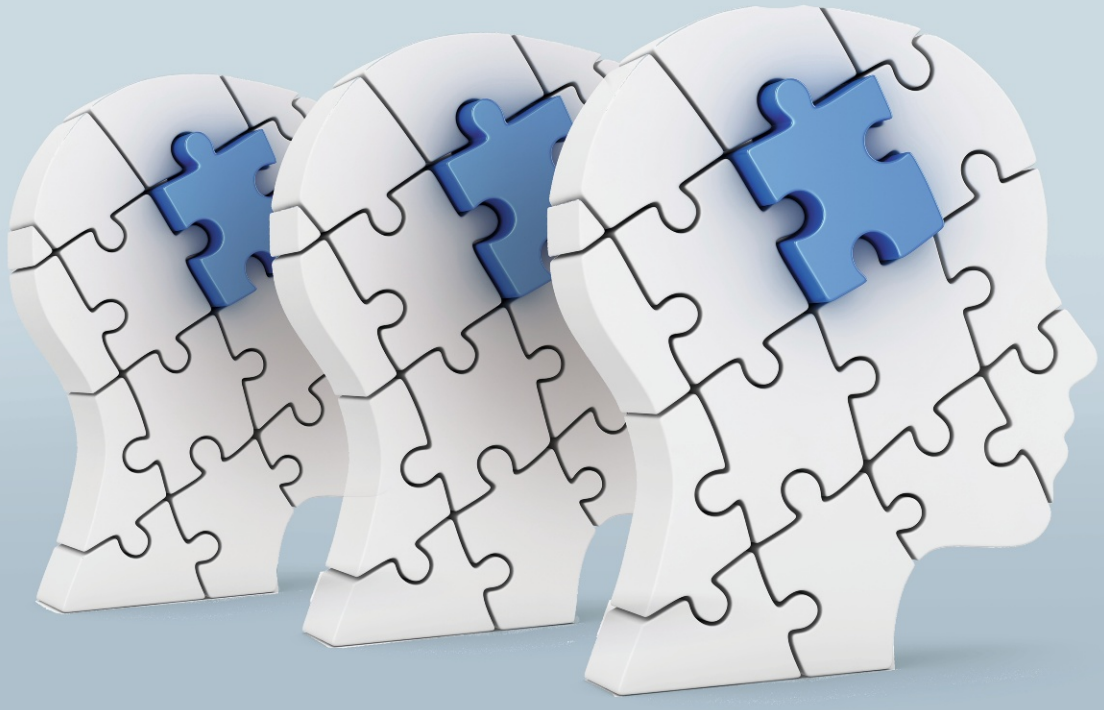


LEHRBUCH

Jochen Müsseler · Martina Rieger *Hrsg.*

Allgemeine Psychologie

3. Auflage

EXTRAS ONLINE

Springer

Allgemeine Psychologie

Jochen Müsseler
Martina Rieger
(Hrsg.)

Allgemeine Psychologie

3. Auflage

Springer

Herausgeber
Jochen Müsseler
RWTH Aachen
Institut für Psychologie
Aachen, Deutschland

Martina Rieger
UMIT – Private Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik
Institut für Psychologie
Hall in Tirol, Österreich

ISBN 978-3-642-53897-1 ISBN 978-3-642-53898-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-53898-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Einbandabbildung: fotolia, Urheber: freshidea
Illustrationen: SPIESZDESIGN GbR, Sabine Weinert-Spieß
Planung: Marion Krämer

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort zur dritten Auflage

Die erste Auflage des Buches entstand zu einem Zeitpunkt, zu dem Allgemeine Psychologie und kognitive Neurowissenschaften zu verschmelzen begannen. Erkenntnisse aus den kognitiven Neurowissenschaften wurden in die Allgemeine Psychologie integriert, und umgekehrt trug die Allgemeine Psychologie an der Entwicklung der kognitiven Neurowissenschaften durch funktionale Modellbildungen bei. Die zweite Auflage des Buches wurde zu einem Zeitpunkt veröffentlicht, zu dem grundlegende Veränderungen in der Universitätslandschaft anstanden: die Einführung von Bachelor- und Masterstudiengängen im Zuge des Bologna-Prozesses. Ein Umbruch des universitären Psychologiestudiums steht, zumindest in Deutschland, auch zum Zeitpunkt des Erscheinens der dritten Auflage an: In naher Zukunft ist eine Approbationsausbildung Psychotherapie an den Universitäten geplant, d. h., die Psychotherapieausbildung wird entweder in das Psychologiestudium integriert, oder es wird neben einem Master in Psychologie auch einen Master in Psychotherapie geben. Schon jetzt gibt es weitere spezialisierte Masterstudiengänge, über deren Notwendigkeit man aber trefflich streiten kann.

Auch wenn noch nicht alle Entscheidungen getroffen sind, so zeichnet sich ab, dass die Allgemeine Psychologie davon weitgehend unberührt bleibt. Die zentralen Inhalte der Allgemeinen Psychologie (und der anderen Grundlagenfächer) beziehen sich auf Funktionsbereiche, die bei vielen psychischen Störungen dysfunktional sind. Für die Psychotherapie und die Approbationsausbildung Psychotherapie bedeutet dies, dass Wissen über die Funktionsweise psychischer Prozesse bei gesunden Personen unabdingbar ist. Darüber hinaus basieren viele psychotherapeutische Verfahren auf der Anwendung des Grundlagenwissens.

Die Kapitel der dritten Auflage wurden grundlegend überarbeitet und aktualisiert. Zwar blieben die inhaltlichen Schwerpunkte des Buches unverändert, allerdings wurden einige Bereiche umstrukturiert. Einzelne Kapitel entfielen, andere Kapitel wurden geteilt oder neu hinzugefügt. Dies geschah zum einen mit der Intention, eine noch ausgewogenere Darstellung verschiedener Bereiche in diesem Buch zu präsentieren. Zum anderen wollten wir damit auch aktuellen Entwicklungen in der Forschungslandschaft Rechnung tragen.

Das Lehrbuch richtet sich – wie die vorherigen Auflagen – an eine psychologisch vorgebildete Leserschaft. Es werden keine elementaren Einführungsinhalte vermittelt, obwohl Sprache und Inhalt möglichst allgemeinverständlich gehalten sind. Es dient zur wissenschaftlichen und beruflichen Weiterbildung, als Nachschlagewerk und zur Vertiefung von Prüfungsinhalten vor allem im zweiten, aber auch im ersten Studienabschnitt. Wir wünschen uns, dass die Leserinnen und Leser der Faszination der Allgemeinen Psychologie erliegen, und hoffen, dass dies letztendlich der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der Allgemeinen Psychologie zugutekommt.

Wir danken allen Personen, die an der dritten Auflage des Buches mitgewirkt haben und ohne die dieses Projekt nicht durchführbar gewesen wäre. Insbesondere danken wir allen Autorinnen und Autoren, die unentgeltlich viel Zeit investiert haben, um wissenschaftlich fundierte und anschauliche Darstellungen verschiedener Inhaltsbereiche zu diesem Buch beizutragen. Ganz großer Dank gebührt auch allen Personen, die im Springer-Verlag und bei le-tex publishing services an der Neuauflage dieses Buches beteiligt waren (in alphabethischer Reihenfolge): Stefanie Adam, Sigrid Cuneus, Marion Krämer, Sorina Moosdorf und Regine Zimmerschmied.

Aachen und Hall in Tirol, im März 2016

JM & MR

Vorwort zur zweiten Auflage

Im Vorwort der Erstauflage wird der mittlerweile weitgehend vollzogene inhaltliche Umbruch der Allgemeinen Psychologie hin zu den Kognitiven Neurowissenschaften thematisiert. Die Zweitauflage wird dagegen zu einem Zeitpunkt präsentiert, wo sich zwei grundlegende strukturelle Veränderungen der Universitätslandschaft vollziehen. Erstens ist der von uns allen so geschätzte Diplom-Studiengang Psychologie im Rahmen des europäischen Bologna-Prozesses an vielen Universitäten bereits durch einen Bachelor-Master-Studiengang ersetzt worden. Dank der Initiative der Deutschen Gesellschaft für Psychologie mit der Forderung nach einem konsekutiven Studiengang bleiben davon die Studieninhalte – also auch die Inhalte der Allgemeinen Psychologie – weitgehend unbetroffen. Man wird aber vermuten müssen, dass in Zukunft die Profile der psychologischen Teildisziplinen aufgrund der divergierenden Modulbezeichnungen deutlich an Schärfe verlieren werden. Die zweite Änderung an den Universitäten zeichnet sich mit der Einrichtung der Exzellenzinitiativen ab. Dieser Prozess ist im vollen Gange, aber ich bin zuversichtlich, dass sich die Allgemeine Psychologie mit ihren interdisziplinären Verankerungen innerhalb der Kognitiven Neurowissenschaften darin zu behaupten vermag.

In der zweiten Auflage des vorliegenden Lehrbuchs blieben die inhaltlichen Schwerpunkte der Erstauflage unverändert, da sie an wissenschaftlicher und praktischer Aktualität nichts verloren haben. Die Schwerpunkte haben sich in den Modulen der neuen Studiengänge nur neu sortiert und dies ist ja auch gut so. Alle Kapitel wurden wissenschaftlich aktualisiert und mit neueren Literaturangaben versehen. Einzelne Kapitel wurden darüber hinaus grundlegend überarbeitet, so dass wir Ihnen eine verbesserte und aktualisierte Neuauflage des Lehrbuchs präsentieren können. Nach wie vor richtet sich das Lehrbuch an die bereits psychologisch vorgebildete Leserschaft. Es sollen also keine elementaren Einführungsinhalte vermittelt werden, stattdessen ist es zur vertiefenden Prüfungsvorbereitung für die Allgemeine Psychologie im zweiten Studienabschnitt, zur wissenschaftlichen und beruflichen Weiterbildung oder einfach als Nachschlagewerk gedacht.

Mein vorrangiger Dank gilt all den Personen, die an dieser Überarbeitung des Buches mitgewirkt haben und ohne die ein solches Projekt einfach nicht durchführbar wäre. Neben den Autoren und Autorinnen ist hier insbesondere das Verlagslektorat von Frau *Katharina Neuser-von Oettingen* zu nennen. Die vielen Koordinierungstätigkeiten, notwendigen Vereinheitlichungen und Layoutfestlegungen wurden von Frau Lektorin *Stefanie Adam* konstruktiv entwickelt und betreut. Außerdem hat dankenswerterweise Frau *Regine Zimmerschied* die Beiträge zusätzlich Korrektur gelesen. Frau *Hannah Baumert* hat bei den Vereinheitlichungen der Abbildungen hilfreich mitgewirkt. Ihnen allen möchte ich hiermit danken.

Aachen, im April 2007

JM

Vorwort zur ersten Auflage

Die Allgemeine Psychologie befindet sich – so scheint es zumindest – in einem Umbruch: Die in den letzten Jahren zu beobachtende zunehmende Orientierung allgemeinpsychologischer Fragestellungen an neurophysiologischer Forschung stellt die Allgemeine Psychologie mehr und mehr in das Licht der sogenannten Kognitiven Neurowissenschaften – also all jener Wissenschaften, die kognitive Prozesse hauptsächlich und bisweilen ausschließlich in Verbindung mit deren neuronalen Implementationen untersuchen. Oft findet man dort sogar die Vorstellung, dass funktionale kognitive Modellvorstellungen ohne einen entsprechenden neuronalen Bezug keinen Erklärungswert mehr besitzen.

Die Beiträge in diesem Lehrbuch zeigen, dass die Allgemeine Psychologie zweifellos vom anhaltenden Boom der Neurowissenschaften profitiert. Sie zeigen aber auch, dass die Allgemeine Psychologie nicht nur die Erkenntnisse der neurowissenschaftlichen Arbeiten zunehmend rezipiert und integriert, sondern dass sie die kognitiven Neurowissenschaften auch in einem nicht unerheblichen Maße formiert. Ein funktionales Erklärungsmodell kann ohne neurophysiologischen Bezug bestehen, umgekehrt bleiben neurophysiologische Erkenntnisse in Form bloßer corticaler Verortungen psychischer Sachverhalte allein ohne Erklärungswert. In diesem Sinne ergänzt und erweitert die Allgemeine Psychologie die kognitiven Neurowissenschaften und wird keineswegs durch sie abgelöst.

Mit diesem Lehrbuch möchten wir einen Überblick über moderne Forschungsansätze und -ergebnisse der Allgemeinen Psychologie vermitteln. Es richtet sich an die bereits vorgebildete Leserschaft von StudentInnen und FachkollegInnen, die es zur vertiefenden Prüfungsvorbereitung, zur wissenschaftlichen und beruflichen Weiterbildung oder einfach als Nachschlagewerk verwenden können. Das Lehrbuch stellt daher keine elementare Einführung dar, obwohl es in Sprache und Inhalt bis hin zu den Illustrationen möglichst allgemeinverständlich gestaltet worden ist. Unser Ziel war es, ein Lehrbuch zu den Schwerpunktdisziplinen der Allgemeinen Psychologie vorzulegen, in dem die nationalen wie die internationalen, die derzeitigen und die – soweit sie sich momentan abzeichnen – zukünftigen Forschungsperspektiven adäquat berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde, aber auch um dem wissenschaftlichen Generationswechsel an unseren Universitäten Rechnung zu tragen, haben wir uns erfolgreich bemüht, für die einzelnen Kapitel ausschließlich jüngere FachkollegInnen als AutorInnen zu gewinnen. Sie alle haben sich der Aufgabe angenommen, einen kompakten Überblicksartikel zu verfassen und ihn mit aktuellen Literaturverweisen und fachterminologischen Definitionen auszustatten.

Unser Dank gilt daher zunächst den AutorInnen. Sie haben das Buchkonzept mitgestaltet, bevor sie die Kapitel inhaltlich in Form eines ersten Entwurfs ausgefüllt haben. Nicht zuletzt mussten sie sich dann der Tortur der ungeliebten Revisionsarbeit stellen, durch die nicht nur unsere Anregungen, sondern auch die kritischen und konstruktiven Kommentare von Seiten vieler StudentInnen und ungenannter FachkollegInnen in die Kapitel eingeflossen sind. Unser Dank gilt in diesem Zusammenhang auch Frau Friederike Bröhan, Frau Veronika Gärtner und Frau Lydia Moric', die die Manuskripte sorgfältig korrekturgelesen haben.

Bei all diesen Arbeiten, vom ersten Konzeptentwurf bis hin zur Fertigstellung des Buches, haben wir die wertvolle Unterstützung des Spektrum Akademischer Verlags erhalten. Hier gilt unser herzlicher Dank insbesondere dem Lektorat von Frau Katharina Neuser-von Öttingen und der Lektoratsassistenz durch Frau Ulrike Finck. Nicht zuletzt möchten wir unserer Kollegin Frau Sabine Maasen danken. Sie hat in der ersten Hälfte der Herausgeberschaft die Koordination der verschiedenen Tätigkeiten übernommen und stand uns auch danach mit Rat und Tat zur Seite.

Der Erfolg der Bemühungen aller liegt, so glauben wir, nicht unwesentlich in der Offenheit für neue Perspektiven und der Freude am wissenschaftlichen Fortschritt. Unsere Hoffnung ist, dass dies in den Beiträgen spürbar wird und dass sich dies auf die LeserInnen dieses Buches überträgt.

München, im Juli 2002

JM & WP

Inhaltsverzeichnis

Autorinnen und Autoren ... XXII

1 **Einleitung – Psychologie als Wissenschaft** ... 1
Wolfgang Prinz, Jochen Müsseler und Martina Rieger
1.1 **Psychologie heute** ... 2
1.1.1 Unübersichtliche Verhältnisse ... 2
1.1.2 Ein Blick zurück ... 2
1.1.3 Lob der Unübersichtlichkeit ... 4
1.2 **Allgemeine Psychologie** ... 4
1.2.1 Welche Gegenstände? ... 5
1.2.2 Welche Methoden? ... 6
1.2.3 Welche Theorien? ... 7
1.3 **Allgemeine Psychologie und der Aufbau dieses Buches** ... 9
Literatur ... 10

I Wahrnehmung und Aufmerksamkeit

2 **Visuelle Informationsverarbeitung** ... 13
Jochen Müsseler
2.1 **Einleitung: Fragen der visuellen Wahrnehmungsforschung** ... 14
2.2 **Das Auge und die visuellen Verarbeitungspfade** ... 16
2.2.1 Die Retina ... 16
2.2.2 Die Bahn des Sehnervs zwischen Auge und Cortex ... 17
2.2.3 Der primäre visuelle Cortex ... 17
2.2.4 Weitere corticale Verarbeitungspfade ... 17
2.3 **Visuelle Informationsaufnahme und -verarbeitung** ... 19
2.3.1 Visuelle Sehschärfe und Sensitivität ... 19
2.3.2 Farbwahrnehmung ... 23
2.3.3 Raum- und Tiefenwahrnehmung ... 24
2.3.4 Bewegungswahrnehmung ... 27
2.3.5 Objektwahrnehmung ... 30
2.4 **Theorien der Wahrnehmung** ... 35
2.4.1 Die klassische Psychophysik ... 35
2.4.2 Die Gestaltpsychologie ... 38
2.4.3 Der wahrnehmungsökologische Ansatz von James J. Gibson ... 39
2.4.4 Der computationale Ansatz von David Marr ... 40
2.5 **Anwendungsbeispiele** ... 42
2.6 **Ausblick** ... 43
2.7 **Weiterführende Informationen** ... 44
Literatur ... 46

3 **Auditive Informationsverarbeitung** ... 51
Alexandra Bendixen und Erich Schröger
3.1 **Einleitung: Alleinstellungsmerkmale der auditiven Informationsverarbeitung** ... 52
3.2 **Physikalische Grundlagen des Hörens** ... 53
3.3 **Physiologische Grundlagen: Umwandlung von Schallwellen in Hirnaktivität** ... 53
3.4 **Der auditive Verarbeitungspfad** ... 54
3.5 **Wichtige Aufgaben und Leistungen der auditiven Informationsverarbeitung** ... 56
3.5.1 Sequenzielle Verarbeitung, Gedächtnis und Prädiktion ... 57
3.5.2 Aufmerksamkeitsausrichtung ... 58
3.5.3 Auditive Szenenanalyse ... 60
3.5.4 Ambiguität und Multistabilität beim Hören ... 63

3.6 **Psychophysiologische Korrelate auditiver Verarbeitung** 64
3.7 **Störungen des Hörsinns und mögliche Kompensationen** 66
3.8 **Anwendungsbeispiele** 69
3.9 **Ausblick** 69
3.10 **Weiterführende Informationen** 70
Literatur 71

4 **Multisensorische Informationsverarbeitung** 75
Knut Drewing
4.1 **Einleitung und Überblick** 76
4.2 **Multisensorische Kombination** 77
4.3 **Multisensorische Integration** 78
4.3.1 Intersensorische Beeinflussungen 78
4.3.2 Modelle zur Integration redundanter Information 79
4.4 **Das Korrespondenzproblem** 81
4.4.1 Zeitliche und räumliche Nähe 82
4.4.2 Semantische und synästhetische Korrespondenzen 83
4.5 **Abgleich zwischen den Sinnen** 84
4.6 **Aufmerksamkeit über Sinne hinweg** 86
4.6.1 Räumlich selektive Aufmerksamkeit 86
4.6.2 Aufmerksamkeit und multisensorische Integration 87
4.7 **Neurophysiologische Grundlagen** 89
4.7.1 Multisensorische Verarbeitung in einzelnen Neuronen 89
4.7.2 Multisensorische Konvergenzzonen 90
4.7.3 Multisensorische Verarbeitung in „unisensorischen" Arealen 91
4.8 **Anwendungsbeispiele** 92
4.9 **Ausblick** 94
4.10 **Weiterführende Informationen** 95
Literatur 97

5 **Aufmerksamkeit** 103
Joseph Krummenacher und Hermann J. Müller
5.1 **Einleitung** 104
5.2 **Selektive Aufmerksamkeit** 105
5.2.1 Klassische Ansätze zur selektiven Aufmerksamkeit 105
5.2.2 Selektive visuelle Aufmerksamkeit 109
5.2.3 Visuelle Suche 113
5.2.4 Temporale Mechanismen der selektiven Aufmerksamkeit 118
5.2.5 Limitationen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit 120
5.2.6 Neurokognitive Mechanismen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit 122
5.2.7 Resümee 131
5.3 **Aufmerksamkeit und Performanz** 132
5.3.1 Aufgabenkombination und geteilte Aufmerksamkeit 132
5.3.2 Automatische Verarbeitung 137
5.3.3 Aufmerksamkeit und Umschalten zwischen Aufgaben 141
5.3.4 Resümee 141
5.4 **Anwendungsbeispiele** 141
5.5 **Ausblick** 142
5.6 **Weiterführende Informationen** 143
Literatur 146

6 **Bewusstsein** 153
Markus Kiefer
6.1 **Einleitung** 154
6.2 **Bewusstsein – ein heterogener Begriff** 155
6.3 **Theoretische Ansätze zur Erklärung des Bewusstseins** 157
6.3.1 Klassische psychologische Ansätze 157

6.3.2 Evolutionäre Ansätze ... 159
6.3.3 Neurowissenschaftliche Ansätze ... 160
6.3.4 Philosophische Ansätze ... 162
6.4 **Empirische Bewusstseinsforschung** ... 164
6.4.1 Bewusste und unbewusste Wahrnehmung ... 164
6.4.2 Störungen des visuellen Bewusstseins bei hirnverletzten Patienten ... 169
6.4.3 Das neuronale Korrelat des visuellen Bewusstseins ... 172
6.4.4 Bewusstsein und höhere kognitive Funktionen ... 174
6.5 **Synopse der empirischen und theoretischen Bewusstseinsforschung: Grundlegende Mechanismen** ... 176
6.6 **Anwendungsbeispiele** ... 177
6.7 **Ausblick** ... 178
6.8 **Weiterführende Informationen** ... 179
Literatur ... 181

II Emotion und Motivation

7 **Emotion** ... 185
Andreas B. Eder und Tobias Brosch
7.1 **Einleitung** ... 186
7.2 **Emotionspsychologie: Eine kurze Geschichte** ... 186
7.3 **Emotion: Gegenstandseingrenzung und Definition** ... 188
7.4 **Emotionskomponenten und ihre Messung** ... 189
7.4.1 Kognitive Komponente ... 189
7.4.2 Physiologische Komponente ... 189
7.4.3 Motivationale Komponente ... 190
7.4.4 Expressive Komponente ... 190
7.4.5 Subjektive Erlebenskomponente ... 191
7.4.6 Zusammenhang zwischen den Emotionskomponenten ... 191
7.5 **Klassifikation von Emotionen** ... 192
7.5.1 Diskrete Modelle ... 192
7.5.2 Dimensionale Modelle ... 193
7.5.3 Modale Modelle ... 195
7.6 **Funktionen von Emotionen** ... 195
7.6.1 Informative Funktionen ... 195
7.6.2 Motivierende Funktionen ... 197
7.6.3 Soziale Funktionen ... 199
7.7 **Biologische Grundlagen von Emotionen** ... 201
7.7.1 Das emotionale Gehirn: Neuronale Grundlagen von Emotionen ... 201
7.7.2 Emotion und Körper: Emotionale Reaktionen im vegetativen Nervensystem ... 203
7.8 **Emotionstheorien** ... 205
7.8.1 Ältere Emotionstheorien ... 205
7.8.2 Evolutionsbiologische Theorien ... 208
7.8.3 Kognitive Theorien ... 210
7.8.4 Konstruktivistische Theorien ... 211
7.9 **Emotionsregulation** ... 212
7.10 **Anwendungsbeispiele** ... 215
7.11 **Ausblick** ... 216
7.12 **Weiterführende Informationen** ... 216
Literatur ... 217

8 **Motivation** ... 223
Rosa Maria Puca und Julia Schüler
8.1 **Einleitung: Motive, Anreize und Ziele – die zentralen Begriffe der Motivationspsychologie** ... 224
8.2 **Motivationspsychologische Theorien aus historischer Perspektive** ... 226
8.2.1 Von Triebtheorien zur Feldtheorie ... 226

8.2.2 Erwartungswerttheorien . . . 228
8.3 **Biologische Grundlagen der Motivation** . . . 230
8.4 **Implizite, explizite Motive und Motivinkongruenz** . . . 231
8.4.1 Die Geschichte der Unterscheidung in implizite und explizite Motive . . . 231
8.4.2 Unterscheidungsmerkmale impliziter und expliziter Motive . . . 232
8.4.3 Motivinkongruenz und seine Folgen . . . 232
8.4.4 Messung von Motiven . . . 233
8.5 **Motivklassen** . . . 235
8.5.1 Anschluss/Intimität . . . 235
8.5.2 Macht und Dominanz . . . 238
8.5.3 Leistung . . . 239
8.6 **Motivation durch Zielsetzung** . . . 241
8.7 **Anwendungsbeispiele** . . . 243
8.8 **Ausblick** . . . 243
8.9 **Weiterführende Informationen** . . . 244
Literatur . . . 246

9 **Volition und kognitive Kontrolle** . . . 251
Thomas Goschke
9.1 **Einleitung: Gegenstand der Forschung zu Volition und kognitiver Kontrolle** . . . 253
9.2 **Kognitive Grundlagen willentlicher Handlungen: Vom Reflex zur Antizipation** . . . 255
9.2.1 Entwicklungsstufen der Verhaltenssteuerung . . . 255
9.2.2 Besondere Funktionsmerkmale willentlicher Handlungen . . . 256
9.2.3 Grundlegende Kontrollprobleme bei der willentlichen Handlungssteuerung . . . 257
9.3 **Kognitionspsychologische Ansätze: Automatische und kontrollierte Prozesse bei der intentionalen Handlungssteuerung** . . . 259
9.3.1 Bewusste und unbewusste Steuerung willentlicher Handlungen . . . 259
9.3.2 Ein Modell der Interaktion automatischer und intentionaler Prozesse . . . 262
9.4 **Volitionspsychologische Ansätze: Motivationskonflikte und Selbstkontrolle** . . . 263
9.4.1 Zielselektion vs. Zielrealisierung . . . 264
9.4.2 Vom Wünschen zum Wollen: Das Rubikonmodell . . . 264
9.4.3 Handlungskontrolle: Abschirmung von Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen . . . 267
9.4.4 Empirische Evidenz für den Einfluss von Handlungskontrollstrategien und exekutiven Funktionen auf selbstkontrolliertes Verhalten . . . 268
9.4.5 Bedingungsfaktoren und Moderatoren der Mobilisierung von Selbstkontrolle . . . 271
9.4.6 Individuelle Unterschiede in der Selbstkontrolle: Lage- vs. Handlungsorientierung . . . 272
9.5 **Kognitive Neurowissenschaft der willentlichen Handlungssteuerung: Neuronale Grundlagen der kognitiven Kontrolle** . . . 274
9.5.1 Methodische Vorbemerkungen . . . 274
9.5.2 Kognitive Kontrollfunktionen des Präfrontalcortex . . . 277
9.5.3 Funktionelle Organisation des präfrontalen Cortex: Zentrale Exekutive oder multiple exekutive Systeme? . . . 287
9.5.4 Computationale Modelle der kognitiven Kontrolle . . . 291
9.5.5 Konfliktüberwachung und adaptive Regulation kognitiver Kontrolle . . . 293
9.6 **Kontrolldilemmata und Metakontrollprobleme** . . . 296
9.6.1 Kontrolldilemmata . . . 296
9.6.2 Metakontrollparameter . . . 298
9.6.3 Emotionale Modulation von Kontrollparametern . . . 298
9.6.4 Neuromodulation kognitiver Kontrolle . . . 299
9.7 **Anwendungsbeispiele** . . . 300
9.8 **Ausblick** . . . 303
9.9 **Weiterführende Informationen** . . . 303
Literatur . . . 308

III Lernen und Gedächtnis

10 **Lernen – Assoziationsbildung, Konditionierung und implizites Lernen** 319
Iring Koch und Christoph Stahl
10.1 **Einleitung** 320
10.1.1 Definition und Abgrenzung 320
10.1.2 Historische Einordnung 321
10.2 **Experimentelle Untersuchungsparadigmen in der Lernpsychologie** 322
10.2.1 Explizites, hypothesengeleitetes Lernen (Wissenserwerb) vs. implizites, inzidentelles Lernen 322
10.2.2 Lernen von neuen Verhaltensweisen: Konditionierungsparadigmen 323
10.2.3 Erwerb von neuen Einstellungen und Wissen 325
10.2.4 Zusammenfassung 327
10.3 **Grundphänomene des assoziativen Lernens** 328
10.3.1 Erwerb und Löschung 328
10.3.2 Merkmale des Reizes: Generalisierung und Diskrimination 330
10.3.3 Merkmale der gelernten Reaktion 331
10.3.4 Biologische Einschränkungen des Lernens 332
10.3.5 Wann wird gelernt? Kontiguität, Kontingenz und Erwartungsdiskrepanz 333
10.3.6 Zusammenfassung 337
10.4 **Mechanismen des assoziativen Lernens** 337
10.4.1 Was wird gelernt? 337
10.4.2 Das Rescorla-Wagner-Modell als Basismodell assoziativen Lernens 340
10.4.3 Limitationen des Rescorla-Wagner-Modells 341
10.4.4 Elementale und konfigurale Modelle 342
10.4.5 Zusammenfassung 343
10.5 **Implizites Lernen** 343
10.5.1 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung impliziten Lernens 344
10.5.2 Prädiktive Relationen beim impliziten Lernen 345
10.5.3 Unbewusstes Lernen 346
10.5.4 Zusammenfassung 348
10.6 **Anwendungsbeispiele** 348
10.7 **Ausblick** 349
10.8 **Weiterführende Informationen** 350
Literatur 352

11 **Kategorisierung und Wissenserwerb** 357
Michael R. Waldmann
11.1 **Einleitung: Funktionen von Kategorien** 358
11.2 **Die mentale Repräsentation natürlicher Kategorien** 359
11.2.1 Ähnlichkeitsbasierte Ansätze 359
11.2.2 Kritik ähnlichkeitsbasierter Theorien 370
11.2.3 Die Theoriensicht 372
11.3 **Arten von Kategorien** 374
11.3.1 Natürliche Arten vs. Artefakte 374
11.3.2 Kausale Kategorien 375
11.3.3 Andere Arten von Kategorien 377
11.4 **Relationen zwischen Kategorien** 377
11.4.1 Taxonomien 378
11.4.2 Nichthierarchische Kategorienstrukturen 381
11.5 **Der Erwerb von Kategorien** 381
11.5.1 Konnektionistische Modelle 381
11.5.2 Wissensbasierte Lerntheorien 384
11.6 **Die Nutzung von Kategorien** 384
11.6.1 Der Einfluss von Zielen und pragmatischen Kontexten 385
11.6.2 Konzeptuelle Kombination 386
11.6.3 Sprache und Kategorien 386
11.6.4 Kategorien und Induktion 388

11.7 **Anwendungsbeispiele** 389
11.8 **Ausblick** 390
11.9 **Weiterführende Informationen** 391
Literatur 394

12 **Gedächtniskonzeptionen und Wissensrepräsentationen** 401
Axel Buchner und Martin Brandt
12.1 **Einleitung und Begriffsklärung** 402
12.2 **Langzeitgedächtnis** 405
12.2.1 Systemorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis 405
12.2.2 Prozessorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis 412
12.2.3 Formale Gedächtnistheorien 419
12.3 **Arbeitsgedächtnis** 423
12.3.1 Das modulare Arbeitsgedächtnismodell 423
12.3.2 Das Embedded-Processes-Modell 425
12.4 **Sensorisches Gedächtnis** 427
12.5 **Anwendungsbeispiele** 428
12.6 **Ausblick** 428
12.7 **Weiterführende Informationen** 429
Literatur 430

IV Sprachproduktion und -verstehen

13 **Worterkennung und -produktion** 437
Pienie Zwitserlood und Jens Bölte
13.1 **Einleitung: Wörter als Kernelemente der Sprache** 438
13.1.1 Wie hängen sprachliche und nichtsprachliche Einheiten zusammen? 438
13.1.2 Was sind Wörter? 439
13.1.3 Sprechen und Verstehen: Von den Konzepten zu den Sprachlauten – von den Sprachlauten zu den Konzepten 439
13.2 **Wie wir Sprachlaute produzieren** 440
13.3 **Wortgedächtnis: Was ist im Wortgedächtnis gespeichert und wie?** 442
13.3.1 Die Form der Wörter: Lautliche und orthografische Beschreibung 442
13.3.2 Die interne Struktur der Wörter: Morphologie 443
13.3.3 Die strukturellen Merkmale der Wörter 443
13.3.4 Die Bedeutung der Wörter und das Problem der Mehrdeutigkeit 444
13.4 **Worterkennung** 445
13.4.1 Das kontinuierliche und variable Sprachsignal 445
13.4.2 Was passiert bei der Worterkennung? 449
13.4.3 Vom Buchstaben zur Bedeutung 451
13.5 **Was passiert im Gehirn bei der Worterkennung?** 452
13.6 **Wortproduktion** 452
13.6.1 Umsetzung von lexikalen Konzepten in Wörter 454
13.6.2 Umsetzung von Lemmata in Wortformen 455
13.7 **Was passiert im Gehirn beim Sprechen von Wörtern?** 456
13.7.1 Neuronale Korrelate der Sprachproduktion 457
13.7.2 Wenn es nicht einwandfrei funktioniert: Aphasien 457
13.8 **Anwendungsbeispiele** 458
13.9 **Ausblick** 458
13.10 **Weiterführende Informationen** 459
Literatur 462

14 **Sätze und Texte verstehen und produzieren** 467
Barbara Kaup und Carolin Dudschig
14.1 **Einleitung: Kommunizieren über Sachverhalte** 468
14.2 **Syntaktische Verarbeitung von Sätzen** 470
14.2.1 Syntaktische Struktur von Sätzen 470
14.2.2 Erfassen der syntaktischen Struktur von Sätzen (Parsing) 473
14.2.3 In welcher Form liegt unser syntaktisches Wissen vor? 482
14.3 **Semantische Verarbeitung von Sätzen** 485
14.3.1 Semantische Struktur von Sätzen 485
14.3.2 Erfassen der Satzbedeutung 489
14.4 **Pragmatische Verarbeitung von Sätzen** 493
14.5 **Textverstehen** 495
14.5.1 Struktur von Texten 495
14.5.2 Erfassen der Textbedeutung 500
14.6 **Verstehen als Simulation** 506
14.7 **Sprachproduktion** 508
14.7.1 Aspekte der Produktionsforschung 508
14.7.2 Sprachproduktionsmodelle 510
14.7.3 Dialog 516
14.7.4 Zusammenhang Verstehen und Produktion 517
14.8 **Neurobiologische Grundlagen** 517
14.9 **Anwendungsbeispiele** 518
14.10 **Ausblick** 519
14.11 **Weiterführende Informationen** 520
Literatur 523

V Denken und Problemlösen

15 **Logisches Denken** 533
Markus Knauff und Günther Knoblich
15.1 **Einleitung: Logik und vernünftiges Denken** 534
15.2 **Sicheres logisches Schließen** 536
15.2.1 Konditionales Schließen 536
15.2.2 Syllogistisches Schließen 543
15.2.3 Relationales Schließen 548
15.3 **Unsicheres logisches Schließen** 551
15.3.1 Anfechtbares Schließen 552
15.3.2 Überzeugungsänderung 552
15.3.3 Denken mit mehr als zwei Wahrheitswerten 556
15.3.4 Nichtmonotones Schließen 557
15.3.5 Defaults und präferierte mentale Modelle 559
15.3.6 Nachdenken über Mögliches und Notwendiges 560
15.3.7 Ramsey-Test 561
15.3.8 Bayesianisches Denken 561
15.3.9 Induktives Denken 562
15.4 **Neuronale Korrelate des logischen Denkens** 563
15.4.1 Logisches Denken im intakten Gehirn 564
15.4.2 Logisches Denken nach Hirnschädigungen 565
15.5 **Drei wichtige Fragen der Psychologie des logischen Denkens** 566
15.5.1 Welche Rolle spielt Wissen für das logische Denken? 566
15.5.2 Hilft Visualisierung beim logischen Denken? 570
15.5.3 Ist logisches Denken rationales Denken? 573
15.6 **Anwendungsbeispiele** 575
15.7 **Ausblick** 578

15.8 **Weiterführende Informationen** 578
Literatur 580

16 **Problemlösen** 587
Michael Öllinger
16.1 **Einleitung** 588
16.2 **Definitorische Grundlagen** 589
16.2.1 Problemtypen 589
16.2.2 Einfache und komplexe Probleme 590
16.3 **Komplexe Probleme** 590
16.3.1 Kriterien komplexer Probleme 590
16.3.2 Klassische Untersuchungen zum komplexen Problemlösen 591
16.3.3 Weitere Aspekte komplexen Problemlösens 591
16.4 **Das Lösen einfacher Probleme** 592
16.4.1 Historische Grundlagen der Problemlöseforschung – Sultan der Problemlöser 592
16.4.2 Computer lösen Probleme – die Problemraumtheorie 593
16.5 **Erweiterung der Problemraumtheorie** 596
16.5.1 Umstrukturierung aus gestaltpsychologischer Sicht 596
16.5.2 Weitere Aspekte von Umstrukturierung beim Problemlösen 598
16.5.3 Kognitive Theorien einsichtsvollen Problemlösens 601
16.6 **Methoden der Problemlöseforschung** 605
16.6.1 Blickbewegungsstudien 605
16.6.2 Neuropsychologische Untersuchungen 605
16.6.3 Neuronale Korrelate beim Lösen von Problemen 606
16.7 **Expertise beim Problemlösen** 607
16.7.1 Schachexpertise 607
16.7.2 Voraussetzungen des Expertentums 608
16.8 **Problemlösen durch analogen Transfer** 609
16.8.1 Grundlegende Überlegungen zum analogen Transfer 609
16.8.2 Klassische Untersuchungen zum analogen Transfer 610
16.8.3 Neuronale Korrelate zum analogen Transfer 611
16.9 **Anwendungsbeispiele** 611
16.10 **Ausblick** 613
16.11 **Weiterführende Informationen** 613
Literatur 615

17 **Urteilen und Entscheiden** 619
Arndt Bröder und Benjamin E. Hilbig
17.1 **Einleitung** 620
17.1.1 Urteilen und Entscheiden – Abgrenzung und Gemeinsamkeiten 621
17.1.2 Historische Einordnung 622
17.1.3 Grundbegriffe und Methoden 623
17.1.4 Gliederung des Kapitels 623
17.2 **Strukturmodelle** 625
17.2.1 Was ist eine gute Entscheidung? 625
17.2.2 Erwartungswert und Erwartungsnutzen 625
17.2.3 Verletzung der Axiome 627
17.2.4 Prospect-Theorie 628
17.2.5 Das „große Ganze“ und neuere Entwicklungen 631
17.3 **Modelle mit psychologischen Einflüssen** 632
17.3.1 Das Bayes-Theorem und der Basisratenfehler 632
17.3.2 Ein umfassendes Rahmenmodell des Urteilens 637
17.4 **Kognitive Prozessmodelle des Urteilens und Entscheidens** 641
17.4.1 Was ist ein Prozessmodell? 641
17.4.2 Der adaptive Entscheider und seine „Werkzeugkiste“ 641
17.4.3 Andere kognitive Mechanismen 643

17.4.4 Welche Faktoren bestimmen die Art des Entscheidungsprozesses? ... 646
17.4.5 Abschließende Bemerkungen ... 649
17.5 **Anwendungsbeispiele** ... 649
17.6 **Ausblick** ... 650
17.7 **Weiterführende Informationen** ... 651
Literatur ... 654

VI Handlungsplanung und -ausführung

18 **Planung und exekutive Kontrolle von Handlungen** ... 663
Bernhard Hommel
18.1 **Einleitung** ... 664
18.2 **Planung einfacher Handlungen** ... 664
18.2.1 Motorische Programme ... 664
18.2.2 Programme und Parameter ... 666
18.2.3 Nutzung von Vorinformationen über Handlungsmerkmale ... 666
18.2.4 Programmierung von Handlungsmerkmalen ... 667
18.2.5 Reprogrammierung von Handlungsmerkmalen ... 667
18.2.6 Integration von Handlungsmerkmalen ... 668
18.2.7 Programmierung und Spezifikation von Handlungen ... 669
18.2.8 Programmierung und Initiierung von Handlungen ... 672
18.2.9 Programme, Pläne und Ziele ... 673
18.3 **Planung von Handlungssequenzen** ... 674
18.3.1 Programmierung von Handlungssequenzen ... 674
18.3.2 Sequenzierung von Handlungselementen ... 677
18.3.3 Planung langer und geübter Handlungssequenzen ... 680
18.4 **Planung und Koordination multipler Handlungen** ... 682
18.4.1 Untersuchungsmethoden ... 683
18.4.2 Aufgabenkoordination ... 684
18.4.3 Reizverarbeitung und Gedächtnis ... 684
18.4.4 Reiz-Reaktions-Übersetzung und Reaktionsauswahl ... 686
18.4.5 Reaktionsinitiierung ... 687
18.5 **Wechseln zwischen Handlungen** ... 688
18.5.1 Untersuchungsmethoden ... 689
18.5.2 Aufgabenvorbereitung ... 690
18.5.3 Proaktive Effekte ... 692
18.5.4 Residuale Wechselkosten ... 693
18.5.5 Implementierung und Aktualisierung von Aufgabensets ... 694
18.6 **Anwendungsbeispiele** ... 695
18.7 **Ausblick** ... 696
18.8 **Weiterführende Informationen** ... 698
Literatur ... 700

19 **Motorisches Lernen** ... 707
Mathias Hegele und Sandra Sülzenbrück
19.1 **Einleitung** ... 709
19.2 **Sensomotorische Adaptation** ... 710
19.2.1 Sensomotorische Transformationen ... 711
19.2.2 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung sensomotorischer Adaptation ... 712
19.2.3 Mechanismen sensomotorischer Adaptation ... 715
19.3 **Fertigkeitserwerb** ... 724
19.3.1 Theorien und Modelle des Fertigkeitserwerbs ... 724
19.3.2 Was beeinflusst den Fertigkeitserwerb? ... 733
19.4 **Fitness oder evolutionäres motorisches Lernen** ... 737

19.5 **Anwendungsbeispiele** 738
19.6 **Ausblick: Tear down this Ivory Tower, Nimrod!** 740
19.7 **Weiterführende Informationen** 741
Literatur 743

20 **Motorische Kontrolle** 749
Jürgen Konczak
20.1 **Einleitung** 750
20.2 **Theorien und Modelle der menschlichen Bewegungskontrolle** 750
20.2.1 Regelung und Steuerung sind die zwei grundlegenden Arten der motorischen Kontrolle 751
20.2.2 Die Idee einer zentralen Repräsentation von Bewegung 752
20.2.3 Generalisierte motorische Programme 753
20.2.4 Interne Modelle der Motorik 754
20.3 **Neuronale Repräsentationen von Bewegung** 756
20.3.1 Der motorische Cortex 757
20.3.2 Die motorische Funktion der Basalganglien 760
20.3.3 Das Kleinhirn 763
20.4 **Anwendungsbeispiele** 766
20.5 **Ausblick** 767
20.6 **Weiterführende Informationen** 767
Literatur 769

21 **Embodiment und Sense of Agency** 773
Martina Rieger und Dorit Wenke
21.1 **Einleitung** 774
21.2 **Handlungsvorstellungen** 777
21.2.1 Gemeinsamkeiten von vorgestellten und ausgeführten Handlungen 778
21.2.2 Faktoren, die die Dauer von vorgestellten im Vergleich zu ausgeführten Handlungen beeinflussen 779
21.2.3 Unterschiede von vorgestellten und ausgeführten Handlungen 783
21.2.4 Fazit 784
21.3 **Handlungsbeobachtung** 785
21.3.1 Handlungssimulation und automatische Imitation 786
21.3.2 Vorhersage von Handlungen anderer Personen 787
21.3.3 Handlungssimulation und Handlungsvorhersage im sozialen Kontext 789
21.3.4 Handlungserfahrung und Expertise 790
21.3.5 Sind biologische Bewegungen wirklich besonders? 791
21.3.6 Fazit 792
21.4 **Sense of Agency** 793
21.4.1 Untersuchungsmethoden 794
21.4.2 Vorhersagbarkeit von Handlungskonsequenzen 795
21.4.3 Flüssigkeit der Handlungsauswahl 797
21.4.4 Valenz der Handlungskonsequenzen 798
21.4.5 Fazit 799
21.5 **Handlungsbezogene Sprache** 800
21.5.1 Theoretische Annahmen 800
21.5.2 Befunde 801
21.5.3 Flexibilität und Kontextabhängigkeit 803
21.5.4 Handlungserfahrung und Expertise 804
21.5.5 Ebene der Handlungssimulationen 805
21.5.6 Verständnis abstrakter Sprache und nicht handlungsbezogener Sprache 805
21.5.7 Fazit 806
21.6 **Anwendungsbeispiele** 806
21.7 **Ausblick** 808
21.8 **Weiterführende Informationen** 809
Literatur 811

22 **Handlung und Wahrnehmung** 821
Wilfried Kunde
22.1 **Einleitung** 822
22.2 **Die sensomotorische Perspektive menschlichen Verhaltens** 823
22.3 **Trennung oder Koppelung von Wahrnehmung und Handlung?** 825
22.3.1 Reiz-Reaktions-Kompatibilität 825
22.3.2 Zwei-Pfade-Modelle 826
22.3.3 Unbewusste Reaktionsbahnung 828
22.4 **Handeln verändert die Wahrnehmung** 828
22.5 **Ziele bedingen Handlungen, nicht Reize** 830
22.6 **Einheit von Wahrnehmung und Handlung** 831
22.6.1 Motorische Wahrnehmungstheorien 831
22.6.2 Ideomotorik 831
22.7 **Vermittlungsversuche zwischen sensomotorischen und ideomotorischen Ansätze** 832
22.8 **Anwendungsbeispiele** 833
22.9 **Ausblick** 833
22.10 **Weiterführende Informationen** 834
Literatur 836

Serviceteil 839
Stichwortverzeichnis 840

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr. Alexandra Bendixen
Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Naturwissenschaften, Institut für Physik
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
alexandra.bendixen@physik.tu-chemnitz.de

Prof. Dr. Jens Bölte
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Psychologie
Fliednerstr. 21
48149 Münster
boelte@uni-muenster.de

Dr. Martin Brandt
Universität Mannheim
Lehrstuhl Psychologie III
Schloss, Ehrenhof-Ost
68131 Mannheim
brandt@psychologie.uni-mannheim.de

Prof. Dr. Arndt Bröder
Universität Mannheim
Lehrstuhl für Allgemeine Psychologie
Schloss, Ehrenhof-Ost
68131 Mannheim
broeder@uni-mannheim.de

Prof. Dr. Tobias Brosch
University of Geneva
Department of Psychology, Office 5139
40, Boulevard du Pont d'Arve
CH-1205 Geneva
tobias.brosch@unige.ch

Prof. Dr. Axel Buchner
Heinrich-Heine-Universität
Institut für Experimentelle Psychologie
Universitätsstr. 1
40225 Düsseldorf
axel.buchner@hhu.de

Priv.-Doz. Dr. Knut Drewing
Universität Gießen
Allgemeine Psychologie
Otto-Behaghel-Str. 10F
35394 Gießen
knut.drewing@psychol.uni-giessen.de

Dr. Carolin Dudschig
Universität Tübingen
Psychologisches Institut
Schleichstr. 4
72076 Tübingen
carolin.dudschig@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. Andreas Eder
Universität Würzburg
Allgemeine Psychologie II
Röntgenring 10
97070 Würzburg
andreas.eder@psychologie.uni-wuerzburg.de

Prof. Dr. Thomas Goschke
TU Dresden
Allgemeine Psychologie
Zellescher Weg 17
01062 Dresden
thomas.goschke@tu-dresden.de

Prof. Dr. Mathias Hegele
Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Sportwissenschaft/
AB Experimentelle Sensomotorik
Kugelberg 62
35394 Gießen
Mathias.Hegele@sport.uni-giessen.de

Prof. Benjamin E. Hilbig, PhD
Universität Koblenz-Landau
Kognitive Psychologie
Fortstraße 7
76829 Landau
hilbig@uni-landau.de

Prof. Bernhard Hommel, PhD
Universiteit Leiden
Instituut Psychologie
Pieter de la Court gebouw, Wassenaarseweg 52
NL-2333 AK Leiden
hommel@fsw.leidenuniv.nl

Prof. Dr. Barbara Kaup
Universität Tübingen
Psychologisches Institut
Schleichstr. 4
72076 Tübingen
barbara.kaup@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. Markus Kiefer
Universität Ulm
Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie III,
Sektion für Kognitive Elektrophysiologie
Leimgrubenweg 12
89075 Ulm
markus.kiefer@uni-ulm.de

Prof. Dr. Markus Knauff
Universität Gießen
Fachbereich 06, Allgemeine Psychologie und Kognitionsforschung
Otto-Behaghel-Str. 10F
35394 Gießen
markus.knauff@psychol.uni-giessen.de

Prof. Dr. Günther Knoblich
Central European University, Budapest
Department of Cognitive Science
October 6 street 7
01051 Budapest
knoblichg@ceu.edu

Prof. Dr. Iring Koch
RWTH Aachen
Institut für Psychologie
Jägerstr. 17–19
52056 Aachen
koch@psych.rwth-aachen.de

Prof. Dr. Jürgen Konczak
University of Minnesota
Human Sensorimotor Control Lab
400 Cooke Hall, 1900 University Ave. SE
Minneapolis, MN 55456
jkonczak@umn.edu

Priv.-Doz. Dr. Joseph Krummenacher
Universität Ulm
Fakultät Ingenieurwissenschaften, Informatik und Psychologie,
Institut für Psychologie und Pädagogik
89069 Ulm
joseph.krummenacher@uni-ulm.de

Prof. Dr. Wilfried Kunde
Universität Würzburg
Lehrstuhl für Psychologie III
Röntgenring 11
97070 Würzburg
kunde@psychologie.uni-wuerzburg.de

Prof. Dr. Hermann Müller
Ludwig-Maximilians-Universität München
Department Psychologie,
Allgemeine und Experimentelle Psychologie
Leopoldstr. 13
80802 München
hmueller@psy.lmu.de

Prof. Dr. Jochen Müsseler
RWTH Aachen
Institut für Psychologie
Jägerstr. 17–19
52056 Aachen
muesseler@psych.rwth-aachen.de

Dr. Michael Öllinger
Parmenides Center for the Study of Thinking
Kirchplatz 1
82049 München/Pullach
michael.oellinger@parmenides-foundation.org

Prof. Dr. Wolfgang Prinz
Max Planck Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften Leipzig
Stephanstr. 1A
04103 Leipzig
prinz@cbs.mpg.de

Prof. Dr. Rosa Maria Puca
Universität Osnabrück
Institut für Psychologie
Seminarstr. 20
49074 Osnabrück
rpuca@uni-osnabrueck.de

Prof. Dr. Martina Rieger
UMIT – Private Universität für Gesundheitswissenschaften, Medizinische Informatik und Technik
Institut für Psychologie
Eduard Wallnöfer-Zentrum 1
A-6060 Hall in Tirol
martina.rieger@umit.at

Prof. Dr. Erich Schröger
Universität Leipzig
Institut für Psychologie
Neumarkt 9–19
04109 Leipzig
schroger@rz.uni-leipzig.de

Prof. Dr. Julia Schüler
Universität Konstanz
Fachgruppe Sportwissenschaft, Sportpsychologie
Universitätsstraße 10
78464 Konstanz
julia.schueler@uni-konstanz.de

Prof. Dr. Christoph Stahl
Universität Köln
Department Psychologie
Herbert-Lewin-Str. 2
50931 Köln
christoph.stahl@uni-koeln.de

Prof. Dr. Sandra Sülzenbrück
FOM Hochschule für Oekonomie & Management
Leimkugelstr. 6
45141 Essen
sandra.suelzenbrueck@fom.de

Prof. Dr. Michael Waldmann
Universität Göttingen
Georg-Elias-Müller-Institut für Psychologie
Goßlerstr. 14
37073 Göttingen
michael.waldmann@bio.uni-goettingen.de

Prof. Dr. Dorit Wenke
PFH Private Hochschule Göttingen
Bereich Psychologie
Weender Landstr. 3–7
37073 Göttingen
wenke@pfh.de

Prof. Dr. Pienie Zwitserlood
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Psychologie
Fliednerstr. 21
48149 Münster
zwitser@uni-muenster.de

Einleitung – Psychologie als Wissenschaft

Wolfgang Prinz, Jochen Müsseler und Martina Rieger

1.1 Psychologie heute – 2
1.1.1 Unübersichtliche Verhältnisse – 2
1.1.2 Ein Blick zurück – 2
1.1.3 Lob der Unübersichtlichkeit – 4

1.2 Allgemeine Psychologie – 4
1.2.1 Welche Gegenstände? – 5
1.2.2 Welche Methoden? – 6
1.2.3 Welche Theorien? – 7

1.3 Allgemeine Psychologie und der Aufbau dieses Buches – 9

Literatur – 10

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_1

1.1 Psychologie heute

Der Begriff „Psychologie" wird im Alltag in unterschiedlichen Bedeutungen verwendet, die nicht immer etwas mit dem gemeinsam haben, was wissenschaftlich unter Psychologie verstanden wird. Seit jeher wird der Begriff „Psychologie" für alles Mögliche vereinnahmt, und immer wieder gerät die Psychologie dadurch in Misskredit. In Zeiten eines nicht enden wollenden Psychobooms wird das Prädikat *psychologisch* – und mit ihm der Nimbus der Wissenschaft dieses Namens – für allerlei Lehren und Praktiken missbraucht, die mit ernsthafter Wissenschaft nichts zu tun haben. So werden beispielsweise esoterische Kulte, religiöse Heilslehren oder absonderliche therapeutische Praktiken, manchmal sogar kosmologische oder astrologische Welterklärungssysteme, als irgendwie *psychologisch* – oder jedenfalls *psychisch* – ausgegeben. Ähnliches gilt auch für weite Teile der kultur-, literatur- und kunstkritischen Feuilletons, in denen gerne Belesenheit und Seriosität vorgetäuscht werden, indem vieles – egal wie beliebig und hausgemacht es auch sein mag – aus einer wie auch immer gearteten psychologischen Perspektive betrachtet wird. Hiervon ist die wissenschaftliche Psychologie, die leider auf die Alleinverwendung ihres Namens kein Patent hat, klar abzugrenzen.

1.1.1 Unübersichtliche Verhältnisse

Allerdings hat die wissenschaftliche Psychologie es auch mit sich selbst nicht immer leicht. Denn obwohl sie seit inzwischen über 130 Jahren an den Universitäten der Welt in Forschung und Lehre vertreten ist, hat sie es bis heute nicht zu einer kompakten Disziplin mit robustem Selbstbewusstsein gebracht. Sie ist, ganz im Gegenteil, ziemlich unübersichtlich, und sie lässt sich in ihrer derzeitigen Gestalt eigentlich nur als ein Bündel verschiedener Forschungsansätze begreifen, die sich mit unterschiedlichen Methoden auf unterschiedliche Gegenstandsbereiche richten. Und viele Stimmen glauben, dass sich dies in absehbarer Zeit auch nicht ändern wird – oder aus prinzipiellen Gründen nicht ändern kann.

Die Unübersichtlichkeit rührt aus verschiedenen Quellen. Eine von ihnen ergibt sich bereits aus der weithin akzeptierten Gegenstandsbestimmung der Psychologie, die ein grundlegendes Dilemma, wenn nicht gar Trilemma, zum Ausdruck bringt. Psychologie versteht sich als die Wissenschaft vom (menschlichen) *Erleben* und *Verhalten* – bisweilen sogar unter Einschluss der damit verbundenen *physiologischen Vorgänge*. Ihr Gegenstand hat damit gleichsam zwei bzw. drei Seiten, und zwar Seiten, die so disparat sind, dass sie völlig verschiedene methodische Zugänge verlangen: subjektive und objektive Methoden, historisch verstehende und systematisch erklärende Verfahren, Beobachtung und Experiment – kurz Zugänge, die den gesamten Kanon des geistes-, sozial- und naturwissenschaftlichen Methodeninventars umfassen.

Darüber hinaus ist die Frage des sachlichen Zusammenhangs der verschiedenen Seiten ungeklärt. Hinter der Frage nach dem adäquaten methodischen Zugang zum Erleben, zum Verhalten und zu den Hirnprozessen verbirgt sich das prinzipielle Problem der Beziehung zwischen geistigen und materiellen Prozessen – ein Problem, das nicht nur moderne Wissenschaften wie die Psychologie und die Hirnforschung umtreibt, sondern die Philosophie schon seit über 2000 Jahren bewegt.

Ein weiteres Moment der Unübersichtlichkeit ergibt sich aus dem breiten Spektrum der Fragen, die die psychologische Forschung stellt und aus der die Verschiedenheit der mit diesen Fragen verbundenen thematischen Forschungsfelder resultiert. *Allgemeine Psychologie*, auf die wir noch näher zu sprechen kommen, fragt nach universalen Gesetzmäßigkeiten im Bereich psychischer Grundfunktionen wie Wahrnehmung, Motivation, Emotion, Gedächtnis, Denken oder Handlung. Entsprechend diesem universalistischen Ansatz ist ihre Forschungspraxis dadurch gekennzeichnet, dass sie von individuellen Unterschieden abstrahiert. Umgekehrt geht *Differenzielle Psychologie* gerade von interindividuellen Unterschieden in der Ausprägung psychischer Merkmale aus und rekonstruiert auf dieser Grundlage allgemeine Strukturmerkmale der zugrunde liegenden psychischen Funktionssysteme. *Entwicklungspsychologie* untersucht die Wechselwirkungen der inneren und äußeren Faktoren, die die Entwicklung psychischer Funktionen und Leistungen im Verlauf der Lebensspanne bestimmen und beeinflussen. Dabei wird der Aufbau der psychischen Funktionen ebenso behandelt wie ihre Transformationen und ihr Abbau. *Sozialpsychologie* analysiert Erleben und Verhalten im sozialen Kontext. Dabei geht es um den Einfluss des sozialen Kontexts auf das Individuum ebenso wie die umgekehrten Einwirkungen des Individuums auf seine soziale Umgebung. *Biologische Psychologie* beschäftigt sich mit den Zusammenhängen zwischen biologischen Prozessen und dem Erleben und Verhalten. In der Allgemeinen Psychologie werden diese biologischen Prozesse auch berücksichtigt, wenn es um das Verständnis psychischer Grundfunktionen wie Wahrnehmung, Motivation, Emotion, Gedächtnis, Denken oder Handlung geht, wobei die Allgemeine Psychologie darüber hinausgeht. Biologische Psychologie selbst verfolgt im Gegensatz zur Allgemeinen Psychologie keinen universalistischen Ansatz, sondern beschäftigt sich mit den biologischen Grundlagen in den verschiedensten Forschungsfeldern. Neben diesen Hauptfeldern der Grundlagenforschung hat die moderne Psychologie außerdem eine große Zahl anwendungsnaher Forschungsfelder hervorgebracht, u. a. in den Bereichen der *Klinischen Psychologie*, der *Diagnostik*, der *Pädagogischen Psychologie*, der *Arbeits-, Betriebs- und Organisationspsychologie* und *der Forensischen Psychologie.*

1.1.2 Ein Blick zurück

Unübersichtliche Verhältnisse lassen sich oft historisch erklären, und so ist es auch in der Psychologie. Die moderne wissenschaftliche Psychologie entstand im ausgehenden 19. Jahrhundert. Vor ungefähr 130 Jahren wurden unter dem Namen *Psychologie* zwei bis dahin weitgehend getrennte geistes- und wissenschaftsgeschichtliche Entwicklungslinien zusammengeführt. Dies hatte weitreichende wissenschaftliche und institutionelle Konsequenzen.

Die eine wissenschaftsgeschichtliche Entwicklungslinie geht auf eine bemerkenswerte Verknüpfung von Philosophie und

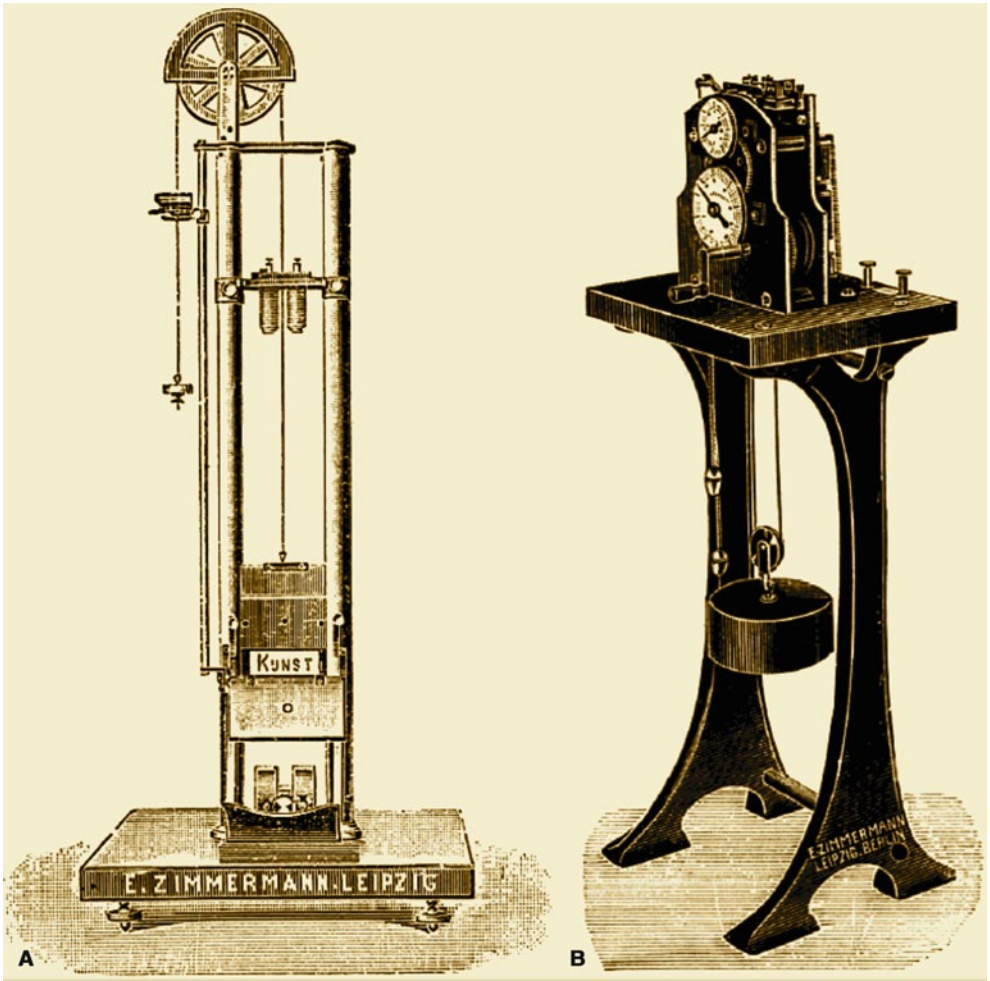


Abb. 1.1 Ein Falltachistoskop für kurzzeitige Reizdarbietungen (**A**) und ein Hipp'sches Chronoskop für Zeitmessungen im Millisekundenbereich (**B**), wie sie im ausgehenden 19. Jahrhundert in psychologischen Experimenten eingesetzt wurden. (Schröger 2004)

Physiologie zurück, die sich um die Mitte des 19. Jahrhunderts ergab, als die philosophische Erkenntnistheorie mit der damals aufkeimenden, experimentell betriebenen *Subjektiven Sinnesphysiologie* in Berührung kam. Eine der zentralen klassischen Fragen der philosophischen Erkenntnistheorie war seit jeher, wie die Beziehung zwischen subjektiven Wahrnehmungsinhalten und den tatsächlichen Gegebenheiten in der objektiven Umwelt bestimmt werden kann. Diese Frage, die über zwei Jahrtausende hinweg lediglich Gegenstand scharfsinniger Erörterungen und philosophischer Debatten gewesen war, wurde um die Mitte des 19. Jahrhunderts mit einem Mal auch Gegenstand experimenteller Forschung. Wissenschaftler wie Johannes Müller, Ewald Hering und Hermann von Helmholtz entwickelten Untersuchungsansätze, die es erlaubten, klassische erkenntnistheoretische Fragen nunmehr mit experimentellen Methoden anzugehen, und zwar mit Methoden, die im Wesentlichen auf subjektiven Beobachtungen fußten und in diesem Sinne als psychologisch gelten konnten.

Die andere wissenschaftsgeschichtliche Entwicklungslinie entstand unabhängig davon. Sie setzte bereits im 18. Jahrhundert ein und lässt sich am besten als *vergleichende Menschenkunde* charakterisieren. Hinter dieser Bezeichnung verbergen sich eine Vielfalt von halb unterhaltsamen, halb wissenschaftlichen Unternehmungen, die darauf abzielen, dem gebildeten und wissenschaftlich interessierten Publikum zur Erweiterung seiner Welt- und Menschenkenntnis zu verhelfen, indem sie vor seinen Augen das Panorama der wundersamen Vielfalt der menschlichen Lebensformen entfalten. Dabei konnte sich die vergleichende Beschreibung sowohl auf verschiedene Typen und Charaktere beziehen (wie in den Systemen der Physiognomie und der Phrenologie) als auch auf verschiedene Völker und ihre Gebräuche (wie in den Kompendien der Völkerkunde). Später trat die vergleichende Beschreibung der Geisteskrankheiten hinzu und – nicht zuletzt – der Vergleich zwischen Kindern in verschiedenen Alters- und Entwicklungsstufen. So verschieden diese Ansätze im Einzelnen waren, hatten sie doch zweierlei gemeinsam: das inhaltliche Interesse an der Vielfalt des menschlichen Erlebens und Verhaltens sowie den methodischen Zugang der vergleichenden Beschreibung.

Nicht zuletzt der wissenschaftlichen Integrationskraft des Leipziger Philosophieprofessors Wilhelm Wundt (1832–1920) ist es zuzuschreiben, dass diese beiden ganz unterschiedlichen Denktraditionen schließlich unter dem Begriff einer Wissenschaft namens *Psychologie* zusammengeführt und auch an den Universitäten institutionell etabliert wurden. Wundt hinterließ – neben vielem, vielem anderen – zwei mehrbändige Hauptwerke, die der systematischen Grundlegung der beiden Zweige der neuen Wissenschaft gewidmet waren, die aus diesen beiden Entwicklungslinien abgeleitet sind: die zuletzt dreibändigen *Grundzüge der Physiologischen Psychologie* (Erstausgaben 1873/1874) und die zehnbändige *Völkerpsychologie* (Erstausgaben zwischen 1900 und 1920).

Die *Physiologische Psychologie* war experimentell orientiert, und aus ihr gingen später die Forschungsansätze hervor, die heute als *Allgemeine Psychologie* bezeichnet werden. Wundts *Völkerpsychologie* war dagegen vergleichend, beschreibend und interpretierend angelegt; sie kann aus heutiger Sicht als eine Grundlegung nicht nur der *Sozialpsychologie*, sondern auch der *Differenziellen Psychologie* und der *Entwicklungspsychologie* gelesen werden. Im Grunde gilt noch heute, was bereits Wundt lehrte: Die *Physiologische Psychologie* bzw. ihre Nachfolgedisziplinen richten sich vorwiegend auf die Analyse der Prozesse und der Mechanismen, die psychischen Funktionen zugrunde liegen, d. h. auf das *Wie*. Dagegen richten sich die *Völkerpsychologie* und die in ihrer Nachfolge stehenden Wissenschaftsansätze vorzugsweise auf das *Was*, d. h. auf die Frage, *was* welche Individuen unter welchen Bedingungen denken oder tun. Und wie schon bei Wilhelm Wundt, dem Gründer und Vereiniger, hat die Was-Psychologie manchmal auch noch heute mit der Wie-Psychologie weder inhaltlich noch methodisch besonders viel gemeinsam. Allerdings öffnen sich Disziplinen mit vorwiegend bedingungsanalytischen Ansätzen zunehmend auch funktionsanalytischen Fragestellungen und entwickeln entsprechende Theorien und Modelle. So ist z. B. die moderne Entwicklungspsychologie mit ihrer engen Verschränkung sowohl mit der Differenziellen Psychologie als auch mit der Allgemeinen Psychologie ein eindrucksvolles Beispiel dafür, dass die alten Grenzziehungen überbrückt werden können.

1.1.3 Lob der Unübersichtlichkeit

Was soll man von einer Wissenschaft halten, in der sich so viele unterschiedliche Perspektiven kreuzen, die sowohl vom Erleben als auch vom Verhalten handelt, die sich von differenzieller Verschiedenheit ebenso beeindrucken lässt wie von universeller Gleichförmigkeit und die bedingungsanalytische Erkenntnisziele ebenso verfolgt wie funktionsanalytische? Zweifellos trägt diese mehrfache Unübersichtlichkeit dazu bei, dass es schwerfällt, sich ein klares Bild davon zu machen, was psychologische Forschung eigentlich ist und wie sie funktioniert. Kein Zweifel aber auch, dass diese Unübersichtlichkeit, die sich ja aus der Natur der Forschungsgegenstände ergibt, zugleich den besonderen intellektuellen Reiz und die besondere Herausforderung psychologischer Forschung ausmacht.

Die Frage ist nur, wie man mit dieser Herausforderung umgeht. Wenn es nämlich stimmt, dass man die Forschungsgegenstände allgemein oder differenziell, bedingungsanalytisch oder funktionsanalytisch, als Erleben, Verhalten oder hirnphysiologischen Prozess beschreiben und untersuchen kann, und wenn außerdem stimmt, dass diese verschiedenen Untersuchungsansätze und Erkenntnisziele nicht ohne Weiteres zur Deckung zu bringen sind, gibt es forschungsstrategisch zwei Möglichkeiten: Rückzug oder Offensive. Rückzug würde bedeuten, sich auf einen dieser Forschungsansätze zu kaprizieren und sich ihm und nur ihm ganz zu verschreiben. Offensive bedeutet dagegen, sich mit dem eigenen Ansatz zu den übrigen Ansätzen ins Verhältnis zu setzen, sich in Konkurrenz zu begeben oder Verbindungen zu schaffen und die damit verbundenen intellektuellen und forschungspolitischen Anstrengungen auszuhalten.

Dass sie eine solche produktive Konkurrenz ermöglicht, aber auch erzwingt, ist ein entscheidendes Charakteristikum der unübersichtlichen Wissenschaft Psychologie. Sie ermöglicht und erfordert, unser Denken und unsere Forschungsarbeit in vielfältigen theoretischen Kontexten zu situieren. Das macht die Psychologie spannungsreich und anstrengend. Aber gerade dafür lieben wir sie.

1.2 Allgemeine Psychologie

Wir wenden uns jetzt der Allgemeinen Psychologie zu, die wir natürlich ganz besonders lieben. Einiges von dem, was sie kennzeichnet, haben wir bereits angedeutet:

- Die Bezeichnung *Allgemeine Psychologie* steht für eine *Teildisziplin* des Gesamtunternehmens Psychologie und keineswegs, wie sie manchmal missverstanden wird, für das Gesamtunternehmen selbst.
- Das besondere Kennzeichen, das ihr die Bezeichnung *Allgemein* einträgt, ergibt sich aus ihrem universalistischen Ansatz: Sie betrachtet den Menschen als psychologisches Gattungswesen und fragt nach dem, was Menschen *gemeinsam* ist – ohne sich dafür zu interessieren, was sie unterscheidet.
- Sie richtet sich auf das *Wie*, nicht auf das *Was* dieser Gemeinsamkeiten, d. h., sie interessiert sich für die Prozesse und Mechanismen, in denen psychische Vorgänge ablaufen, und nicht primär für deren Inhalte.

In der Tat können *Universalismus* und *Funktionalismus* als zentrale Leitideen der allgemeinpsychologischen Forschung gelten. Hinter der Allgemeinen Psychologie steht die Idee einer universalistisch gedachten psychologischen Funktionslehre. Das klingt nach schwergewichtiger Programmatik, aber die Praxis der Umsetzung dieser Idee ist ganz und gar pragmatisch. Obwohl die Psychologie voll von Manifesten ist, in denen die (nach Auffassung ihres jeweiligen Autors) einzig wahre Form, Psychologie zu betreiben, charakterisiert wird, wird man vergebens nach einem Manifest für Allgemeine Psychologie oder nach der Idee einer universalistischen Funktionslehre suchen. Und auch das lässt sich wiederum historisch erklären: Die Allgemeine Psychologie verdankt ihre Existenz als besondere Teildisziplin der Psychologie nicht der Programmatik von theoretischen Konzeptionen, sondern der Pragmatik von Prüfungsordnungen mit dem Hauptfach Psychologie.

Dementsprechend steht *Allgemeine Psychologie* auch heute keineswegs für ein klar abgegrenztes und in sich einheitliches Forschungsgebiet. Vielmehr versammeln sich unter dem Dach der Allgemeinen Psychologie diejenigen Gebiete der Psychologie, die sich den Leitideen des Universalismus und Funktionalismus verpflichtet fühlen und in denen erfolgreiche Forschungsprogramme etabliert werden konnten. Dabei dienen auch die Leitideen selbst nicht als programmatische Vorgaben, sondern als pragmatische Maximen der Forschung, die man beibehält, solange sie sich bewähren, die man aber aufgibt, wenn sie nicht mehr weiterhelfen. So kann man z. B. an die Grenzen des Universalismus stoßen, wenn man auf *allgemeine* Fragen *differenzielle*

Antworten erhält (was z. B. in der Motivationspsychologie häufig geschieht), oder man kann an die Grenzen des Funktionalismus stoßen, wenn sich zeigt, dass Prozesse und Inhalte keineswegs so unabhängig voneinander sind, wie der formale Funktionalismus unterstellt (wie sich z. B. in der Denkpsychologie zeigt).

Auch wenn die Grenzen unscharf sind, bleibt es dabei: Zur Allgemeinen Psychologie gehören diejenigen Teile der Psychologie, die sich an den Leitideen des Universalismus und Funktionalismus orientierten. Welche Gegenstände, welche Methoden und welche Theorien kommen für dieses Programm infrage?

1.2.1 Welche Gegenstände?

Die Leitidee einer universalistischen psychologischen Funktionslehre lässt sich auch so formulieren: *Was* Personen in verschiedenen Situationen wahrnehmen, denken oder tun, wird vom jeweiligen Kontext bestimmt – von Merkmalen, die in der Situation liegen, und von Merkmalen, die in den Personen liegen. Viel weniger variabel und kontextgebunden ist dagegen das *Wie* des Wahrnehmens, Denkens und Handelns, d. h. die allgemeine Funktionsarchitektur der Prozesse, in denen die spezifischen Inhalte erzeugt werden. Diese allgemeine Funktionsarchitektur – so die Idee – stellt universelle Mechanismen bereit, die für die Verarbeitung und Transformation von Inhalten des Erlebens und Verhaltens zur Verfügung stehen. *Was* jemand wahrnimmt, denkt und tut, hängt von der Person und der Situation ab; aber *wie* das Wahrnehmen, Denken und Tun vor sich geht, ist für alle gleich, d. h. universell. Aufgabe universalistischer Forschungsprogramme ist es dann, das *Wie* vom *Was* zu isolieren und es in reiner Form zu untersuchen.

Aber wie untersucht man das *Wie?* Wie erklärt man die Prozesse, die dem beobachtbaren psychischen Geschehen zugrunde liegen? *Was* Personen tun, kann man offen beobachten. *Wie* das aber geschieht, d. h. welche Prozesse und Mechanismen dem beobachtbaren Geschehen zugrunde liegen, kann man nicht beobachten, sondern nur erschließen. Allgemeine Psychologie interessiert sich nicht in erster Linie dafür, *was* Personen sehen, hören, denken, wollen oder erinnern, sondern sie will wissen, *wie* das Sehen, Hören, Denken, Wollen und Erinnern funktionieren. Das bedeutet, dass die Gegenstände der Forschung nicht offen zutage liegen. Sie liegen nicht in den beobachtbaren Inhalten des Erlebens und Verhaltens, sondern in den verborgenen Vorgängen, die diese beobachtbaren Inhalte erzeugen.

Wenn wir diese Prozesse nicht direkt beobachten können, woher können wir denn wissen, dass sie existieren? Wie charakterisieren wir unterschiedliche Prozesse? Wie grenzen wir sie voneinander ab? Wie teilen wir sie ein? Auch hier gibt es prinzipielle und pragmatische Antworten.

Prinzipielle Antworten sind in der Geschichte der Allgemeinen Psychologie verschiedentlich ausprobiert worden, aber keine von ihnen hat sich auf Dauer durchsetzen können. Prinzipielle Antworten sind solche, die aus einer vorgegebenen Theorie abgeleitet sind. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine begrenzte, oft sehr kleine Zahl von psychischen Grundoperationen postulieren, und sie glauben, dass die Vielfalt aller beobachtbaren Erscheinungen auf diese wenigen Grundprozesse zurückgeführt werden kann. Wilhelm Wundt lehrte z. B., dass sich alle komplexen Erscheinungen des menschlichen Erlebens auf zwei Grundprozesse zurückführen lassen: die (simultanen und sukzessiven) *Assoziationen* (Verbindungen zwischen psychischen Inhalten) und die komplexeren *Apperzeptionen* (das Bewusstwerden eines psychischen Inhalts durch das Eintreten in das Aufmerksamkeitsfeld, bei Wundt mittels eines willentlichen Aktes). Später wurde die Wundt'sche Theorie durch die sogenannte Gestalttheorie abgelöst. Diese Theorie hielt nicht viel von Assoziationen; stattdessen sah sie einen Prozess namens Umstrukturierung als den Kernprozess aller höheren kognitiven Leistungen an. Die Liste dieser allumfassend angelegten prinzipiellen Lösungsvorschläge ließe sich beliebig erweitern. Erfolgreich waren sie allesamt nicht. Sie geben theoretische Prinzipien vor und lassen diese Prinzipien dann auf die Empirie los. Das geht nur selten gut: Entweder landet man dabei bei unnötig komplizierten und unplausiblen Erklärungen empirischer Sachverhalte oder dabei, dass weite Bereiche der Empirie von der Erklärung ausgeschlossen bleiben.

Deshalb sind die prinzipiellen längst den pragmatischen Lösungen gewichen. Pragmatische Lösungen gehen den umgekehrten Weg – von empirischen Sachverhalten zu theoretischer Rekonstruktion. Bei den empirischen Sachverhalten kann es sich um Erscheinungen des Erlebens oder des Verhaltens handeln oder auch um beides zugleich. Ferner können die Untersuchungsgegenstände auf ganz verschiedenen Abstraktionsniveaus bestimmt werden. Forschung im Bereich der Gedächtnispsychologie kann sich z. B. für Gedächtnisprozesse ganz allgemein interessieren, für Prozesse im Bereich des biografischen Gedächtnisses oder des Kurzzeitgedächtnisses oder auch für sehr spezielle Prozesse wie das Gedächtnis für historische Jahreszahlen. Wie man im Einzelnen seinen Untersuchungsgegenstand zuschneidet, wird von verschiedenen Faktoren bestimmt, die einander überlagern.

Der *erste* dieser Faktoren – gewiss nicht der unwichtigste – ist unsere eigene psychologische Intuition. Jeder von uns – auch der psychologische Forscher – weiß ja von sich selbst, was es heißt zu sehen, zu hören, sich zu erinnern, aufmerksam zu sein, traurig oder wütend zu sein oder zu etwas keine Lust zu haben. Wir alle kennen unser Innenleben, und unsere psychologische Alltagssprache liefert ein begriffliches Gerüst zu seiner Beschreibung. Daher kann es nicht verwundern, dass die Sprache der Alltagspsychologie die Sprache der wissenschaftlichen Psychologie von Anfang an stark geprägt hat und auch heute noch prägt. So sind z. B. die Hauptkategorien, in die wir die Allgemeine Psychologie einteilen – Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Motivation, Emotion, Gedächtnis, Sprache, Denken usw. –, im Grunde wissenschaftliche Fortsetzungen des psychologischen *common sense*, dessen wir uns auch im Alltagsleben bedienen.

Je weiter die Forschung allerdings voranschreitet, desto mehr werden alltagspsychologische Intuitionen durch wissenschaftlich begründete Einteilungen und Definitionen abgelöst. Dass wir z. B. heute im Bereich der Gedächtnisforschung zwischen episodischem und semantischem Gedächtnis unterscheiden und die episodischen Gedächtnisleistungen noch einmal in ein Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis unterteilen, ist das Ergebnis jahrzehntelanger Forschung in diesem Bereich und hat nichts mehr mit alltagspsychologischen Intuitionen zu tun. Der jeweils

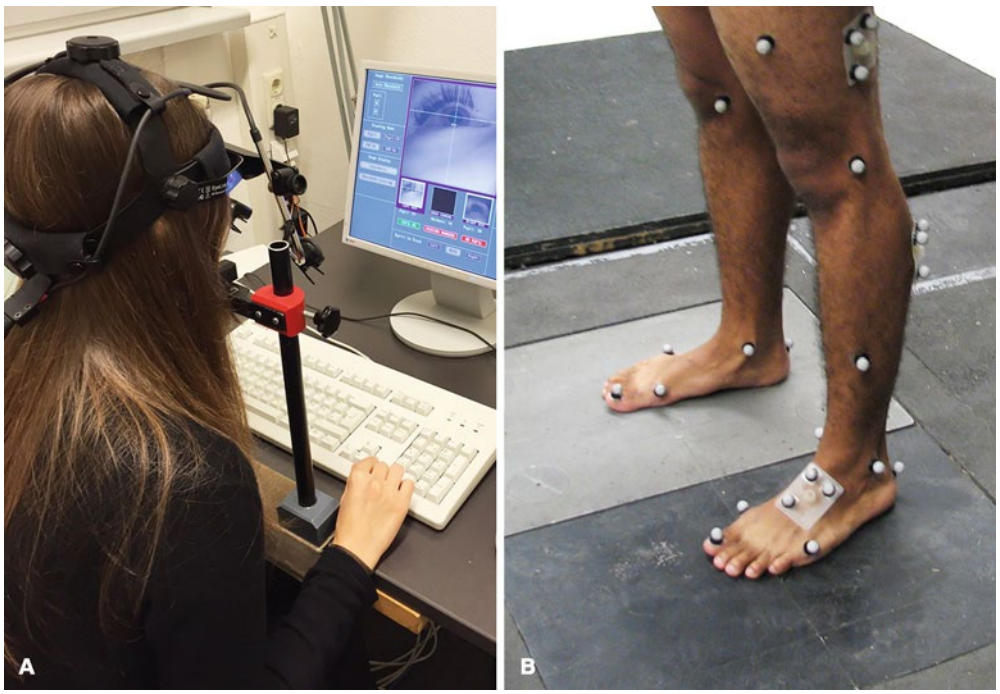


Abb. 1.2 Moderne Geräte zur verhaltensbasierten Messung von Blickbewegungen mittels videobasierten Miniaturkameras (**A**; Eyelink II von SR-Research Ltd.) und von Körperbewegungen mittels Bewegungsmarker, die hier an den Beinen eines Probanden befestigt sind. (**B**; Foto D. Gordon E. Robertson via Wikimedia Commons)

aktuelle Stand der Forschung und der einschlägigen Theorien ist also die *zweite* wichtige Quelle, die zur Bestimmung, Definition und Einteilung der Forschungsgegenstände beiträgt.

Schließlich kommt *drittens* hinzu, dass die Forschungsgegenstände auch durch die konkreten Situationen und Aufgaben bestimmt werden, die im Forschungsprozess zur Anwendung kommen. Wie in den einzelnen Kapiteln des Buches deutlich wird, verläuft der Forschungsprozess über weite Strecken *paradigmenorientiert*, d. h., er orientiert sich an bestimmten Untersuchungssituationen und bestimmten experimentellen Aufgaben, von denen man überzeugt ist, dass sie sich besonders gut zur Aufklärung bestimmter Prozesse eignen. In der Gedächtnisforschung z. B. verwendet man u. a. das *Wiedererkennungsparadigma* (*Recognition-Paradigma*), um Abrufprozesse aus dem Langzeitgedächtnis zu untersuchen. In Wahrnehmung und Motorik verwendet man *(Wahl-)Reaktionsaufgaben*, um Prozesse der Reizanalyse und der Reaktionsauswahl zu untersuchen. In der Aufmerksamkeitsforschung verwendet man das *Interferenzparadigma*, um zu untersuchen, inwieweit irrelevante Information selektiv ausgeblendet werden kann. In all diesen Fällen sind die konkreten Aufgaben, die man untersucht, eigentlich nur als Mittel zum Zweck gedacht: zum Zweck der Aufklärung von Prozessen, die über diese Aufgaben hinausgehen (also Abruf aus dem Gedächtnis, Reizanalyse und Reaktionsauswahl, Ausblendung irrelevanter Information). Dabei geschieht es aber häufig, dass das Mittel selbst zum Zweck wird, d. h., dass die Untersuchungsaufgaben zum eigentlichen Gegenstand der wissenschaftlichen Analyse werden (also Wiedererkennungsaufgaben, Wahlreaktionsaufgaben, Interferenzaufgaben).

Pragmatisch ist die Wahl der Gegenstände schließlich auch darin, dass die beiden großen Gegenstandsfelder der Psychologie – das Erleben und Verhalten – prinzipiell gleichberechtigt sind. Das war nicht immer so: Begonnen hat die wissenschaftliche Psychologie als reine Erlebniswissenschaft; dann wandelte sich ihr Forschungsprogramm (jedenfalls im angloamerikanischen Raum) im Behaviorismus zu einer reinen Verhaltenswissenschaft. Inzwischen sind aber diese Grabenkämpfe vorbei. Egal ob wir es begrüßen oder bedauern: Pragmatik hat Programmatik abgelöst.

1.2.2 Welche Methoden?

Komplexem Geschehen kann man auf zweierlei Weise wissenschaftlich zu Leibe rücken: durch *Beobachtung* und *Experiment*. Beobachtende Methoden sind dann angezeigt, wenn man das Geschehen in seiner Komplexität belassen will und wenn es darum geht, seine eigene, gleichsam naturwüchsige Dynamik zu charakterisieren. Experimentelle Methoden sind demgegenüber angezeigt, wenn man die kausale Mechanik des Geschehens im Einzelnen studieren will und dazu Bedingungen herstellt, unter denen man die Wirksamkeit einzelner Faktoren selektiv untersuchen kann. Beobachtende Methoden haben den Vorzug, dass sie die Untersuchungsgegenstände unberührt und unverändert lassen (jedenfalls weitgehend), dafür aber den Nachteil, dass sie keine unmittelbaren Einsichten in die kausalen Beziehungen erlauben, die den Erscheinungen zugrunde liegen. Experimentelle Methoden haben den Vorzug, dass sie solche Einsichten erlauben (jedenfalls partiell), dafür aber den Nachteil, dass diese Einsichten zunächst auf die künstlich vereinfachten Aufgaben, die im Labor untersuchbar sind, beschränkt bleiben und sich nicht auf den vollen Reichtum der psychischen Vorgänge im wirklichen Leben beziehen.

Die Diskussion über die Vor- und Nachteile experimenteller und beobachtender Methoden durchzieht die gesamte Psychologie, und an vielen Stellen wird sie in Form ideologischer Glaubenskriege geführt. So pragmatisch sich die Allgemeine Psychologie bei der Bestimmung ihrer Forschungsgegenstände geben mag – in der Methodenfrage muss sie Farbe bekennen. Hier muss sie sich für die Idee des experimentellen Vorgehens entscheiden. Wenn nämlich zutrifft, dass ihre Gegenstände ver-

borgene psychische Prozesse sind, werden diese Prozesse durch bloße Beobachtung von Erleben und Verhalten im täglichen Leben kaum aufzudecken oder aufzuklären sein. Zu viele Vorgänge kreuzen und überlagern sich hier in unkontrollierbarer Weise, als dass die Analyse einzelner Beobachtungen noch aussichtsreich sein könnte. Daher bleibt nur der umgekehrte Weg, nämlich das Herstellen von Bedingungen, unter denen ein untersuchungswürdiger Prozess in möglichst reiner Form isoliert untersucht wird. Damit verlagert sich der Ort der Untersuchung vom Leben ins Labor – mit der Folge, dass, wie es oft kritisch heißt, die Untersuchungsgegenstände dekontextualisiert, d. h. ihres natürlichen Kontexts beraubt, werden. Dieser Kritik muss sich die Allgemeine Psychologie stellen, denn an diesem Punkt hat sie, wie gesagt, keine andere Wahl: Will man die Grundidee des Funktionalismus methodisch umsetzen, muss man die mit der experimentellen Methode verbundenen Dekontextualisierungen in Kauf nehmen.

Hinzu kommt ein weiteres Moment, das sich aus der Idee des Universalismus ergibt. In psychologischen Experimenten werden das Verhalten und Erleben von Versuchsteilnehmern unter verschiedenen Bedingungen untersucht und verglichen. Wenn beispielsweise untersucht werden soll, wie Gedächtnisleistungen von der emotionalen Befindlichkeit von Personen abhängen, wird man Bedingungen schaffen, unter denen Personen eine Gedächtnisaufgabe im Anschluss an positiv oder negativ getönte Erlebnisse absolvieren. Die Versuchsfrage in einem solchen Experiment zielt darauf ab, wie sich die Gedächtnisleistung unter den beiden Bedingungen unterscheidet. Eine Antwort auf diese Frage kann man auf zwei Ebenen suchen: für jeden einzelnen Versuchsteilnehmer und für den Durchschnitt aller Versuchsteilnehmer insgesamt. Typischerweise zeigen sich in psychologischen Experimenten erhebliche individuelle Unterschiede in der Stärke (und oft auch in der Richtung) der experimentellen Effekte. Aber entsprechend der Idee des Universalismus sieht die allgemeinpsychologische Forschung von diesen Unterschieden in der Regel ab: Sie will nicht erklären, was die Versuchsteilnehmer unterscheidet, sondern was ihnen gemeinsam ist. Sie erklärt gleichsam das Verhalten einer fiktiven Durchschnittsperson – und überlässt die Erklärung der individuellen Unterschiede der Differenziellen Psychologie.

Es ist einfach, aber auch vorschnell, das Vorgehen der Experimentellen Psychologie für seine Künstlichkeit zu kritisieren und über die große Distanz zwischen Labor und Leben die Nase zu rümpfen. Man darf nicht übersehen, dass die Allgemeine Psychologie nicht ausgezogen ist, um die Komplexität des Lebens zu erklären (ebenso wenig wie, nebenbei bemerkt, die Physik ausgezogen ist, um den Durchmesser der Erde oder die Form des Matterhorns zu erklären). Was sie erklären will, sind die Grundprozesse, die dieses Leben ausmachen – und darin ist sie bisher außerordentlich erfolgreich gewesen.

1.2.3 Welche Theorien?

Das ist die schwierigste der drei Fragen, die wir erörtern, um verständlich zu machen, wie Allgemeine Psychologie funktioniert. Natürlich können wir uns hier nicht in abstrakte Diskussionen darüber einlassen, was Theorien eigentlich sind und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit ein Sachverhalt als *erklärt* oder *verstanden* gelten kann. Für unseren Zweck ist ausreichend, wenn wir uns die Frage so zurechtlegen: Wir haben bereits zwischen den Inhalten des Erlebens und Verhaltens und den psychischen Prozessen, die ihnen zugrunde liegen, unterschieden, d. h. zwischen Erscheinungen, die man unmittelbar beobachten kann, und Prozessen, die man aus den Beobachtungen erschließen kann. Könnten wir diese Prozesse angemessen charakterisieren, dann könnten wir *erklären*, wie die Erscheinungen, die wir beobachten, zustande kommen. Somit fällt die Frage danach, welche Theorien die Allgemeine Psychologie braucht, mit der Frage zusammen, wie man diese verborgenen Prozesse, Mechanismen und Strukturen adäquat beschreiben und charakterisieren kann.

Wir brauchen also Theorien über universelle Prozesse – Theorien, die unabhängig von den speziellen Inhalten des Erlebens und Verhaltens, in denen sich diese Prozesse manifestieren, Bestand haben. Da universelle Prozesse eher der allgemeinen *Natur* des Gattungswesens Mensch zuzurechnen sind als der speziellen *Kultur*, unter der es jeweils lebt, werden wir die Theorien, nach denen wir suchen, eher im naturwissenschaftlichen als im kultur- und sozialwissenschaftlichen Lager der Psychologie suchen müssen, d. h. eher in der Biologie und Hirnforschung als in der Soziologie und Historie. Allerdings wird allgemeinpsychologische Forschung gerade deswegen oft in ausgesprochen skurrile Debatten verwickelt. Ihr wird vorgehalten, sie verkürze den Menschen auf ein reines Naturwesen und leugne seine kulturelle und historische Bestimmung als autonomes Subjekt. Das Menschenbild der Psychologie, so heißt es dann oft, sei auf reine Biologie und Hirnphysiologie verkürzt, und sehr schnell ist dann in solchen Debatten auch davon die Rede, dass derartige Psychologie den Menschen entwürdige und Manipulation oder gar Totalitarismus Tür und Tor öffne.

Dies ist falsch und beruht auf einem logischen Missverständnis. Das Missverständnis entsteht durch eine Verwechslung von Forschungsprogramm und Menschenbild. Forschungsprogramme müssen, wenn sie erfolgreich sein wollen, selektiv sein, d. h., sie müssen ihren Gegenstand unter einer speziellen Perspektive betrachten (hier der Perspektive des universalistischen Funktionalismus). Wenn ein solches Forschungsprogramm erfolgreich ist, besagt das nur, dass seine spezifische Perspektive produktiv ist – und es besagt überhaupt nichts darüber, dass es nicht noch viele andere selektive Perspektiven auf den gleichen Gegenstand geben kann, die ebenso produktiv sind. Die Allgemeine Psychologie will lediglich universelle psychische Funktionen aufklären, und sie tut dies in dem vollen Bewusstsein, dass dies nur einer unter vielen Bausteinen zu einem umfassenderen Verständnis menschlichen Tuns und Lassens ist.

Kommen wir also zurück zu der Frage, die die Theorien, nach denen wir suchen, beantworten sollen: Wie kann man psychische Prozesse adäquat charakterisieren? Auf diese Frage gibt es bis heute keine allgemein akzeptierte Antwort. Welche Typen von Mechanismen kommen für die Charakterisierung psychischer Prozesse in Betracht, und in welcher Sprache bzw. in welcher sprachlichen Metaphorik können wir sie beschreiben? Einen Vorgang zu erklären, den man nicht versteht, bedeutet, ihn auf einen anderen Vorgang, den man besser versteht, zurückzufüh-

Abb. 1.3 Moderne Geräte zur neurophysiologischen Messung von Gehirnaktivierungen mittels Elektroencephalografie bzw. ereigniskorrelierter Potenziale (**A**) und mittels funktionaler Magnetresonanztomografie (**B**)

ren – auf einen Vorgang von prinzipiell bekannter Struktur also. Die Erklärungsangebote, die die Geschichte der Psychologie für psychische Prozesse und Mechanismen bereithält, lassen sich vereinfacht in drei Typen einteilen: Erklärungen durch Bewusstseinsprozesse, durch Gehirnprozesse und durch abstrakte Prozesskonfigurationen (Roth und Prinz 1996).

Erklärungen durch Bewusstseinsprozesse

Dies ist die älteste, gleichsam klassische Erscheinungsform einer psychologischen Theorie – genau derjenige Typus von Theorie und Erklärung, den wir auch im Alltagsleben verwenden: Wir erklären das, was jemand jetzt denkt, fühlt oder tut, durch vorausgehende Bewusstseinserscheinungen. Jemand ist resigniert, weil er glaubt, dass er einer anstehenden Aufgabe nicht gewachsen ist, jemand anderes geht ins Kino, weil er sich vom Prüfungsstress ablenken möchte, und einem anderen kommt Gedanke X, nachdem er sich vorher Y überlegt hat, usw. Kein Zweifel: Dies ist die Art und Weise, wie wir uns im Alltagsleben unser eigenes Seelenleben und das unserer Mitmenschen zurechtlegen. Im wissenschaftlichen Kontext haben Erklärungen dieser Art vor allem in frühen Tagen der Psychologie eine Rolle gespielt und oft sogar als die eigentlichen (und einzigen) psychologischen Erklärungen gegolten. Dass sie heute immer weniger gelten – und in weiten Teilen der Allgemeinen Psychologie völlig ausrangiert sind –, hat mehrere Gründe:

- Erklärungen dieser Art beschreiben, wenn man genauer hinsieht, im Grunde nur die Aufeinanderfolge von Erscheinungen des Erlebens und Verhaltens, aber sie enthalten keine wirkliche Charakterisierung der Vorgänge, in denen diese Inhalte entstehen. Sie beschränken sich im Grunde darauf, das Auftreten bestimmter Inhalte unter bestimmten Bedingungen inhaltlich plausibel zu machen, und zwar unter Rückgriff auf unsere *common-sense*-Intuitionen über derartige Zusammenhänge: Wir alle wissen, dass Stress durch Zerstreuung abgebaut werden kann, und deshalb finden wir es plausibel, dass jemand mit Prüfungsstress Lust darauf hat, ins Kino zu gehen. Plausibel sind solche Erklärungen also in einem rein inhaltlichen Sinn; über die zugrunde liegenden Prozesse, an die die Allgemeine Psychologie eigentlich heran will, sagen sie nichts aus.
- Bei dieser Art von Erklärungen gewinnt man nichts, was man nicht schon längst weiß – nämlich aufgrund der eigenen langjährigen Teilnahme am alltagspsychologischen Diskurs. Von wissenschaftlichen Erklärungen verlangt man jedoch mehr: Sie sollen das, was man beobachtet, auf andersartige Vorgänge und Mechanismen zurückführen. Wie gesagt, einen Vorgang, den man nicht versteht, zu erklären, bedeutet, ihn auf einen anderen Vorgang zurückzuführen, den man besser versteht. Dieses Kriterium wird aber von Erklärungen durch Bewusstseinserscheinungen gewiss nicht erfüllt.
- Eine weitere – vielleicht entscheidende – Schwäche liegt darin, dass es viele psychische Vorgänge gibt, die ohne erkennbare Beteiligung von Bewusstseinsprozessen zustande kommen. Das bedeutet: Selbst wenn man sich mit den Schwächen von bewusstseinsverankerten Erklärungen zufrieden gäbe, würde man dennoch auf diese Weise den Bereich der Gegenstände, die man überhaupt betrachtet, unnötig beschneiden. Die moderne Psychologie sieht Bewusstseinserscheinungen nicht mehr als das entscheidende Fundament menschlichen Erlebens und Verhaltens. Bewusstseinserscheinungen *können* psychische Vorgänge begleiten, müssen es allerdings nicht. Wenn das aber so ist, kommt die Sprache der Bewusstseinserscheinungen nicht als theoretische Sprache für eine erklärende Psychologie in Betracht.

Erklärungen durch Gehirnprozesse

Schon bei ihrer Geburt war der psychologischen Wissenschaft die Idee in die Wiege gelegt, dass ihre eigentliche Bestimmung darin bestehen würde, eines Tages psychische Prozesse durch Ge-

hirnprozesse zu erklären. Gustav Theodor Fechner (1801–1887), ein weiterer wichtiger Name aus der Riege der Gründungsväter der modernen Psychologie, entwickelte um die Mitte des 19. Jahrhunderts die Idee der *Psychophysik*, d. h. einer Lehre von den psychischen Erscheinungen, die auf einer Lehre von ihnen zugrunde liegenden Gehirnprozessen beruhen sollte. Allerdings waren damals die einschlägigen Kenntnisse über die Arbeitsweise des Gehirns so eingeschränkt, dass hirnphysiologische Erklärungen weithin den Charakter ziemlich wilder Spekulationen hatten. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Situation aber dramatisch verändert: Die kognitiven Neurowissenschaften haben einen enormen Aufschwung genommen, und dank der rapiden Entwicklung beim Einsatz bildgebender Verfahren in der Hirnforschung ist es inzwischen möglich geworden, dem menschlichen Gehirn mit nichtinvasiven Methoden gleichsam bei der Arbeit zuzusehen.

Zum erleichterten Aufatmen besteht allerdings noch längst kein Anlass. Nach wie vor sind wir mit einer Situation konfrontiert, in der die Gehirnprozesse, die wir zur Erklärung kognitiver und psychischer Prozesse heranziehen, nicht besser, sondern eher schlechter verstanden sind als die kognitiven und psychischen Prozesse, die wir erklären wollen. Nach wie vor verstehen wir sehr wenig darüber, wie die Aktivität von Nervenzellen und Nervenzellverbänden in psychische Vorgänge umgesetzt wird. Dies stößt gar auf prinzipielle Schwierigkeiten, wenn man beispielsweise danach fragt, wie diese Aktivität das Ich- und Selbst-Erleben hervorbringen kann. Und nach wie vor verstehen wir ebenso wenig, wie – umgekehrt – kognitive Leistungen und andere psychische Vorgänge durch Gehirnprozesse realisiert werden. In der Konsequenz sind wir noch immer weit davon entfernt, die Rätsel des Erlebens durch Wissen über Gehirnprozesse zu lösen. Stattdessen sehen wir uns vielmehr mit mehreren Rätseln gleichzeitig konfrontiert: wie Erleben entsteht, wie Verhalten gesteuert wird, wie Gehirnprozesse funktionieren – und wie diese drei Erscheinungsreihen miteinander verbunden sind.

Erklärungen durch abstrakte Prozesskonfigurationen

Nachdem es lange Zeit so schien, als wären die Sprachen, in denen wir Bewusstseinserscheinungen bzw. Gehirnfunktionen beschreiben, die einzigen Kandidaten für eine allgemeinpsychologische Theoriesprache, sind im Laufe der Entwicklung der Psychologie noch weitere Kandidaten hinzugekommen. Dabei handelt es sich um solche Sprachen, die gleichsam neutrale Mechanismen beschreiben – weder Bewusstseinserscheinungen noch Gehirnprozesse, sondern abstrakte Prozesskonfigurationen, die auf beide Bereiche anwendbar sind. Ein prägnantes und besonders wichtiges Beispiel für eine derartige neutrale Sprache ist die Sprache der Informationsverarbeitung, von der insbesondere die gegenwärtige Kognitionspsychologie ausgiebig Gebrauch macht. In dieser Sprache werden die verborgenen Mechanismen, die dem beobachtbaren Verhalten und Erleben zugrunde liegen, als *informationsverarbeitende Mechanismen* verstanden, die nach bestimmten Regeln funktionieren. Zum Teil sind diese Regeln in der Grundausstattung des Systems angelegt, zum Teil werden sie für die jeweilige Aufgabe festgelegt – ganz ähnlich einem Computer, dessen konkrete Aktivität von Vorgaben auf ganz unterschiedlichen Ebenen bestimmt wird: durch die Hardware, das Betriebssystem, das gerade aktive Programm und schließlich die Daten, die aktuell eingegeben werden.

Computerjargon als theoretische Sprache der Allgemeinen Psychologie? Das mag auf den ersten Blick befremdlich, wenn nicht gar lächerlich erscheinen. Hat die Allgemeine Psychologie nichts Besseres zu tun, als sich ihre theoretischen Konzepte bei der Informatik auszuborgen? Die Antwort ist einfach genug: Was zählt, ist der Erfolg. Kein anderes theoretisches Programm ist bisher in der Geschichte der Psychologie ähnlich erfolgreich gewesen wie der theoretische Ansatz der modernen Kognitiven Psychologie, der kognitive Leistungen als Ergebnis von Informationsverarbeitungsprozessen konzeptualisiert.

Diese Konzeptualisierungen nutzen zwar den Computerjargon, unterstellen damit aber natürlich nicht eine Funktionsarchitektur menschlicher Informationsverarbeitung, die sich an den Architekturen von Computersystemen anlehnt. In der Tat wurde dieser Fehler insbesondere in den Anfängen des informationsverarbeitenden Ansatzes begangen, als eine allzu wortwörtliche Auslegung der Computermetapher den wissenschaftlichen Fortschritt eher behinderte als ihm nutzte. Was den informationsverarbeitenden Ansatz vielmehr auszeichnet, ist die Möglichkeit einer abstrakten Entwicklung von Funktionsarchitekturen, durch die nicht nur die beiden Beobachtungsebenen Erleben und Verhalten theoretisch zusammengeführt werden, sondern die es gestattet, als dritte Komponente auch noch unser Wissen über Gehirnprozesse zu integrieren. Die Psychologie redet über kognitive Leistungen und psychische Prozesse, hat aber keine Möglichkeit, diese direkt in die Sprache über Gehirnprozesse zu übersetzen. Umgekehrt spricht die Neurobiologie über Neurone und Synapsen, hat aber keine Möglichkeit, diese direkt in die Sprache von Erleben und Verhalten zu setzen. Sehr wohl können sich Psychologie und Neurobiologie aber in der gleichsam neutralen Sprache der Informationsverarbeitung treffen und gegenseitig verständlich machen – dann nämlich, wenn sie Strukturen und Prozesse im Gehirn als informationsverarbeitende Systeme beschreiben und, mit anderen Worten, Erleben und Verhalten als Ergebnisse informationsverarbeitender Prozesse auffassen, die in Gehirnstrukturen realisiert sind.

Trotzdem gilt: Die Sprache der Informationsverarbeitung wird sicher nicht das letzte Wort in der Suche nach einer angemessenen Sprache zur Erklärung psychischer Prozesse und kognitiver Leistungen sein. Sie ist nichts weiter als der aussichtsreichste Erklärungsansatz, den wir derzeit haben – und zudem bisher der einzige, der die Chance bietet, Psychologie und Hirnforschung zusammenzuführen (Bermeitinger et al. 2016).

1.3 Allgemeine Psychologie und der Aufbau dieses Buches

Wie erwähnt, bilden die Teilgebiete der Allgemeinen Psychologie ein thematisch nicht sonderlich konsistentes Gesamtbild. Allzu häufig wird die Allgemeine Psychologie auf die in Prüfungsordnungen vorgegebenen klassischen Teildisziplinen reduziert, als da sind: *Wahrnehmung*, *Motivation*, *Emotion*, *Lernen*, *Gedächtnis* und *Denken*. Wenn sich aber unter dem Dach der Allgemeinen Psychologie all diejenigen Teilgebiete der Psychologie versammeln, die sich den Leitideen des Universalismus und Funktio-

nalismus verpflichtet fühlen, dann ist diese Liste nicht nur unvollständig, sondern in vielen Punkten auch zu undifferenziert.

Wir haben deshalb in diesem Lehrbuch versucht, dem Facettenreichtum der Allgemeinen Psychologie besser gerecht zu werden. Dies ist auch aus pragmatischen Gründen angezeigt: Will man beispielsweise ein Lehrbuchkapitel über die Teildisziplin *Wahrnehmung* verfassen, so sieht man sich schnell mit der Frage konfrontiert, ob die Phänomene der *Aufmerksamkeit* hierunter zu subsumieren sind oder nicht. Auf der einen Seite sind Aufmerksamkeitsthemen sicherlich innerhalb der Wahrnehmungspsychologie anzusiedeln, beispielsweise dann, wenn es um Verarbeitungsengpässe im visuellen Gesichtsfeld geht, die nur bei bestimmten Reizkonstellationen beobachtet werden. Auf der anderen Seite kann man aber auch Aufmerksamkeitsengpässe in Doppelaufgabenparadigmen beobachten, die eher auf Reaktionsauswahlprozessen beruhen. In diesem Fall wäre die Thematik Aufmerksamkeit eher einem Kapitel über Handlungsplanung und -ausführung zuzuordnen. Als ein Ausweg aus diesem Dilemma bietet sich die Möglichkeit an, Aufmerksamkeit als eigenständige Teildisziplin zu definieren.

Natürlich ließe sich aufgrund eines solchen Vorgehens die Anzahl möglicher Teilgebiete der Allgemeinen Psychologie ins Uferlose steigern. Wir haben uns deshalb bemüht, die Allgemeine Psychologie durch all die Teilgebiete zu repräsentieren, die sich in den verschiedenen nationalen und internationalen Foren formiert haben. Die daraus resultierende Auffächerung der Allgemeinen Psychologie ist sicher mit einer gewissen Willkür behaftet, wird ihr aber heute weitaus gerechter, als die einst in Prüfungsordnungen festgeschriebenen Teildisziplinen vermuten lassen.

Teil I des Buches besteht daher nicht nur aus einem Wahrnehmungskapitel, sondern man findet dort neben den Kapiteln zur *visuellen Informationsverarbeitung*, zur *auditiven Informationsverarbeitung* und zur *multisensorischen Informationsverarbeitung* gleichberechtigt die Kapitel *Aufmerksamkeit* und *Bewusstsein*. Während sich die Aufmerksamkeit schon seit geraumer Zeit als eigenständige Disziplin der Allgemeinen Psychologie etabliert hat, ist die Bewusstseinsthematik erst in den letzten Jahrzehnten mit dem Aufkommen der kognitiven Neurowissenschaften (wieder)entdeckt geworden. Wie wir alle wissen, war die Auseinandersetzung mit der Bewusstseinsthematik – insbesondere unter dem Einfluss des Behaviorismus – lange Zeit verpönt.

Ähnlich erging es „dem Willen", der zu Beginn des 20. Jahrhunderts ebenfalls ein durchaus akzeptierter Forschungsgegenstand war und der – nach einer langen Zeit der Vernachlässigung – wieder in den Blickpunkt des Forschungsinteresses gerückt ist. Daher werden in Teil II des Buches die klassischen Themen der *Motivation* und der *Emotion* um das Thema der *Volition* ergänzt. Teil III des Buches behandelt die Prozesse beim *Lernen* (*Assoziationsbildung, Konditionierung und implizites Lernen*), beim *Kategorisieren und Wissenserwerb* und vermittelt Kenntnisse über die *Gedächtniskonzeptionen und Wissensrepräsentationen*. Kurzum, Teil III behandelt die klassischen Themen des Lernens und des Gedächtnisses.

In den beiden dann folgenden Teilen geht es um Fähigkeiten, in denen sich der Mensch ganz offensichtlich und nachhaltig von anderen Lebewesen unterscheidet: In Teil IV, *Sprachproduktion und -verstehen*, werden zunächst die Prozesse der *Worterkennung und -produktion* und dann die der *Satz- und Textebene* erläutert. Sie machen deutlich, dass der uns so vertraute Umgang mit Sprache weitaus komplexer ist, als er sich zunächst darstellt. Eine vergleichbare Komplexität unterstellt man den Prozessen des *Denkens und Problemlösens*, die in Teil V des Buches dargestellt werden. Dieser Teil beinhaltet Kapitel zum *logischen Denken,* zum *Problemlösen* und zum *Urteilen und Entscheiden*.

Die Thematik von Teil VI, *Handlungsplanung und -ausführung*, hat innerhalb der Allgemeinen Psychologie seit jeher weniger Beachtung erfahren als die Funktionsgrundlagen von beispielsweise Wahrnehmung und Denken. Dieser Themenbereich hat aber in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen. Wir haben ihm daher fünf Kapitel gewidmet: Die Kapitel zu *Planung und exekutiver Kontrolle von Handlungen*, *motorischem Lernen* und *motorischer Kontrolle* werden durch Kapitel zu *Embodiment* und zum Zusammenhang von *Handlung und Wahrnehmung* ergänzt – beides Themen, die in den verschiedensten Bereichen der Allgemeinen Psychologie eine Rolle spielen.

Die in den letzten Jahren zu beobachtende Annäherung zwischen allgemeinpsychologischer und neurowissenschaftlicher Forschung wird dagegen nicht in einem gesonderten Kapitel behandelt, sondern in jedem Kapitel angemessen berücksichtigt. – In diesem Zusammenhang sind weitere Punkte in der formalen Gestaltung der Kapitel zu nennen, die die Funktion der Kapitel als Lehrbuchbeiträge herausstellen:

- Jedem Kapitel sind mehrere *Vertiefungsboxen* hinzugefügt worden, die zwar thematisch abgeschlossene Einheiten bilden und die für das Verständnis des Haupttextes verzichtbar sind, die aber über interessante Paradigmen, aktuelle Kontroversen, Anwendungsbeispiele und Demonstrationsversuche informieren.
- Um die Bedeutung allgemeinpsychologischer Erkenntnisse für die praktische Anwendung herauszuheben, ist jedes Kapitel mit einem Abschnitt *Anwendungsbeispiele* versehen worden.
- Jedes Kapitel wird mit sogenannten *Kernsätzen* abgeschlossen, die der Inhaltsangabe dienen. Weiter finden sich an den Kapitelenden Listen mit *Schlüsselbegriffen*, die besonders zentral für die jeweilige Thematik sind.
- Zur inhaltlichen Vertiefung der Kapitelthematik können die *weiterführenden Literaturangaben* genutzt werden.

Wir möchten hiermit ein Lehrbuch vorlegen, das nicht nur der Faszination unseres Fachgebiets gerecht wird, sondern das bei Leserinnen und Lesern auch ein Interesse an der wissenschaftlichen Weiterentwicklung unseres Faches weckt.

Literatur

Bermeitinger, C., Kaup, B., Kiesel, A., Koch, I., Kunde, W., Müsseler, J., Oberfeld-Twistel, D., Strobach, T., & Ulrich, R. (2016). Positionspapier zur Lage der Allgemeinen Psychologie. *Psychologische Rundschau*, *67*(3), S 175–207.

Roth, G., & Prinz, W. (Hrsg.). (1996). *Kopf-Arbeit. Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Schröger, E. (2004). Wilhelm Wundt (1832–1920) und die Anfänge der experimentellen Psychologie. Universität Leipzig, Institut für Allgemeine Psychologie. http://www.uni-leipzig.de/~psycho/wundt/viewer.htm

Wundt, W. (1900–1920). *Völkerpsychologie* (Vol. Bd. 1–10). Leipzig: Engelmann.

Wundt, W. (1874/1875). *Grundzüge der physiologischen Psychologie*. Leipzig: Engelmann.

Wahrnehmung und Aufmerksamkeit

Kapitel 2 **Visuelle Informationsverarbeitung – 13**
Jochen Müsseler

Kapitel 3 **Auditive Informationsverarbeitung – 51**
Alexandra Bendixen und Erich Schröger

Kapitel 4 **Multisensorische Informationsverarbeitung – 75**
Knut Drewing

Kapitel 5 **Aufmerksamkeit – 103**
Joseph Krummenacher und Hermann J. Müller

Kapitel 6 **Bewusstsein – 153**
Markus Kiefer

Teil I dieses Buches ist der Wahrnehmung gewidmet. Unseren alltagspsychologischen Eindrücken folgend ist das Wahrnehmen ein weitgehend unproblematischer psychischer Vorgang. „Wahrnehmen" geschieht mit uns ohne unser Zutun. Weil wir nicht wahrnehmen, wie wir wahrnehmen, erscheint uns der Wahrnehmungsprozess überaus simpel. Jedenfalls kann man diesen Eindruck im Vergleich zu anderen psychischen Funktionen (z. B. dem Denken) gewinnen, deren Schwierigkeiten uns eher zugänglich erscheinen (jedenfalls befinden wir uns in diesem Glauben!). Dieser subjektive Eindruck täuscht über die wahren Problemstellungen und Leistungen des Wahrnehmungsapparats hinweg.

In den ersten beiden Kapiteln dieses Teiles werden Fragen behandelt, wie und welche Reizinformationen der Umwelt vom Organismus aufgenommen werden und wie diese Informationen in Verbindung mit den vorhandenen Wissensbeständen des Wahrnehmenden den uns bekannten Wahrnehmungseindruck entstehen lassen. In ► Kap. 2 wird dabei auf den visuellen Informationsverarbeitungsprozess fokussiert, während in ► Kap. 3 vornehmlich die auditive Informationsverarbeitung analysiert wird. Außerdem wird in ► Kap. 4 der Frage nachgegangen, wie die Informationen verschiedener Sinnesmodalitäten zu phänomenal und funktional zusammenhängenden Einheiten integriert werden (intermodale Integration).

Eigentlich könnte man in diesen drei Kapiteln auch eine Beantwortung der Frage erwarten, wie man aus dem immensen Informationsangebot unserer Umwelt die handlungsrelevanten Objekte und Ereignisse auswählt, andere Informationen dagegen ignorieren kann – oder der Frage, wie und unter welchen Bedingungen Objekte und Ereignisse tatsächlich „bewusst" werden, andere dagegen nicht. Eine Erörterung dieser Fragen erschien uns so gewichtig, dass wir ihnen gesonderte Kapitel gewidmet haben: In ► Kap. 5 wird das Problem der Aufmerksamkeit behandelt, in ► Kap. 6 das des Bewusstseins.

Visuelle Informationsverarbeitung

Jochen Müsseler

2.1 Einleitung: Fragen der visuellen Wahrnehmungsforschung – 14

2.2 Das Auge und die visuellen Verarbeitungspfade – 16

2.2.1 Die Retina – 16

2.2.2 Die Bahn des Sehnervs zwischen Auge und Cortex – 17

2.2.3 Der primäre visuelle Cortex – 17

2.2.4 Weitere corticale Verarbeitungspfade – 17

2.3 Visuelle Informationsaufnahme und -verarbeitung – 19

2.3.1 Visuelle Sehschärfe und Sensitivität – 19

2.3.2 Farbwahrnehmung – 23

2.3.3 Raum- und Tiefenwahrnehmung – 24

2.3.4 Bewegungswahrnehmung – 27

2.3.5 Objektwahrnehmung – 30

2.4 Theorien der Wahrnehmung – 35

2.4.1 Die klassische Psychophysik – 35

2.4.2 Die Gestaltpsychologie – 38

2.4.3 Der wahrnehmungsökologische Ansatz von James J. Gibson – 39

2.4.4 Der computationale Ansatz von David Marr – 40

2.5 Anwendungsbeispiele – 42

2.6 Ausblick – 43

2.7 Weiterführende Informationen – 44

Literatur – 46

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_2

Im Blickfang

Eine Wahrnehmungstäuschung

Fixiert man kurze Zeit die Bildmitte des flimmernden Gitters (Abb. 2.1), werden in den hellgelben Schnittpunkten des Gitters dunkle Punkte sichtbar, die aber fortdauernd verschwinden bzw. ihre Position zu verlagern scheinen. In unserem subjektiven Empfinden variieren die Anzahl und Position der flimmernden Punkte ständig. Ein weitere überraschende Beobachtung zu dieser Täuschung: Das Flimmern der Punkte nimmt ab, wenn man den Kopf um 45° neigt!

Derartige Sinnestäuschungen wecken unser Interesse (und nicht nur das Interesse des Wahrnehmungsforschers!), weil sie uns eindrucksvoll verdeutlichen, dass unsere Wahrnehmungswelt keineswegs eine 1:1-Abbildung der Realität ist. Diese Erkenntnis ist in gleichem Maße faszinierend wie beunruhigend, schließt sie doch ein, dass der Wahrnehmungsinhalt auch sonst von der Realität abweichen könnte, ohne dass wir uns darüber im Klaren wären. Schlimmer noch, man muss aus der Selbstbeobachtung, dass die Anzahl der schwarzen Punkte im flimmernden Gitter mit jedem neuen Versuch variiert, schließen, dass der Zusammenhang zwischen Realität und subjektiver Wahrnehmungswelt nicht durch eine einfache – und insbesondere nicht konstante – Transformationsregel determiniert ist. Wahrnehmen ist also nicht ein passives Aufnehmen von Information nach festgelegten Regeln, vielmehr können kurzfristige Zustände des Systems unsere momentanen Wahrnehmungsinhalte bestimmen.

Für den Wahrnehmungsforscher sind solche Sinnestäuschungen nur Mittel zum Zweck, und er bedient sich ihrer auch nur zum Teil. Sein vorrangiges Ziel ist die Analyse *aller* Verarbeitungsprozesse, die darüber aufklären, wie aus der reichhaltigen Information unserer Umwelt die Wahrnehmung entsteht, die schließlich unser Empfinden und Handeln leitet.

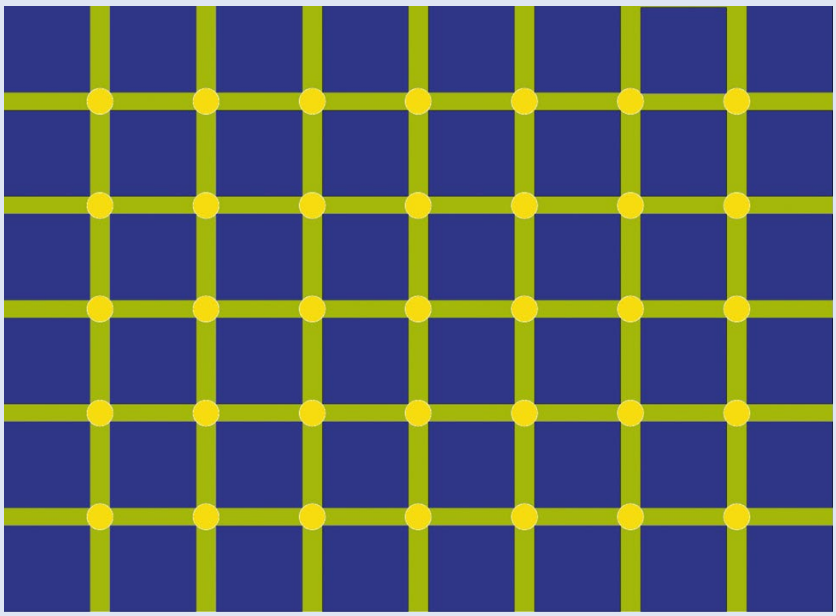


Abb. 2.1 Das flimmernde Gitter (Scintillating Grid). (Nach Schrauf et al. 1997)

2.1 Einleitung: Fragen der visuellen Wahrnehmungsforschung

Die Wissenschaft von der Wahrnehmung versucht zu ergründen, wie die Information unserer distalen Umwelt aufgenommen und verarbeitet wird, wie aus ihr die Wahrnehmung entsteht, die unser Erleben und Verhalten maßgeblich begründet. Oft findet man sogar die Vorstellung, dass alle menschlichen Erkenntnisse und Einsichten auf sensorischen Erfahrungen beruhen, also durch Wahrnehmungsprozesse erst zustande kommen. Es verwundert daher nicht, dass der Untersuchungsgegenstand „Wahrnehmung" in der modernen Psychologie von jeher eine Sonderstellung einnahm und das Wahrnehmen als die Grundfunktion aller psychischen Funktionen angesehen wurde und zum Teil auch noch so betrachtet wird.

Diese Sonderstellung der Wahrnehmung, insbesondere auch der visuellen Wahrnehmungsmodalität, wird durch den trügerischen Eindruck verstärkt, dass sich Wahrnehmung ohne unser Zutun – also weitgehend passiv – vollzieht. Oft wird visuelles Wahrnehmen mechanistisch aufgefasst und mit den Vorgängen in einer Kamera verglichen, die ja auch ein Abbild der Umwelt zu erzeugen vermag. Es hat eine lange Tradition, das Auge als Kamera zu verstehen. René Descartes war wohl Anfang des 17. Jahrhunderts einer der ersten Wissenschaftler, der am herausoperierten Rinderauge das Abbild unserer Umwelt auf der Netzhaut systematisch untersuchte (Abb. 2.2). Tatsächlich ist die Kameraanalogie bis zu einem gewissen Punkt durchaus zutreffend: Die veränderliche Brennweite der Linse, die Blende bzw. die Pupille und der belichtungsempfindliche Film bzw. die Netzhaut unterscheiden sich zwar in ihrem Aufbau, erfüllen aber ähnliche Funktionen. In beiden Fällen entsteht ein seiten- und höhenverkehrtes Abbild. Die hauptsächliche Wahrnehmungsleistung findet aber erst im Gehirn statt, in den sich anschließenden Analyse- und Verarbeitungsprozessen. Das, was wir als Wahrnehmen bezeichnen,

ist in ◘ Abb. 2.2 daher insbesondere durch den Menschenkopf repräsentiert, der die Abbilder auf der Netzhaut beobachtet. Er repräsentiert den vom Gehirn zu leistenden Wahrnehmungsprozess – erst er weiß, die auf dem Kopf stehende Netzhautinformation „richtig" zu interpretieren (▶ Abschn. 2.3.3).

Nicht die Projektion der Umwelt auf die Netzhaut, sondern die sich daran anschließenden Prozesse kennzeichnen den eigentlichen Wahrnehmungsvorgang. Das Auge versorgt uns mit den sensorischen Rohmaterialien; Wahrnehmen heißt vor allem aber auch, diese Rohmaterialien *zu verarbeiten*. Dabei sind zunächst einmal die Aufnahme und die Beschaffenheit der Rohdaten wichtig:

- Wie sehen die elementaren visuellen Encodierungsprozesse aus, was sind die Basismerkmale des Wahrnehmungsvorgangs?
- Wie werden die Orientierungen einfacher Linien, Winkel und Farben encodiert?

Dies sind Beispiele für Fragen, die in den folgenden Abschnitten eingehender erläutert werden und die die „frühe" visuelle Verarbeitung (*early vision*) kennzeichnen. In dieser Phase der frühen visuellen Verarbeitung ist der Anteil an reizgetriebenen Mechanismen relativ hoch. Unter **Bottom-up-Verarbeitung** versteht man die durch einen Reiz ausgelösten und dann weitgehend automatisch ablaufenden Prozesse, die von den mehr kognitiven Funktionen (z. B. Gedächtnis, Lernen) wenig beeinflussbar sind. Mit zunehmender Verarbeitungstiefe kann man allerdings davon ausgehen, dass deren Anteil am Wahrnehmungsprozess (**Top-down-Verarbeitung**) steigt. Obwohl es auch theoretische Ansätze gibt, die eine erste – vom kognitiven Einfluss vollkommen unabhängige – visuelle Verarbeitungsstufe annehmen (z. B. Pylyshyn 1999), so ist die vorherrschende Meinung doch eher die, dass der Einfluss des Kognitiven – wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß – auf nahezu allen Verarbeitungsstufen nachweisbar ist. Zumindest erscheint eine strikte Trennung zwischen frühen kognitiv unbeeinflussten und späteren kognitiv beeinflussten visuellen Wahrnehmungsmechanismen nicht angezeigt (z. B. Müsseler 1999a).

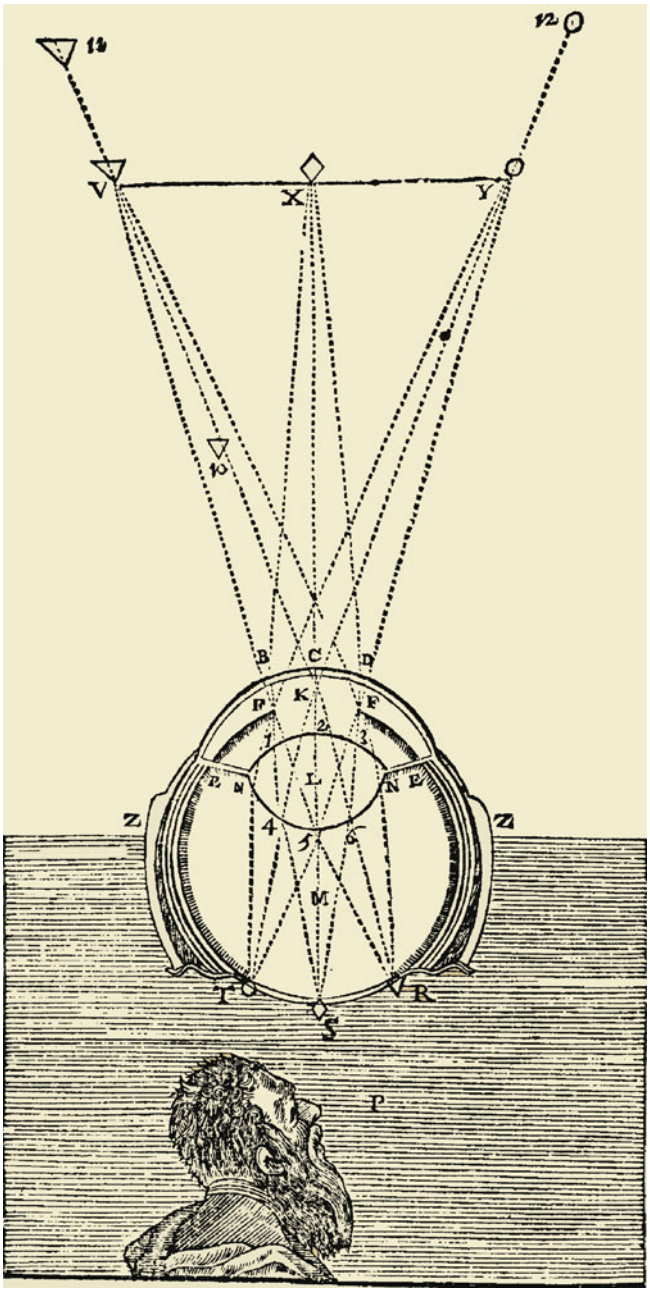
Ohne die kognitive Komponente wären in jedem Fall die folgenden, eher interpretativen Leistungen des Wahrnehmungsprozesses nicht zu erbringen:

- Wie werden Objekte voneinander abgegrenzt?
- Wie werden Objekte identifiziert und kategorisiert?

Dies sind Probleme der Objekterkennung und der Organisation in der Wahrnehmung. Eine Beantwortung dieser Fragen verdeutlicht, dass Wahrnehmen ohne den Bezug zu den bestehenden Wissensbeständen des Wahrnehmenden nicht auskommen kann. Wahrnehmen ist also auch immer eine Interpretation der Rohmaterialien. Daneben gibt es Fragen, die – je nachdem, welchen Ausschnitt man fokussiert – sowohl eine „frühe" als auch eine „späte" Komponente aufweisen:

- Wie werden räumliche Distanzen und Tiefe wahrgenommen?
- Wie vollzieht sich die Wahrnehmung von Bewegung?

Im Folgenden wird deutlich werden, dass Wahrnehmung nicht ein passives Aufnehmen von Information ist, sondern sich aktiv



◘ **Abb. 2.2** Historische Skizze zu Descartes' Beobachtungen der Abbildung unserer Umwelt auf der Netzhaut eines Rinderauges

vollzieht. Zwar senden wir keinen „Wahrnehmungsstrahl" wie die Fledermaus aus, die mittels Echoortung ihre Umwelt räumlich „abtastet". Dennoch erscheint die Analogie des Wahrnehmungsstrahles, von der im Übrigen der griechische Philosoph Platon überzeugt war, eher geeignet, den Wahrnehmungsprozess zu charakterisieren als die Vorstellung einer rein rezeptiv angelegten Informationsaufnahme und -verarbeitung.

Im vorliegenden Kapitel können nicht der gesamte Werdegang und Wissensstand der Wahrnehmungsforschung wiedergegeben werden – hier sei auf die speziell für diesen Zweck geschriebenen Wahrnehmungslehr- und -handbücher verwiesen (z. B. Goldstein 2015; Palmer 1999). Wir beschränken uns hier auf die Grundprobleme der Wahrnehmung und auf die zu diesem Zweck entwickelten

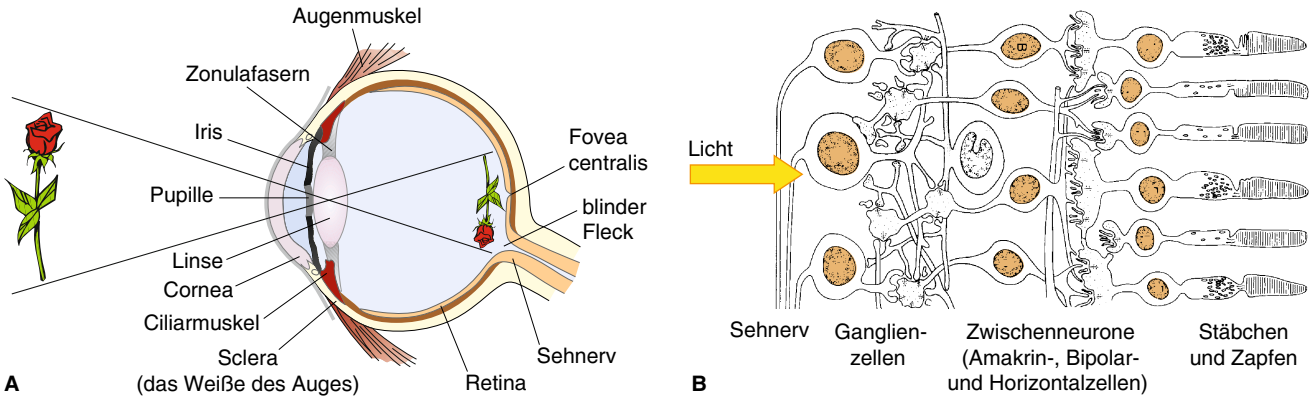


Abb. 2.3 Das Auge (**A**) und der Aufbau der Retina (**B**). Man beachte, dass das Licht zunächst die (durchsichtige) Ganglien- und Zwischenneuronenschicht der Retina durchdringt, bevor es auf die lichtsensitive Schicht der Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) fällt. (Nach Dowling und Boycott 1966)

grundlegenden Wahrnehmungstheorien. Auch kann dieses Kapitel nur äußerst unzureichend über die Vielzahl und Vielfältigkeit der bekannten Wahrnehmungsillusionen informieren (einen Eindruck darüber liefern entsprechende Sammelbände, z. B. Ditzinger 2006; Rodgers 1999; Seckel 2014). Dies ist insbesondere deshalb kritisch, weil in der Wahrnehmungsforschung – eher noch als in anderen Teildisziplinen der Allgemeinen Psychologie – das rein phänomenorientierte Vorgehen weit verbreitet ist. Obwohl dieses Vorgehen aus wissenschaftstheoretischen Überlegungen keineswegs dem theoriegeleiteten Vorgehen vorzuziehen ist, existieren dennoch eine Vielzahl lokaler Erklärungsansätze, die sich lediglich auf eine Erklärung einer Illusion oder einer Gruppe von Illusionen beschränken. Wir behandeln hier lediglich eine aktuelle Auswahl derartiger Phänomene und Erklärungsansätze; weitere, besonders aktuelle Phänomene, z. B. das Phänomen der Maskierung (Metakontrast), des Aufmerksamkeitsblinzelns (*attentional blink*), der Wiederholungsblindheit (*repetition blindness*) oder der Veränderungsblindheit (*change blindness*), finden sich in ▶ Kap. 5 und 6.

2.2 Das Auge und die visuellen Verarbeitungspfade

Wahrnehmungspsychologische Fragestellungen werden heutzutage eng mit Fragestellungen der Sinnes- und Neurophysiologie verknüpft. Wir wissen heute, dass nahezu die Hälfte des Neocortex durch visuelle Reizung stimulierbar ist und dass diese Areale zumindest mittelbar am Wahrnehmungsprozess beteiligt sind. Dieser Abschnitt gibt deshalb zunächst einen groben Überblick über die Neurophysiologie des Sehens, den daraus abzuleitenden grundlegenden sensorischen Verarbeitungsprinzipien der Retina und den nachfolgenden (corticalen) Verarbeitungspfaden. Kenntnisse der neurophysiologischen Grundlagen werden dabei vorausgesetzt (z. B. Bear et al. 2009).

2.2.1 Die Retina

Wie in ▶ Abschn. 2.1 angedeutet, gleicht das Auge in seinen Funktionsmerkmalen einer Kamera. Einfache Störungen (z. B. Weit- und Kurzsichtigkeit) können mit einfachen physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Lichtbrechung erklärt und korrigiert werden Abb. 2.3A. Diese Vergleichbarkeit hat natürlich aufgrund der unterschiedlichen Hardwarerealisierungen der optischen Apparate ihre Grenzen, sie hört aber spätestens bei der Projektionsfläche auf: Die Retina (Abb. 2.3B) ist keineswegs eine dem analogen Film oder dem digitalen Bildsensor ähnliche homogene, lichtempfindliche Schicht. Die im gesunden Auge (Abb. 2.3A) angesiedelten ca. 126 Mio. Photorezeptoren sind unterschiedlich licht- und farbempfindlich. Weil die 120 Mio. Stäbchen (*rods*) eine deutlich höhere Lichtempfindlichkeit aufweisen als die 6 Mio. Zapfen (*cones*), nehmen wir beispielsweise in der Dunkelheit nur die *achromatischen* Farben Weiß, Grau oder Schwarz wahr („Nachts sind alle Katzen grau!"; skotopisches Sehen), während am helllichten Tag das *chromatische* Farbsehen der Zapfen mit den Farben Blau, Rot, Grün und Gelb vorherrscht (photopisches Sehen; zum Farbensehen s. auch ▶ Abschn. 2.3.2). Außerdem ist die Verteilung der Stäbchen und Zapfen im Gesichtsfeld sehr unterschiedlich. Die Zapfendichte ist in der Fovea centralis – einem Gebiet, das nur etwa 2° des gesamten Gesichtsfeldes ausmacht – am höchsten. Sie nimmt mit zunehmender Exzentrizität vom Fixationspunkt deutlich ab, und die relative Dichte der Stäbchen steigt. Stäbchen sind zwar durch eine bessere Lichtsensitivität ausgewiesen, das Zapfensystem übermittelt aber neben dem Farbensehen eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung (Überblick in Skavenski 1990).

Zum Teil sind die letztgenannten Befunde auch dadurch bedingt, dass bereits auf der Retina erste verschiedenartige neuronale Verschaltungen zwischen den Stäbchen bzw. Zapfen einerseits und den Zwischenneuronen und Ganglienzellen andererseits wirksam werden. Dementsprechend überlappen sich zum einen die **rezeptiven Felder** der Ganglienzellen, zum anderen findet man in den aus dem Auge austretenden Zellen auch eine erste funktionale Spezialisierung in *M-Typ*-(magnozellulär-) und *P-Typ*-(parvozellulär-)ähnliche Zellen. Die M-Typ-ähnlichen Ganglienzellen haben vergleichsweise große rezeptive Felder und antworten auf grobe achromatische Reizung mit einer schnellen transienten Aktivierung. Die P-Typ-ähnlichen Ganglienzellen haben dagegen kleine rezeptive Felder und antworten auf eine fein achromatische und auf chromatische Reizung mit einer langsamen tonischen Aktivierung. Diese prinzipielle Zellunterscheidung wird bis zu den corticalen Projektionsarealen beibehalten (Überblick in Bear et al. 2009; Kandel 1996).

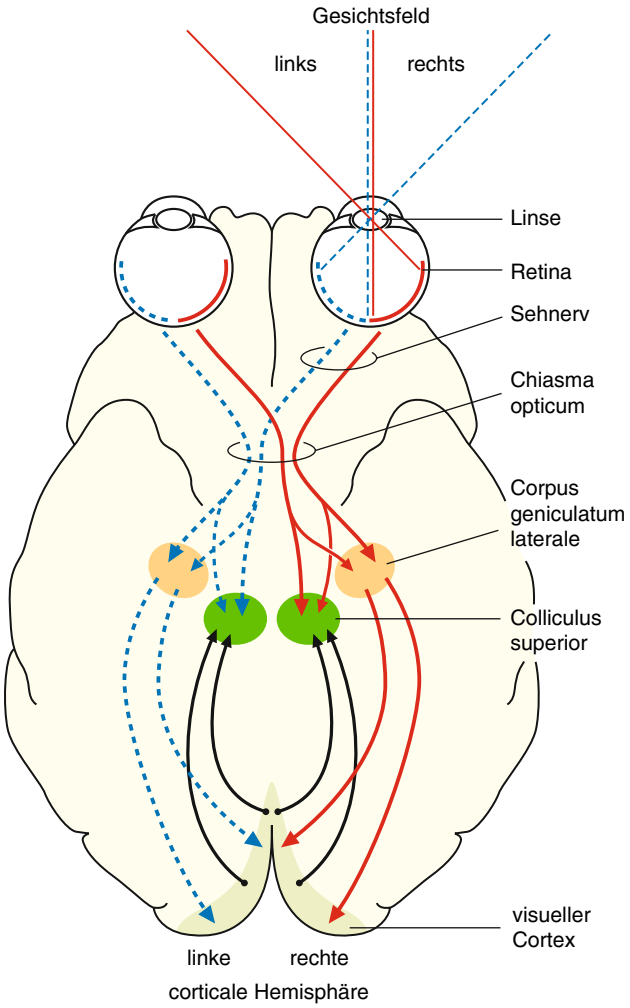
2.2.2 Die Bahn des Sehnervs zwischen Auge und Cortex

Während die Sehbahnen der temporalen Retinahälften nach dem Austritt aus dem Auge ungekreuzt verlaufen, kreuzen die jeweils nasalen Retinahälften im Chiasma opticum die Hemisphäre, sodass das jeweilige Gesichtsfeld kontralateral projiziert wird (◘ Abb. 2.4). Bevor allerdings corticale Regionen erreicht werden, ziehen etwa 10 % des Sehnervs in den Colliculus superior (CS) – eine Region, die maßgeblich an der Steuerung von Blickbewegungen beteiligt ist. Die übrigen Anteile des Sehnervs entsenden hauptsächlich Fasern zum Corpus geniculatum laterale (CGL), einer Struktur unterhalb des eigentlichen Thalamus, die sich in zwei retinotop organisierte magno- und vier parvozelluläre Zellschichten gliedert. Eine selektive Zerstörung der magnozellulären Schichten führt beim Affen zu starken Einbußen in der Bewegungswahrnehmung, während parvozelluläre Läsionen die Wahrnehmung von Farbe, feinen Texturen, Formen und räumlicher Tiefe verhindern (Schiller et al. 1990).

2.2.3 Der primäre visuelle Cortex

Die Neurone aller Schichten des CGL projizieren zum visuellen Cortex im Okzipitallappen. Der primäre visuelle Cortex wird aufgrund seines gestreiften Aufbaus auch als Area striata (oder als Brodmann-Areal 17 oder einfach als V1) bezeichnet. Er besteht aus neun Schichten (1 bis 6, wobei die vierte Schicht in 4A, 4B, 4Cα und 4Cβ unterteilt ist). Wie im CGL liegt in V1 eine räumlich retinotope Organisation der Zellen vor, wobei allerdings den fovealen Regionen weit mehr Platz eingeräumt wird als den peripheren Regionen (**corticaler Vergrößerungsfaktor**; Cowey und Rolls 1974; Drasdo 1977). Die magnozellulären CGL-Schichten projizieren größtenteils zur Schicht 4Cα, die wiederum Fasern zur Schicht 4B entsendet. Auch die *einfachen Zellen* der Schicht 4B sind zum Teil bewegungssensitiv, reagieren aber insbesondere auf Orientierung. Die parvozellulären Schichten des CGL entsenden Fasern zur Schicht 4Cβ, die wiederum die Schichten 2 und 3 des primären visuellen Cortex innervieren (◘ Abb. 2.5). Die dort zu findenden *komplexen Zellen* des V1, insbesondere die Zellen der parvozellulären Blob-Bahn (so benannt nach ihrer äußeren Erscheinungsform nach einer Einfärbung; *blob* = „Tropfen"), sind farbsensitiv. In den ebenfalls komplexen Zellen der parvozellulären Interblob-Bahnen finden sich dagegen richtungs- und formsensitive Zellen für Reize einer bestimmten Orientierung. Sie sind weniger positionsrestriktiv als die einfachen Zellen, d. h., ihr Zelltuning ist relativ unabhängig davon, wo der Reiz das rezeptive Feld durchstreicht. – Neben den einfachen und komplexen Zellen sind in V1 außerdem die *endinhibierten Zellen* (hyperkomplexen Zellen) isoliert worden, die sensitiv auf sich bewegende Ecken und Winkel einer bestimmten Länge reagieren.

Diese äußerst grobe Beschreibung der Zellen in V1 wird bei Weitem nicht der anzunehmenden Verarbeitungskomplexität gerecht, die dieses Areal leistet. Man kann jedoch festhalten: Je weiter man sich von der Retina entfernt, desto spezialisierter reagieren die einzelnen Neurone auf spezifische Reizeigenschaften. Seit Hubel und Wiesels (z. B. 1959, 1968) bahnbrechenden Einzelzellableitungen an Katzen und Affen in diesem Areal geht man deshalb davon aus, dass die Zellen von V1 als erste Merkmalsdetektoren fungieren.



◘ **Abb. 2.4** Die Bahn des Sehnervs zwischen Auge und primärem visuellen Cortex. Dabei kreuzen die Neuronenbahnen aus den nasalen Retinahälften im Chiasma opticum die Hemisphäre, sodass das jeweilige Gesichtsfeld kontralateral projiziert wird. Die Information des linken Gesichtsfeldes wird in die rechte corticale Hemisphäre (durchgezogene Linie) projiziert und umgekehrt (gestrichelte Linie)

2.2.4 Weitere corticale Verarbeitungspfade

Die weitere Verarbeitung im extrastriaten visuellen Cortex verläuft durch die Areale V2 bis V5, wobei letzteres auch als mediotemporales Areal (MT) bezeichnet wird. Die Areale sind feiner differenzierbar (z. B. in V3a und V5a; z. B. Felleman und Van Essen 1991), wichtig ist aber der Befund, dass der Verarbeitungsfluss nicht – wie man früher annahm – strikt seriell verläuft. Spätestens ab V3 bzw. V4 teilt sich der parvo- und magnozelluläre visuelle Informationsfluss in einen temporalen (ventralen) und einen parietalen (dorsalen) Verarbeitungspfad (◘ Abb. 2.5).

Diese unterschiedlichen Verarbeitungspfade wurden vor allem von Ungerleider und Mishkin (Mishkin et al. 1983; Unger-

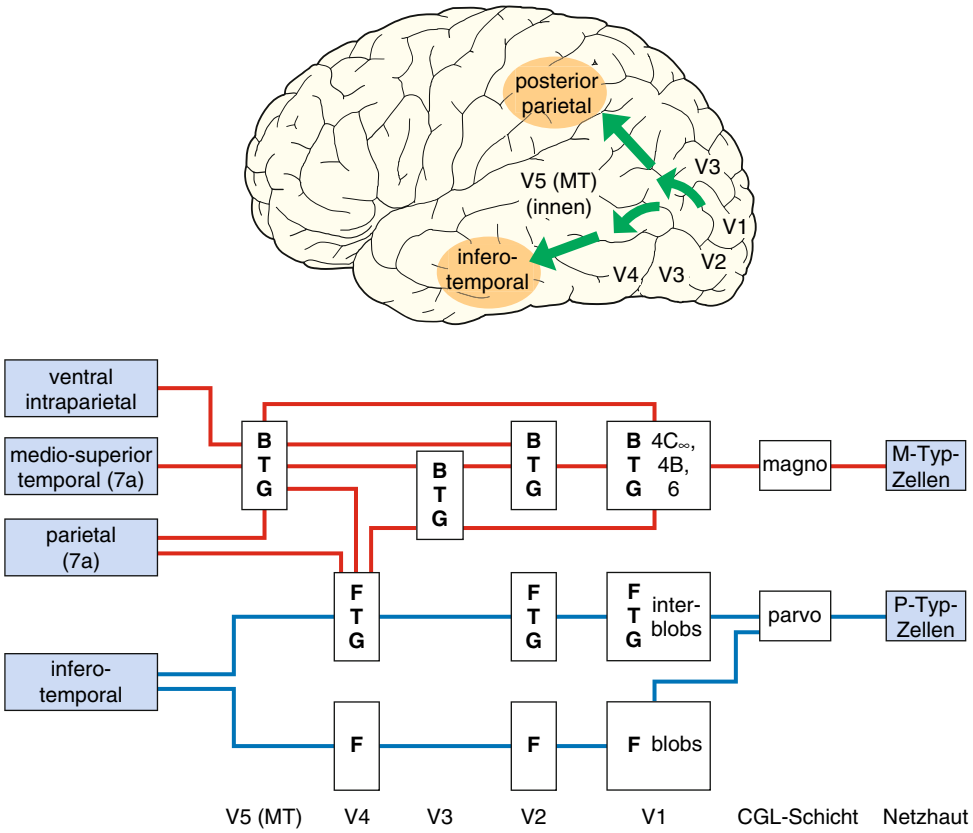


Abb. 2.5 Der temporale und parietale Verarbeitungspfad des visuellen Systems mit den dort hauptsächlich übermittelten Reizeigenschaften. *F* = Farbe, *T* = räumliche Tiefe, *G* = Gestalt, *B* = Bewegung. (Nach DeYoe und Van Essen 1988; Kandel 1996)

leider und Mishkin 1982) beschrieben, wobei sie dem *temporalen Pfad* (dem Was-Pfad) die Funktion der Objekterkennung und dem *parietalen Pfad* (dem Wo-Pfad) die Funktion der Objektlokalisation zuschrieben. Mittlerweile stellt sich der Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsfunktionen und den beteiligten visuellen Arealen deutlich differenzierter dar (einen Eindruck vermittelt Abb. 2.5). Außerdem ist die Was-Wo-Unterscheidung auch zugunsten einer Was-Wie-Unterscheidung diskutiert worden. Während Ungerleider und Mishkin ihre Konzeption von der Frage her entwickelten, *welche* Information in den beiden Pfaden verarbeitet wird, ist die Leitfrage von Milner und Goodale (1995), *wozu* die Information in den beiden Strängen dient. Ähnlich wie bei Ungerleider und Mishkin (1982) findet im Was-Pfad die neuronale Codierung von Objektmerkmalen statt. Die Neurone im inferotemporalen Cortex reagieren besonders auf komplexe visuelle Reize wie Hände oder Gesichter, aber auch Farbe (insbesondere in V4; Zeki et al. 1991) wird vorrangig im ventralen Pfad verarbeitet. Nach Milner und Goodale (1995) ist dieser Pfad daher vor allem für die bewusste Objekterkennung zuständig. Inwieweit bewusste Wahrnehmungsvorgänge dem ventralen Verarbeitungspfad zuzuschreiben sind, wird in ▶ Kap. 6 eingehender erörtert (dort findet sich auch eine Darstellung von verschiedenen Wahrnehmungsbeeinträchtigungen nach pathologisch bedingten Läsionen der hier besprochenen Areale; z. B. Blindsicht, visuelle Agnosien, visuospatialer Neglect).

Gegenüber dem Was-Pfad wird der dorsale Pfad für die (nicht notwendigerweise bewusste) visuelle Steuerung von Handlungen verantwortlich gemacht. Im Gegensatz zum ventralen System stellt der dorsale Pfad sozusagen online diejenigen visuellen Informationen zur Verfügung, die für die visuelle Kontrolle von Handlungen benötigt werden. Das betrifft sowohl die räumliche Position von Objekten als auch Informationen über die Richtung und Geschwindigkeit von bewegten Objekten (insbesondere im MT bzw. in V5; Zeki et al. 1991). Es wird also angenommen, dass die Analyse der Objektmerkmale, die für die Identifikation und das Wiedererkennen von Objekten notwendig ist, unabhängig von der Analyse derjenigen Objektmerkmale stattfindet, die es einer Person erlauben, ein Objekt zu greifen. Dieser Ansatz ist allerdings nicht unumstritten. So gibt es beispielsweise Befunde, die schon frühe Interaktionen zwischen dem dorsalen und dem ventralen Pfad belegen (z. B. Merigan und Maunsell 1993; Van Essen und DeYoe 1995). Folgt man Rossetti und Pisella (2002), repräsentieren die beiden Verarbeitungspfade ein sensomotorisches und ein kognitiv-sensorisches System, die je nach Stimulus- und Responsetyp und deren zeitlicher Verkopplung zum Einsatz kommen. Festzuhalten bleibt, dass die vermuteten unterschiedlichen Funktionen der beiden Verarbeitungspfade und damit der Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Handlung in den letzten Jahrzehnten zu einem enormen Anstieg auch psychophysischer Experimente geführt haben. Die Diskussion darüber erscheint keineswegs abgeschlossen.

Fassen wir zusammen: Mit zunehmender (corticaler) Verarbeitung findet man in den entsprechenden Hirnregionen eine zunehmende funktionale Neuronenspezialisierung (▶ Zur Vertiefung 2.1). Diese geht umgekehrt proportional einher mit der Größe der zugehörigen rezeptiven Felder. Die Ganglienzellen der Retina antworten auf eine unspezifische Lichtreizung innerhalb einer eng umgrenzten Netzhautregion, während die Zellen in V1 bei größer werdenden rezeptiven Feldern z. B. nur auf Lichtstreifen einer bestimmten Orientierung antworten. Im inferotempo-

Zur Vertiefung 2.1

Bildgebende Verfahren zur Untersuchung von Hirnprozessen

Insbesondere in den letzten Jahrzehnten sind **bildgebende Verfahren** entwickelt worden, die es ermöglichen, am wachen Menschen neurale Prozesse nahezu nichtinvasiv zu erfassen. So können Teilaspekte der Wahrnehmung und anderer kognitiver Funktionen mit den corticalen Regionen in Verbindung gebracht werden, die bei der Darbietung von Reizen oder beim Lösen bestimmter Aufgaben aktiv sind (detaillierte Beschreibung der Verfahren z. B. in Jäncke 2005).

Die *Positronenemissionstomografie* (PET) basiert auf der Messung von radioaktiven Markersubstanzen, die zuvor in den Blutkreislauf injiziert wurden und Positronen emittieren. Die radioaktiv markierten Stoffwechselsubstanzen werden verstärkt in metabolisch aktiven Zellen verbraucht, also den Zellen, die an dem jeweiligen kognitiven Prozess beteiligt sind. Ein Detektor, der in einer Vorrichtung drehbar um den Kopf geführt wird, zählt die Photonen, die bei der Annihilation von Positronen mit Elektronen im Körper emittiert werden, sodass der Computer die Orte stärkster und schwächster Strahlung bestimmen kann. Die zeitliche Auflösung beim PET liegt allerdings nur im Bereich von 10 s, die räumliche Auflösung erlaubt dagegen die Lokalisation mit Millimeterpräzision.

Bei der *funktionellen Kernspintomografie* (bzw. funktionellen Magnetresonanztomografie, fMRT; *functional magnetic resonance imaging*, fMRI) werden nicht die Veränderungen radioaktiver Strahlungen, sondern magnetischer Felder erfasst. Dazu werden Wasserstoffatome durch ein starkes statisches Magnetfeld parallel zu den Feldlinien des Magnetfeldes ausgerichtet. Daneben wird ein kleines, radiofrequentes Feld induziert. Wenn die Neurone aktiv werden, ändert sich der Sauerstoffverbrauch im Bluthämoglobin, was sich wiederum auf die Eigenschaften des magnetischen Feldes auswirkt. Diese Veränderungen können mithilfe der fMRI-Technik gemessen werden. Aufgrund der Trägheit des Wechsels im Blutfluss ist allerdings die zeitliche Auflösungsfähigkeit auf ungefähr 1 s beschränkt. Allerdings lässt sich dieser Wert aufgrund von autoregressiven Modellierungen (und gleichzeitiger Gültigkeit der entsprechenden Modellierungsannahmen) erheblich verbessern (z. B. Goebel et al. 2003). Die hohe räumliche Auflösung im Millimeterbereich wird meist durch eine zusätzliche Magnetresonanztomografie (MRT; *magnet resonance imaging*, MRI) sichergestellt, wodurch individuelle anatomische Lageinformationen berücksichtigt werden.

Methoden, die auf jeden Fall eine hinreichend gute zeitliche Auflösung gewährleisten, um die in kognitiven Prozessen ablaufenden physiologischen Aktivitäten im Millisekundenbereich zu erfassen, sind das *ereigniskorrelierte Potenzial* (EKP; *event-related potential*, ERP) und die *Magnetencephalografie* (MEG). Das EKP erfasst alle elektrocorticalen Potenziale, die vor, während und nach einem sensorischen, motorischen oder psychischen Reiz- oder Reaktionsereignis im Elektroencephalogramm (EEG) auf der Kopfoberfläche messbar sind. Das EKP stellt die summierte Aktivität dieser elektrischen Prozesse dar. Die wesentliche Annahme bei der EKP-Messung liegt darin, dass es geordnete Aktivierungsmuster gibt, die mit psychischen Vorgängen eng zusammenhängen. Die Muster werden nach ihrer Ausrichtung, negativ oder positiv, und ihrem zeitlichen Auftreten klassifiziert. Zum Beispiel wird eine Positivierung des Potenzials im Bereich von 95–140 ms nach der Reizdarbietung als P1 bezeichnet, die mit frühen reizbezogenen Verarbeitungsprozessen in Verbindung gebracht wird.

Allerdings verfügt das EKP neben der guten zeitlichen über eine schlechte räumliche Auflösung. Dieses Manko hat die MEG nicht, wenngleich die hohe räumliche Auflösungsfähigkeit der MEG mit zunehmender Tiefe etwas abnimmt. Auch die MEG nutzt die Tatsache aus, dass elektrische Ströme im Gehirn magnetische Felder erzeugen. Diese Felder kann man mithilfe sogenannter SQUIDs (*superconducting quantum interference devices*) messen. Allerdings sind die durch die magnetischen Felder verursachten Ausschläge extrem klein, und der Messort muss entsprechend aufwendig und kostenintensiv abgeschirmt werden.

Zusammenfassend weisen PET und fMRI eine hohe räumliche Auflösung auf, was allerdings zu Lasten der zeitlichen Auflösung geht. In zeitlicher Hinsicht (allerdings nicht in räumlicher) ist die Ableitung des EKP informativer. Wenn man in seinen Fragestellungen sowohl auf eine hohe räumliche als auch auf eine hohe zeitliche Auflösung angewiesen ist, ist zurzeit die MEG das Maß der Dinge.

Neben den bisher genannten reaktiven Verfahren zur Messung von Gehirnaktivitäten, die nach der Präsentation sensorischer Reizinformation oder bei der Bearbeitung kognitiver Aufgaben auftreten, kommt in den letzten Jahrzehnten vermehrt auch ein Verfahren zum Einsatz, das transkraniell – also durch den Schädel hindurch – von außen auf die neuronalen Aktionspotenziale einwirkt. Mithilfe von elektrisch erzeugten Magnetfeldern gelingt es, gezielt und fast schmerzlos durch die Haut und den Knochen hindurch die Nervenzellen einzelner Hirngebiete zu stimulieren. Dieses Verfahren wird als *Transkranielle Magnetstimulation* (TMS) bezeichnet. Dabei wird unterschieden zwischen der Stimulation durch einzelne Magnetfeldpulse und der Stimulation durch Impulssalven (von bis zu 100 Hz), der sogenannten *repetitiven Transkraniellen Magnetstimulation* (rTMS). Durch Magnetstimulation über dem motorischen Cortex kann man beispielsweise Muskelzuckungen auslösen. Über dem visuellen Cortex kann eine derartige Stimulation zu Phosphenen (Lichterscheinungen), aber auch zu Skotomen (Wahrnehmungsausfällen innerhalb des Gesichtsfeldes) führen. Eine rTMS von Hirnregionen, die für Sprache zuständig sind, kann für einige Minuten eine Verschlechterung der sprachlichen Ausdrucksfähigkeit bewirken.

ralen Cortex präferieren die Zellen sogar höchst komplexe Reizeigenschaften (z. B. Gesichter), die relativ unabhängig vom Ort der retinalen Stimulation sind (z. B. Tanaka 1996). Eine Folge dieser zunehmenden Spezialisierung ist eine verteilte Codierung von Reizeigenschaften in verschiedenen Hirnregionen. Wir werden darauf zurückkommen (▶ Abschn. 2.3.5) und ein damit verbundenes Problem, das Bindungsproblem (*binding problem*), erörtern.

2.3 Visuelle Informationsaufnahme und -verarbeitung

In diesem Abschnitt geht es darum, die Wahrnehmungsleistungen zu erörtern, zu interpretieren und diese im Zusammenhang mit neurophysiologischen Befunden zu diskutieren. Dabei stehen die psychophysischen Leistungen des Wahrnehmungsapparats im Vordergrund, also die Leistungen, die durch Einsatz entsprechend objektivierbarer Methoden validiert worden sind (▶ Zur Vertiefung 2.2 und ▶ Zur Vertiefung 2.4).

2.3.1 Visuelle Sehschärfe und Sensitivität

Die räumliche Auflösungsfähigkeit des visuellen Systems gilt als recht hoch. Sie steigt von 5 min arc bei 10° retinaler Exzentrizität bis über 1 min arc in der Fovea (z. B. Badcock und Westheimer 1985; Westheimer 1981). Die Abhängigkeit der Sehschärfe vom retinalen Ort der Reizung kann man sich leicht selbst klarmachen, indem man einen Buchstaben in einer Zeilenmitte dieses Buches fixiert und bei fixiertem Blick die Buchstaben am

Zur Vertiefung 2.2

Psychophysische Methoden

Durch Gustav Theodor Fechner (1860) wurden in der klassischen Psychophysik Messmethoden etabliert, die zur Erfassung psychologischer Phänomene dienten. Die für den Wahrnehmungspsychologen wichtigsten Verfahren sind bis heute die *Grenzmethode*, die *Konstanzmethode* und die *Herstellungsmethode*. Daneben existieren weitere Verfahren, die aber meist auf einer Variante oder einer Kombination dieser Methoden beruhen. Die grundlegenden Messmethoden werden im Folgenden anhand einer absoluten **Wahrnehmungsschwelle** („Ab welcher Lichtintensität ist ein Reiz überhaupt wahrnehmbar?") und der zugehörigen Unterschiedsschwelle (die Schwelle des eben merklichen Unterschieds, „Ab welchem Intensitätsunterschied werden zwei Lichtreize als unterschiedlich empfunden?") beispielhaft erläutert.

Grenzmethode

Zur Messung der absoluten Wahrnehmungsschwelle steigert der Versuchsleiter bei dieser Messmethode die Intensität eines zunächst deutlich unterschwelligen Reizes in festgelegten Schritten, bis der Beobachter angibt, diesen Reiz wahrzunehmen (aufsteigendes Verfahren). Daraufhin wird die Messreihe abgebrochen, und der Versuchsleiter startet eine weitere Messreihe, in der er die Lichtintensität eines deutlich überschwelligen Reizes reduziert, bis der Beobachter diesen Reiz nicht mehr wahrnimmt (absteigendes Verfahren). Die Schwelle ergibt sich aus dem Mittelwert mehrerer ab- und aufsteigender Messreihen. Zur Messung der Unterschiedsschwelle fragt man analog in ab- und aufsteigenden Messreihen danach, ob sich ein Reiz von einem Vergleichsreiz unterscheidet oder nicht.

In der *Staircase-Variante* dieses Verfahrens werden ab- und aufsteigende Darbietungen zufällig gemischt, der Versuchsleiter behält aber die Kontrolle über beide Messreihen. Der wesentliche Unterschied zur ursprünglichen Grenzmethode besteht darin, dass – sobald der Beobachter den Reiz in der aufsteigenden Messreihe wahrgenommen hat – die Reizintensität zunächst wieder verringert wird und man sich so der Schwelle iterativ nähert. Analog verfährt man in der absteigenden Messreihe (adaptives Staircase-Verfahren; ◘ Abb. 2.6). Die Schwelle ergibt sich dann als Mittelwert aus den beobachteten Umkehrpunkten. Eine besonders effektive Variante der Staircase-Methode ist bei Pentland (1980) und Lieberman und Pentland (1982) als Best-PEST-Verfahren beschrieben.

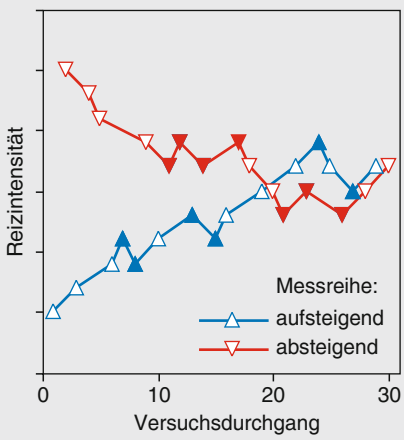
Konstanzmethode

Im Gegensatz zur Grenzmethode, in der die Messreihe abgebrochen wird, sobald der Beobachter signalisiert, einen Reiz erkannt zu haben (oder nicht), werden bei der Konstanzmethode in zufälliger Reihenfolge immer alle vom Experimentator ausgewählten Reizausprägungen dargeboten. Zur Auswertung wird dann den Urteilswahrscheinlichkeiten der Beobachter eine Funktion angepasst (z. B. unter Zuhilfenahme einer *Logit-* oder *Probit-Analyse*; Finney 1971; Lieberman 1983), die es erlaubt, die absolute Schwelle als entsprechenden Wert der Lichtintensität auf der x-Achse zu bestimmen. Den Konventionen entsprechend ist dieser Wert durch die 50 %-Urteilswahrscheinlichkeit festgelegt, also bei dem Wert der x-Achse, an dem der Beobachter mit gleicher Wahrscheinlichkeit angibt, den Reiz erkannt zu haben oder nicht (durchgezogene rote Linie in ◘ Abb. 2.7).

Handelt es sich um überschwellige Reizintensitäten, so kann man auf diese Weise auch den „Punkt subjektiver Gleichheit" zweier sensorischer Empfindungen ermitteln (*point of subjective equality*, PSE-Wert). Soll ein Beobachter beispielsweise einen Reiz danach beurteilen, ob er in seiner Lichtintensität mit einem Vergleichsreiz, der aber vor einem andersfarbigen Hintergrund präsentiert wird, übereinstimmt oder nicht, so gibt die 50 %ige Urteilswahrscheinlichkeit den PSE-Wert an. Einer weiteren Konvention folgend werden in diesem Fall die untere und obere Unterschiedsschwelle bei 25 %iger bzw. 75 %iger Urteilswahrscheinlichkeit angesiedelt (bisweilen auch bei 20 %iger bzw. 80 %iger Urteilswahrscheinlichkeit; punktierte blaue Linien in ◘ Abb. 2.7). – Die Konstanzmethode ist naturgemäß aufwendiger als die Grenzmethode, wird aber im Allgemeinen als sehr genau angesehen.

Herstellungsmethode

Zur Bestimmung der absoluten Schwelle stellt der Beobachter bei dieser Methode selbst (z. B. mittels eines Leuchtdichtereglers) die Reizintensität ein, an der er einen Reiz gerade noch wahrnimmt bzw. ihn nicht mehr wahrnimmt (absolute Schwelle). Analog dazu stellt er bei der Unterschiedsschwelle den gerade merklichen Unterschied zu einem Vergleichsreiz ein. Der Schwellenwert ergibt sich aus dem Mittelwert mehrerer Einstellungen. – Die Herstellungsmethode ist die einfachste der genannten psychophysischen Methoden. Sie benötigt nur eine geringe Anzahl von Versuchsdurchgängen, gilt allerdings wegen ihrer Anfälligkeit im Hinblick auf mögliche Antworttendenzen als weniger genau.



◘ Abb. 2.6 Adaptives Staircase-Verfahren mit einer auf- und einer absteigenden Messreihe. Die ausgefüllten Dreiecke markieren die für die Schwellenbestimmung wichtigen Umkehrpunkte

Zur Vertiefung 2.2 (*Fortsetzung*)

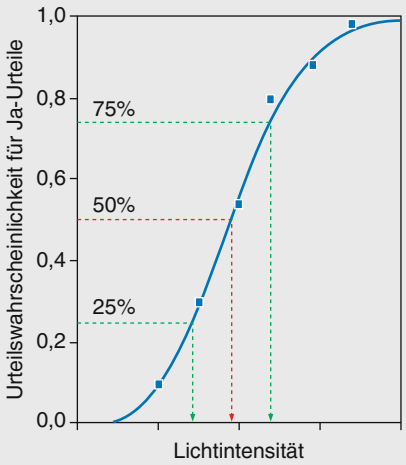


Abb. 2.7 Ein Beobachter beurteilt wiederholt die Wahrnehmbarkeit eines Reizes mit einem Ja-nein-Urteil (hier beispielsweise bei Darbietung verschiedener Lichtintensitäten). Abgetragen sind hier die Urteilswahrscheinlichkeiten der Ja-Urteile (schwarze Quadrate), denen eine Funktion angepasst wird (hier z.B eine kumulative Normalverteilung, Probit-Funktion; durchgezogene Linie). Der Abszissenwert bei 50 %-Urteilswahrscheinlichkeit determiniert die absolute Wahrnehmungsschwelle oder – beim Vergleich überschwelliger Reizintensitäten – den Punkt subjektiver Gleichheit (PSE-Wert; gestrichelte Linie). Die 25 %- und 75 %-Urteilswahrscheinlichkeit sind bisweilen als untere bzw. obere Unterschiedsschwelle (punktierte Linien) definiert

A

B

Abb. 2.8 Die Sehschärfe-Illusion. **A** Schematisch wird veranschaulicht, dass die Buchstaben in der retinalen Peripherie größer dargestellt werden müssten, um bei Fixation in der Bildmitte gleich gut identifizierbar zu sein. **B** *Unten* ist die zunehmende retinale Unschärfe einer Szene bildhaft dargestellt. Unser alltägliches Sehen vermittelt uns dagegen den Eindruck, immer über ein „bis in alle Ecken" scharfes Abbild zu verfügen (*oben*). (Der Abdruck erfolgt mit freundlicher Genehmigung durch den Karlsverein-Dombauverein Aachen. Das Foto wurde der Webseite ► http://www.karlsverein.de/die-perfekte-geometrie-des-aachener-doms/ entnommen.)

rechten und linken Rand zu identifizieren versucht. Dies wird misslingen. Abb. 2.8A veranschaulicht schematisch, dass die Buchstaben in der retinalen Peripherie größer sein müssten, um sie fehlerfrei identifizieren zu können. Merkwürdigerweise wird uns diese zunehmende periphere Unschärfe nur selten bewusst. Stattdessen nehmen wir vor unserem geistigen Auge ein überall gleich scharfes „Foto" wahr – eine Täuschung, die man auch als *Sehschärfe-Illusion* bezeichnet (Abb. 2.8B).

Die Überlegenheit des fovealen Sehens lässt sich schon auf der Retina mit der unterschiedlichen Verteilung von Stäbchen und Zapfen und deren neuronalen Verschaltungen in Verbindung bringen. Da in der Peripherie immer mehrere Rezeptoren auf eine Ganglienzelle konvergieren (die rezeptiven Felder dieser Ganglienzellen sind entsprechend groß), hingegen die Rezeptoren in fovealen Arealen weit dichter und weniger verschaltet sind (mit entsprechend kleineren rezeptiven Feldern), resultiert schon daraus eine höhere foveale Sehschärfe.

Der foveale Vorteil wird besonders deutlich bei Verwendung von Standardmethoden. Zum Beispiel ist bei der *Landolt'schen Sehprobe* die Öffnungsrichtung einer rotierten, dem Buchstaben C ähnlichen Figur unter ansonsten optimalen Bedingungen anzugeben (Größe und Öffnung des Zeichens sind in der Europäischen Norm EN ISO 8596 festgeschrieben); auch bei der *Vernier-Sehprobe* hat der Beobachter unter optimalen Bedingun-

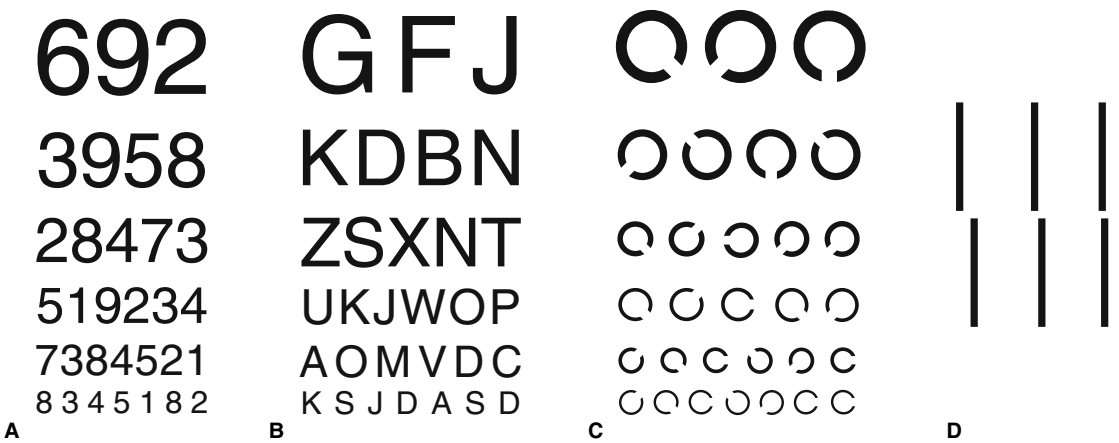


Abb. 2.9 Testtafeln zur Ermittlung der Sehschärfe. (**A** und **B**) Die alphanumerischen Zeichen haben den Nachteil, dass die Zeichen individuell mehr oder weniger vertraut sind und deswegen unterschiedlich gut berichtet werden (Stichwort Analphabetismus). Dies ist bei den Landolt-Ringen (**C**) und bei dem Vernier-Sehschärfetest (Noniussehschärfe; **D**) nicht der Fall

gen die Versetzung zweier übereinander angeordneter Striche zu erkennen – optimal heißt hier jeweils, dass die Reize lang andauernd, gleichzeitig, stationär und mit hohem Kontrast präsentiert werden (Abb. 2.9).

Bereits Skavenski (1990) hat darauf hingewiesen, dass die mit Standardmethoden ermittelte Sehschärfe keineswegs allen Aufgaben zugutekommen muss. So kann in Textursegmentierungsaufgaben (Abb. 2.21) unter bestimmten Bedingungen ein Zielreiz in der Fovea schlechter erkannt werden als in der Peripherie (Meinecke und Kehrer 1994; Kehrer 1997). Die Sensitivität des visuellen Systems hängt noch von weiteren Fakoren ab, z. B. von der Reizdauer und der Leuchtdichte. Dabei bleibt dem *Bloch'schen Gesetz* folgend die Sehschärfe konstant, wenn mit zunehmender Reizdauer die Leuchtdichte reduziert wird. Das reziproke Verhältnis zwischen Reizdauer und Leuchtdichte gilt bei der Landolt'schen Sehprobe bis etwa 150 ms Reizdauer (Kahneman et al. 1967). Darüber lässt sich eine Abnahme der Leuchtdichte nicht mehr mit einer Zunahme der Reizdauer kompensieren. Das Bloch'sche Gesetz ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass die Reizenergie an den Rezeptoren bis zu einem bestimmten Intervall zeitlich aufsummiert wird.

Die räumliche Auflösungsfähigkeit des visuellen Apparats wird auch durch eine Sukzessivität in der Darbietung negativ beeinflusst. Haben Versuchspersonen beispielsweise die Aufgabe, einen peripher dargebotenen Zielreiz danach zu beurteilen, ob er sich links oder rechts von der Mitte eines Vergleichsreizes befindet, so nehmen sie die relative Position des Zielreizes selbst dann relativ genau wahr, wenn beide Reize sehr kurzzeitig, aber simultan dargeboten werden. Trennt man die Darbietung beider Reize zeitlich nur um 100 ms, so kommt es zu einer systematisch wahrgenommenen Verschiebung des Zielreizes nach außen und zwar in einer Größenordnung, die mit 0,3–0,5° weit über der aufgrund der Standardmethoden zu erwartenden räumlichen Auflösungsfähigkeit liegt (Müsseler et al. 1999; Müsseler und Van der Heijden 2004; Bocianski et al. 2008, 2010).

Eine weitere Variable, die das visuelle Auflösungsvermögen nachhaltig beeinflusst, ist der Adaptationszustand des visuellen Systems. Die Flamme einer Kerze wird in klarer Nacht erst nach erfolgter (Dunkel-)Adaptation aus mehreren Kilometern wahrnehmbar. Ebenso braucht das System zur (Hell-)Adaptation einige Zeit, wenn man plötzlich in einen hellen Raum eintritt. Die optimale Sensitivität des Systems wird durch Veränderungen der Pupillengröße und durch die veränderte photochemische Lichtempfindlichkeit der Zapfen und Stäbchen erreicht. Da beide Rezeptorsysteme – wie erwähnt – unterschiedlich lichtempfindlich sind, ist die Dunkeladaptationskurve (Abb. 2.10) durch den sogenannten Kohlrausch-Knick gekennzeichnet, der den Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen markiert.

Zumindest das letztgenannte Beispiel bezieht sich auf Sensitivitätsveränderungen, die im absoluten Schwellenbereich beobachtbar sind. Man kann aber auch Sensitivitätsveränderungen im überschwelligen Bereich bei konstanter physikalischer Reizgröße beobachten. Abb. 2.11 verdeutlicht dies anhand der je nach Hintergrund unterschiedlich empfundenen Helligkeit von

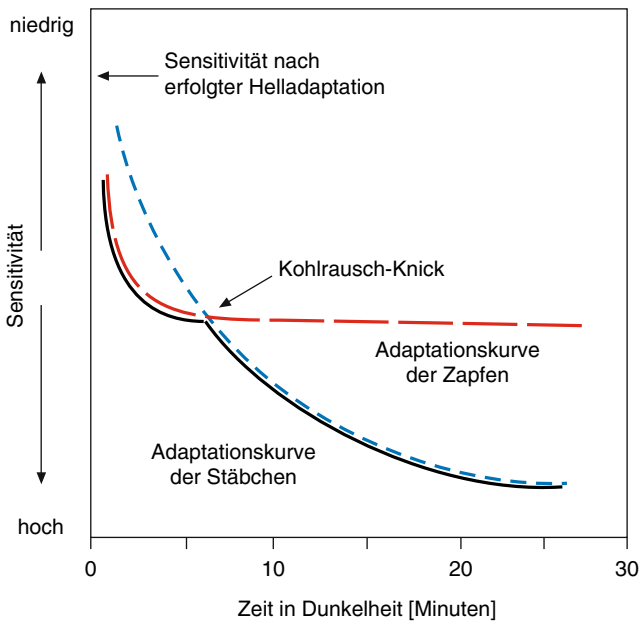


Abb. 2.10 Dunkeladaptationskurven der Stäbchen und Zapfen. Die durchgezogene Linie zeigt die aus beiden Kurven resultierende Adaptationskurve mit dem Kohlrausch-Knick

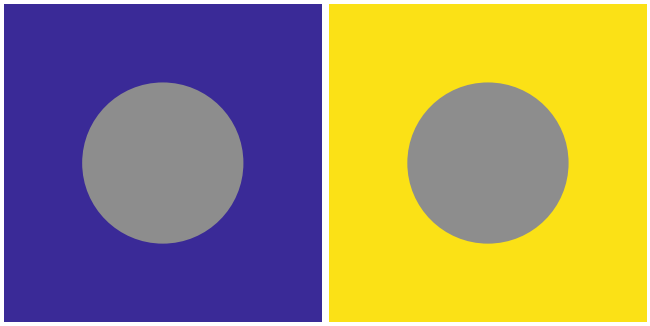


Abb. 2.11 Simultankontrast. Fixieren Sie in der Mitte zwischen den beiden Quadraten und beurteilen Sie die beiden grauen Scheiben. Obwohl sie identisch sind, erscheint die Scheibe vor dem hellen gelben Hintergrund deutlich dunkler

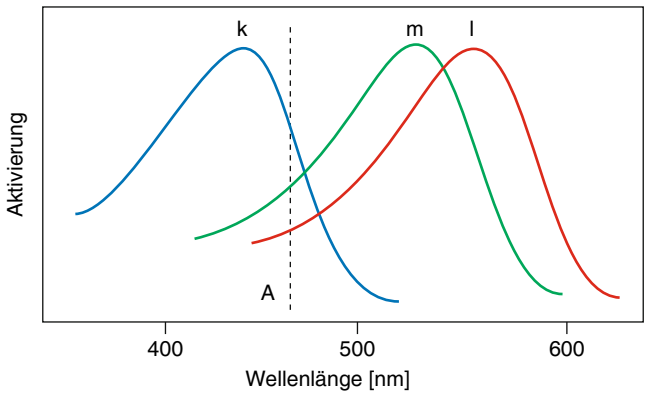


Abb. 2.12 Aktivierungskurven von relativ kurz- (k, blauwellige Zapfen, Maxima ca. 420 nm), mittel- (m, grünwellige Zapfen, ca. 530 nm) und langwelligen (l, rotwellige Zapfen, ca. 560 nm) Rezeptorsystemen. Reiz A stimuliert die drei Rezeptortypen in einem bestimmten Verhältnis

Oberflächen, des *Simultankontrasts*. Obwohl die beiden grauen Scheiben sich nicht unterscheiden, wirkt das Feld vor dem hellen Hintergrund deutlich dunkler. Erklärt wurde dies zunächst mit einem eher peripheren Mechanismus, der als *laterale Inhibition* bezeichnet werden kann: Die Lichtreizung von Rezeptoren hemmt die Entladung benachbarter Rezeptoren – mit der Konsequenz, dass der hellere Hintergrund die Rezeptoren der rechten grauen Scheibe stärker hemmt als der dunkle Hintergrund. Neurophysiologisch ließ sich dieser Mechanismus tatsächlich bereits auf der Retina nachweisen (Hartline et al. 1956). Neuere Befunde legen allerdings auch nahe, dass am Simultankontrast zusätzlich corticale Faktoren beteiligt sind (neuerer Überblick zur Kontrastverarbeitung in Wirtz 2001; vgl. auch das Phänomen der Helligkeitskonstanz in ▶ Abschn. 2.3.5).

Laterale Inhibition wird im Übrigen auch als Erklärung für das Kontrastgitter (Hermann'sches Gitter; eine Variante, das Scintillating Grid, ist in Abb. 2.1 dargestellt) herangezogen. Die Annahme ist, dass die Kreuzungspunkte von vier Seiten laterale Inhibition erhalten, während die übrigen Linien nur von zwei Seiten lateral gehemmt werden. Die deshalb ausgeprägtere laterale Inhibition lässt in der Peripherie an den Kreuzungspunkten dunkle Punkte entstehen (vgl. auch Spillmann 1994). – Der Simultankontrast ist übrigens nicht auf Helligkeitsstufen beschränkt. Ein auf ähnlichen Mechanismen beruhender Farbsimultankontrast lässt sich beispielsweise erzeugen, wenn ein graues Feld von einer roten Umrandung umgeben wird. Es erscheint dann leicht grünlich.

2.3.2 Farbwahrnehmung

Wie viele Farben können wir sehen? Wenn weißes Licht mithilfe eines Prismas gebrochen wird, zeigt sich, dass das menschliche Auge für Wellenlängen zwischen 400 und 700 nm empfindlich ist. „Farben" existieren in der physikalischen Außenwelt nicht, das Licht wird nur mit unterschiedlicher Wellenlänge von den Oberflächen reflektiert. Die Farbempfindung bestimmt sich neben der Wellenlänge aus der *Intensität* eines Farbreizes (also der Helligkeit) und dessen *Sättigung*. Trifft z. B. hauptsächlich Licht der Wellenlänge 500–570 nm auf die Retina, nehmen wir ein gesättigtes Grün wahr. Werden andere Wellenlängen in gleichen Anteilen hinzugemischt (nimmt also der Weißanteil einer Farbe zu), nimmt die Sättigung ab. Man schätzt, dass das menschliche Auge auf diese Weise zwischen 2 und 7 Mio. Farbabstufungen differenzieren kann (Tessier-Lavigne und Gouras 1996).

Wie sieht aber der sensorische Code aus, der diese differenzierte Farbwahrnehmung ermöglicht? Betrachtet man die ungeheure Anzahl der wahrnehmbaren Farbabstufungen auf jedem Punkt der Retina, ist klar, dass nicht jede Farbnuance durch ihren eigenen Rezeptor und einen zugehörigen neuronalen Verarbeitungsstrang übermittelt wird. Vielmehr ist anzunehmen, dass eine begrenzte Anzahl von Neuronenpopulationen ein spezifisches Aktivierungs*muster* generiert, das zur Farbwahrnehmung führt. Diese Vorstellung hat schon früh zu psychophysischen Farbmischungsexperimenten und Theorien der Farbwahrnehmung geführt. So stellten beispielsweise Thomas Young und Herrmann von Helmholtz im 19. Jahrhundert fest, dass jede mögliche Farbempfindung durch eine Mischung der drei Grundfarben Blau, Rot und Grün erzeugt werden kann. In ihrer *Dreifarbentheorie* beruht Farbwahrnehmung daher auf drei Rezeptorsystemen mit jeweils unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit (Helmholtz 1910). In Abb. 2.12 hat z. B. der Reiz A einen relativ hohen Anteil an einer kurzwelligen Aktivierungskomponente und niedrige Anteile an der mittel- und langwelligen Aktivierungskomponente, was in diesem Fall zu einem blauen Farbempfinden führt. Werden die Rezeptorsysteme in einem anderen Verhältnis aktiviert, entsteht eine andere Farbempfindung. Man beachte aber, dass trotz eines unterschiedlich zusammengesetzten physikalischen Frequenzspektrums die Empfindung gleich bleiben kann. In diesem Fall spricht man von *metameren Farben*.

Erst in den 1980er Jahren konnte man beim Menschen mit den sich eröffnenden neuen physiologischen Registrierungsmöglichkeiten drei verschiedene Zapfensysteme mit Pigmentabsorptionskurven ermitteln, die ähnliche Maxima und Verläufe aufweisen wie in Abb. 2.12 (z. B. Dartnall et al. 1983). Die Dreifarbentheorie erhielt auf diese Weise ihre physiologische Bestätigung.

Zur gleichen Zeit, als die Dreifarbentheorie entwickelt wurde, machte man auch folgende Beobachtungen: Betrachtet man über mehrere Minuten ein blaues Feld und schaut danach auf eine weiße Fläche, so stellt sich ein gelbes *Nachbild* ein (so wie sich nach dem Betrachten eines gelben Feldes ein blaues Nachbild

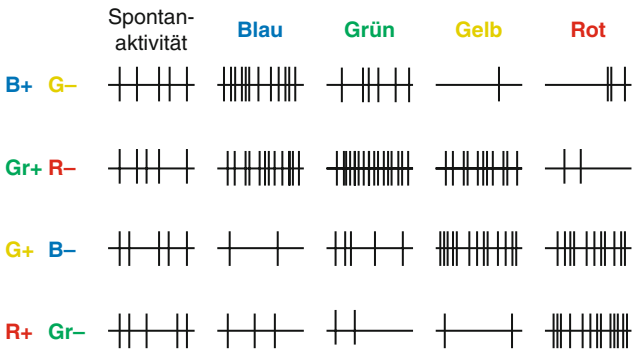


Abb. 2.13 Mögliche Entladungsraten von Gegenfarbenzellen im CGL des Rhesusaffen über die Zeit. Die Zelle B+G– reagiert z. B. mit einer vermehrten Aktivität auf eine Reizung mit blauem Licht, während sie auf eine Reizung mit gelbem Licht eher inhibiert wird. (Nach DeValois und Jacobs 1968)

einstellt). Ähnliches gilt für die Farben Rot und Grün. Aufgrund solcher Feststellungen und aufgrund der Beobachtung, dass Rotblinde immer auch grünblind bzw. Blaublinde immer auch gelbblind sind, verfasste Ewald Hering seine *Gegenfarbentheorie* (Überblick in Hurvich und Jameson 2001). Danach sind Rot/Grün, Blau/Gelb und auch Schwarz/Weiß antagonistisch wirkende Farbpaare, d. h., sie lösen jeweils einen Gegenfarbenmechanismus aus, der dazu führt, dass auf eine Farbe positiv und auf die andere negativ reagiert wird.

Eine neurophysiologische Bestätigung fand die Gegenfarbentheorie in den 1960er Jahren in den sogenannten Gegenfarbenzellen des CGL des Rhesusaffen (zur Lokalisation des CGL beim Menschen s. Abb. 2.4). Dort fand man beispielsweise (B+G–)-Zellen, die mit einer vermehrten Aktivität auf eine Reizung mit blauem Licht reagierten, während sie auf eine Reizung mit gelbem Licht eher inhibiert wurden (DeValois und Jacobs 1968; Abb. 2.13).

Dreifarbentheorie und Gegenfarbentheorie schließen sich nicht – wie man zunächst glaubte – aus. Beide Mechanismen ergänzen sich. Neuronale Schaltkreise der Eingangsimpulse von den k-, l- und m-Zapfen erzeugen die aktivierenden und hemmenden Wirkungen der nachgeschalteten Gegenfarbenzellen, die sich u. a. auch in den Ganglienzellen der Retina finden. Auf diese Weise ist man in der Lage, verschiedenartige Farbphänomene zu erklären, unter ihnen die Effekte des Farbnachbildes oder des Farbsimultankontrasts (s. oben; neuere Überblicke zur Farbwahrnehmung bei Gegenfurtner 2012; Gegenfurtner und Sharpe 2000). Unabhängig davon hat gerade die Erforschung der Farbwahrnehmung gezeigt, dass bisweilen aus psychophysischen Experimenten gewonnene Theorien weit vor ihrer physiologischen Bestätigung vorliegen können. Im vorliegenden Fall ist zwischen der Entwicklung der Dreifarben- bzw. der Gegenfarbentheorie und ihren physiologischen Bestätigungen mehr als ein halbes Jahrhundert vergangen.

2.3.3 Raum- und Tiefenwahrnehmung

Visuelle Raum- und Tiefenwahrnehmung entsteht aus den zweidimensionalen Projektionen unserer dreidimensionalen Umwelt auf die Retina. Wir befassen uns zunächst mit zweidimensionalen Vorlagen, die einen Raum- und Tiefeneindruck entstehen lassen, und gehen dann zu den dreidimensionalen Anordnungen über.

Raum- und Tiefenwahrnehmung bei zweidimensionalen Vorlagen

Relative Ortsinformation ohne Tiefe Betrachten wir zunächst die relative Ortsinformation ohne Tiefe, die bei der Betrachtung einer einfachen zweidimensionalen Fläche entsteht. Zum Beispiel stehen die Abbildungen und Absätze auf einer Buchseite in einer räumlichen Relation zueinander, die es zu identifizieren und zu repräsentieren gilt. Dies allein ist alles andere als trivial. An dieser Stelle gilt es, zwei Trugschlüsse auszuräumen, die in diesem Zusammenhang in populärwissenschaftlichen Darstellungen immer wieder auftauchen. Beide stehen in Verbindung mit einer zu wortwörtlich genommenen Kameraanalogie (▶ Abschn. 2.1).

Der erste Trugschluss entsteht dadurch, dass unsere Umwelt auf der Retina seiten- und höhenverkehrt abgebildet ist, d. h., die oberste Zeile einer Seite ist auf der Retina unten projiziert, die unterste Zeile oben. Da wir unsere Welt aber nicht auf dem Kopf stehend wahrnehmen, scheint eine Leistung des visuellen Verarbeitungsapparats darin zu bestehen, die Welt wieder „richtig" herum zu drehen. Dies ist natürlich irreführend. Es gibt keinen Verarbeitungsprozess, und es besteht auch keine Notwendigkeit für einen Verarbeitungsprozess, der das seiten- und höhenverkehrte Abbild „umdreht". Was das System bestenfalls während der ontogenetischen Entwicklung lernt, ist die Konsistenz und die Etikettierung dessen, was in unserem Sprachgebrauch als „oben" und „unten" bezeichnet wird. Oben auf der Retina ist der Ort, zu dem sich die Objekte bewegen, wenn man sie loslässt – also, unserem Sprachgebrauch folgend, nach unten (vgl. in diesem Zusammenhang die sogenannten Umkehrbrillenexperimente, die oben und unten vertauschen; Kohler 1962).

Der zweite Trugschluss entsteht, wenn man versucht, Raumwahrnehmung durch die Existenz einer der retinalen Abbildung ähnlichen topografischen Gehirnkarte zu erklären. In der heutigen Zeit ist diese Gefahr recht groß, kann man doch durch geeignete neurophysiologische Methoden derartige topografische Karten sogar an verschiedenen Stellen des visuellen Verarbeitungspfades nachweisen. Beispielsweise sind Strukturen im CGL (dort insbesondere in Schicht 6), aber auch in V1 und späteren visuellen Arealen retinotop organisiert. Diese Karten bilden die räumlichen Retinaverhältnisse neuronal nach, wenn auch meist erheblich verzerrt. Dennoch liegt die Annahme nahe, dass der visuell wahrgenommene Raum mit der Existenz einer solchen Karte repräsentiert und Raumwahrnehmung als solche hinreichend geklärt ist (*position as a code for position*-Trugschluss; Van der Heijden et al. 1999). In Wirklichkeit handelt es sich lediglich um eine Verschiebung des Problems, weil man zur Interpretation einer topografischen Karte einen Homunculus („einen kleinen Mann im Kopf") benötigt, der die räumlichen Informationen auszulesen weiß (**Homunculus-Problem**; nicht zu verwechseln mit dem Homunculus im primär-motorischen Cortex; ▶ Kap. 20). Es nützt zum Verständnis des Wahrnehmungsprozesses und hier insbesondere der Raumwahrnehmung nichts, wenn man die Retina in Abb. 2.2 durch eine retinotope Karte des Gehirns ersetzt. Erklärungsbedürftig bleibt dann, wie der

Menschenkopf bzw. der Homunculus die räumliche Karte ausliest und damit zu einem Raumeindruck gelangt.

So muss man grundsätzlich bezweifeln, dass die retinotope Organisation neuronaler Karten unmittelbar metrische Informationen über die konkreten Abstände von Objekten enthält. Zwar liefert die retinale Stimulation die Substanz für die räumliche Struktur, indem durch sie die lokalen Nachbarschaftsbeziehungen der Objekte (*local receptive field structure*) festgelegt wird, es bedarf aber eines zusätzlichen global operierenden Codes (*multilocal code*; Koenderink 1990), um die wahrgenommene Position eines Objekts zu bestimmen. Einige Autoren vermuten, dass sich dieser Code erst durch verifizierbare Blickbewegungen etabliert (Van der Heijden et al. 1999; Wolff 1999; Van der Heijden 2004, Kap. 8; für eine frühe Version dieser Idee vgl. Helmholtz 1866).

Tiefenwahrnehmung bei zweidimensionalen Vorlagen Wenden wir uns nun dem Tiefenaspekt zu. Das Betrachten eines zweidimensionalen Fotos oder eines Gemäldes ist meist mit einem mehr oder weniger starken Tiefeneindruck verbunden. Dies ist selbst dann der Fall, wenn man ein Auge abdeckt, weswegen diese **Tiefenkriterien** auch als *monokulare Tiefenkriterien* bezeichnet werden. Es sind dies u. a.:

- *Linearperspektive und Texturgradient:* Für die Linearperspektive ist kennzeichnend, dass parallele Linien in der Tiefe in einem Fluchtpunkt zusammenlaufen, für den Texturgradienten, dass z. B. frontal parallele Linien, die gleich weit voneinander entfernt sind, in der Tiefe dichter gepackt erscheinen. Diese Tiefenkriterien wurden in der Malerei der Frührenaissance perfektioniert, entstammen also nicht der neuzeitlichen Psychologie. So führte auch Leonardo da Vinci (1452–1519) neben der Linearperspektive die *Farbperspektive* (d. h. die Verblassung bzw. Verblauung von Farben mit zunehmender Tiefe) und die *Luftperspektive* (auch atmosphärische Perspektive oder Sfumato, d. h. das Verschwimmen der Konturen bei sehr weiten Distanzen) ein.
- *(Teil-)Verdeckung:* Verdeckt ein Objekt ein anderes, so wird dies als näher empfunden.
- *Relative Größe und Bekanntheitsgrad von Objekten:* Größere Objekte erscheinen näher als kleinere Objekte, allerdings wird dies durch die Lage des Horizonts modifiziert (sogenannte Mondtäuschung). Ist die Größe eines Objekts bekannt, wirkt sich dies ebenfalls auf die wahrgenommene Größe aus.

Schon diese Tiefenkriterien erlauben in den meisten Fällen eine ausgezeichnete Abschätzung der tatsächlichen Tiefe. An der Tiefenwahrnehmung sind aber noch weitere Faktoren beteiligt.

Raum- und Tiefenwahrnehmung in dreidimensionalen Anordnungen

Querdisparation Betrachten wir in einer realen (oder simulierten) dreidimensionalen Anordnung von Objekten zunächst einen stationären Beobachter bei fixiertem Blick. Schaltet man in dieser Anordnung die o. g. monokularen Tiefenkriterien weitgehend aus, entsteht dort Tiefenwahrnehmung aufgrund der paarigen Anlegung unserer Augen – genau genommen aufgrund der beiden geringfügig unterschiedlichen Augenblickwinkel. In sogenannten Stereoskopen oder 3-D-Filmen macht man sich diese Eigenschaft des visuellen Apparats zunutze, indem man unterschiedliche Bilder zu den beiden Augen projiziert. Wie entsteht dadurch der Tiefeneindruck?

Jeder Punkt auf einer Netzhaut korrespondiert mit einem Punkt auf der anderen Netzhaut (vgl. aber das Korrespondenzproblem; s. unten). Fixiert man einen Punkt *F* in einer räumlichen Anordnung, so wird er auf korrespondierende Netzhautstellen abgebildet, in diesem Fall in der Fovea. Auf korrespondierende Netzhautstellen fallen aber auch alle Punkte eines virtuellen Kreises, der durch den fixierten Punkt F und dem optischen Mittelpunkt beider Augen verläuft, den sogenannten theoretischen **Horopter** (der empirische Horopter divergiert von dieser Idealform insbesondere im äußeren Gesichtsfeld; Palmer 1999, S. 206 ff.). Genau genommen ist der Horopter keine eng umgrenzte Linie, sondern umfasst ein mehr oder weniger breites Areal um den Horopter, in dem die Objekte der beiden Netzhäute noch zu einem Objekt fusioniert werden (*Panum-Areal*). Ansonsten würden Doppelbilder wahrgenommen. In jedem Fall fallen alle anderen Punkte unseres Gesichtsfeldes außerhalb des Horopter auf nicht korrespondierende Netzhautstellen, d. h., die Orte ihrer Projektionen weichen im linken und rechten Auge ein wenig voneinander ab, und es entsteht die **Querdisparation**. Das unterschiedliche Ausmaß der Querdisparation lässt die unterschiedlich wahrgenommenen Entfernungen zu den Objekten entstehen (◘ Abb. 2.14; s. auch ▶ Zur Vertiefung 2.3).

In V1 finden sich die ersten binokularen Zellen, die nur auf Stimulation in beiden Augen reagieren. Zellen, die ein optimales Tuning bei einem bestimmten Ausmaß an Querdisparation zeigen, lassen sich bei der Katze vor allem in V1 und V2 isolieren (LeVay und Voigt 1988). Allerdings scheinen querdisparationsempfindliche Zellen zusätzlich auf der gesamten parietalen Bahn und zum Teil auch auf der temporalen Bahn zu existieren (Tyler 1990).

Ungeklärt ist dabei bis heute weitgehend, wie das visuelle System das **Korrespondenzproblem** löst. Es muss ja zunächst die korrespondierenden Informationen der beiden Netzhauthälften zueinander in Beziehung setzen, bevor es die Disparität feststellen kann. Dies ist ein besonders auffälliges Problem, wenn man Stereogramme aus Zufallspunktmustern betrachtet (*random-dot stereograms*; Julesz 1971). Dort ist die Zuordnung der Punkte ja keineswegs trivial (neuerer Überblick zum stereoskopischen Sehen in DeAngelis 2000; Marr 1982; computationale Lösungsvorschläge dieses Problems in Marr und Poggio 1979).

Okulomotorische Faktoren der Raum- und Tiefenwahrnehmung Querdisparation ist ein binokulares Tiefenkriterium. Weitere binokulare Tiefenkriterien sind die Konvergenz und die Akkommodation. Der *Konvergenzwinkel* der Augen, also die Stellung der Augen zueinander, gemessen als Winkel am Fixationspunkt, ist bei Fixation eines nahen Objekts größer als bei Fixation eines weit entfernten Objekts. Die *Akkommodation* ist die Anpassung der Form der Linse, die bei nahen Objekten bauchiger und bei entfernten Objekten flacher ist. In beiden Fällen berücksichtigt das visuelle System u. a. die propriozeptive Rückmeldung von den Augenmuskeln bei der Tiefenberechnung, sodass diese Tiefenkriterien auch als okulomotorische Tiefenkriterien bezeichnet werden.

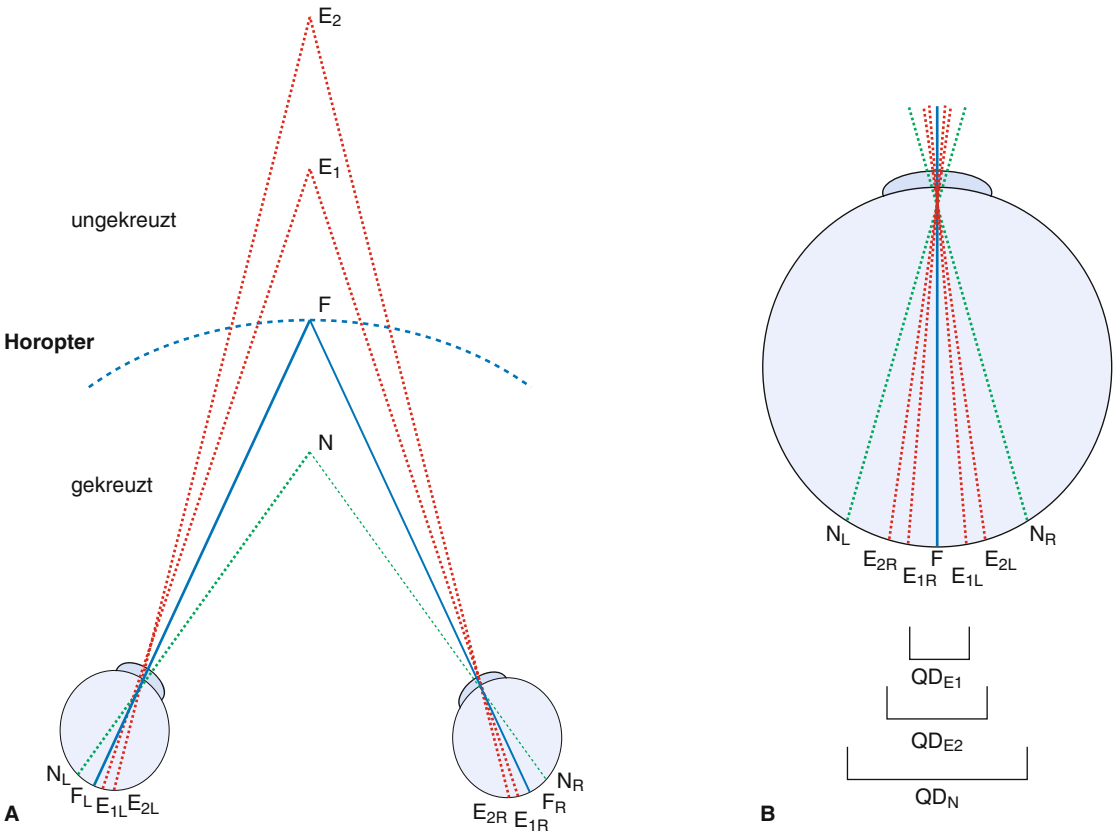


Abb. 2.14 **A** Punkte auf dem Horopter fallen auf korrespondierende Netzhautstellen (*F* = Fixationspunkt in fovealer Abbildung). Der Punkt N ist ein nahes Objekt, und die Punkte E_1 und E_2 sind entfernte Objekte, die allesamt auf nicht korrespondierende Netzhautstellen fallen. **B** Legt man beide Augen aufeinander, offenbart sich die Querdisparation. Der weit entfernte Punkt E_2 hat eine größere Querdisparation (QD) als E_1, wobei beide Punkte nasal abgebildet werden; beim nahen Punkt N erfolgt die Abbildung temporal, d. h., die Gesichtsfeldhälften sind gegenüber den entfernten Objekten vertauscht (L und R sind Indizes für das linke bzw. rechte Auge)

Bewegungsinduzierte Raum- und Tiefenwahrnehmung Die durch die Bewegung der Augen verursachten charakteristischen Änderungen in unserem Gesichtsfeld sind ebenfalls wertvolle Tiefenkriterien. Dies trifft für die okulomotorische Änderungsinformation beim Konvergieren (bzw. Divergieren) und Akkommodieren zu. Eindrucksvoller ist in diesem Zusammenhang aber die Tiefeninformation, die wir als Folge von Eigenbewegung des gesamten Körpers zu nutzen wissen. Beispielsweise wandert ein stationäres Objekt an einem Beobachter vorbei, der in einem Zug sitzend aus dem Fenster zum Horizont blickt. Dabei „bewegt" sich ein Objekt am Horizont langsamer und verbleibt deshalb wesentlich länger in unserem Gesichtsfeld als ein nahes Objekt (Abb. 2.16). Dieses Tiefenkriterium ist schon von Hermann von Helmholtz (1866) beschrieben worden und wird als **Bewegungsparallaxe** bezeichnet.

Insbesondere den Arbeiten von James J. Gibson (1950, 1979) ist es zu verdanken, dass diese und andere durch Eigenbewegung erzeugten Tiefeninformationen eingehender analysiert wurden. Im Gegensatz zu Helmholtz bezog sich Gibson nicht nur auf einzelne Objekte, sondern betonte die Charakteristiken des gesamten visuellen Flussmusters. Abb. 2.16 demonstriert, wie das Flussmuster vom jeweiligen Fixationsort und der Bewegungsrichtung abhängt. Wird ein Punkt unterhalb des Horizonts fixiert (Abb. 2.16B), „bewegt" sich die Landschaft darüber mit, die Landschaft darunter allerdings entgegen der Bewegungsrichtung. Auch wenn man sich dem Fixationspunkt am Horizont nähert, ist das Flussmuster ein anderes, als wenn man den Fixationspunkt tiefer wählt (Abb. 2.16C, D).

Eigenbewegung offenbart auch noch ein anderes Tiefenkriterium. Fährt man an einem nahen Objekt mit Tiefenausdehnung vorbei, werden in unterschiedlichem Maße bisher nicht sichtbare Objektteile aufgedeckt, andere dagegen verschwinden aus unserem Gesichtsfeld (Kriterium der zunehmenden Auf- bzw. Verdeckung). So ist zunächst die eine Seite sichtbar und dann, nachdem wir das Objekt passiert haben, die andere Seite. Das Kriterium der Auf- bzw. Verdeckung wird auch auf Situationen angewandt, in denen ein Objekt durch Bewegung hinter einem anderen Objekt hervortritt bzw. dahinter verschwindet. Auch dies vermittelt einen überzeugenden Tiefeneindruck.

Zusammenfassend kann man bereits aufgrund dieser nicht vollständigen Erörterung der Tiefenkriterien festhalten, dass der wahrgenommene Raum multipel verankert ist. Wie gut unser Kenntnisstand in dieser Hinsicht mittlerweile ist, erkennt man an den nahezu perfekten Simulationen dreidimensionaler virtueller Welten mithilfe des Computers. Allerdings bleibt diese Schlussfolgerung reizseitig beschränkt, d. h., wir wissen mittlerweile, *welche* Tiefeninformation genutzt wird, aber weit weniger darüber, *wie* sie genutzt wird und wie die verschiedenen Tiefenkriterien zu einem Gesamteindruck zusammengefügt werden.

Zur Vertiefung 2.3

Selbstversuch zur binokularen Querdisparation

Man kann sich die Wirkung der Querdisparation am besten im Selbstversuch verdeutlichen, wenn man einen Arm ausstreckt und abwechselnd mit dem rechten und linken Auge den ausgestreckten Daumen fixiert. Der Finger „springt" in diesem Fall nur unwesentlich. Fixieren Sie dann ein anderes Objekt und halten Sie Ihren Daumen entweder davor oder dahinter! In diesen Fällen ist ein deutliches „Springen" des Daumens zu beobachten. Beachten Sie die Änderung der Springrichtung, je nachdem ob Sie den Daumen vor oder hinter dem fixierten Objekt halten. Man kann diesen Sachverhalt auch als gekreuzte und ungekreuzte Querdisparation beschreiben (Abb. 2.15).

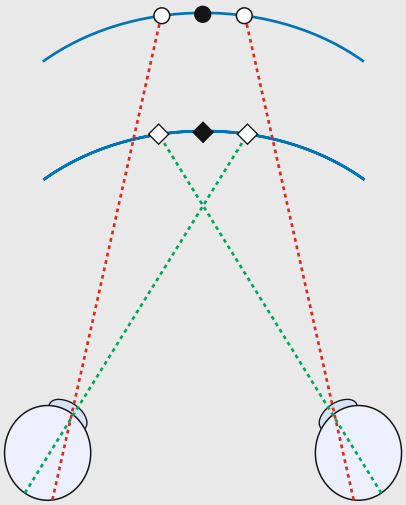


Abb. 2.15 Gekreuzte und ungekreuzte Querdisparation. Wenn man den Punkt fixiert und abwechselnd das linke und rechte Auge verschließt, „kreuzen sich die Sehbahnen" zu den wahrgenommenen Rauten. Fixiert man dagegen die Raute, verlaufen die Sehbahnen zu den wahrgenommenen Punktpositionen ungekreuzt

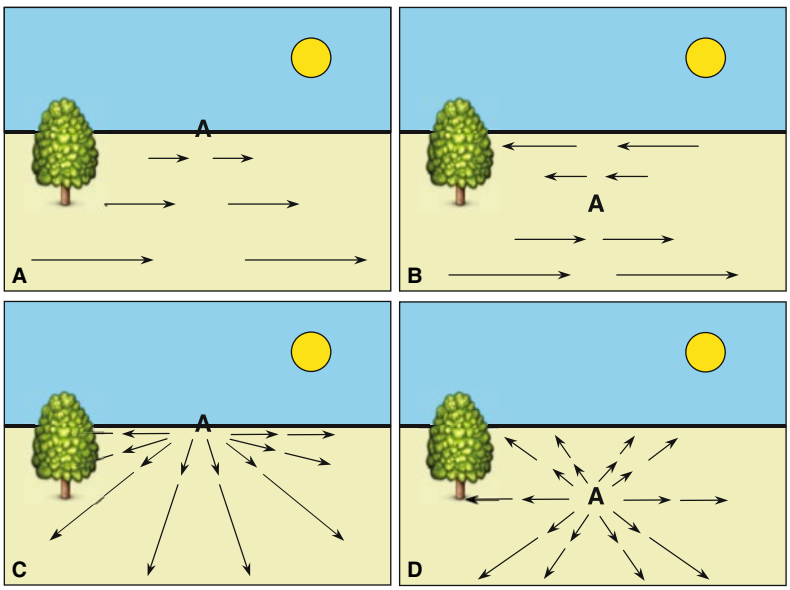


Abb. 2.16 Visuelle Flussmuster bei verschiedenen Eigenbewegungen (**A** und **B**: Bewegung nach links; **C** und **D**: in Richtung auf den Fixationspunkt x) und verschiedenen Orten des Fixationspunktes x (**A** und **C**: am Horizont; **B** und **D**: unter dem Horizont)

2.3.4 Bewegungswahrnehmung

Schon die Erörterung der Tiefenkriterien hat gezeigt, dass Bewegung eine wichtige Informationsquelle in der visuellen Verarbeitung ist. Nicht nur Eigenbewegungen, sondern auch die durch Objektbewegungen (relativ zum ruhenden Beobachter) vermittelten Informationen liefern wertvolle Anhaltspunkte über die Form, die Tiefe oder die Größe eines Objekts. Ein Verlust des Bewegungssehens, wie es Zihl et al. (1983, 1991) bei einer gehirngeschädigten Patientin beschreiben, hat schwerwiegendste Wahrnehmungsbeeinträchtigungen zur Folge. Die Gehirnregion, die man heutzutage mit Bewegungswahrnehmung in Verbindung bringt, ist vorrangig das MT-Areal (Abb. 2.5). Es besteht zum überwiegenden Teil aus bewegungs- und richtungsempfindlichen Neuronen – also aus Neuronen, die selektiv auf Reize mit einer Aktivierung reagieren, die sich in einer bestimmten Richtung über die Retina bewegen. Derartige Neurone finden sich aber auch – wenngleich nicht so umfangreich – in anderen visuellen Arealen.

Scheinbewegungen

Bewegungs- und richtungssensitive Neurone hat man sehr schnell mit einem Bewegungsphänomen in Verbindung gebracht, dem Bewegungsnacheffekt (*motion after-effect*, MAE). Schaut man beispielsweise längere Zeit auf einen Wasserfall und blickt dann auf die stationäre Umgebung, so scheint sich diese kurzzeitig in entgegengesetzter Richtung zu bewegen. Physiologisch wurde dies damit erklärt, dass nach erfolgter Adaptation die Aktivität der Neurone, die die Richtung des Wasserfalls codieren, unter die Spontanentladungsrate sinkt und dadurch die Neurone, die sensitiv für die Richtung entgegen des Wasserfalls sind, eine relativ höhere Entladungsrate aufweisen (Barlow und Hill 1963). Auf diese Weise wurde ein Wahrnehmungseindruck entgegen der Bewegungsrichtung erklärt. Dass diese Vorstellung wahrscheinlich zu vereinfachend ist, zeigen neuere Arbeiten, in denen die Beobachter gleichzeitig mit zwei Bewegungsströmen unterschiedlicher Richtung adaptiert werden. Die dann im Nacheffekt zu beobachtende Richtung scheint mehr der entgegengesetzten Vektorsumme der beiden Bewegungsströme zu entsprechen – eine Beobachtung, die auf einen aufwendigeren Mechanismus hindeutet (z. B. Grunewald und Lankheet 1996; Grunewald und Mingolla 1998).

Das Wahrnehmen einer eigentlich nicht vorhandenen Bewegung ist aber nicht nur charakteristisch für Bewegungsnacheffekte, sondern auch für andere Formen der **Scheinbewegung**. Heutzutage gelten Film und Fernsehen wohl als die bekanntesten Beispiele von Scheinbewegungen (stroboskopischen Bewegungen). In seiner klassischen Arbeit von 1912 berichtet Max Wertheimer erstmals von Scheinbewegungen zwischen zwei kurz aufblitzenden stationären Lichtstreifen, wenn diese unter optimalen Verhältnissen ein- und ausgeschaltet werden (Phi-Phänomen). Dabei üben der zeitliche und der räumliche Abstand sowie die Lichtintensität einen Einfluss auf den Bewegungseindruck aus. So kann etwa ein größerer räumlicher Abstand durch eine Vergrößerung des zeitlichen Abstands kompensiert werden. Hält man die Reizdistanz konstant und reduziert die Leuchtstärke der Reize, muss ebenfalls das Zeitintervall zwischen beiden Reizen verlängert werden, um den optimalen Bewegungseindruck zu erhalten. Wenn das Zeitintervall konstant gehalten und die räumliche Distanz systematisch variiert wird, muss die Leuchtstärke mit zunehmender Distanz zunehmen. Diese Gesetzmäßigkeiten sind als Korte'sches Gesetz seit 1915 bekannt und in nachfolgenden Studien bestätigt worden. Die im Korte'schen Gesetz ausgedrückten Beziehungen werden Mechanismen der frühen visuellen Verarbeitung zugeschrieben. Da sich allerdings die eine Scheinbewegung erzeugende räumliche Distanz auch in der Tiefe erstrecken kann (Green und Odom 1986), erscheint eine nur retinotope Erklärung unwahrscheinlich.

Man hat Scheinbewegung unabhängig von realen Bewegungen zu interpretieren versucht, insbesondere weil sich einige Unvereinbarkeiten zwischen Scheinbewegungen und realen Bewegungen aufzeigen lassen (z. B. Kolers 1974). Mittlerweile ist man wieder darum bemüht, Scheinbewegung als einen Spezialfall der realen Bewegung aufzufassen (z. B. Shaw et al. 1995). Ein solches Modell muss auf eine zeitlich versetzte Stimulation an räumlich separaten Orten genauso reagieren wie auf eine kontinuierliche Bewegung zwischen diesen Orten. Mit anderen Worten, es sollte unerheblich sein, ob die räumliche Zwischenstrecke vom Reiz überstrichen wird oder nicht (s. auch den Reichardt-Bewegungsdetektor in ▶ Abschn. 2.3.4). Allerdings wirft dies Probleme auf, die bis heute nicht abschließend gelöst sind: Warum tritt Scheinbewegung nur unter optimalen Bedingungen auf, während reale Bewegungen diesen zeitlichen und räumlichen Restriktionen nicht unterliegen? Was unterscheidet Scheinbewegungen zwischen zwei Lichtstreifen von den komplexeren stroboskopischen Bewegungen innerhalb eines Filmes? Wie löst das System beim Betrachten eines Films das Korrespondenzproblem (▶ Abschn. 2.3.3)? In diesem Fall müssen ja auch die korrespondierenden Informationen zueinander in Beziehung gesetzt werden, die hier allerdings zwischen zwei und mehr zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern vorliegen. (Man beachte, dass beim stereoskopischen Sehen das Korrespondenzproblem durch die Zuordnung von simultan verfügbarer, aber querdisparater Information der beiden Netzhäute entsteht, wohingegen beim Betrachten eines Filmes zeitlich separate Informationen zu integrieren sind.) In einer Szene mit schnell aufsteigenden, womöglich noch gleichfarbigen Luftballons, muss ein Luftballon zum Zeitpunkt $n+1$ als der Luftballon zum Zeitpunkt n identifiziert werden, der lediglich durch die Bewegung räumlich versetzt wurde. Noch offensichtlicher wird das Korrespondenzproblem, wenn man einen Beobachter mit zwei zufälligen Punktmustern unterschiedlicher Bewegungsrichtung konfrontiert (Random-Dot-Bewegungen; ▶ Abschn. 2.3.3). Auch dies gelingt dem visuellen System ohne Weiteres.

Reale Bewegungen

Auch Wahrnehmungsanalysen bei realen Bewegungen vermitteln Informationen über die beteiligten Verarbeitungsprozesse. Bei unbewegtem Auge führt eine Objektbewegung zu einer zeitlich versetzten Stimulation an benachbarten retinalen Orten. Ein einfaches Modell eines Bewegungsdetektors, das genau dies berücksichtigt, ist von Bernhard Hassenstein und Werner Reichardt in den 1950er Jahren entwickelt worden (Übersicht in Borst et al. 2010). Es wird heute gemeinhin als Reichardt-Detektor bezeichnet.

◘ Abb. 2.17 veranschaulicht die Wirkungsweise dieses richtungsspezifischen Detektors. In ◘ Abb. 2.17A bewegt sich ein Reiz von links nach rechts zunächst über den Rezeptor an der Position P_1, dann über den Rezeptor an der Position P_2. Die entscheidende Annahme des Modells ist, dass nach der Aktivierung von P_1 die neuronale Weiterleitung um einen Betrag Δt verzögert wird, sodass – sobald der Reiz P_2 erreicht hat – die Erregungen von P_1 und P_2 zeitgleich im Neuron $\times_1$ kumulieren. Der Detektor ist dann exzitatorisch aktiviert. In ◘ Abb. 2.17B bewegt sich der Reiz von rechts nach links. In diesem Fall führt die Verzögerung Δt der P_2-Aktivierung zu einer zeitgleichen Erregung im Neuron x_2, sobald die Bewegung P_1 erreicht hat. Dadurch spricht der inhibitorische Ausgang des Detektors an. Auf eine Bewegung von links nach rechts antwortet der Detektor also exzitatorisch, auf eine Bewegung von rechts nach links inhibitorisch.

Der Reichardt-Detektor ist mittlerweile neurophysiologisch belegt (Maisak et al. 2013) und kann aufgrund der sukzessiven Stimulation zweier Punkte, also von P_1 und P_2, auch als Erklärung des Phi-Phänomens herangezogen werden. Er erklärt auch, warum ein zeitgleiches, zweimaliges Aufblitzen beider Punkte (mit einem zeitlichen Abstand von Δt) keinen Bewegungsein-

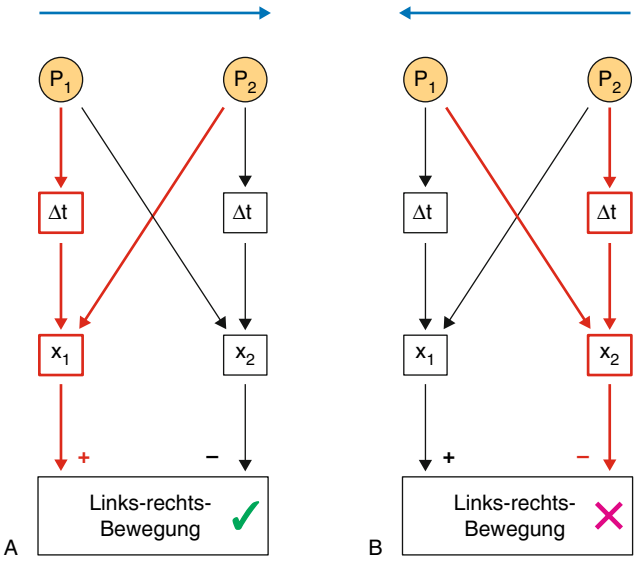


Abb. 2.17 Zur Funktionsweise eines richtungsspezifischen Reichardt-Bewegungsdetektors. In (**A**) hat eine Reizbewegung von links nach rechts eine exzitatorische Wirkung, in (**B**) eine Reizbewegung von rechts nach links eine inhibitorische Wirkung

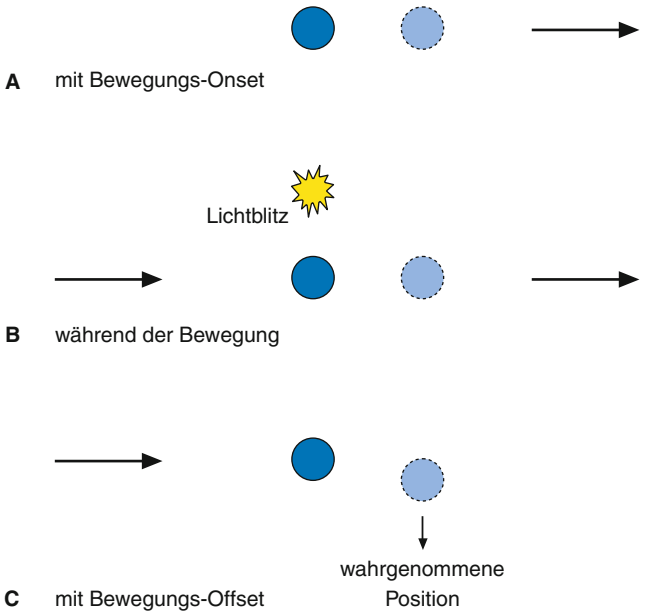


Abb. 2.18 Ein plötzlich erscheinender Zielreiz bewegt sich nach rechts und verschwindet dann vom Bildschirm. Bestimmt ein Beobachter entsprechend seinem Wahrnehmungseindruck den Ort des Onsets (**A**) oder des Offsets (**C**), zeigen sich jeweils Lokalisationsfehler in Bewegungsrichtung. Wenn während der Bewegung auf gleicher Höhe ein Lichtblitz dargeboten wird, erscheint der Lichtblitz deutlich hinter dem Zielreiz (**B**). Diese Lokalisationsfehler werden als Fröhlich-Effekt (**A**), repräsentationales Momentum (**C**) und als Flash-lag-Effekt (**B**) bezeichnet

druck hinterlässt, weil sich dann exzitatorische und inhibitorische Wirkungen aufheben.

Entgegen dem Reichardt-Detektor setzt sich die wahrgenommene Bewegung aber nicht nur aus den raumzeitlichen Informationen zusammen, die der Reiz benötigt, um nacheinander zwei rezeptive Felder im Gesichtsfeld zu überstreichen. Ansonsten wäre ein Einfluss des Kontexts nicht zu erwarten, der aber seit Längerem bekannt ist: So beeinflusst beispielsweise eine Verschiebung des Hintergrundes die Geschwindigkeit und die Richtung der wahrgenommenen Bewegung (bzw. ruft diese gar erst hervor; vgl. die *induzierten Bewegungen*; Wallach 1959). Außerdem hat schon Gibson (1950, 1979) auf die Bedeutung des Hintergrundes hingewiesen (vgl. auch Verri et al. 1992). Die bei Bewegungen zu beobachtenden Flussmuster (▶ Abschn. 2.3.3) oder die bei Reizbewegungen auftretenden kinetischen Auf- und Verdeckungen des Hintergrundes sind zudem wichtige Kriterien zur Abgrenzung von Fremd- und Eigenbewegungen.

Auf einen anderen Kontexteffekt hat J. F. Brown schon in den 1930er Jahren aufmerksam gemacht. Bewegt man einen Reiz mit gleicher Geschwindigkeit durch zwei Fenster unterschiedlicher Größe, so wird die Geschwindigkeit im kleineren Fenster viel höher empfunden als im größeren (Brown 1931; vgl. auch Algom und Cohen-Raz 1987; Mashour 1964; Müsseler 1999b). Derartige Kontexteffekte demonstrieren, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit sich nicht analog der physikalischen Geschwindigkeit aus dem Quotienten $v = s/t$ ergibt und damit nicht durch die sukzessive Reizung aneinandergrenzender Netzhautstellen und deren rezeptiver Felder bestimmt werden kann.

Von den anderen sehr vielfältigen Aspekten und Effekten der Bewegungswahrnehmung (Überblick in Epstein und Rogers 1995) werden hier drei weitere Illusionen beispielhaft behandelt. Sie sind in den letzten Jahren (wieder) in das Blickfeld des Forschungsinteresses gerückt und äußern sich jeweils in Form von Misslokalisationen in Bewegungsrichtung. Die erste Illusion besteht darin, dass ein bewegter Reiz nicht an der Position wahrgenommen wird, an der er im Gesichtsfeld erscheint, sondern ein wenig in der Bewegungsrichtung verschoben (Abb. 2.18A). Mit anderen Worten, die ersten Positionen eines bewegten Reizes entziehen sich unserer bewussten Wahrnehmung. Diese Fehllokalisation wurde erstmals von dem Astronomen O. Pihl bei Beobachtungen am Sternenhimmel berichtet, wird aber aufgrund der ersten systematischeren Untersuchungen Friederich W. Fröhlich (1923; vgl. Kerzel und Müsseler 2002; Müsseler und Aschersleben 1998; Müsseler und Tiggelbeck 2013; neuere Überblicke in Kerzel 2010; Müsseler und Kerzel 2016) zugeschrieben. Nach ihm reflektiert der Effekt die sogenannte Empfindungszeit, also die Zeit, die bis zum Aufbau einer ersten phänomenalen Repräsentation verstreicht.

Nachdem der Fröhlich-Effekt lange Zeit in Vergessenheit geraten war, ist er in den 1990er Jahren im Zusammenhang mit dem Flash-lag-Effekt wiederentdeckt worden. Der Flash-lag-Effekt ist von Romi Nijhawan (1994) in einer viel beachteten Arbeit mit einer Versuchsanordnung beschrieben worden, in der ein Balken um seinen Mittelpunkt rotiert und bisweilen durch begleitende stroboskopische Lichtblitze flankiert wird. Dabei ist zu beobachten, dass die Wahrnehmung des Lichtblitzes dem bewegten Reiz hinterherhinkt (deshalb Flash-lag-Effekt; Abb. 2.18B). Nijhawan war sich wohl nicht bewusst, dass eine sehr ähnliche Versuchsanordnung – allerdings mit linearen Bewegungen – bereits in den 1930er Jahren von Wolfgang Metzger (1932) beschrieben wurde, der seinerseits auf eine Anordnung von Hazelhoff und Wiersma (1924) verweist. Nach Metzger ist der Flash-lag-Effekt auf die längere Latenzzeit des stationären

Lichtblitzes gegenüber dem bewegten Reiz zurückzuführen (vgl. auch Whitney et al. 2000). Ein anderer Ansatz nimmt an, dass ein stationärer Stimulus eine größere Wahrnehmungspersistenz aufweist und dadurch den Effekt verursacht (Krekelberg und Lappe 2000). Nach Nijhawan reflektiert der Flash-lag-Effekt einen Extrapolationsmechanismus, der die bei Bewegung unvermeidbare Diskrepanz zwischen physikalischen und – aufgrund von Wahrnehmungslatenzen verzögerten – phänomenalen Positionen des Reizes kompensiert.

Neben dem Fröhlich-Effekt und dem Flash-lag-Effekt ist noch ein dritter Lokalisationsfehler in Bewegungsrichtung bekannt: Wenn der Endpunkt einer Bewegung bestimmt werden soll, lokalisiert man den Reiz an einem Ort, den er noch gar nicht erreicht hatte (◘ Abb. 2.18C). Diese Variante wurde meist mit höheren kognitiven Gedächtnisprozessen in Verbindung gebracht, die inkorporierte physikalische Bewegungstendenzen repräsentieren sollen. Dementsprechend bezeichnete man dieses Phänomen als repräsentationales Momentum (Freyd und Finke 1984; Hubbard 2005, 2014a; vgl. aber auch die perzeptuellen Erklärungen von Jordan et al. 2002; Kerzel 2000; Kerzel et al. 2001).

Bisher wurden für die drei Lokalisationsfehler meist unabhängige Erklärungsansätze entwickelt. Mehrere Autoren gehen aber auch einem gemeinsamen Erklärungsansatz nach (Erlhagen und Jancke 2004; Hubbard 2014b; Jancke und Erlhagen 2010; Kerzel 2010). Beispielsweise nehmen Jancke und Erlhagen (2010; vgl. auch Müsseler et al. 2002; Müsseler und Kerzel 2016) an, dass mit Präsentation eines Reizes auf einer topografisch aufgebauten internen Raumkarte exzitatorische und inhibitorische Prozesse ausgelöst werden, die nicht auf den Ort der Stimulation beschränkt bleiben. Dies führt zum Aufbau eines Aktivierungsmusters, das kontextuelle Informationen von angrenzenden Arealen des visuellen Gesichtsfeldes integriert. Wenn sich ein Reiz bewegt, trifft er auf die durch ihn selbst präaktivierten Areale, wodurch sich das Aktivierungsmuster zu einer reizgetriebenen dynamischen „Welle" modifiziert (vgl. auch Kirschfeld und Kammer 1999; Müsseler et al. 2002). Neurophysiologische Evidenz für diese Welle ließ sich auf corticaler Ebene (Erlhagen et al. 1999) und auf der Ebene der retinalen Ganglienzellen (Berry et al. 1999) finden. Außerdem ist der wellenetablierende Mechanismus entsprechend modellierbar (Erlhagen 2003; Erlhagen und Jancke 2004; Jancke und Erlhagen 2010; vgl. auch Bocianski et al. 2008, 2010).

Das Aktivierungsmuster in Form einer Welle liefert einen Ansatzpunkt zur Erklärung der drei Misslokalisationen. Was man aus psychophysischer Sicht hinzufügen muss, ist lediglich die Annahme einer Wahrnehmungsschwelle. Danach entsteht der Fröhlich-Effekt in der Aufbauphase der Bugwelle. Da diese dann schon bei Erreichen der Schwelle eine entsprechende „Schiefe" aufweist, gehen die ersten Positionen verloren. Das repräsentationale Momentum ist durch die Verfallszeit von überschwelliger zu unterschwelliger Wahrnehmung gekennzeichnet. In gewissem Sinne schwappt die Welle dann über die Endposition des Reizes hinaus. Der Flash-lag-Effekt schließlich entsteht dadurch, dass der bewegte Reiz durch die von ihm selbst präaktivierten Areale eine schnellere Verarbeitung erfährt als der stationäre Reiz. In der Zukunft wird sich erweisen, ob eine derartige Modellvorstellung haltbar ist. Weitere Aspekte der Bewegungswahrnehmung werden in ▶ Kap. 22 erörtert.

◘ **Abb. 2.19** Das Figur-Grund-Problem des Kippbildes von Rubin (1921/2001). Man sieht entweder die Vase vor blauem oder die zwei Gesichter vor gelbem Hintergrund

2.3.5 Objektwahrnehmung

Bisher standen die Fragen der Wahrnehmungsforschung im Vordergrund, wie man die Farbe und die räumliche Position eine Objekts bestimmt oder wie man dessen Bewegung erfasst. Wie aber werden die Objekte selbst erkannt? Mit dieser Frage adressiert man das komplexeste und schwierigste Problem der Wahrnehmungsforschung.

▪ Organisationsprinzipien

Um ein Objekt zu erkennen, muss man es zunächst vom Hintergrund trennen. Dies erscheint uns viel selbstverständlicher, als es tatsächlich ist, und es blieb den Gestaltpsychologen vorbehalten, dieses Problem erstmals wissenschaftlich zu behandeln. Das **Figur-Grund-Problem** stellt sich uns zwar bei jedem Wahrnehmungsvorgang, in den sogenannten Kippbildern wie der Rubin'schen Figur in ◘ Abb. 2.19 wird die Problematik aber auch subjektiv nachempfindbar (Rubin 1921/2001). Der Beobachter sieht entweder die Vase oder die zwei Gesichter, und von Zeit zu Zeit nimmt er einen spontanen Wechsel der Figur-Grund-Zuordnung wahr. In der Sprache der Gestaltpsychologen wirkt die im Vordergrund stehende Figur jeweils „dinghaft", während der Hintergrund „ungeformt" im wahrsten Sinne „in den Hintergrund rückt". Dies steht im Einklang mit Befunden, wonach in solchen Kippfiguren die trennende Kante der Figur zugeordnet wird, während der Hintergrund diese Kante nicht hat (z. B. Driver und Baylis 1995, 1996). Auch neurophysiologisch werden derartige Kippfiguren, insbesondere der von Zeit zu Zeit zu beobachtende spontane Wechsel der Figur-Grund-Zuordnung, im Zusammenhang mit den Merkmalssynchronisationen diskutiert (▶ Abschn. 2.3.5; z. B. Roelfsma und Singer 1998).

Das Figur-Grund-Problem steht in engem Zusammenhang mit den anderen Organisations- und Gruppierungsprinzipien,

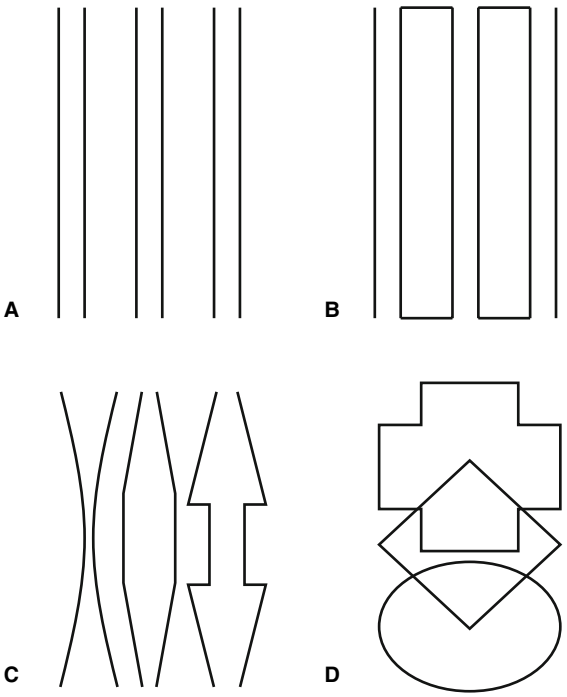


Abb. 2.20 Gestaltgesetze der Figur-Grund- und der Objektgliederung. Die Gesetze der Nähe (**A**), der Geschlossenheit (**B**), der Gleichartigkeit (**C**) und der durchgehenden Linie (**D**)

die durch die **Gestaltgesetze** vermittelt werden. Beispiele dieser Organisationsprinzipien sind in Abb. 2.20 zu sehen.

Die wichtigsten Gesetze sind bereits durch Max Wertheimer (1923; Auszug in Yantis 2001) belegt worden. Wolfgang Metzger hat sie 1966 in einer zusammenfassenden Abhandlung zu sieben Gesetzen gruppiert:

1. *Gesetz der Gleichartigkeit:* Gleichartige Elemente in Bezug auf Form, Farbe, Helligkeit etc. werden eher gruppiert.
2. *Gesetz der Nähe:* Nahe Elemente werden gruppiert.
3. *Gesetz des gemeinsamen Schicksals:* Beispielsweise in gleicher Richtung bewegte Elemente werden gruppiert.
4. *Gesetz der Voreinstellung:* Sind bereits n Elemente nach einem bestimmten Prinzip organisiert, so wird ein hinzukommendes $n+1$-Element nach dem gleichen Prinzip gruppiert.
5. *Gesetz des Aufgehens ohne Rest:* Alle Elemente werden in eine Gruppierung einbezogen.
6. *Gesetz der durchgehenden Linie:* Wenn möglich, wird eine Linie stetig – also geradlinig oder der Krümmung folgend – fortgesetzt.
7. *Gesetz der Geschlossenheit:* Elemente, die eine geschlossene Figur ergeben, werden eher gruppiert.

Ob diese sieben Gesetze ausreichen, um die gestaltordnenden Prinzipien zu klären, bleibt umstritten. Einige in der Gestalttradition arbeitende Psychologen sind weiter darum bemüht, zusätzliche Gesetze zu identifizieren (wie etwa die Gesetze der *common region* oder der *uniform connectedness*; Palmer und Rock 1994; Palmer 1992). Nun sind aber die durch die Gestaltgesetze vorgegebenen Organisationsprinzipien ohnehin nicht immer eindeutig. Gleichartigkeit und Nähe können gegeneinander ausgespielt werden (Quinlan und Wilton 1998). Gleiches gilt beispielsweise

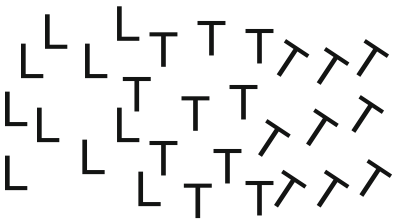


Abb. 2.21 Beispiel einer Textursegmentierungsaufgabe: Welcher Übergang ist auffallender: zwischen L und T oder zwischen T und gekipptem T? (Nach Beck 1966)

in Abb. 2.20D für das Gesetz der durchgezogenen Linie. Im oberen Teil werden ein Kreuz und eine Raute wahrgenommen, selten aber der Überlappungsbereich beider Figuren, der einen nach oben gerichteten Pfeil oder ein Haus offenbart. In solchen Fällen – und auch sonst – wird das *Prägnanzprinzip* (das „Gesetz der guten Gestalt") wirksam. Es besagt, dass immer die Tendenz zur einfachsten, besten und stabilsten Gesamtgestalt besteht. Das Prägnanzprinzip ist damit ein abstraktes und übergeordnetes Organisationsprinzip, das auf eine Vielzahl von Wahrnehmungsphänomenen anwendbar ist. Demgegenüber sind die o. g. Gestaltgesetze nur konkrete Ausformulierungen dieses allgemeinen Prinzips (s. aber ▶ Abschn. 2.4.2).

Die Willkürlichkeit der Gruppierung nach den gestaltpsychologischen Gesetzen wird u. a. in Textursegmentierungsaufgaben sichtbar, die ja ebenfalls eine perzeptuelle Organisation voraussetzen. Ein typisches Beispiel einer Textursegmentierungsaufgabe zeigt Abb. 2.21. Obwohl das T und das gekippte T nach dem Gesetz der Gleichartigkeit ihrer Form gruppiert werden sollten, tendieren Beobachter eher dazu, den Übergang zwischen L und T zu übersehen. Offensichtlich ist die Orientierung ein wichtigerer Faktor als die Formgleichartigkeit (vgl. aber Kimchi und Navon 2000).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zumindest die Figur-Grund- und die Textursegmentierung als Vorstufen der eigentlichen Objekterkennung anzusehen sind. Inwieweit der gesamten perzeptiven Organisation fest verdrahtete, präattentiv arbeitende Mechanismen zugrunde liegen, sei dahingestellt. In jedem Fall gibt es Anhaltspunkte dafür, dass die Textursegmentierung auf einer frühen, parallelen Stufe der visuellen Verarbeitung stattfindet (Julesz 1981; Nothdurft 1990; Überblick in Sagi 1995).

Wahrnehmungskonstanzen

Nehmen wir an, Sie haben eine visuelle Szene gemäß der im vorherigen Abschnitt genannten Mechanismen gegliedert. Sie haben also beispielsweise dieses Buch von seinem Hintergrund, etwa der Schreibtischfläche, visuell trennen können. Außerdem erkennen Sie die einzelnen Absätze und darin die Wörter, die durch kleine Zwischenräume voneinander getrennt sind. Eine weitere außerordentliche Leistung des Wahrnehmungsapparats besteht nun darin, dass diese Gliederungen trotz unterschiedlichster retinaler Projektionen erhalten bleiben. Wenn Sie z. B. dieses Buch in der Tiefe kippen, wird aus dem eigentlich rechteckigen Buchformat ein Trapezoid; aus einem Kreis wird eine Ellipse oder aus dem dreidimensionalen wird ein zweidimensionaler Gegenstand (dann nämlich, wenn Sie für eine Fläche des Buches eine exakt

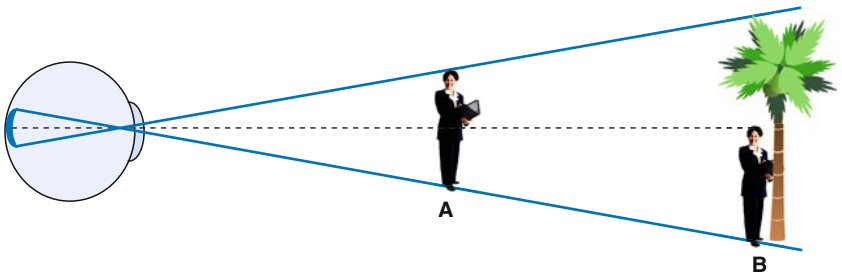


Abb. 2.22 Größenkonstanz. Obwohl die Frau an Punkt A in der retinalen Projektion genauso groß wie die Palme an Punkt B ist, wird sie nicht als gleich groß wahrgenommen. Umgekehrt ist die Projektionsgröße der Frau in Punkt A und B unterschiedlich, obwohl sich ihre wahrgenommene Größe nicht verändert

frontal parallele Projektion wählen). Trotzdem scheint die wahrgenommene Form des Buches gleich zu bleiben. Sie ändert sich nicht mit den Verzerrungen auf der Retina. Diese Leistung des visuellen Systems wird als Formkonstanz bezeichnet. Daneben unterscheidet man als weitere **Wahrnehmungskonstanzen** noch die Größen- und die Farb- bzw. Helligkeitskonstanz (Überblick in Walsh und Kulikowski 1998).

Bleiben wir zunächst bei der *Formkonstanz* (auch *Objektkonstanz*). Sie hängt natürlich eng mit den perspektivischen Verzerrungen zusammen, die wir schon bei der Raumwahrnehmung kennengelernt haben (▶ Abschn. 2.3.3). Beim Kippen des Buches stellen sich unterschiedliche Entfernungen der Buchecken zu uns ein, und Formkonstanz ist nichts anderes als die Verrechnung dieser Distanzen zu einer konstanten relativen Form des Objekts. Dementsprechend kann man die Formkonstanz auch als perspektivische Invarianz bezeichnen (Pizlo 1994).

Auch die *Größenkonstanz* korrigiert perspektivische Verzerrungen. In Abb. 2.22 ist die Frau an Punkt B in der retinalen Projektion etwa nur halb so groß wie an Punkt A, dennoch wird sie nicht als kleiner wahrgenommen. Zum einen, weil wir wissen, dass der Mensch im Allgemeinen eine konstante Körpergröße hat, und zum anderen, weil das System aus der Distanzinformation eine Größenschätzung „berechnet", die weitgehend unabhängig von der Distanz zum Beobachter ist (mathematisch ergibt sich die Größe ja eindeutig aus dem Seheinfallswinkel und der Distanz). Dies funktioniert auch mit Objekten, über die keinerlei Vorinformationen bezüglich der Größe vorliegen. – Selbst wenn man um diese Zusammenhänge weiß, kann man sich dem Eindruck nicht entziehen. Dies wird in einigen Wahrnehmungsillusionen, beispielsweise der *Ponzo-Täuschung* in Abb. 2.23, deutlich. Die durch den Kontext induzierte Tiefe (sich in die Ferne erstreckende Gleise) geht in die Größenschätzung ein und wirkt unmittelbar modifizierend auf den Wahrnehmungseindruck.

Die *Helligkeits-* und *Farbkonstanz* funktionieren ebenfalls nach dem Prinzip, dass die empfundenen (Helligkeits- bzw. Farb-)Eigenschaften weitgehend unabhängig von den umgebenden distalen Darbietungsbedingungen sind. Die Helligkeitskonstanz bezieht sich auf die achromatischen, die Farbkonstanz auf die chromatischen Farben. Betrachten wir beispielsweise einen schwarzen Aufdruck auf weißem Papier. Das Weiß des Papiers erscheint uns in der hellen Sonne genauso wie in einem schwach beleuchteten Raum. Ebenso bleibt das Schwarzempfinden unverändert. In Wirklichkeit ist die von der schwarzen Fläche reflektierte Lichtmenge in der Sonne viel höher als die reflektierte Lichtmenge der weißen Umgebung im schwach beleuchteten Raum. Würden wir also nicht über einen Mechanismus der Helligkeitskonstanz verfügen, müsste sich die schwarze Fläche im abgedunkelten Raum in eine weiße Fläche im Sonnenlicht verwandeln. Der entscheidende Punkt ist offensichtlich, dass das visuelle System das Umfeld in seine Berechnungen mit einbezieht. In diesem Zusammenhang sei auf den in ▶ Abschn. 2.3.1 erwähnten Simultankontrast verwiesen, der ja ebenfalls durch den Kontexteinfluss gekennzeichnet ist. Wallach (1948) konnte an diesem Phänomen wohl in Anlehnung an Hess und Pretori (1894) zeigen, dass die wahrgenommene Helligkeit einer Fläche gleich bleibt, wenn man das Intensitätsverhältnis zu ihrem Umfeld konstant hält. Das, was demnach zur Helligkeitskonstanz führt, ist das gleichbleibende Verhältnis der von den Flächen reflektierten Lichtmengen. Ähnliches gilt für die Farbkonstanz.

Zusammenfassend demonstrieren die Konstanzphänomene, dass wir Form, Größe, Helligkeit und Farbe eines Objekts unabhängig von den meist irrelevanten Dimensionen Orientierung, Distanz und Beleuchtungsstärke wahrnehmen. Dies führt zu einer immensen Stabilisierung unseres Wahrnehmungseindrucks. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass die hier gewählte Abfolge in der Darstellung nicht unbedingt nahelegen sollte, die Konstanzleistung als Post-Organisationsphänomen zu betrachten. Zumindest was die Helligkeitskonstanz und die Gruppierung anbelangt, deuten die Befunde von Rock et al. (1992) eher darauf hin, dass die Gruppierung nach der Helligkeitsbestimmung einsetzt. Inwieweit dies verallgemeinert werden kann, sei dahingestellt.

Wahrnehmen als (Wieder-)Erkennen

Die Objekte, die wir wahrnehmen, sind nicht nur durch eine bestimmte Position, Form und Farbe ausgezeichnet, sondern

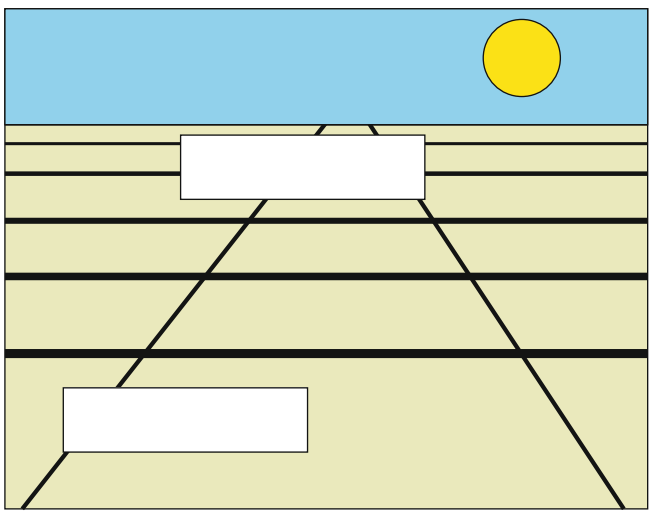


Abb. 2.23 Ponzo-Täuschung. Welches Rechteck ist größer?

immer auch durch bestimmte Bedeutungen und Funktionen. Nach oben zeigende Winkel, kombiniert mit horizontalen Linien wie die Buchstaben in ◘ Abb. 2.24, werden unmittelbar jeweils als A erlebt. Bei Buchstaben wird offensichtlich, dass sich diese Bedeutungseigenschaften aus vorhergehenden Lernprozessen ableiten, die im überdauernden Wissensgedächtnis gespeichert sind. Erst dadurch wissen wir, einen Winkel und eine Linie als A zu interpretieren. ◘ Abb. 2.24 verdeutlicht weiter, dass diese Bedeutungszuweisung bei sehr unterschiedlichen Formen, Größen und Orientierungen beibehalten wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wir – um es in den Worten von Bruner (1957) zu formulieren – „die Dinge in kognitiven Kategorien wahrnehmen". Das trifft nicht nur für Buchstaben zu, es gilt implizit für die Wahrnehmung aller uns umgebenden Gegenstände.

Nun wäre es eine Fehleinschätzung, würde man diese Interpretation bzw. die Zuordnung des Wahrgenommenen zu Kategorien als eine rein postperzeptive Leistung deklarieren. Mit anderen Worten, die Vorstellung, der Interpretationsvorgang setze erst am Wahrnehmungsinhalt an und habe mit dem eigentlichen Wahrnehmungsvorgang nichts zu tun, führt in die Irre. Dass dem nicht so ist, zeigen u. a. Untersuchungen zum *Vertrautheitseffekt* (*familiarity effect*; z. B. Krueger 1975; Shen und Reingold 2001). Er demonstriert, dass im Wissensgedächtnis gespeicherte Buchstaben oder Wörter aufgrund ihrer Vertrautheit schneller und besser verarbeitet werden können als beispielsweise gespiegelte oder rotierte Buchstaben. Dies wird als Beleg von Wissenseinflüssen auf frühe visuelle Verarbeitungsstufen bewertet.

Als wesentliches Problem der Objekterkennung gilt die Frage, wie die Inhalte des Wahrnehmungsprozesses mit der Wissensrepräsentation überhaupt in Verbindung treten. Eine zunächst einfache Vorstellung zur Lösung dieses Problems ist der sogenannte **Schablonenvergleich** (*template matching*): Ein Objekt wird mit im Wissensgedächtnis gespeicherten Schablonen (Prototypen) verglichen. Kann das Objekt mit einer Schablone zur Deckung gebracht werden, so ist das Objekt identifiziert.

Dabei stellt sich allerdings die Frage, über wie viele Schablonen das visuelle System verfügt. Es ist offensichtlich, dass der Erklärungswert solcher Modellvorstellungen gegen Null geht, wenn die Anzahl der Prototypen ins Unendliche steigt. Modelle, die hier allzu leicht mit der Prototypenanzahl jonglieren, werden deshalb in der Literatur meist spöttisch mit der Frage nach einem Großmutterdetektor konfrontiert. Dieses Problem wird auch durch die Vielfalt der Buchstaben in ◘ Abb. 2.24 veranschaulicht. Um nicht genauso viele A-Schablonen wie A-Buchstaben in dieser Abbildung zu postulieren, sind zunächst die Buchstaben zu normalisieren, d. h., sie wären in Form, Größe und Orientierung einer Schablone anzupassen. Diese „Aufarbeitung des Eingangssignals ist keineswegs trivial, wie Zeichen- und Mustererkennungsprogramme aus dem Bereich der Computertechnologie offenbaren. Die Probleme, die sich durch einen zu fordernden Reizgeneralisierungs- bzw. Kategorisierungsmechanismus ergeben, werden hier nur vorverlagert.

Die alternative Vorstellung zum Schablonenvergleich ist die **Merkmalsanalyse** (*feature analysis*). Sie geht davon aus, dass sich Objekte bzw. Figuren durch kritische Merkmale (bzw. deren Kombinationen) voneinander unterscheiden. Mit der Entdeckung von Merkmalsdetektoren im visuellen Cortex durch Hubel

◘ **Abb. 2.24** Wahrnehmen einer kognitiven Kategorie. Trotz unterschiedlicher Form, Größe und Orientierung wird jeweils ein A wahrgenommen

und Wiesel (z. B. 1959, 1968; ▶ Abschn. 2.2.3) wurden Merkmalsmodelle auch in der Psychologie und den Computerwissenschaften populär. Eine weite Verbreitung fanden sie erstmals durch das *Pandämonium-Modell*, das von Selfridge (1959) zum Erkennen von Morsecodes entwickelt und in Zusammenarbeit mit Neisser (1967) zu einem Algorithmus zum Erkennen von Buchstaben weiterentwickelt wurde.

Im Pandämonium-Modell werden auf der untersten Ebene parallel arbeitende Merkmalsdämonen angenommen, die auf einfache Reizmerkmale reagieren (z. B. senkrechte, schräge oder waagerechte Linien, Spitz- oder Rechtwinkligkeit, geschlossene oder offene Kreise). Sie geben ihre Informationen entsprechend zuvor gelernter Verbindungen an sogenannte kognitive Dämonen weiter, die in diesem Fall einfache Buchstabenanalysatoren repräsentieren. Der kognitive Dämon des Buchstabens A wird z. B. durch die Merkmalsdämonen „schräge Linie nach links/rechts", „waagerechte Linie" und „spitzer Winkel" aktiviert. Zwar sind auch andere Buchstaben durch einzelne dieser Merkmale charakterisiert, doch nur der Buchstabe A ist durch diese Kombination erschöpfend beschrieben. Dies führt dazu, dass der kognitive Dämon A „am lautesten schreit" und daher der Reiz von einem sogenannten Entscheidungsdämon als A identifiziert wird.

Die Merkmalsanalyse ist gegenüber dem Schablonenvergleich recht flexibel. Man muss heutzutage daher kein Anhänger des (etwas veralteten) Pandämonium-Modells sein, um das generelle Prinzip der Merkmalsanalyse zu favorisieren. Da es sich auch nicht um ein Prinzip handelt, das nur von der Wahrnehmungsforschung beansprucht wird, werden wir die Idee, Objekte durch Merkmale zu repräsentieren, noch an anderen Stellen in diesem Buch aufgreifen. Eine Vorstellung ist beispielsweise die, dass die Extraktion der Reizmerkmale automatisch und parallel auf einer frühen Stufe der visuellen Verarbeitung stattfindet und dass die Integration der Merkmale zu einem Objekt oder einer Figur fokale Aufmerksamkeit voraussetzt (Merkmalsintegrationstheorie, *feature integration theory*; Treisman und Gelade 1980; ▶ Kap. 5).

Allerdings hat die Repräsentation von Objekten durch verteilte Merkmale nicht nur Vorteile. Sie ist auch mit dem Problem der Integration konfrontiert. Dass die Integration ein unbedingt notwendiger Mechanismus ist, verdeutlicht die folgende Frage: Wie erkennt das verarbeitende System in einer Szene mit mehreren Objekten, welche Merkmale zu welchen Objekten gehören? Gegeben seien beispielsweise ein rotes Dreieck und ein gelber Kreis. Wenn durch frühe visuelle Verarbeitungsprozesse die Form- („Dreieck“ und „Kreis“) und Farbmerkmale („rot“ und „gelb“) unabhängig voneinander extrahiert werden, braucht man wiederum einen Mechanismus, der die Merkmale miteinander in Verbindung setzt. Ansonsten wäre die Wahrnehmung eines gelben Dreiecks und eines roten Kreises nicht auszuschließen. Dieses Problem wird als **Bindungsproblem** (*binding problem*) bezeichnet.

Als Lösung des Bindungsproblems ist u. a. vorgeschlagen worden, dass die räumliche Position zwischen den Merkmalen vermittelt. Neurophysiologische Befunde legen ja nahe, dass Identitäts- und Positionsinformationen in unterschiedlichen, aber interagierenden Pfaden verarbeitet werden (▶ Abschn. 2.2). Wenn man nun annimmt, dass Identitätsmerkmale wie Form, Farbe oder Größe nicht unabhängig von Positionsmerkmalen verarbeitet werden, so könnte die Objektposition im Raum die Funktion eines bindenden Elements erfüllen (z. B. Van der Heijden 1992). In diesem Fall wäre zu erwarten, dass – wann immer Identitätsmerkmale erkannt worden sind – auch die Position bekannt ist. Die Alternative wäre, dass sich die Position eines Objekts nicht grundsätzlich von anderen Merkmalen unterscheidet und damit Identitäts- und Positionsinformationen unkorreliert sind. Verhaltensexperimente, die vom Beobachter sowohl Identifikations- als auch Positionsbestimmungen verlangen, legen die erste Annahme nahe. Mit anderen Worten, wenn man die Identität eines Objekts erkannt hat, kann man sehr häufig auch seine Position angeben, aber nicht unbedingt umgekehrt (Müller und Rabbitt 1989; Tsal und Lavie 1988; Van der Heijden et al. 1995; vgl. auch Van der Heijden et al. 1996).

Auch auf neurophysiologischer Ebene haben sich Vorstellungen darüber entwickelt, wie das Bindungsproblem zu überwinden ist. Da die anzunehmenden Merkmalsdetektoren im Cortex auch immer räumlich verteilt sind (d. h. in unterschiedlichen Hirnregionen lokalisiert sind), ist hier die Bindungsnotwendigkeit noch offensichtlicher. Es gibt Hinweise dafür, dass Bindung durch synchrones Oszillieren einzelner Zellen (oder Zellregionen) zustande kommen könnte. Mit anderen Worten, die Neurone der am Erkennungsprozess beteiligten Hirnareale weisen nicht einfach eine Erhöhung ihrer Entladungsrate auf, sondern sie zeigen mit den zu bindenden Neuronen weiter entfernter Areale ein gleichmäßiges Auf und Ab in der Entladungsrate (40-Hz-Oszillationen; für einen Überblick vgl. z. B. Singer 1994; Singer et al. 1997; ▶ Kap. 18).

Bisher haben wir Objekterkennung anhand einfacher, meist zweidimensionaler Merkmale erläutert. Berücksichtigt man zusätzlich die dritte Raumdimension, eröffnen sich weitere Möglichkeiten. Dies hat Biederman (1987) dazu veranlasst, eine Theorie des Objekterkennens durch grundlegende Teilkomponenten (bzw. -körper) zu entwickeln (*recognition-by-components theory*). Seinem Ansatz folgend gibt es eine begrenzte Anzahl dieser

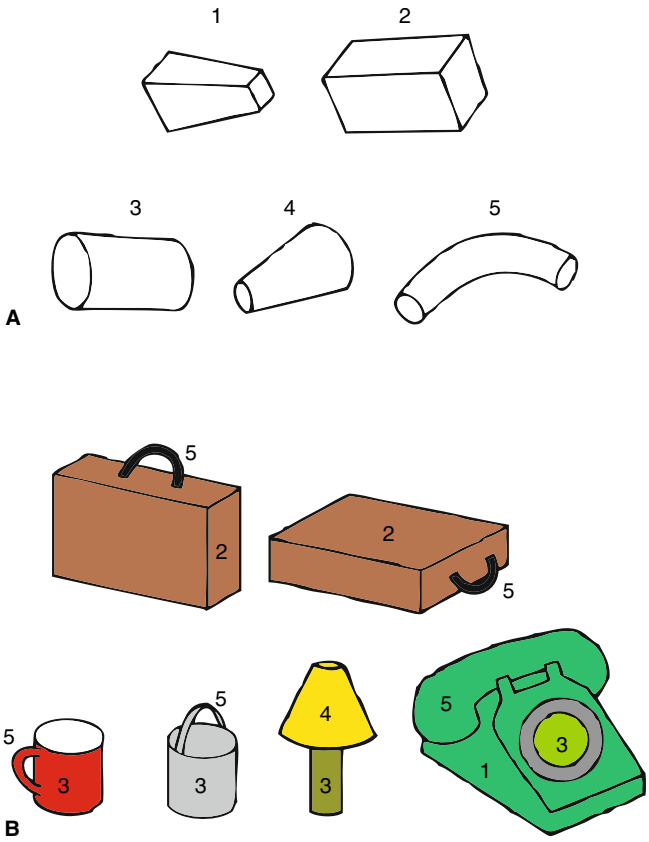


Abb. 2.25 **A** Geons. **B** Einige Objekte, die sich aus einer begrenzten Anzahl von Geons bilden lassen. Die Objekte werden nicht nur durch die in ihnen enthaltenen Geons repräsentiert, sondern auch durch eine Beschreibung ihrer strukturellen Beziehungen. Ein gekrümmter Bogen an einem Zylinder wird so zu einer Tasse oder einem Eimer. (Nach Biederman 1987).

Komponenten, die sogenannten *Geons* (Geon = geometrisches Ion; Abb. 2.25). Typische Geons sind Quader, Kegel, Zylinder und gekrümmte Bögen, die sich zu ganz unterschiedlichen Objekten kombinieren lassen. Die umgekehrte Forderung gilt natürlich auch: Jedes Objekt unserer Wahrnehmung ist in Geons zergliederbar, wobei sich durch neue Kombinationen auch neue Objekte kreieren lassen. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die Geons wiederum bestimmten Kriterien der Kantendetektierung nachempfunden sind, z. B. den Kriterien der Symmetrie, Parallelität und Krümmung. Dadurch ist die theoretische Anzahl der Geons innerhalb des Ansatzes auf 36 limitiert, was aber für das weitere Verständnis unerheblich ist (weitere Details in Biederman 1987, 1995, 2000).

Der Ansatz unterstellt, dass Geons in ihrem Bedeutungsinhalt zunächst abstrakt und unabhängig von ihrer Größe als auch von ihrer Lage im Raum wahrnehmbar sind. Ein konkretes Objekt ergibt sich aus einer Liste der Teilkörper zusammen mit einer Beschreibung ihrer strukturellen Beziehungen (z. B. eine Lampe ergibt sich aus einem „Kegel am oberen Ende eines Zylinders“). Diese Liste wird mit einer bereits repräsentierten Liste abgeglichen. Die Beschreibung der strukturellen Beziehungen zwischen den Elementarkörpern ist in reinen Merkmalsmodellen nicht enthalten, weswegen man diesen Ansatz auch der Klasse der *strukturell beschreibenden Merkmalsmodelle* zuordnet (ein ebenfalls hier einzuordnender Ansatz wird weiter unten behan-

delt; Marr 1982). Ihr Vorteil liegt beispielsweise darin, ein A von einem Λ unterscheiden zu können, was einfachen Merkmalsmodellen nicht gelingt. Außerdem sind in Merkmalsmodellen nicht ohne Weiteres neue Objekte kreierbar und als solche erkennbar.

Zusammenfassend haben Objekterkennungsansätze nur dann einen Erklärungswert, wenn sie zur Informationsreduktion beitragen. Deswegen setzen sich Objekterkennungsansätze auch immer mit Klassifizierungs- und Kategorisierungsfragen auseinander. Ein Problem, mit dem alle Objekterkennungsansätze konfrontiert sind, ist die Definition dessen, was ein Elementarmerkmal ist und wie viele es davon gibt. Julesz (1981) hat vorgeschlagen, dies mit Textursegmentierungsaufgaben zu lösen, wie wir sie in ◘ Abb. 2.21 kennengelernt haben. Vorlagen, die einen Texturtrennungsbereich aufweisen, unterscheiden sich danach in ihren Elementarmerkmalen, die von Julesz (1981) als *Textone* bezeichnet werden (vgl. auch Nothdurft 1990). Konsens darüber besteht bisher aber nicht.

2.4 Theorien der Wahrnehmung

Es gibt nicht *die* Theorie der Wahrnehmung. Keine der nachfolgend genannten Theorien versucht, alle bekannten Wahrnehmungsphänomene und -leistungen zu adressieren, geschweige denn zu erklären. Dies liegt zum einen an der Vielzahl und Vielfältigkeit der bekannten Wahrnehmungsillusionen, zum anderen aber auch daran, was man als „Erklärung" und „Theorie" überhaupt akzeptieren kann. Im Folgenden werden die vier einflussreichsten Strömungen der Wahrnehmungsforschung kurz dargestellt:

1. *Klassische Psychophysik:* Sie entstand im ausgehenden 19. Jahrhundert.
2. *Gestaltpsychologie:* Sie war in der Zeit vor dem Ersten bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges insbesondere in Deutschland populär.
3. *Wahrnehmungsökologischer Ansatz von James J. Gibson:* Er entwickelte sich nach dem Zweiten Weltkrieg.
4. *Computationaler Ansatz von David Marr:* Er entstand in den 1980er Jahren und ist somit auch schon ins Alter gekommen, dennoch verkörpert dieser Ansatz auch heute noch die gängige Vorstellung, Wahrnehmung als eine Transformation von Eingangssignalen aufzufassen.

Natürlich kann man innerhalb dieser Ansätze inhaltliche Überschneidungen zu den vorhergehenden Abschnitten ausmachen. So sind z. B. einige der psychophysischen und gestaltpsychologischen Prinzipien bereits erwähnt worden. Da aber Wahrnehmungsforscher ihre Fragestellungen und Ergebnisse häufig ausschließlich vor einem dieser theoretischen Hintergründe entwickeln und interpretieren, werden die Ansätze hier gesondert und zusammenhängend skizziert.

2.4.1 Die klassische Psychophysik

Der Beginn der modernen Psychologie ist mit dem Beginn der klassischen Psychophysik im ausgehenden 19. Jahrhundert verbunden. In der sich damals vollziehenden Einrichtung einer eigenständigen psychophysischen Disziplin – initiiert durch Gustav Theodor Fechner (1860) – befasste man sich mit den Abbildungsverhältnissen objektiver Reizeigenschaften im subjektiven Reizerleben und -empfinden. Genauer gesagt ist der Gegenstandsbereich der klassischen **Psychophysik** durch die Analyse und die Bestimmung der quantitativen Transformationsgleichungen zwischen einer sensorischen Eingangsgröße und einer am Empfinden und Verhalten orientierten Ausgangsgröße gekennzeichnet.

Damals standen zunächst Fragen im Vordergrund, wie sich die wahrgenommene Größe, Helligkeit oder Farbe eines Gegenstands ändert, wenn man seine physikalische Größe, Helligkeit oder Farbe ändert. Diese Fragen wirken auf uns heute eher banal. Man muss sich aber vergegenwärtigen, dass zur damaligen Zeit die Quantifizierbarkeit psychischer Phänomene grundsätzlich bezweifelt wurde und dass geeignete Messverfahren nicht verfügbar waren. Die Bereitstellung psychophysischer Methoden, die heutzutage nicht nur in der Wahrnehmungsforschung Verwendung finden, ist eines der großen Verdienste der Pioniere jener Zeit (▶ Zur Vertiefung 2.2 und ▶ Zur Vertiefung 2.4).

Da die klassische Psychophysik an den Transformationsgleichungen zwischen physischen Eingangssignalen und psychischen Ausgangssignalen interessiert war, muss man die psychischen Ausgangssignale auf einem vergleichbaren Skalenniveau messen wie die Eingangssignale. Bekanntlich setzt die Rationalskala einen Nullpunkt und gleiche Intervalle voraus, sodass man die gemessenen Werte im Verhältnis zueinander setzen kann. Die von Fechner (1860) vorgeschlagene Messung psychischer Ausgangsgrößen operiert mit Absolut- und Unterschiedsschwellen (jeweils messbar mithilfe psychophysischer Methoden; ▶ Zur Vertiefung 2.2). Die *Absolutschwelle* ist definiert als die am unteren Skalenende zu beobachtende eben merkliche Empfindung und wird mit dem Nullpunkt gleichgesetzt. Die *Unterschiedsschwelle* ist definiert als der eben merkliche Empfindungsunterschied zwischen zwei Reizen und bestimmt die messbare Intervallgröße. Nun hatte bereits Heinrich Weber festgestellt, dass das Verhältnis zwischen einem Standardreiz I und einem Reiz mit eben merklichem Unterschied ΔI konstant ist – was nichts anderes heißt, als dass die Größe des eben merklichen Unterschieds proportional mit dem Standardreiz wächst. Zunächst ist man davon ausgegangen, dass die Konstante nur mit der gemessenen sensorischen Dimension variiert:

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{konstant} \qquad \text{(Weber'sche Konstante)}$$

Unter Einbeziehung der Weber'schen Konstante hat nun Fechner die physikalische gegen die psychische Größe abgetragen (◘ Abb. 2.28). Die sich ergebende logarithmische Funktion lässt sich beschreiben als:

$$E = c \cdot \log(I) \qquad \text{(Fechner'sches Gesetz)}$$

Dabei ist E die wahrgenommene subjektive Größe (skaliert in eben merkliche Unterschiede), I die physikalische Größe und c eine Konstante, die sich unmittelbar zur Weber'schen Konstante in Beziehung setzen lässt.

Zur Vertiefung 2.4

Signalentdeckungstheorie

In der klassischen Psychophysik werden inter-, aber auch intraindividuelle Messvariationen auf unterschiedliche Zustände des jeweiligen sensorischen Apparats zurückgeführt. So ist z. B. offensichtlich, dass verschiedene Personen über eine unterschiedliche Sehschärfe (▶ Abschn. 2.3.1) verfügen oder dass bei ein und derselben Person die Sehschärfe kurzfristige Schwankungen aufweist, die durch unterschiedliche Aufmerksamkeits- oder Motivationszustände der Person bedingt sein können. Die unterschiedliche Erkennbarkeit eines konstanten Reizes unterliegt also Sensitivitätsschwankungen des Systems.

Moderne psychophysische Methoden berücksichtigen neben diesen Sensitivitätsschwankungen zusätzlich das *Entscheidungskriterium* eines Beobachters. Bei einer Reizdarbietung muss z. B. ein Beobachter eine Entscheidung darüber treffen, ob ein im Schwellenbereich dargebotener Reiz tatsächlich präsentiert wurde oder nicht. Diese subjektive Entscheidung kann konservativ erfolgen („Ich bin mir nicht sicher, also entscheide ich mit Nein!"), oder sie ist mit einem Risiko behaftet („Ich bin mir nicht sicher, aber ich entscheide mit Ja!"). Mithilfe der **Signalentdeckungstheorie** (*signal detection theory*, SDT; Swets et al. 1961), die vor dem Hintergrund des Signal-Rausch-Abstands technischer Kommunikationssysteme entwickelt wurde, lassen sich Sensitivität und Entscheidungskriterium getrennt voneinander bestimmen.

Für den Beobachter kommt es in der o. g. Situation darauf an, die Darbietung „mit Reiz" von der Darbietung „ohne Reiz" zu unterscheiden – oder, um es in der Terminologie der SDT auszudrücken, er muss den Reiz (das Signal) vom (Hintergrund-)Rauschen trennen. Die SDT unterstellt somit zwei Zustände des Systems: Signal + Rauschen (S + R) und Rauschen (R). Kann der Beobachter perfekt zwischen diesen beiden Zuständen trennen, d. h., antwortet er immer mit Ja, wenn ein Reiz dargeboten bzw. mit Nein, wenn kein Reiz dargeboten wurde, so hat er 100 % Treffer (*hits*) bzw. 100 % korrekte Ablehnungen (*correct rejections*). Er wird aber in einigen Versuchsdurchgängen das Signal verpassen (Verpasser, *misses*) oder, wenn kein Reiz dargeboten wurde, fälschlicherweise angeben, ein Reiz sei dargeboten worden (falsche Alarme, *false alarms*). Das sich daraus ergebende Vierfelderschema ist grundlegend für die SDT (◘ Tab. 2.1).

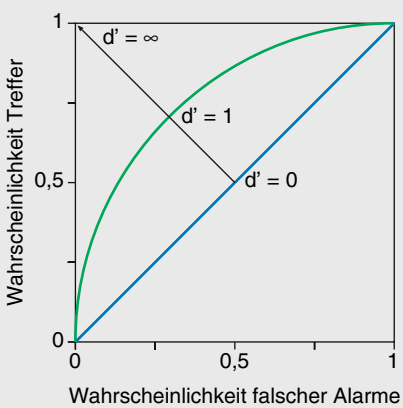
Nun kann man aus der empirisch beobachtbaren Anzahl von Treffern, Verpassern, falschen Alarmen und korrekten Ablehnungen auf die relative Lage der S + R- und der R-Verteilungen schließen (◘ Abb. 2.26). Ermittelt man bei einem Beobachter die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Treffer (Wahrscheinlichkeit der Ja-Antwort bei tatsächlicher Reizdarbietung) und der falschen Alarme (Wahrscheinlichkeit der Ja-Antwort bei unterbliebener Reizdarbietung; die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Verpasser und der korrekten Ablehnungen ergeben sich aus den jeweiligen Komplementärwahrscheinlichkeiten 1 – p), so resultiert daraus die Distanz der beiden Verteilungsmittelwerte in Form des *Sensitivitätsparameters d'*. Man muss dazu lediglich eine Verteilungsannahme – in der Regel die Normalverteilung – einführen. In ◘ Abb. 2.26 hat z. B. ein Beobachter ein Kriterium *c* verwendet, das zu 80 % Treffern und zu 40 % falschen Alarmen geführt hat. Dadurch sind gleichzeitig die Mittelwerte der Verteilungen festgelegt, und *d'* ergibt sich als *z*-Wert aus der Differenz

$$d' = z(\mathrm{T}) - z(\mathrm{F}),$$

wobei mit T und F die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Treffer und falschen Alarme in die Berechnungen eingehen (Vergleich alternativer Sensitivitäts- und Antwortparameter in Macmillan und Creelman 2005). Im vorliegenden Beispiel ergäbe sich $d' = 0{,}842 - (-0{,}253) = 1{,}095$ (vgl. die *z*-Tabellen einschlägiger Statistiklehrbücher). *d'* ist gleich null, wenn der Beobachter nicht zwischen S + R und R diskriminieren kann und somit T = F ist; *d'* wächst mit zunehmender Diskriminierbarkeit zwischen S + R und R an, was beispielsweise der Fall sein sollte, wenn man die Reizintensität erhöht.

◘ Tab. 2.1 Das Vierfelderschema einer Entdeckungsaufgabe

		Reizvorlage	
		mit Reiz (Signal + Rauschen)	ohne Reiz (Rauschen)
Beobachterurteil	Ja „Reiz vorhanden"	Treffer (*hits*)	falsche Alarme (*false alarms*)
	Nein „Reiz nicht vorhanden"	Verpasser (*misses*)	korrekte Ablehnungen (*correct rejections*)
		100 %	100 %



◘ Abb. 2.26 Die R- und S + R-Verteilung bei einem Kriterium *c*, das im vorliegenden Beispiel zu 80 % Treffern und zu 40 % falschen Alarmen geführt hat. Die Mittelwerte der Verteilungen determinieren den Sensitivitätsparameter *d'*

Zur Vertiefung 2.4 (*Fortsetzung*)

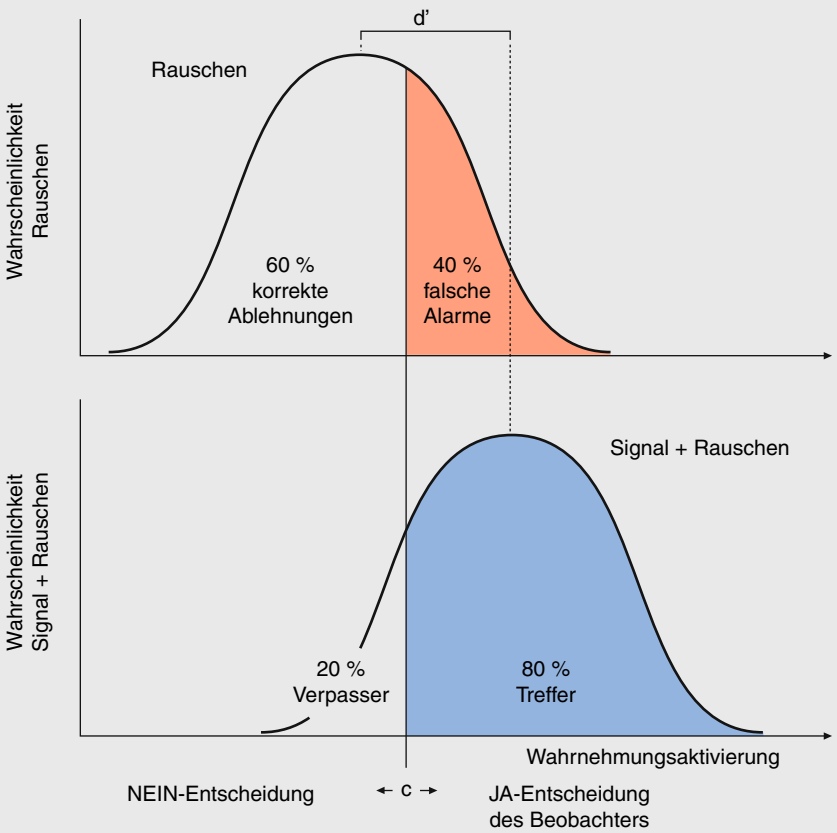
Der zweite Parameter der SDT ist das Entscheidungskriterium *c* des Beobachters bzw. dessen Antworttendenz (*response bias*). Es reflektiert die Strategie, eine Antwort gegenüber der anderen zu präferieren und ergibt sich rechnerisch aus

$$c = -0,5(z(\mathrm{T}) + z(\mathrm{F})).$$

Dieser Ausdruck wird null, wenn der Beobachter seine falschen Antworten im gleichen Maße auf falsche Alarme und Verpasser verteilt. Im obigen Beispiel wird $c = -0,5(0,842 + (-0,253)) = -0,295$, was einer leichten Tendenz zu mehr Ja-Antworten entspricht.

Sensitivitätsparameter *d'* und Antworttendenz *c* sind statistisch unabhängig voneinander. Dies ist nicht nur formal-mathematisch nachweisbar, sondern auch durch Experimente, in denen man die Auftretenswahrscheinlichkeit des Signals variiert. Tritt das Signal sehr selten auf, wird man bei unsicheren Beobachtungen eher zu Nein-Antworten tendieren; tritt das Signal sehr häufig auf, wird man umgekehrt eher Ja-Antworten präferieren. Grafisch lässt sich dies anhand einer Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeiten von Treffern und falschen Alarmen illustrieren, den sogenannten Isosensitivitätskurven (ROC-Kurven, ROC = *receiver operating characteristic*; ◘ Abb. 2.27). Sie beinhalten Kurven gleicher Sensitivität *d'*, aber unterschiedlicher Kriteriumswahl *c*. Variiert man in einem solchen Experiment zusätzlich die Intensität des Reizes, sodass dieser besser vom Rauschen diskriminierbar ist, verändert sich die Krümmung der ROC-Kurve und somit der Sensitivitätsparameter *d'*.

Mithilfe der SDT können nicht nur Entdeckungsaufgaben analysiert werden, sondern sie kann auch u. a. für Gleich-ungleich- und andere Klassifikationsaufgaben genutzt werden (sehr gute Einführung in Macmillan und Creelman 2005). Festzuhalten wäre auch, dass sich die SDT keineswegs nur zur Analyse von Wahrnehmungsaufgaben eignet, sondern dass sich mit ihr prinzipiell auch Gedächtnis-, Kategorisierungs- oder andere Aufgabentypen analysieren lassen (▶ Kap. 11 und 12). Nicht zuletzt deshalb wäre es äußerst irreführend, den Sensitivitätsparameter *d'* als ein Maß einer sensorischen Sensitivität zu verstehen (vgl. die Diskussion in Müsseler et al. 2001; Pylyshyn 1999).



◘ **Abb. 2.27** Kurve gleicher Sensitivität *d'*, aber unterschiedlicher Kriteriumswahl *c* (ROC-Kurve). Das Ausmaß der Krümmung ist ein Indikator für die Sensitivität *d'*

Später stellte man fest, dass das Fechner'sche Gesetz, das bisweilen auch als Weber-Fechner'sches Gesetz bezeichnet wird, nur innerhalb gewisser Grenzbereiche gültig ist, weswegen Stevens (1957) den Zusammenhang eher als eine Potenzfunktion beschrieb:

$$E = aI^b \qquad \text{(Stevens'sche Potenzfunktion)}$$

Dabei hängt *a* als konstanter Wert von der skalierten Maßeinheit abhängt und *b* – ebenfalls als konstanter Wert – repräsentiert das jeweilige Sinnesgebiet und die Sinnesleistung.

Stevens validierte die Potenzfunktion mit einer Variante des Konstanzverfahrens, der *Methode der direkten Größenschätzung (magnitude estimation*; Stevens 1957, 1975). Bei diesem Verfahren weist der Experimentator entweder einem Standardreiz einen numerischen Wert zu (z. B. 10), und die Aufgabe des Beobachters besteht darin, einen Vergleichsreiz entsprechend

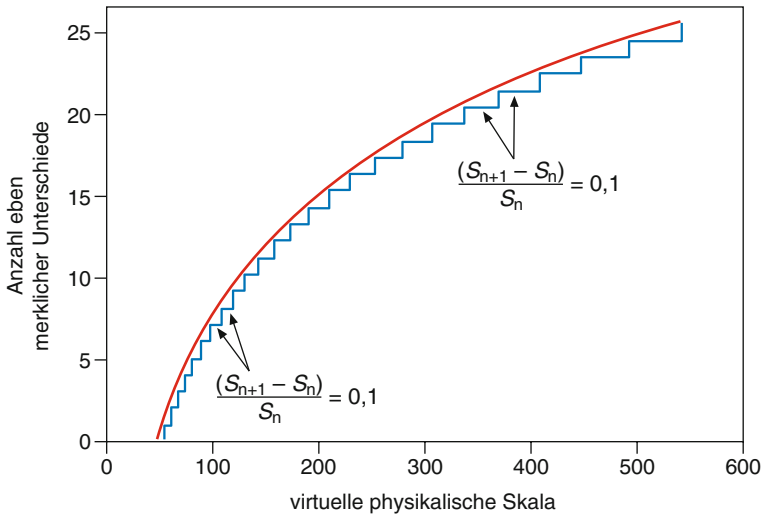


Abb. 2.28 Das aus der Weber'schen Konstante abgeleitete Fechner'sche Gesetz (durchgezogene Linie). Auf der Ordinate ist die Abfolge der eben merklichen Unterschiede – ausgehend von einer Absolutschwelle im Punkt 0 – abgetragen. I_0 wurde hier auf einer virtuellen physikalischen Skala willkürlich auf 50 und die Weber'sche Konstante auf 0,1 festgelegt

einzuschätzen. Wird dieser beispielsweise doppelt so intensiv oder hell eingeschätzt, ist der Wert 20 zu vergeben. Oder der Beobachter quantifiziert einen Reiz ohne Standardreiz. In beiden Fällen wird ein direkterer Weg der Skalierung beschritten, der nicht mehr mit den Unterschiedsschwellen wie in Abb. 2.28 operiert. Man bezeichnet ein solches Verfahren daher auch als *direkte Skalierung*.

Heutzutage beschränken sich psychophysisch arbeitende Wahrnehmungsforscher nicht auf die bloße Bestimmung der Transformationsgleichungen zwischen Physischem und Psychischem. Die Bestimmung der formalen Zusammenhänge ist allerdings dann von Interesse, wenn man gleichzeitig die neurophysiologischen und psychologischen Mechanismen zu identifizieren weiß, die diese Zusammenhänge bedingen. Dieser Aspekt kam in der klassischen Psychophysik sicherlich zu kurz.

2.4.2 Die Gestaltpsychologie

Vorab sei bemerkt, dass es nie *die* **Gestaltpsychologie** oder gar *die* Gestalttheorie gab. Vielmehr umfasste die Gestaltpsychologie mehrere deutschsprachige „Schulen", unter denen die Frankfurter Schule um Max Wertheimer (1880–1943) und die Berliner Schule um Kurt Koffka (1886–1941), Kurt Lewin (1890–1947) und Wolfgang Köhler (1887–1967) wohl hervorstachen. An dieser Stelle werden lediglich die Grundzüge vermittelt, die die verschiedenen gestaltpsychologischen Schulen insgesamt charakterisieren.

Die Gestaltpsychologie entstand zu Beginn des 20. Jahrhunderts als Gegenströmung zur damals vorherrschenden Elementenpsychologie. Die **Elementenpsychologie** ging von der Annahme aus, dass sich Wahrnehmung aus kleinsten elementaren Empfindungen zusammensetzt – einer Annahme, der bereits Christian von Ehrenfels im 19. Jahrhundert mit der Behauptung widersprach „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile". Diese Feststellung wird zwar häufig den Gestaltpsychologen zugeschrieben, findet sich aber auch schon bei Aristoteles (384–322 v. Chr.). In jedem Fall offenbart sich nach Wertheimer (1912) diese Kritik an der Elementenpsychologie u. a. im Phänomen der Scheinbewegung (▶ Abschn. 2.3.4). Dort basiert die Bewegungsempfindung offensichtlich nicht auf den Einzelempfindungen, weil kein Reiz existiert, der sich zwischen den stationären räumlichen Reizpositionen bewegt. Die Bewegungsempfindung wird als Reizeigenschaft hinzugefügt und ist in den lokalen Reizverhältnissen nicht vorhanden.

Ein in gewissem Sinne vergleichbares Phänomen, das ebenfalls keine Entsprechung in der Reizpräsentation aufweist, ist das der *Scheinkontur*. In Abb. 2.29 nehmen wir ein Sechseck wahr, obwohl die Reizanordnung kein Sechseck enthält (Kanisza 1979). Mehr noch, man „sieht" in den weißen Zwischenräumen die verbindenden weißen Linien des Sechsecks – ein Befund, der sich auch in entsprechenden okzipitalen Aktivierungen ausdrückt (Maertens und Pollmann 2005). Derartige Scheinkonturen illustrieren, dass die Wahrnehmung der Teile eines Reizmusters von der Gesamtkonstellation bestimmt wird. Weitere in diesem Kapitel bereits angesprochene Phänomene bestätigen dieses generelle Prinzip. Das Figur-Grund-Problem und die Konstanzphänomene (▶ Abschn. 2.3.5), also die Unabhängigkeit der wahrgenommenen Form, Größe oder Helligkeit von den lokalen Verhältnissen auf der Retina, sind auch nur ein Ausdruck dieses Sachverhalts und von den Gestaltpsychologen immer wieder als Beispiele angeführt worden. Diese Phänomene erfuhren sogar erstmals durch die Gestaltpsychologie eine ihnen gebührende wissenschaftliche Würdigung.

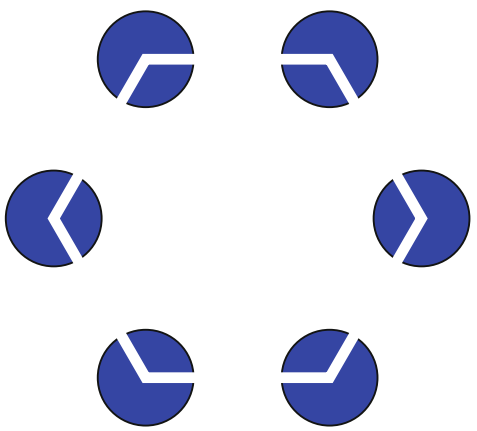


Abb. 2.29 Beispiel einer Scheinkontur. Man sieht ein Sechseck, das in der Reizkonstellation nicht enthalten ist

Die Gestaltpsychologen beschränkten sich aber nicht auf eine Kritik der Elementenpsychologie, sondern sie gingen den Gesetzen nach, wie Wahrnehmung organisiert ist. Dabei orientierte sich ihr Vorgehen an einer später durch Kurt Koffka (1935) berühmt gewordenen Frage: Warum sehen die Dinge so aus, wie sie aussehen? Ihre Antwort in Form der Gestaltgesetze ist auch heute noch allgegenwärtig und bereits in ▶ Abschn. 2.3.5 ausführlich diskutiert worden. Dort ist auch erwähnt worden, dass die Gestaltgesetze einem übergeordnetem Organisationsprinzip, dem Prägnanzprinzip, folgen. Es ist die Tendenz zur einfachsten, stabilsten und besten Gestalt.

Am Prägnanzprinzip entzündete sich auch die Kritik an der Gestaltpsychologie. Von Seiten der Gestaltpsychologie hatte man es versäumt, die Kriterien zu determinieren, wann und unter welchen Bedingungen eine einfachste, stabilste und beste Gestalt vorliegt. Ein Fehlen der Kriterien wird offensichtlich in strittigen Reizkonstellationen, in denen im Vorhinein nicht klar ist, was womit gruppiert wird (◘ Abb. 2.21). Zwar wird in solchen Fällen mit dem Prägnanzprinzip argumentiert, aber häufig nur im Nachhinein und oft auch nur aufgrund introspektiver Eindrücke. Der Vorwurf scheint daher berechtigt, dass zumindest die frühen Gestaltpsychologen mehr beschrieben als erklärt haben.

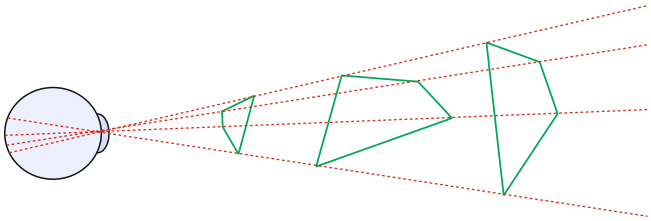
Man könnte daher infrage stellen, ob die Gestaltpsychologie überhaupt die Kriterien einer wissenschaftlichen Theorie erfüllt. Auf der Basis der vorliegenden Ausführungen ist dieser Zweifel berechtigt, wenngleich zugestanden werden muss, dass die verschiedenen gestaltpsychologischen Ansätze und ihre Hauptströmungen hier notwendigerweise unterspezifiziert bleiben müssen (Überblick in Gordon 2004, Kap. 2). Wolfgang Köhler (1958) hat beispielsweise versucht, eine gestaltpsychologische Theorie aufgrund von Prinzipien zu formulieren, die in spezifischen hirnphysiologischen Ideen konkretisiert wurden. Diese Ideen erscheinen allerdings aus heutiger Sicht sehr gewagt.

Nun würde man der Gestaltpsychologie aber nicht gerecht, wenn man sie als historisch überkommene und wissenschaftlich wertlose Strömung kennzeichnen würde. Die durch sie aufgeworfenen Fragen werden – wenn auch mit anderen Ansatzpunkten und Mitteln – durchaus fortgeführt. Außerdem existieren moderne Zugänge zur Gestaltpsychologie, die den subjektiv beschreibenden Charakter der frühen Gestaltpsychologen erweitern (z. B. Kanisza 1979; Palmer und Rock 1994; Palmer 1992).

Zu erwähnen bleibt noch, dass gestaltpsychologische Ideen nicht auf den Bereich der Wahrnehmungsforschung beschränkt blieben. So werden wir auch in anderen Kapiteln dieses Buches auf Überlegungen stoßen, die aus der gestaltpsychologischen Tradition hervorgegangen sind (z. B. in der Denkpsychologie; ▶ Kap. 16).

2.4.3 Der wahrnehmungsökologische Ansatz von James J. Gibson

Der wahrnehmungsökologische Ansatz geht auf den amerikanischen Psychologen James J. Gibson (1950, 1966, 1979) zurück. Er ging im Zweiten Weltkrieg der Frage nach, wie Piloten Entfernungsschätzungen beim Landeanflug vornehmen und ob diese Leistung optimierbar ist. Er gelangte dabei zu der Überzeugung, dass die Entfernung bereits in der umgebenden Oberflächeninformation enthalten ist und von uns nur aufgenommen werden muss. Nach Gibson und seinen Nachfolgern besteht die Aufgabe des Wahrnehmungsforschers lediglich im Aufspüren dieser Informationen. Diese Überzeugung bildete den Ausgangspunkt von Gibsons Theorie, der er bis zu seinem Tode im Jahre 1979 nachging.



◘ **Abb. 2.30** Die Mehrdeutigkeit des retinalen Abbildes im Hinblick auf Form, Größe und Orientierung

Gibson lehnt damit ab, das retinale Bild als Grundlage der Wahrnehmung zu betrachten. Das retinale Bild ist viel zu mehrdeutig im Hinblick auf Form, Größe und Orientierung (◘ Abb. 2.30). Es sind die optischen Anordnungen (*optic arrays*) der Oberflächen und deren charakteristische Veränderungen, die eindeutig das Layout und die Ereignisse in unserer Umwelt spezifizieren. Eine der Eigenschaften von Oberflächen haben wir bereits in ▶ Abschn. 2.3.3 kennengelernt, den Texturgradienten (s. auch den durch parallele Linien erzeugten Texturgradienten in ◘ Abb. 2.23). Der Texturgradient ist eine wichtige Variable höherer Ordnung, eine sogenannte *Invariante*: Die Entfernungsinformation des Gradienten bleibt nämlich erhalten, egal von welcher Stelle ein Beobachter eine Szene betrachtet. Das Erkennen derartiger invarianter Informationen bestimmt nach Gibson maßgeblich unsere Wahrnehmung.

Wahrnehmungsforscher, die sich dem ökologischen Ansatz verpflichtet fühlen, versuchen daher häufig, die Invarianten in formal mathematischer Form zu spezifizieren und deren psychologische Relevanz in Experimenten zu validieren. Als Beispiel sei das *Horizontverhältnis* erwähnt (Gibson 1979): Die Teile der Pfähle in ◘ Abb. 2.31, die auf einer ebenen Fläche über den Horizont hinausragen, werden im gleichen Verhältnis relativ zu den Teilen unter dem Horizont geschnitten. Objekte mit einem identischen Horizontverhältnis haben also die gleiche Größe. Mehr noch, befindet sich ein Beobachter am vordersten Pfahl mit einer Augenhöhe von vielleicht 1,60 m im Schnittpunkt des Horizonts, so sind alle Schnittpunkte der Objekte mit dem Horizont 1,60 m hoch – ein wertvoller Hinweis, um die Größe von Objekten abzuschätzen.

Gibson betonte allerdings, dass eine „Berechnung" dieser Verhältnisse in Form eines kognitiven Verarbeitungsprozesses eine vollkommen unnötige Forderung darstellt. Beispielsweise sind wir bei der Größenkonstanz bisher in unseren Darstellungen davon ausgegangen, dass das visuelle System auf einen kognitiven Mechanismus zurückgreift, der die Entfernung in Rechnung stellt und so zu dem phänomenalen Erleben einer konstanten Größe beiträgt. Wahrnehmung war immer ein Konstruktionsprozess mit mehr oder weniger komplexen Verarbeitungsschritten.

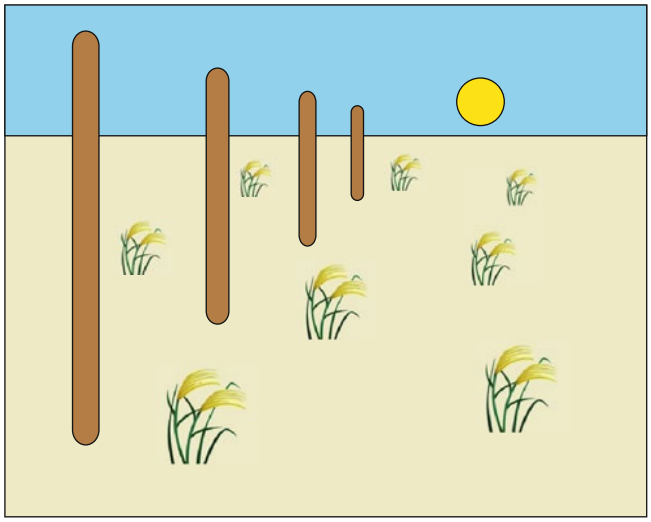


Abb. 2.31 Das Horizontverhältnis. Die Teile der Pfähle, die auf einer ebenen Fläche über den Horizont hinausragen, werden im gleichen Verhältnis relativ zu den Teilen unter dem Horizont geschnitten

Gibson proklamierte dagegen die *direkte Wahrnehmung*: Da die Information bereits in der optischen Anordnung steckt, muss sie nur aufgenommen, keineswegs aber „verarbeitet" werden. Weil beispielsweise zwei identische Objekte in unterschiedlicher Entfernung die gleiche Fläche des Texturgradienten belegen, werden die Flächen unmittelbar als gleich groß wahrgenommen. Dazu bedarf es keines zusätzlichen Verarbeitungsprozesses (Forderung der *unmittelbaren* bzw. *direkten Wahrnehmung*). Das Beispiel macht auch klar, dass es immer der umgebenden Flächenanordnung bedarf, um ein Objekt eindeutig wahrzunehmen. Dies ist der Grund, warum die Theorie als ökologischer Ansatz bezeichnet wird.

Eine besondere Bedeutung räumte Gibson den Flussmustern ein, die bei Eigenbewegungen eines Beobachters zum Vorschein kommen (Abb. 2.16). Überhaupt ist ein Wahrnehmen ohne Bewegungen des Beobachters im Raum kaum denkbar, offenbaren Eigenbewegungen doch erst die Veränderungen in der optischen Anordnung und damit die Invarianten, die durch das Einnehmen verschiedener Perspektiven zustande kommen. Erst durch Eigenbewegungen werden Objektverdeckungen reversibel, wodurch sich der Eindruck einer stabilen visuellen Welt herausstellt.

In seinen späteren Arbeiten wurde Gibson radikaler. War er in seinem 1950er Buch hauptsächlich daran interessiert, die distale visuelle Information zu charakterisieren, so wandte er sich in seinen späten Arbeiten (Gibson 1979) explizit gegen traditionelle Vorstellungen. Das Endprodukt der Wahrnehmung war nicht mehr eine interne Repräsentation, „visuelle Verarbeitung" wurde grundsätzlich als überflüssig erachtet. Dies wird insbesondere in Gibsons Konzept des *Angebots* (*affordance*) deutlich, das wohl auf das von Koffka (1935) beschriebene Konzept des Aufforderungscharakters von Objekten zurückgeht: Was ein Beobachter in seiner Umwelt wahrnimmt, sind die Angebote der Objekte, d. h., ob man nach ihnen greifen oder auf ihnen sitzen kann, ob man sie essen oder werfen kann. Gibson ging über Koffka hinaus, indem er annahm, dass auch diese Angebote unmittelbar aus der optischen Anordnung entnommen werden können. Es bedarf also keines kognitiven Vermittlungs- oder Klassifikationsprozesses, um einen x-beliebigen Designerstuhl als „sitzbar" wahrzunehmen.

Gibsons Ansatz gehört sicherlich zu den umstrittensten Ansätzen der Wahrnehmungsforschung (Überblick in Gordon 2004, Kap. 6; Nakayama 1994). Unumstritten ist, dass Gibsons Ideen unser Augenmerk auf eine genauere Analyse der Umweltinformationen und der darin enthaltenen Invarianten gelenkt hat. Unumstritten ist auch, dass die Bedeutung der Eigenbewegung am Wahrnehmungsvorgang häufig unterschätzt wurde und wird. Auf der anderen Seite kann man bezweifeln, ob das Konzept der kognitiven Verarbeitung vollkommen verzichtbar ist. Daraus ergibt sich auch eine empirische Beweislast, die die Theorie nicht erbringen kann: Es genügt ja nicht, eine Invarianz in der optischen Anordnung ausfindig zu machen, sondern man muss auch nachweisen, dass diese tatsächlich vom Beobachter genutzt wird. Wie will man weiter entscheiden, ob das visuelle System nicht vielleicht doch die Invarianz kognitiv „berechnet", anstatt sie nur aufzunehmen, wie Gibson es postuliert. Wie schließt man beispielsweise aus, dass das visuelle System die Anteile über und unter dem Horizont in Rechnung stellt, um so zu Größenschätzungen zu gelangen, die im invarianten Horizontverhältnis repräsentiert sind? Da dieses Problem weder empirisch noch theoretisch lösbar ist, werden die Meinungen zum wahrnehmungsökologischen Ansatz auch in Zukunft auseinandergehen. Obwohl der Ansatz zwar antithetisch zum traditionellen Informationsverarbeitungsansatz formuliert wurde, gibt es mittlerweile auch Wahrnehmungsforscher, die beide Ansätze zu kombinieren versuchen (z. B. Bruce et al. 1996). Damit kommt man der Realität wahrscheinlich näher.

2.4.4 Der computationale Ansatz von David Marr

Marrs Ansatz gehört zu den einflussreicheren informationsverarbeitenden Wahrnehmungsansätzen, die neurophysiologische und psychologische Erkenntnisse mit computationalen Überlegungen der künstlichen Intelligenz in Verbindung bringen. Sein Ausgangspunkt ist zwar ganz allgemein auf das Verstehen komplexer informationsverarbeitender Systeme ausgerichtet, in seinem 1982er Buch exemplifiziert er dies aber nahezu ausschließlich an Problemen der Wahrnehmung. Die vorliegende Skizzierung seiner Gedanken folgt daher auch nur diesem Aspekt.

Marr ging auch von der Betrachtung naturalistischer Szenen aus. Im Gegensatz zu Gibson ist er aber gerade an den Informationsverarbeitungsprozessen und -stufen interessiert, die unseren Wahrnehmungseindruck begründen. Den Ausgangspunkt seiner Überlegungen bildet also das retinale Abbild, der Endpunkt ist der subjektive Wahrnehmungseindruck, und die Zwischenschritte sind es, die den Wahrnehmungsprozess kennzeichnen.

Da schon auf der Retina die Lichtwellen in neuronale Aktivität umgesetzt werden, kann die reale Welt in unserem Gehirn nur symbolisch repräsentiert sein. Diese symbolischen Repräsentationen werden von Anfang an weiterverarbeitet und schließlich kombiniert zu dem, was wir als Wahrnehmungseindruck bezeichnen. Um mit der Umwelt erfolgreich interagieren

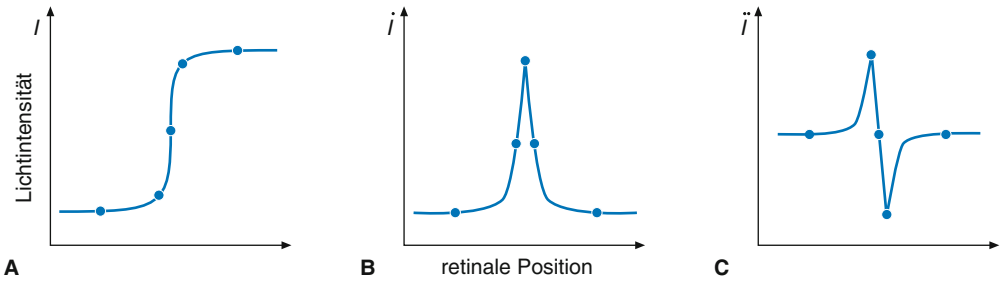


Abb. 2.32 **A** Übergang von geringer zu hoher Intensität im retinalen Abbild. Nach der ersten Ableitung (**B**) offenbart dann die zweite Ableitung (**C**) den 0-Schnittpunkt (*zero crossing*). Er könnte die aus dem retinalen Abbild gewonnene Information der primären Rohskizze repräsentieren. Die Punkte kennzeichnen korrespondierende Punkte in den Graphen. (Nach Marr 1982)

zu können, muss der Wahrnehmungseindruck eine zuverlässige Beschreibung der realen Welt sein. Die Fragen sind natürlich: *Was* wird dazu repräsentiert, und *wie* geschieht dies?

Als eine Antwort auf die erste Frage sah Marr die Hauptaufgabe des visuellen Systems darin, zuverlässige Informationen über die Form von Objekten aus dem retinalen Abbild zu gewinnen. Das Erkennen von Objekten ist also das Ziel. Da dies aber nicht ohne das Entdecken der Kanten und Konturen, der Schattenverläufe von Objekten in naturalistischen Szenen oder der disparaten Information der beiden Netzhäute gelingen kann, adressiert Marr in seiner Theorie den gesamten Wahrnehmungsvorgang.

Als Antwort auf die zweite Frage ging Marr von modularer Verarbeitung aus, bei der die Information sukzessiv mehrere Stadien (*stages*) durchläuft. Im Gegensatz zu anderen, eher klassisch orientierten informationsverarbeitenden Ansätzen, sollte der Übergang zwischen den Stadien algorithmisch fassbar sein. Durchlaufen wir dazu die Stadien, die Marr beim Betrachten einer dreidimensionalen Szene unterstellt:

- *Retinales Abbild (retinal image):* Es repräsentiert die räumliche, retinale Verteilung der verschiedenen Lichtwellen und deren Intensitäten. Das retinale Abbild bildet den Ausgangspunkt der Verarbeitung.
- *Primäre Rohskizze (primal sketch):* Hier werden die Elementarmerkmale einer Szene berechnet, wie sie sich aus den Intensitätsübergängen im retinalen Abbild ergeben: Etwa Kontur- und Kantenelemente, Ecken und Kantenenden, auch geschlossene und offene Formen (Kleckse und Flecken) gehören zu den Elementarmerkmalen dieser Verarbeitungsebene.
- *2 1/2-dimensionale Skizze (2 1/2-D sketch):* Die Elementarmerkmale der primären Rohskizze werden auf dieser Verarbeitungsstufe gruppiert, wobei an dieser Stelle durchaus Prinzipien angewandt werden, die den Gestaltgesetzen ähnlich sind. Es entsteht eine Repräsentation der Flächen und ihrer Anordnungen mit einer groben Tiefencharakteristik, die Marr als 2 1/2-dimensionale Skizze bezeichnet. Dieses „Abbild" ist organisiert in Bezug auf den Betrachter, es ist aber noch nicht durch den Bezug zur externen Umwelt ausgezeichnet.
- *Dreidimensionale Modellrepräsentation (3-D model representation):* In dieser Verarbeitungsstufe werden die Flächen und ihre Anordnungen explizit zu Repräsentationen der dreidimensionalen Umweltobjekte zusammengefasst. Durch die hier vorgenommene Objektzentrierung werden die Objekte auch unabhängig von ihrer spezifischen Position oder Orientierung auf der Retina repräsentiert. Mit anderen Worten: Mit dieser Repräsentation liegt ein Modell der real existierenden Welt vor, wie sie der Betrachter wahrnimmt.

Wahrnehmung vollzieht sich demnach in aufeinanderfolgenden Verarbeitungsstufen – von den Berechnungen der silhouettenartigen, schemenhaften Konturen in der primären Rohskizze bis hin zu den Berechnungen, die zu ausgereiften dreidimensionalen Objektrepräsentationen führen. Bisher ist allerdings wenig über die Berechnungen an sich und deren Implementation gesagt worden. Dies soll anhand der Extraktion eines einfachen Merkmals aus dem retinalen Abbild beispielhaft illustriert werden: Wie kann ein Prozess aussehen, der Intensitätsschwankungen im retinalen Abbild (als Input) in Zeichen (*token*) für Konturen und Kanten (als Output) überführt?

Ein einfacher Algorithmus, der diese Problematik löst, ergibt sich aus der Determination der sogenannten 0-Schnittpunkte (*zero crossings*). In der Sprache der künstlichen Bildverarbeitung werden Konturen und Kanten durch Transformationen des retinalen Eingangssignals (*convolution*) entdeckt. Tut man dies, können die Intensitätsänderungen im retinalen Abbild durch zweifache Ableitung mittels Differenzialrechnung gewonnen werden. Abb. 2.32 veranschaulicht das Prinzip. Abb. 2.32A zeigt einen Übergang von geringer zu hoher Intensität im retinalen Abbild. Die erste Ableitung dieser Kurve stellt dar, wo sich ein Übergang vollzieht. Zunächst liegt in Abb. 2.32A eine gleichbleibende (niedrige) Intensität vor, dann ändert sich die Intensität und liegt wieder gleichbleibend auf einem (hohen) Niveau. Der Peak in Abb. 2.32B kennzeichnet diese Änderungsinformation, die sich durch die erste Ableitung bestimmen lässt.

Die zweite Ableitung berechnet die Änderungsinformation der Kurve in Abb. 2.32B. Dort ist zunächst keine Änderung vorhanden, dann steigt die Kurve an, allerdings nur kurzzeitig, um sofort wieder auf das Ausgangsniveau zurückzufallen. Dies führt in der Ableitungsberechnung zu einem zunächst positiven Peak in Abb. 2.32C, gefolgt von einem negativen Ausschlag. Beim Übergang vom positiven zum negativen Ausschlag wird die x-Achse gekreuzt. Diese Kreuzungen der 0-Schnittpunkte sind Teil dessen, was nach Marrs Vorstellungen den Übergang vom retinalen Abbild zur ersten Repräsentation in Form der primären

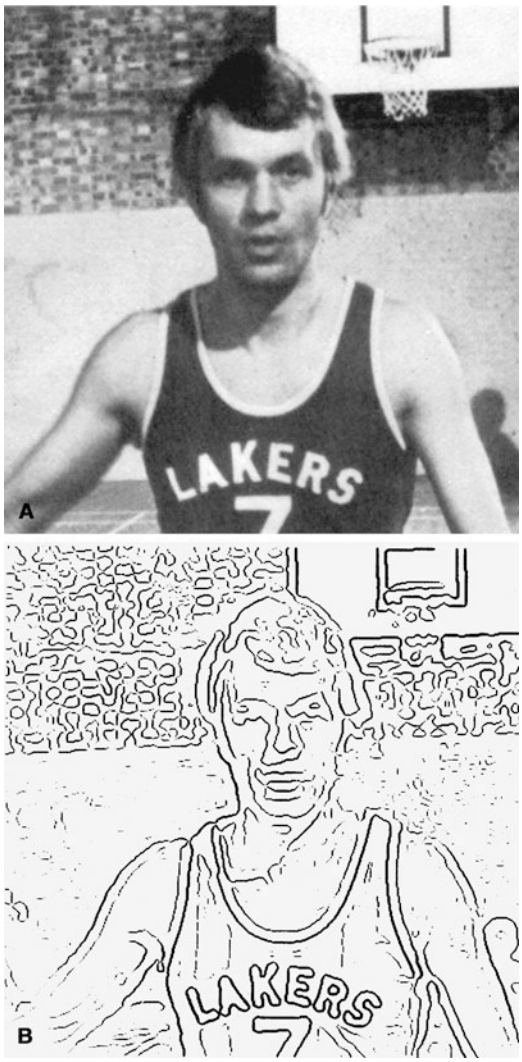


Abb. 2.33 Das Entdecken von Kanten mittels Determination der 0-Schnittpunkte (*zero crossings*). Die ursprüngliche Abbildung (**A**) könnte nach Marr in der primären Rohskizze u. a. durch die 0-Schnittpunkte repräsentiert sein (**B**). (Aus Marr 1982, S. 61, Abb. 2.15)

Rohskizze kennzeichnen könnte. Die Kreuzungen der 0-Schnittpunkte stellen somit eine Repräsentation von (besonders markanten) Intensitätsänderungen im ursprünglichen Abbild dar. Sie markieren häufig (aber nicht ausschließlich) die Kanten von Objekten und geben damit Hinweise, wo Objekte beginnen bzw. aufhören. Abb. 2.33 veranschaulicht die 0-Schnittpunkte in einem natürlichen zweidimensionalen Bild.

Der mathematische Algorithmus zur Extraktion der 0-Schnittpunkte erfolgt natürlich nach idealen, abstrakten Gleichungen. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Extraktion in dieser Form von einem neuronalen Mechanismen geleistet wird. Marr suchte deshalb nach einem vergleichbaren Filtermechanismus zur Extraktion der 0-Schnittpunkte, der gleichzeitig auch eine neuronale Implementationsmöglichkeit eines solchen Algorithmus gewährleistet. Im Falle der 0-Schnittpunkte verwies er auf die Existenz eines räumlichen Frequenzfilters, der sich aus der Differenz zweier Gauß-Verteilungen ergibt (*difference of two Gaussians*; DOG-Filter). Dieser wiederum findet sich in sehr ähnlicher Weise in den Ganglienzellen der Retina und deren rezeptiven Feldern, die zum einen auf eine Intensitätserhöhung mit einer Positivierung, zum anderen auf eine Intensitätserniedrigung mit einer Negativierung reagieren. Die Ähnlichkeit, die Marr zwischen den Outputs eines simulierten DOG-Filters und der entsprechenden Zellen nachweisen kann, ist frappierend. Der DOG-Filter hat also gegenüber dem mathematischen Ableitungsalgorithmus den Vorteil, dass man seine Arbeitsweise besser mit der neuronalen abgleichen kann.

In ähnlicher Weise formulierte Marr Algorithmen für die anderen Verarbeitungsstufen. Beispielsweise postulierte er wie Biederman (1987, 1995, 2000; ▶ Abschn. 2.3.5) generalisierte Prototypen von Kegeln und Kuben, um dem Beitrag von Vorwissen zur Objekterkennung Rechnung zu tragen. Ansonsten gehen Marrs Berechnungen oft von Bottom-up-Verarbeitung aus – vielleicht allzu oft, denn dies ist einer der Punkte, an denen sich die Kritik entzündete. Reizgetriebene Verarbeitung ist die präferierte Verarbeitungsrichtung auf einem Computer. Es gibt aber per se wenige Gründe, dies in gleicher Weise für die menschliche Informationsverarbeitung zu favorisieren. Andere Kritikpunkte betreffen spezifische Annahmen in den Algorithmen, die etwa auch die Extraktion der 0-Schnittpunkte betreffen (Überblick in Gordon 2004, Kap. 7). Mehr grundsätzlicher Natur ist die Kritik, ob denn die Beschreibung visueller Prozesse in Form eines Algorithmus überhaupt Erkenntnisse darüber liefern kann, wie das visuelle System arbeitet. Dies ist ein oft geäußerter Kritikpunkt, der generell den Erkenntnisgewinn aufgrund von Modellierungen infrage stellt und der nicht nur die visuelle Verarbeitung betrifft.

2.5 Anwendungsbeispiele

Wahrnehmungsforschung ist überwiegend Grundlagenforschung, wenngleich deren Anwendungsgebiete vielfältig, aber nicht immer offensichtlich sind. An dieser Stelle werden drei Beispiele aufgeführt: perspektivisch verursachte Fehlwahrnehmungen bei Sportjuroren, Distanzschätzungen beim Autofahren zum Vorderfahrzeug und zum rückwertigen Verkehr durch den Seitenspiegel.

▪ Perspektivisch verursachte Fehlwahrnehmungen bei Sportjuroren

Moderne Computersysteme sind mittlerweile in der Lage, nahezu fehlerfrei Gesichter zu identifizieren, wenn diese beispielsweise frontal präsentiert werden. Allerdings werden die Grenzen maschinellen Sehens offensichtlich, wenn ein und dasselbe Gesicht aus verschiedenen Perspektiven zu beurteilen ist (z. B. frontal und von der Seite). Menschen gelingt dies meist mühelos (s. auch das Phänomen der Form- bzw. Objektkonstanz in ▶ Abschn. 2.3.5). Das heißt allerdings nicht, dass Menschen aus verschiedenen Blickperspektiven immer korrekt urteilen.

In einer Studie von Plessner und Schallies (2005) wurden Sportjuroren und Laien gebeten, Turnern mit ausgestreckten Armen in den Ringen (bei ansonsten senkrechter Körperhaltung) zu beurteilen. Bei der Benotung dieser Übung ist es u. a. wichtig zu bewerten, ob und, wenn ja, wie weit die Stellungen der Arme vom Idealwinkel 180° abweichen. Plessner und Schallies

gingen darüber hinaus der Frage nach, ob die beurteilten Abweichungen vom Blickwinkel der jeweiligen Juroren abhingen, mit der diese die Szene beobachteten. Dazu wurden den Juroren kurzzeitig Bilder präsentiert, die aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen waren (aus einer Frontalperspektive bis zu einem 60°-Winkel von der Seite). Es zeigte sich, dass die Stellung der Arme umso mehr fehlbeurteilt wurde, je weiter der Aufnahmeblickwinkel von der Frontalperspektive abwich. Bei Experten war dieser Fehler zwar weniger ausgeprägt als bei Laien, dennoch waren auch sie dem Fehler erlegen.

Der Blickwinkel von Sportjuroren spielt eine oft unterschätzte Rolle, wie etwa auch die Beurteilung der Abseitsposition im Fußball zeigt. So konnten Oudejans et al. (2000) zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Fehlurteil steigt, sobald sich die Linienrichter nicht auf „Ballhöhe" befinden (vgl. auch Baldo et al. 2002). Der Fehler, der hier entsteht, ist wahrnehmungsseitig zu verorten.

Distanzschätzungen zum Vorderfahrzeug

Die Rückleuchten von Kraftfahrzeugen unterscheiden sich häufig in ihrer Form, aber auch in ihrem Abstand. Bei Kleinwagen ist der horizontale Abstand zwischen den Leuchten oft deutlich geringer als bei Mittel- und Oberklassewagen. Aber auch innerhalb einer Klasse variiert der Abstand, je nachdem wo die Rückleuchten am Fahrzeug angebracht sind. Aus wahrnehmungspsychologischer Sicht ist dies problematisch, da das Phänomen der Größenkonstanz (Abb. 2.22) nahelegt, dass ein kleineres oder größeres retinales Abbild des Rückleuchtenabstands eine weitere oder nähere Distanz zum Fahrzeug ausdrückt. Buchner et al. (2006) untersuchten deshalb die Frage, inwieweit die Distanzschätzungen zum Vorderfahrzeug von der Anbringung der Rückleuchten bestimmt werden – insbesondere dann, wenn die Sichtbedingungen eingeschränkt sind (also etwa bei Nebel oder Dunkelheit) und somit weitere Tiefenkriterien fehlen. In ihrer Untersuchung präsentierten die Autoren ihren Versuchspersonen zunächst für 500 ms statische Vorlagen, in denen der horizontale und vertikale Abstand der Rückleuchten sowie die tatsächliche Distanz zum Vorderfahrzeug variiert wurden. Es zeigte sich der erwartete Effekt: Bei kleinem vertikalen und/oder horizontalen Abstand der Rückleuchten wird das Fahrzeug weiter entfernt eingeschätzt als bei einem großen Abstand.

Nun könnte man argumentieren, dass sich dieser Befund nur bei der Präsentation von statischen Reizvorlagen einstellt, während beim normalen Fahren die bewegungsinduzierten, dynamischen Flussmuster (Abb. 2.16) genauere Abschätzungen der Distanzen ermöglichen. Buchner et al. (2006, Experimente 3 bis 5) konnten die Befunde allerdings auch mit dynamischen Reizvorlagen replizieren. Die Untersuchung demonstriert damit auch, dass die unter oft eingeschränkten Bedingungen gewonnenen wahrnehmungspsychologischen Erkenntnisse häufig generalisierbar sind (s. aber auch das nachfolgende Anwendungsbeispiel).

Distanzschätzungen zum rückwertigen Verkehr durch den Seitenspiegel

Unsere heutigen Kraftfahrzeuge sind häufig mit konvexen oder asphärischen Seitenspiegeln ausgestattet. Konvexe Spiegel haben den bekannten Weitwinkeleffekt mit einem konstanten Vergrößerungsfaktor, während asphärische Spiegel insbesondere in den seitlichen Außenbereichen eine andere Größenverzerrung aufweisen. Der Vorteil liegt in beiden Fällen darin, dass das visuelle Gesichtsfeld für den rückwärtigen Verkehr vergrößert und der sogenannte tote Winkel verkleinert wird. Allerdings wirkt sich das auch auf die wahrgenommene Distanz zum rückwärtigen Verkehr aus: Während bei planaren Spiegeln die Distanz zum rückwärtigen Fahrzeug eher unterschätzt wird, neigt man bei konvexen bzw. asphärischen Spiegeln eher zum Überschätzen der Distanz (z. B. Flannagan et al. 1997; Überblick in Hahnel und Hecht 2012). Aus Sicht der Verkehrssicherheit wäre ein Unterschätzen weniger kritisch als ein Überschätzen, weil die Fahrzeuge nur näher gesehen werden, als sie tatsächlich sind, und Fahrmanöver (z. B. Überholmanöver) deswegen mit größerem Sicherheitsabstand ausgeführt werden können. Umgekehrt verhält es sich bei einer wahrgenommenen Überschätzung der Distanz. Allerdings scheinen die Fahrer die verzerrende Wirkung der konvexen bzw. asphärischen Spiegel in Rechnung zu stellen, da die Überschätzungen weit geringer ausfallen, als aufgrund der Verzerrung des retinalen Abbildes zu erwarten wäre. Außerdem wäre auch hier die Wirkung der bewegungsinduzierten, dynamischen Flussmuster bei den Abstandsschätzungen zu klären.

Hecht und Brauer (2007) verglichen deshalb in einer Studie Distanzschätzungen aufgrund von statischen Reizvorlagen mit einer Kenngröße, die die verbleibende Zeit bis zur Kollision (*time to contact*; TTC-Schätzung) abbildet. Dabei wird unterstellt, dass Fahrer die TTC-Schätzung aus dem optischen Flussmuster extrahieren (▶ Abschn. 2.3.3) und anwenden können. In ihrer Studie zeigten sich die Distanzschätzungen bei konvexen Rückspiegeln wenig fehlerbehaftet, allerdings waren die Varianzen gegenüber der Nutzung von planaren Spiegeln deutlich erhöht. Demgegenüber wurde die Zeit bis zur Kollision (TTC-Schätzung) von den Versuchspersonen deutlich überschätzt. Man sollte also für die Nutzung konvexer oder asphärischer Seitenspiegel potenzielle Vor- und Nachteile gegeneinander abwägen und insbesondere die Nutzer über die Gefahrenpotenziale aufklären.

2.6 Ausblick

Visuelle Wahrnehmungsforschung ist heutzutage nicht mehr der Gegenstandsbereich *einer* wissenschaftlichen Disziplin. Vielmehr setzen sich einschlägige nationale und internationale Tagungen immer aus Vertretern mehrerer Disziplinen zusammen – Wahrnehmungspsychologen findet man dort genauso wie Neurophysiologen, Neuropsychologen und Computerwissenschaftler. In der Wahrnehmungsforschung hat diese interdisziplinäre Trendwende vor etwa 30 Jahren mit der Einführung der Kognitiven Neurowissenschaften eingesetzt. Seitdem hat sich die Wahrnehmungsforschung – mehr als manche andere Kognitionswissenschaft – zu einem erfolgreichen kohärenten und integrierten Wissenschaftsgebiet formiert.

Computationale Ansätze haben sicherlich viel zu dieser Formierung beigetragen. Derzeit ist unter Wahrnehmungsforschern die Vorstellung weit verbreitet, dass sich visuelle Wahrnehmung aus einer Art „Berechnung" der Eingangssignale ergibt. Diese

Berechnungen müssen zwar nicht unbedingt in algorithmischer Form zum Ausdruck gebracht werden, aber es genügt, Wahrnehmung als eine wie auch immer geartete Transformation der Eingangsinformation aufzufassen.

Auf der anderen Seite mehren sich trotz des unbestreitbaren Erfolgs die Einwände gegen eine zu reduktionistisch ausgelegte Sichtweise dieser Ansätze – eine Reduktion, die im Übrigen nicht den Intentionen Marrs (1982) entspricht. Betrachtet man visuelle Wahrnehmung lediglich als Transformation des retinalen Eingangssignals, so muss dies zu einer Verarmung führen, die der Funktion des visuellen Systems nicht gerecht werden kann. Wahrnehmungsforscher wie Steven Palmer, der sich in seinem ansonsten ausgezeichneten Lehrbuch von 1999 zum computationalen Ansatz bekennt, beschränken sich häufig ausschließlich auf die Analyse visueller Wahrnehmungsprozesse und lassen allzu oft andere Sinne außer Betracht. Dabei treten z. B. in unserer natürlichen Umwelt visuelle Ereignisse häufig zusammen mit akustischen Ereignissen auf. Wie in ▶ Kap. 3 und 4 in weiteren nichtvisuellen Sinnesmodalitäten gezeigt wird, sind diese multimodalen Ereignisse sehr wohl in der Lage, den visuellen Wahrnehmungseindruck zu modifizieren. Visuelle Wahrnehmung besteht also nicht nur aus den Transformationen eines retinalen Eingangssignals.

Ein anderer Aspekt, der in diesem Zusammenhang allzu häufig vernachlässigt wird, ist die Funktion des Wahrnehmungsprozesses überhaupt. Man muss sich stets vor Augen führen, dass die Sinne lediglich als Hilfsmittel entwickelt wurden, um ein erfolgreiches Handeln des Individuums mit der Umwelt überhaupt zu ermöglichen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass sich diese Funktion in der phylogenetischen Entwicklung des Wahrnehmungsapparats niedergeschlagen hat. Diese Sichtweise wird durch die neueren neurophysiologischen Vorstellungen der visuellen Verarbeitungspfade wie auch durch die alten Überlegungen von Kurt Koffka und James Gibson zum Zusammenhang von Wahrnehmung und Handlung gestützt (▶ Abschn. 2.2.3 bzw. ▶ Abschn. 2.4.3). Dieser Aspekt wird deshalb in ▶ Kap. 5 und 22 gesondert herausgearbeitet. Um zu einem umfassenden Verständnis visueller Verarbeitungsprozesse zu gelangen, sollte man daher immer auch diese Kapitel rezipieren.

2.7 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Mit zunehmender (corticaler) Verarbeitung findet man in den entsprechenden Hirnregionen eine zunehmende funktionale Neuronenspezialisierung, die umgekehrt proportional zur Größe der zugehörigen rezeptiven Felder ist.
- Im temporalen Verarbeitungspfad werden die kognitiven Prozesse der Objekterkennung verortet, während im parietalen Verarbeitungspfad Prozesse der Objektlokalisation und der sensomotorischen Kopplung vermutet werden.
- Eine Folge der funktionalen Neuronenspezialisierung ist die verteilte Codierung von Reizeigenschaften in verschiedenen Hirnregionen. Verteilte Codierung ist aber auch kennzeichnend für die kognitiven Merkmalstheorien.
- Farbwahrnehmung beruht nach der Dreifarbentheorie auf drei Rezeptorsystemen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit; nach der Gegenfarbentheorie resultiert Farbwahrnehmung aus antagonistisch wirkenden Gegenfarbenzellen.
- Raumwahrnehmung resultiert aus einer Vielzahl von monokularen, binokularen, okulomotorischen und bewegungsinduzierten Tiefenkriterien.
- Das Erkennen eines Objekts setzt immer auch die Bezugnahme zu den überdauernden Wissensbeständen des Wahrnehmenden voraus. Erst dadurch erhalten die Dinge eine Bedeutung und eine Funktion.
- Die klassische Psychophysik befasst sich unter Verwendung psychophysischer Methoden mit der Analyse und der Bestimmung der quantitativen Transformationsgleichungen zwischen einer sensorischen Eingangsgröße und einer am Empfinden und Verhalten orientierten Ausgangsgröße.
- Die Gestaltpsychologie entstand als Gegenströmung zur Elementenpsychologie. Sie stellt die Bedeutung der gestalthaften Organisation von Einzelelementen in den Vordergrund, die dadurch Eigenschaften erlangen, die nicht in den Einzelelementen enthalten sind. Die für die Gestaltpsychologie relevanten Organisationsprinzipien sind in den Gestaltgesetzen formuliert.
- Der wahrnehmungsökologische Ansatz fokussiert die Reizinformation in der optischen Anordnung, die menschliches und tierisches Handeln durch ihre räumlichen und zeitlichen Strukturen ermöglicht. Dieser Ansatz verzichtet auf eine Analyse der kognitiven Vermittlungsprozesse und ist daher antithetisch zum Informationsverarbeitungsansatz formuliert worden.
- Der computationale Ansatz von David Marr ist ein Informationsverarbeitungsansatz, der wahrnehmungspsychologische Befunde mit neurophysiologischen und computationalen Erkenntnissen der künstlichen Bildverarbeitung in Verbindung bringt.

Schlüsselbegriffe

Bewegungsparallaxe (*motion parallax*) Ein bewegungsinduziertes Tiefenkriterium, dem zufolge sich bei Eigenbewegung ein Objekt am Horizont langsamer „bewegt" und länger im Gesichtsfeld verbleibt als ein nahes Objekt.

Bildgebende Verfahren (*imaging techniques*) Neurophysiologische Methoden u. a. zur Erfassung von Gehirnprozessen als Folge von Reizdarbietungen. Zu den momentan gängigen Verfahren gehören die Positronenemissionstomografie (PET), die funktionelle Kernspintomografie (fMRI), das ereigniskorrelierte Potenzial (EKP bzw. ERP) und die Magnetencephalografie (MEG).

Bindungsproblem (*binding problem*) Das in Merkmalstheorien aufgrund der Annahme verteilter Codierungen hervorgerufene Problem, wie die verschiedenen Merkmale bei der Objekterkennung integriert werden. Neurophysiologisch entspricht es dem Problem, wie die Aktivitäten in den verschiedenen spezialisierten Hirnarealen zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Bottom-up-Verarbeitung (*bottom-up processing*) Von der Stimulation an den Rezeptoren ausgehende Verarbeitungsprozesse, die weitgehend unabhängig von anderen kognitiven Prozessen (z. B. Gedächtnis, Motivation) verlaufen.

Corticaler Vergrößerungsfaktor (*cortical magnification factor*) Auf dem Cortex hat man räumlich retinotop-organisierte Karten nachweisen können, in denen allerdings den fovealen Regionen weit mehr Platz eingeräumt wird als den retinal peripheren Regionen.

Elementenpsychologie (*elementarism*) Die Vorstellung, dass Wahrnehmung aus elementaren Empfindungen besteht und sich auf diese reduzieren lässt.

Figur-Grund-Problem (*figure-ground problem*) Die perzeptive Trennung von Figur und Hintergrund. Das Figur-Grund-Problem wird beispielsweise beim Rubin'schen Kippbild deutlich.

Gestaltgesetze (*gestalt principles*) Auf die Gestaltpsychologen zurückzuführende Prinzipien, die eine Organisation in der Wahrnehmung bewirken. Neben dem übergeordneten Prägnanzprinzip (Gesetz der guten Gestalt) sind dazu die Gesetze der Gleichartigkeit, der Nähe, der Geschlossenheit usw. formuliert worden.

Gestaltpsychologie (*gestalt psychology*) Stellt die Bedeutung der gestalthaften Organisation von Einzelelementen in den Vordergrund, die dadurch Eigenschaften erlangen, die nicht in den Einzelelementen enthalten sind.

Homunculus-Problem (*homunculus problem*) Die Erklärung eines kognitiven Prozesses mithilfe eines „kleinen Menschen im Kopf" (nicht zu verwechseln mit dem kartografischen Homunculus im somatosensorischen Cortex).

Horopter (*horopter*) Theoretischer Kreis durch den Fixationspunkt und die beiden optischen Mittelpunkte der Augen. Auf ihn fallen korrespondierende Netzhautstellen.

Korrespondenzproblem (*correspondence problem*) Es bezeichnet in der Tiefenwahrnehmung das bei Querdisparation vorliegende Problem, wie die korrespondierenden Informationen der beiden Netzhauthälften zueinander in Beziehung gesetzt werden. Das Korrespondenzproblem stellt sich auch bei stroboskopischen Scheinbewegungen, hier allerdings zwischen zwei und mehr zeitlich aufeinanderfolgenden Bild- bzw. Reizdarbietungen.

Laterale Inhibition (*lateral inhibition*) Innerhalb eines neuronalen Schaltkreises geht häufig die Aktivierung eines Neurons mit der Hemmung benachbarter Neurone einher.

Merkmalsanalyse (*feature analysis*) Verarbeitungsansätze der Merkmalsanalyse gehen davon aus, dass Objekte bzw. Figuren durch Merkmale repräsentiert sind, denen eine entscheidende Rolle bei der Objekterkennung und -identifizierung zukommt. Prominente Beispiele sind das Pandämonium-Modell und die Merkmalsintegrationstheorie.

Psychophysik (*psychophysics*) Die klassische Psychophysik befasst sich mit der Analyse und der Bestimmung der quantitativen Transformationsgleichungen zwischen einer sensorischen Eingangsgröße und einer am Empfinden und Verhalten orientierten Ausgangsgröße.

Psychophysische Methoden (*psychophysical methods*) Die vorwiegend innerhalb der klassischen Psychophysik entwickelten Methoden zur Bestimmung des Zusammenhangs der sensorischen Eingangsgröße und der am Empfinden und Verhalten orientierten Ausgangsgröße. Man unterscheidet im Wesentlichen die Grenz-, die Konstanz-, die Herstellungsmethode und die Methode der direkten Größenschätzung.

Querdisparation (*binocular disparity*) Ein Tiefenkriterium, das die beiden geringfügig unterschiedlichen Augenblickwinkel berücksichtigt.

Rezeptives Feld (*receptive field*) Im visuellen Kontext ist ein rezeptives Feld derjenige Teil der Retina, der sich – sobald entsprechend stimuliert – auf das Antwortverhalten eines Neurons im visuellen Verarbeitungspfad auswirkt. Je weiter das Neuron von der Retina entfernt ist, desto größer ist in der Regel sein rezeptives Feld.

Schablonenvergleich (*template matching*) Die Vorstellung, wonach ein Objekt mit im Wissensgedächtnis gespeicherten Schablonen (Prototypen) verglichen und so identifiziert wird.

Scheinbewegung (*apparent motion*) Räumlich und zeitlich getrennte Reize werden unter optimalen Bedingungen als kontinuierlich bewegende Reize wahrgenommen. Zu den Scheinbewegungsphänomenen gehören u. a. der Bewegungsnacheffekt (*motion-after effect*) und die stroboskopischen Bewegungen (*stroboscopic movement*).

Sensorische Adaptation (*sensoric adaptation*) Allgemein die Anpassung eines sensorischen Systems an eine lang andauernde Stimulation. So liegt beispielsweise erst nach erfolgter Dunkel- oder Helladaptation eine optimale Sensitivität vor.

Signalentdeckungstheorie (*signal detection theory*, SDT) Die SDT geht von der Grundannahme aus, dass die Wahrnehmung eines Signals vor dem Hintergrund eines Rauschens erfolgt. Sie erlaubt eine unabhängige Schätzung des Sensitivitätsparameters d' und des Entscheidungskriteriums c aufgrund der Treffer (*hits*) und der falschen Alarme (*false alarms*) des Vierfelderschemas einer Entdeckungsaufgabe.

Stevens'sche Potenzfunktion (*Stevens's power law*) Eine von Stevens modifizierte Gesetzmäßigkeit zum Zusammenhang der physikalischen Reizgröße I und der Empfindungsgröße E. Es lautet $E = aI^b$, wobei a als konstanter Wert von der skalierten Maßeinheit abhängt und b – ebenfalls als konstanter Wert – das jeweilige Sinnesgebiet und die Sinnesleistung repräsentiert.

Tiefenkriterien (*depth cues*) Raum- und Tiefenwahrnehmung wird durch monokulare (Linearperspektive, Texturgradient,

Verdeckung usw. bei ruhendem Auge), binokulare (Querdisparation), okulomotorische (Konvergenz und Akkommodation) und bewegungsinduzierte (Bewegungsparallaxe, visuelle Flussmuster) Tiefenkriterien vermittelt.

Top-down-Verarbeitung (*top-down processing*) Verarbeitungsrichtung, die an einem vergleichsweise hohen Verarbeitungsniveau ansetzt und daher den Gegensatz zur reizgetriebenen Verarbeitung bildet.

Wahrnehmungskonstanz (*perceptual constancy*) Trotz zum Teil sehr unterschiedlicher retinaler Projektionsbedingungen werden Reize weitgehend unverändert wahrgenommen. Man unterscheidet die Helligkeits- bzw. Farbkonstanz, die Größenkonstanz und die Formkonstanz (auch Objektkonstanz).

Wahrnehmungsschwelle (*perceptual threshold*) In der Psychophysik unterscheidet man die absolute Schwelle (die Mindeststärke eines physikalischen Reizes, die einen gerade überschwelligen Wahrnehmungseindruck hervorruft) und die Unterschiedsschwelle (Schwelle des eben merklichen Unterschieds, also der physikalische Mindestunterschied zwischen zwei Reizen, damit diese als zwei verschiedene Wahrnehmungsereignisse empfunden werden). Wahrnehmungsschwellen lassen sich mithilfe psychophysischer Methoden bestimmen.

Weber'sche Konstante (*Weber's law*) Das Verhältnis zwischen einem Standardreiz und einem Reiz mit eben merklichem Unterschied ΔI ist – zumindest innerhalb eines gewissen Grenzbereichs – konstant. Aus dieser Gesetzmäßigkeit ergibt sich das Fechner'sche Gesetz (bzw. das Weber-Fechner'sche Gesetz).

Weiterführende Literatur

Goldstein, E. B. (2015). *Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung*. Deutsche Ausgabe herausgegeben von K. R. Gegenfurtner. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. (Eine gute und umfassende Einführung.)

Gordon, I. E. (2004). *Theories of visual perception*. 3rd edition. New York: John Wiley und Sons. (Detaillierte Darstellung der verschiedenen Wahrnehmungstheorien.)

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., und Jessell, T. H. (Eds.). (1996). *Neurowissenschaften. Eine Einführung.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. (Umfassende neurowissenschaftliche Darstellung nicht nur zur visuellen Wahrnehmungsforschung.)

Karnath, H.-O. und Thier, P. (Hrsg). (2012). *Kognitive Neurowissenschaften*. Heidelberg: Springer-Verlag. (Lehrbuch in deutscher Sprache, das insbesondere in den ersten vier Teilen Themen der Wahrnehmung aufgreift.)

Metzger, W. (2007). *Gesetze des Sehens*. 4. Auflage. Frankfurt a.M.: W. Kramer. Englische Übersetzung durch Spillmann, L. (2009). *Laws of Seeing*. Cambridge, MA: MIT Press. (Eine lesenswerte Darstellung aus gestaltpsychologischer Sicht.)

Palmer, S. E. (1999). *Vision science. Photons to phenomenology*. Cambridge, MA: MIT Press. (Ein immer noch ausgezeichnetes und umfassendes Werk.)

Seckel, A. (2014). *Optische Illusionen: Sie werden Ihren Augen nicht trauen!* Fränkisch-Crumbach: Edition XXL Verlag. (Sammlung verschiedener Wahrnehmungstäuschungen aus der künstlerischen Perspektive – leider nur, soweit sie in Buchform darstellbar sind.)

Yantis, S. (Ed.). (2001). *Visual perception*. Philadelphia, PA: Psychology Press. (Reader zu den verschiedenen Teilgebieten der Wahrnehmungsforschung.)

Literatur

Algom, D., & Cohen-Raz, L. (1987). Sensory and cognitive factors in the processing of visual velocity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 3–13. doi:10.1037/0096-1523.13.1.3.

Badcock, D. R., & Westheimer, G. (1985). Spatial location and hyperacuity: The centre/surround localization contribution function has two substrates. *Vision Research*, *25*, 1259–1267. doi:10.1016/0042-6989(85)90041-0.

Baldo, M. V. C., Ranvaud, R. D., & Morya, E. (2002). Flag errors in soccer games: the flash-lag effect brought to real life. *Perception*, *31*, 1205–1210. doi:10.1068/p3422.

Barlow, H. B., & Hill, R. M. (1963). Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*, *200*(200), 1345–1347. doi:10.1038/2001345a0.

Bear, M. F., Conners, B. W., & Paradiso, M. A. (2009). *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischr Verlag, Springer.

Beck, J. (1966). Effect of orientation and shape similarity in perceptual grouping. *Perception and Psychophysics*, *1*, 300–302. doi:10.3758/BF03215792.

Berry, M. J., Brivanlou, I. H., Jordan, T. A., & Meister, M. (1999). Anticipation of moving stimuli by the retina. *Nature*, *398*(6725), 334–338. doi:10.1038/18678.

Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, *94*, 115–147. doi:10.1037/0033-295X.94.2.115.

Biederman, I. (1995). Visual object recognition. In S. M. Kosslyn, & D. N. Osherson (Hrsg.), *Visual cognition: An invitation to cognitive science* (S. 121–165). Cambridge, MA: MIT Press.

Biederman, I. (2000). Recognizing depth-rotated objects: A review of recent research and theory. *Spatial Vision*, *13*, 241–253. doi:10.1163/156856800741063.

Bocianski, D., Müsseler, J., & Erlhagen, W. (2008). Relative mislocalization of successively presented stimuli. *Vision Research*, *48*, 2204–2212. doi:10.1016/j.visres.2008.06.016.

Bocianski, D., Müsseler, J., & Erlhagen, W. (2010). Effects of attention on a relative mislocalization with successively presented stimuli. *Vision Research*, *50*, 1793–1802. doi:10.1016/j.visres.2010.05.036.

Borst, A., Haag, J., & Reiff, D. F. (2010). Fly motion vision. *Annual Review of Neuroscience*, *33*, 49–70. doi:10.1146/annurev-neuro-060909-153155.

Brown, J. F. (1931). The visual perception of velocity. *Psychologische Forschung*, *14*, 199–232. doi:10.1007/BF00403873.

Bruce, V., Green, P. R., & Georgeson, M. A. (1996). *Visual perception. Physiology, psychology, and ecology*. East Sussex, UK: Psychology Press.

Bruner, J. S. (1957). On perceptual readiness. *Psychological Review*, *64*, 123–152. doi:10.1037/h0043805.

Buchner, A., Brandt, M., Bell, R., & Weise, J. (2006). Car backlight position and fog density bias observer-car distance estimates and time-to-collision judgments. *Human Factors*, *48*, 300–317.

Cowey, A., & Rolls, E. T. (1974). Human cortical magnification factor and its relation to visual acuity. *Experimental Brain Research*, *21*, 447–454. doi:10.1007/BF00237163.

Dartnall, H. J. A., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1983). Human visual pigments: Microspetrophometric results from the eyes of seven persons. *Proceedings of the Royal Society of London*, *220B*, 115–130. doi:10.1098/rspb.1983.0091.

DeAngelis, G. C. (2000). Seeing in three dimensions: the neurophysiology of stereopsis. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 80–90. doi:10.1016/S1364-6613(99)01443-6.

DeValois, R. L., & Jacobs, G. H. (1968). Primate color vision. *Science*, *162*, 533–540. doi:10.1126/science.162.3853.533.

DeYoe, E. A., & Van Essen, D. C. (1988). Concurrent processing streams in monkey visual cortex. *Trends in Neuorscience*, *11*, 219–226. doi:10.1016/0166-2236(88)90130-0.

Ditzinger, T. (2006). *Illusionen des Sehens*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Dowling, J. E., & Boycott, B. B. (1966). Organization of the primate retina: electron microscopy. *Proceedings of the Royal Society of London*, *166B*, 80–111. doi:10.1098/rspb.1966.0086.

Drasdo, N. (1977). The neural representation of visual space. *Nature*, *266*, 552–556. doi:10.1038/266554a0.

Driver, J., & Baylis, G. C. (1995). One-sided edge assignment in vision. II. Part decomposition, shape description, and attention to objects. *Current Directions in Psychological Science*, *4*, 201–206. doi:10.1111/1467-8721.ep10772645.

Driver, J., & Baylis, G. C. (1996). Edge-assignment and figure-ground segmentation in short-term visual matching. *Cognitive Psychology*, *31*, 248–306. doi:10.1006/cogp.1996.0018.

Epstein, W., & Rogers, S. J. (Hrsg.). (1995). *Perception of space and motion*. San Diego, CA: Academic Press, Inc..

Erlhagen, W. (2003). Internal models for visual perception. *Biological Cybernetics*, *88*, 409–417. doi:10.1007/s00422-002-0387-1.

Erlhagen, W., & Jancke, D. (2004). The role of action plans and other cognitive factors in motion extrapolation: A modelling study. *Visual Cognition*, *11*, 315–340. doi:10.1080/13506280344000293.

Erlhagen, W., Bastian, A., Jancke, D., Riehle, A., & Schöner, G. (1999). The distribution of neuronal population activation (DPA) as a tool to study interaction and integration in cortical representations. *Journal of Neuroscience Methods*, *94*, 53–66. doi:10.1016/S0165-0270(99)00125-9.

Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.

Felleman, D. J., & Van Essen, D. C. (1991). Distributed hierachical processing in the primate visual cortex. *Cerebral Cortex*, *1*, 1–47. doi:10.1093/cercor/1.1.1-a.

Finney, D. J. (1971). *Probit analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.

Flannagan, M. J., Sivak, M., Schumann, J., Traube, E. C., & Kojima, S. (1997). *Distance perception in driverside and passenger-side convex rearview mirrors: Objects in mirrors are more complicated than they appear*. Bd. UMTRI-97–32. Ann Arbor: The University of Michigan Transportation, Research Institute.

Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 126–132. doi:10.1037/0278-7393.10.1.126.

Fröhlich, F. W. (1923). Über die Messung der Empfindungszeit. *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, *54*, 58–78. doi:10.1007/bf01723521.

Gegenfurtner, K. R. (2012). Farbwahrnehmung und ihre Störungen. In H. O. Karnath, & P. Thier (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaften* (S. 45–52). Berlin: Springer Verlag.

Gegenfurtner, K. R., & Sharpe, L. T. (2000). *Color vision: from genes to perception*. New York: Cambridge University Press.

Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.

Goebel, R., Roebroeck, A., Kim, D.-S., & Formisano, E. (2003). Investigating directed cortical interactions in time-resolved fMRI data using vector autoregressive modeling and Granger causality mapping. *Magnetic Resonance Imaging*, *21*, 1251–1261. doi:10.1016/j.mri.2003.08.026.

Goldstein, E. B. (2015). *Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer. Deutsche Ausgabe herausgegeben von K. R. Gegenfurtner

Gordon, I. E. (2004). *Theories of visual perception*. New York: Psychology Press.

Green, M., & Odom, J. V. (1986). Correspondence matching in apparent motion – Evidence for 3-dimensional spatial representation. *Science*, *233*(4771), 1427–1429. doi:10.1126/science.3749887.

Grunewald, A., & Lankheet, M. J. M. (1996). Orthogonal motion after-effect illusion predicted by a model of cortical motion processing. *Nature*, *384*(6607), 358–360. doi:10.1038/384358a0.

Grunewald, A., & Mingolla, E. (1998). Motion after-effect due to binocular sum of adaptation to linear motion. *Vision Research*, *38*, 2963–2971. doi:10.1016/S0042-6989(98)00102-3.

Hahnel, U. J. J., & Hecht, H. (2012). The impact of rear-view mirror distance and curvature on judgements relevant to road safety. *Ergonomics*, *55*, 23–36. doi:10.1080/00140139.2011.638402.

Hartline, H. K., Wagner, H. G., & Ratliff, F. (1956). Inhibition in the eye of Limulus. *Journal of General Physiology*, *39*, 651–673. doi:10.1085/jgp.39.5.651.

Hazelhoff, F. F., & Wiersma, H. (1924). Die Wahrnehmungszeit. *Zeitschrift für Psychologie*, *96*, 171–188.

Hecht, H., & Brauer, J. (2007). Convex rear view mirrors compromise distance and time-to-contact judgements. *Ergonomics*, *50*, 601–614.

Helmholtz, H. v. (1866/1910). *Handbuch der physiologischen Optik*. 3. Aufl. ergänzt und hrsg. von W. Nagel, A. Gullstrand und J. von Kries. Hamburg: Voss.

Hess, C., & Pretori, H. (1894). Messende Untersuchungen über die Gesetzmässigkeit des simultanen Helligkeits-Contrastes. *Archiv für Ophthalmologie*, *40*, 1–24. doi:10.1007%2FBF01693963

Hubbard, T. L. (2005). Representational momentum and related displace-ments in spatial memory: A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*, 822–851. doi:10.3758/BF03196775.

Hubbard, T. L. (2014a). Forms of momentum across space: Representational, operational, and attentional. *Psychonomic Bulletin & Review*, *21*, 1371–1403. doi:10.3758/s13423-014-0624-3.

Hubbard, T. L. (2014b). The flash-lag effect and related mislocalizations: Findings, properties, and theories. *Psychological Bulletin*, *140*, 308–338. doi:10.1037/a0032899.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology*, *148*, 574–591. doi:10.1113/jphysiol.1959.sp006308.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey straite cortex. *Journal of Physiology*, *195*, 215–243. doi:10.1113/jphysiol.1968.sp008455.

Hurvich, L. M., & Jameson, D. (2001). An opponent-process theory of color vision. In S. Yantis (Hrsg.), *Visual perception* (S. 129–146). Philadelphia, PA: Psychology Press.

Jancke, D., & Erlhagen, W. (2010). Bridging the gap: A model of common neural mechanisms underlying the Fröhlich effect, the flash-lag effect, and the representational momentum effect. In R. Nijhawan, & B. Khurana (Hrsg.), *Space and time in perception and action*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jäncke, L. (2005). *Bildgebende Verfahren in der Psychologie und den kognitiven Neurowissenschaften*. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

Jordan, J. S., Stork, S., Knuf, L., Kerzel, D., & Müsseler, J. (2002). Action planning affects spatial localization. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention and Performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 158–176). Oxford, UK: Oxford University Press.

Julesz, B. (1971). *Foundation of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.

Julesz, B. (1981). Textons, the elements of texture perception and their interaction. *Nature*, *290*, 91–97. doi:10.1038/290091a0.

Kahneman, D., Norman, J., & Kubovy, M. (1967). Critical duration for resolution of form – centrally or peripherally determined. *Journal of Experimental Psychology*, *73*, 323–327. doi:10.1037/h0024257.

Kandel, E. R. (1996). Die Konstruktion des visuellen Bildes. In E. R. Kandel, & J. H. S. T. M. Jessel (Hrsg.), *Neurowissenschaften: Eine Einführung* (S. 393–411). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Kanisza, G. (1979). *Organization in vision: Essays on Gestalt perception*. New York: Praeger.

Kehrer, L. (1997). The central performance drop in texture segmentation: a simulation based on a spatial filter model. *Biological Cybernetics*, *77*, 297–305. doi:10.1007/s004220050391.

Kerzel, D. (2000). Eye movements and visible persistence explain the mislocalization of the final position of a moving target. *Vision Research*, *40*, 3703–3715. doi:10.1016/S0042-6989(00)00226-1.

Kerzel, D. (2010). The Fröhlich effect: Historical notes and relation to the flash-lag, current theories and reconciliation with the onset repulsion effect. In R. Nijhawan, & B. Khurana (Hrsg.), *Space and Time in Perception and Action* (S. 321–337). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Kerzel, D., & Müsseler, J. (2002). Effects of stimulus material on the Fröhlich illusion. *Vision Research*, *42*, 181–189. doi:10.1016/S0042-6989(01)00271-1.

Kerzel, D., Jordan, J. S., & Müsseler, J. (2001). The role of perceptual anticipation in the mislocalization of the final position of a moving target. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 829–840. doi:10.1037/0096-1523.27.4.829.

Kimchi, R., & Navon, D. (2000). Relative judgment seems to be the key: Revisiting the Beck effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 789–805. doi:10.1037/0096-1523.26.2.789.

Kirschfeld, K., & Kammer, T. (1999). The Fröhlich effect: A consequence of the interaction of visual focal attention and metacontrast. *Vision Research*, *39*, 3702–3709. doi:10.1016/S0042-6989(99)00089-9.

Koenderink, J. J. (1990). The brain a geometry engine. Special Issue: Domains of mental functioning: Attempts at a synthesis. *Psychological Research*, *52*, 122–127. doi:10.1007/BF00877519.

Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt psychology*. New York: Hartcourt Brace.

Kohler, I. (1962). Experiments with goggles. *Scientific American*, *206*, 63–72. doi:10.1038/scientificamerican0562-62.

Köhler, W. (1958). *Dynamische Zusammenhänge in der Psychologie*. Bern: Huber.

Kolers, P. A. (1974). The illusion of movement. In R. Held, & W. Richards (Hrsg.), *Perception: Mechanism and models* (S. 316–323). San Francisco, CA: Freeman.

Krekelberg, B., & Lappe, M. (2000). A model of the perceived relative positions of moving objects based upon a slow averaging process. *Vision Research*, *40*, 201–215. doi:10.1016/S0042-6989(99)00168-6.

Krueger, L. E. (1975). Familiarity effects in visual information processing. *Psychological Bulletin*, *82*, 949–974. doi:10.1037/0033-2909.82.6.949.

LeVay, S., & Voigt, T. (1988). Ocular dominance and disparity coding in cat visual cortex. *Visual Neuroscience*, *1*, 395–414. doi:10.1017/S0952523800004168.

Lieberman, H. R. (1983). Computation of psychological thresholds using the probit technique. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, *15*, 446–448. doi:10.3758/BF03203681.

Lieberman, H. R., & Pentland, A. P. (1982). Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The best PEST. *Behavior Research Methods and Instrumentation*, *14*, 21–25. doi:10.3758/BF03202110.

Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2005). *Detection theory: A user's guide* (2. Aufl.). Mahwah, New Jersey London: Lawrence Erlbaum Associates.

Maertens, M., & Pollmann, S. (2005). fMRI reveals a common neural substrate of illusory and real contours in V1 after perceptual learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1553–1564. doi:10.1162/089892905774597209.

Maisak, M. S., et al. (2013). A directional tuning map of *Drosophila* elementary motion detectors. *Nature*, *500*, 212–216. doi:10.1038/nature12320.

Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman and Company.

Marr, D., & Poggio, T. (1979). A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London*, *B 204*, 301–328. doi:10.1098/rspb.1979.0029.

Mashour, M. (1964). *Psychophysical relations in the perception of velocity*. Stockholm: Almquist and Wiksell.

Meinecke, C., & Kehrer, L. (1994). Peripheral and foveal segmentation of angle textures. *Perception and Psychophysics*, *56*, 326–334. doi:10.3758/BF03209766.

Merigan, W. H., & Maunsell, J. H. (1993). How parallel are the primate visual pathways? *Annual Review of Neuroscience*, *16*, 369–403. doi:10.1146/annurev.ne.16.030193.002101.

Metzger, W. (1932). Versuch einer gemeinsamen Theorie der Phänomene Fröhlichs und Hazeloffs und Kritik ihrer Verfahren zur Messung der Empfindungszeit. *Psychologische Forschung*, *16*, 176–200. doi:10.1007/BF00409732.

Metzger, W. (1966). Figurale Wahrnehmung. In W. Metzger (Hrsg.), *Handbuch der Psychologie* (Bd. 1, S. 693–744). Göttingen: Hogrefe.

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.

Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neuroscience*, *6*, 414–417. doi:10.1016/0166-2236(83)90190-X.

Müller, H. J., & Rabbitt, P. M. (1989). Spatial cueing and the relation between the accuracy of „where" and „what" decisions in visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41A*, 747–773. doi:10.1080/14640748908402392.

Müsseler, J. (1999a). How independent from action control is perception? An event-coding account for more equally-ranked crosstalks. In G. Aschersleben, & T. B. J. Müsseler (Hrsg.), *Cognitive contributions to the perception of spatial and temporal events* (S. 121–147). Amsterdam: Elsevier.

Müsseler, J. (1999b). Perceiving and measuring of spatiotemporal events. In S. Jordan (Hrsg.), *Modeling consciousness across the disciplines* (S. 95–112). Lanham, Maryland: University Press of America, Inc.

Müsseler, J., & Aschersleben, G. (1998). Localizing the first position of a moving stimulus: The Fröhlich effect and an attention-shifting explanation. *Perception and Psychophysics*, *60*, 683–695. doi:10.3758/BF03206055.

Müsseler, J., & Kerzel, D. (2016). Mislocalizing the onset position of moving stimuli. In T. L. Hubbard (Hrsg.), *Spatial Biases in Perception and Cognition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Müsseler, J., & Tiggelbeck, J. (2013). The perceived onset position of a moving target: Effects of trial contexts are evoked by different attentional allocations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*, 349–357. doi:10.3758/s13414-012-0397-6.

Müsseler, J., & Van der Heijden, A. H. C. (2004). Two spatial maps contributing to perceived space. Evidence from a relative mislocalization. *Visual Cognition*, *11*, 235–254. doi:10.1080/13506280344000338.

Müsseler, J., Van der Heijden, A. H. C., Mahmud, S. H., Deubel, H., & Ertsey, S. (1999). Relative mislocalizations of briefly presented stimuli in the retinal periphery. *Perception and Psychophysics*, *61*, 1646–1661. doi:10.3758/BF03213124.

Müsseler, J., Steininger, S., & Wühr, P. (2001). Can actions affect perceptual processing? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *54A*, 137–154. doi:10.1080/02724980042000057.

Müsseler, J., Stork, S., & Kerzel, D. (2002). Comparing mislocalizations in movement direction: The Fröhlich effect, the flash-lag effect and representational momentum. *Visual Cognition*, *9*, 120–138. doi:10.1080/13506280143000359.

Nakayama, K. (1994). James J. Gibson: An appreciation. *Psychological Review*, *101*, 329–335. doi:10.1037/0033-295X.101.2.329.

Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. New York: Meredith Corporation.

Nijhawan, R. (1994). Motion extrapolation in catching. *Nature*, *370*, 256–257. doi:10.1038/370256b0.

Nothdurft, H. C. (1990). Texture discrimination by cells in the cat lateral geniculate nucleus. *Experimental Brain Research*, *82*, 48–66. doi:10.1007/BF00230837.

Oudejans, R. R. D., Verheijen, R., Bakker, F. C., Gerrits, J. C., Steinbrückner, M., & Beek, P. J. (2000). Errors in judging 'offside' in football. *Nature,*, *404*, 33.

Palmer, S. E. (1992). Common region: A new principle of perceptual grouping. *Cognitive Psychology*, *24*, 436–447. doi:10.1016/0010-0285(92)90014-S.

Palmer, S. E. (1999). *Vision science. Photons to phenomenology*. Cambridge, MA: MIT Press.

Palmer, S., & Rock, I. (1994). Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. *Psychonomic Bulletin and Review*, *1*, 29–55. doi:10.3758/BF03200760.

Pentland, A. P. (1980). The Best PEST, a maximum-likelihood parameter estimation procedure. *Perception and Psychophysics*, *28*, 377–379.

Pizlo, Z. (1994). A theory of shape constancy based on perspective invariants. *Vision Research*, *34*, 1637–1658. doi:10.1016/0042-6989(94)90123-6.

Plessner, H., & Schallies, E. (2005). Judging the cross on rings: A matter of achieving shape sonstancy. *Applied Cognitive Psychology*, *19*, 1145–1156. doi:10.1002/acp.1136.

Pylyshyn, Z. (1999). Is vision continuous with cognition? The case for cognitive impenetrability of visual perception. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 341–365. doi:10.1017/S0140525X99002022.

Quinlan, P. T., & Wilton, R. N. (1998). Grouping by proximity or similarity? Competition between the Gestalt principles in vision. *Perception*, *27*, 417–430. doi:10.1068/p270417.

Rock, I., Nijhawan, R., Palmer, S., & Tudor, L. (1992). Grouping based on phenomenal similarity of achromatic color. *Perception*, *21*, 779–789. doi:10.1068/p210779.

Rodgers, N. (1999). *Unglaubliche optische Illusionen*. Augsburg: Weltbild.

Roelfsma, P. R., & Singer, W. (1998). Detecting connectedness. *Cerebral Cortex*, *85*, 385–396. doi:10.1093/cercor/8.5.385.

Rossetti, Y., & Pisella, L. (2002). Several 'vision for action' systems: A guide to dissociating and integrating dorsal and ventral functions. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention and Performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 62–119). Oxford, UK: Oxford University Press.

Rubin, E. (1921/2001). Figure and ground. In S. Yantis (Ed.), *Visual perception* (pp. 225–229; Auszug aus Rubin, E. (1921). Visuell wahrgenommene Figuren. Kopenhagen: Gyldendalske Boghandel). Philadelphia, PA: Psychology Press.

Sagi, D. (1995). The psychophysics of texture segmentation. In T. V. Papathomas, & C. Chubb (Hrsg.), *Early vision and beyond* (S. 69–78). Cambridge, MA: MIT Press.

Schiller, P. H., Logothetis, N. K., & Charles, E. R. (1990). Functions of the colour-opponent and broad-band channels of the visual system. *Nature*, *343*, 68–70. doi:10.1038/343068a0.

Schrauf, M., Lingelbach, B., & Wist, E. R. (1997). The scintillating grid illusion. *Vision Research*, *37*, 1033–1038. doi:10.1016/S0042-6989(96)00255-6.

Seckel, A. (2014). *Optische Illusionen: Sie werden Ihren Augen nicht trauen!* Fränkisch-Crumbach: Edition XXL Verlag.

Selfridge, O. G. (1959). *Pandemonium: A Paradigm for learning*. Proceedings of Mechanisation of Thought Processes, Bd. 1, S. 513–530). London: Her Majesty's Stationary Office.

Shaw, R. E., Flascher, O. M., & Mace, W. M. (1995). Dimensions of event perception. In W. Prinz, & B. Bridgeman (Hrsg.), *Perception* Handbook of perception and action, (Bd. 1, S. 345–395). London, UK: Academic Press.

Shen, J., & Reingold, E. M. (2001). Visual search asymmetry: The influence of stimulus familiarity and low-level features. *Perception and Psychophysics*, *63*, 464–475. doi:10.3758/BF03194413.

Singer, W. (1994). The organization of sensory motor representations in the Neocortex: A hypothesis based on temporal binding. In C. Umiltà, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and Performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 77–107). Cambridge, MA: MIT Press.

Singer, W., Engel, A. K., Kreiter, A. K., Munk, M. H. J., Neuenschwander, S., & Roelfsema, P. R. (1997). Neuronal assemblies: necessity, signature and detectability. *Trends in Cognitive Sciences*, *1*, 252–261. doi:10.1016/S1364-6613(97)01079-6.

Skavenski, A. A. (1990). Eye movement and visual localization of objects in space. In E. Kowler (Hrsg.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes* (S. 263–287). Amsterdam: Elsevier.

Spillmann, L. (1994). The Hermann grid illusion: A tool for studying human perceptive field organization. *Perception*, *23*, 691–708. doi:10.1068/p230691.

Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, *64*, 153–181. doi:10.1037/h0046162.

Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics*. New York: Wiley and Sons.

Swets, J. A., Tanner, W. P., & Birdsall, T. G. (1961). Decision processes in perception. *Psychological Review*, *68*, 301–340. doi:10.1037/h0040547.

Tanaka, K. (1996). Inferotemporal cortex and object vision. *Annual Review of Neuroscience*, *19*, 109–139. doi:10.1146/annurev.neuro.19.1.109.

Tessier-Lavigne, M., & Gouras, P. (1996). Farbe. In E. R. Kandel, & J. H. S. T. H. Jessell (Hrsg.), *Neurowissenschaften. Eine Einführung* (S. 459–475). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97–136. doi:10.1016/0010-0285(80)90005-5.

Tsal, Y., & Lavie, N. (1988). Attending to color and shape: the special role of location in selective visual processing. *Perception and Psychophysics*, *44*, 15–21. doi:10.3758/BF03207469.

Tyler, C. W. (1990). A stereoscopic view of visual processing streams. *Vision Research*, *30*, 1877–1895. doi:10.1016/0042-6989(90)90165-H.

Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, & M. A. G. R. J. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of visual behavior* (S. 549–580). Cambridge: MIT Press.

Van der Heijden, A. H. C. (1992). *Selective attention in vision*. London: Routledge.

Van der Heijden, A. H. C. (2004). *Attention in Vision – Perception, Communication, and Action*. London: Routledge.

Van der Heijden, A. H. C., Wolters, G., & Brouwer, R. F. T. (1995). Response dependency and processing dependency of line orientation and position in a single-item task. *Psychological Research*, *58*, 19–30. doi:10.1007/BF00447086.

Van der Heijden, A. H. C., Kurvink, A. G., De Lange, L., De Leeuw, F., & Van der Geest, J. N. (1996). Attending to color with proper fixation. *Perception and Psychophysics*, *58*, 1224–1237. doi:10.3758/BF03207555.

Van der Heijden, A. H. C., Müsseler, J., & Bridgeman, B. (1999). On the perception of position. In G. Aschersleben, T. Bachmann, & J. Müsseler (Hrsg.), *Cognitive contributions to the perception of spatial and temporal events* (S. 19–37). Amsterdam: Elsevier.

Van Essen, D. C., & DeYoe, E. A. (1995). Concurrent processing. In I. M. S. Gazzaniga (Hrsg.), *The cognitive neuroscience* (S. 383–400). Cambridge, MA: MIT Press.

Verri, A., Straforini, M., & Torre, V. (1992). Computational aspects of motion perception in natural and artificial visionsystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, *337*(1282), 429–443. doi:10.1098/rstb.1992.0119.

Wallach, H. (1948). Brightness constancy and the nature of achromatic colors. *Journal of Experimental Psychology*, *38*, 310–324. doi:10.1037/h0053804.

Wallach, H. (1959). The perception of motion. *Scientific American*, *201*, 107–116. doi:10.1038/scientificamerican0759-56.

Walsh, V., & Kulikowski, J. (Hrsg.). (1998). *Perceptual constancy: Why things look as they do*. New York: Cambridge University Press.

Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, *61*, 262–265.

Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre der Gestalt, II. *Psychologische Forschung*, *5*, 301–350. doi:10.1007/BF00410640.

Westheimer, G. (1981). *Visual hyperacuity. Progress in Sensory Physiology* (S. 1–30). Berlin: Springer.

Whitney, D., Murakami, I., & Cavanagh, P. (2000). Illusory spatial offset of a flash relative to a moving stimulus is caused by differential latencies for moving and flashed stimuli. *Vision Research*, *40*, 137–149. doi:10.1016/S0042-6989(99)00166-2.

Wirtz, M. (2001). *Der Einfluss der Kantenkontrastverarbeitung auf die wahrgenommene Helligkeit angrenzender Flächen*. München: Herbter Utz Verlag.

Wolff, P. (1999). Space perception and the intention of action. In G. Aschersleben, & T. B. J. Müsseler (Hrsg.), *Cognitive contributions to the perception of spatial and temporal events* (S. 43–63). Amsterdam: Elsevier.

Yantis, S. (Hrsg.). (2001). *Visual perception*. Philadelphia, PA: Psychology Press.

Zihl, J., Cramon, D. von, & Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral damage. *Brain*, *106*, 313–340. doi:10.1093/brain/106.2.313.

Zeki, S., Watson, J. D. G., Lueck, C. J., Firston, K. J., Kennard, C., & Frackowiak, R. S. J. (1991). A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *11*, 641–649.

Zihl, J., Cramon, D. von, Mai, N., & Schmid, C. (1991). Disturbance of movement vision after bilateral posterior brain damage. *Brain*, *114*, 2235–2252. doi:10.1093/brain/114.5.2235.

Auditive Informationsverarbeitung

Alexandra Bendixen und Erich Schröger

3.1 Einleitung: Alleinstellungsmerkmale der auditiven Informationsverarbeitung – 52

3.2 Physikalische Grundlagen des Hörens – 53

3.3 Physiologische Grundlagen: Umwandlung von Schallwellen in Hirnaktivität – 53

3.4 Der auditive Verarbeitungspfad – 54

3.5 Wichtige Aufgaben und Leistungen der auditiven Informationsverarbeitung – 56

3.5.1 Sequenzielle Verarbeitung, Gedächtnis und Prädiktion – 57

3.5.2 Aufmerksamkeitsausrichtung – 58

3.5.3 Auditive Szenenanalyse – 60

3.5.4 Ambiguität und Multistabilität beim Hören – 63

3.6 Psychophysiologische Korrelate auditiver Verarbeitung – 64

3.7 Störungen des Hörsinns und mögliche Kompensationen – 66

3.8 Anwendungsbeispiele – 69

3.9 Ausblick – 69

3.10 Weiterführende Informationen – 70

Literatur – 71

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_3

Im Blickfang

Tinnitus

„Was Sie da hören, kommt nicht aus Ihrer Umgebung – Ihr Gehirn gaukelt Ihnen das nur vor." Der hier angesprochene Patient leidet nicht etwa unter akustischen Halluzinationen im Rahmen einer schizophrenen Erkrankung, sondern unter einer viel basaleren Beeinträchtigung: **Tinnitus**. Unter Tinnitus versteht man das Erleben auditiver Sinnesinhalte ohne passenden physikalischen Input. Im Unterschied zu akustischen Halluzinationen sind die Inhalte in der Regel einfacher Natur (d. h. keine Sprache, sondern z. B. Pfeif- und Pieptöne, Rauschen und Klickgeräusche) und werden vom Patienten als aus dem Ohr kommend erlebt. Bis zu 10 % der Bevölkerung ist von Tinnitus betroffen, und für viele Tausende Betroffene führt dies zu einer gravierenden Beeinträchtigung der Lebensqualität. Das Phänomen des Tinnitus verdeutlicht, dass sich auch die auditive Wahrnehmung nicht aus einem 1 : 1-Abbild der Umwelt ergibt, sondern aus dem komplexen Zusammenspiel von physikalischer Information, physiologischer Verarbeitung und psychologischer Bedeutungszuweisung entsteht. Es verdeutlicht ferner, dass einzelne Elemente dieses Zusammenspiels sich im Extremfall „verselbstständigen" und zu massiven Fehlwahrnehmungen führen können. Und es verdeutlicht, dass solche Veränderungen in elementaren Wahrnehmungsfunktionen schwerwiegende Konsequenzen nicht nur für das Erleben, sondern auch das Verhalten des Menschen haben können (man denke an den Rückzug aus sozialen Situationen aufgrund von erlebter Informationsüberflutung). Aus der Forschung zur auditiven Wahrnehmung sind inzwischen vielversprechende Interventionsansätze für Betroffene entstanden. Die Arbeitsgruppe von Christo Pantev an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster entwickelte eine Therapie, die mittels der frequenzgefilterten Präsentation von Musik über längere Zeiträume eine Reorganisation des Gehirns und damit eine Verringerung der subjektiv empfundenen Tinnituslautstärke bewirkt (Okamoto et al. 2010). Interessanterweise können die Betroffenen dafür ihre Lieblingsmusikstücke auswählen. Die Wirksamkeit dieses Ansatzes wird derzeit in einer groß angelegten klinischen Studie überprüft (Pantev et al. 2014).

3.1 Einleitung: Alleinstellungsmerkmale der auditiven Informationsverarbeitung

Über unsere Sinnessysteme nehmen wir Informationen aus der Umwelt auf. Oft gilt dabei das Sehen als wichtigster Sinn („queen of the senses"), was sich auch im Alltagssprachgebrauch niederschlägt („im Blickfang", „Ansehen genießen" usw.). In der Tat kann das visuelle System des Menschen in vielerlei Hinsicht als dominant erachtet werden – aber um wie vieles ärmer wäre unsere Interaktion mit der Umwelt ohne die Möglichkeit, Musik zu hören, Sand unter unseren Füßen zu spüren, eine köstliche Suppe zu riechen und zu schmecken? Und um wie vieles gefährlicher wäre die Umwelt noch dazu, wenn wir ein Auto hinter uns nicht hören könnten, wenn unser Geschmackssinn uns nicht vor der verdorbenen Speise warnen würde oder wenn der Schmerz uns nicht rechtzeitig von der heißen Herdplatte zurückzucken ließe?

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit Wahrnehmung und Informationsverarbeitung beim Hören, das nach dem Sehen den meistuntersuchten Sinn darstellt und für viele psychische Funktionen, wie etwa soziale Kommunikation, von zentraler Bedeutung ist. Selbstverständlich spielen auch andere nichtvisuelle Sinnesmodalitäten (Riechen, Schmecken, Fühlen usw.) eine tragende Rolle. Auch erfolgt unsere Wahrnehmung meist nicht getrennt nach den verschiedenen Modalitäten – ganz im Gegenteil, wir erleben die Informationen, die über die verschiedenen Sinne vermittelt werden, als sich gegenseitig ergänzend. Diese sogenannte multisensorische Interaktion wird in ▶ Kap. 4 besprochen.

Das Hören ist neben dem Sehen der zweite Fernsinn des Menschen. Analog zu den elektromagnetischen Wellen beim Sehen (▶ Kap. 2) werden beim Hören Schwingungen einer bestimmten Wellenlänge aufgenommen und in psychisches Empfinden umgesetzt. In diesem Fall handelt es sich bei den Schwingungen um Luftdruckschwankungen, die durch das schallerzeugende Objekt (z. B. ein Musikinstrument, der menschliche Stimmapparat, die Kollision von zwei Gegenständen) ausgelöst werden. Oft werden die physikalischen Eingangsparameter und deren psychophysische Transformation zwischen Hören und Sehen gleichgesetzt. Die Amplitude der Schwingung wird als Intensität (also Lautheit bzw. Helligkeit) wahrgenommen, die Wellenlänge (Frequenz) der Schwingung entspricht auf psychischer Ebene der Tonhöhe bzw. dem erlebten Farbton. Doch selbst für diese einfache Analogie kann man bereits Gegenargumente finden. Während die Tonhöhe psychisch eindimensional repräsentiert ist (d. h., alle Tonhöhen lassen sich nebeneinander auf einer Skala, der Tonleiter, anordnen), wird der Farbraum typischerweise als mehrdimensional empfunden – es ist nicht möglich, alle Farben der Reihe nach zu sortieren (Kavšek 1996). Klare Unterschiede gibt es auch in der Benennungsleistung. Während die Benennung von Farben für die meisten Menschen (solange sie nicht farbfehlsichtig sind) kein Problem darstellt, ist die korrekte Benennung von Tonhöhen eine vergleichsweise seltene Gabe – das *absolute Gehör* besitzt nur ein Bruchteil der Bevölkerung (z. B. Elmer et al. 2015). Solche Unterschiede machen deutlich, dass der Hörsinn zumindest teilweise nach anderen Prinzipien organisiert ist als der Sehsinn.

Gleichwohl zeigen neuere Untersuchungen zur corticalen Plastizität, dass die Hirnareale, die das Sehen bzw. Hören unterstützen, in einem gewissen Ausmaß zur Verarbeitung von Informationen des jeweils anderen Sinnes herangezogen werden, wenn einer der Sinne von Geburt an beeinträchtigt ist oder im Laufe des Lebens nachlässt – wenn also eine Person erblindet oder ertaubt (Merabet und Pascual-Leone 2010). Solche Befunde sprechen dafür, dass es doch eine gewisse Ähnlichkeit in der (corticalen) Organisation der beiden Sinnessysteme gibt. Interessanterweise ist diese Funktionsübernahme nicht immer hilfreich: Sandmann et al. (2012) konnten in einer Studie zeigen, dass fast vollständig ertaubte Personen bei Wiederherstellung der akustischen Informationsaufnahme mittels eines Cochleaimplantats das Hören dann besonders erfolgreich wieder erlernten, wenn der auditive Cortex *nicht* bereits visuelle Funktionen übernommen hatte. Auch wenn die zugrunde liegenden Mechanismen noch weitgehend ungeklärt sind, illustrieren solche Befunde, wie

wichtig es ist, die Funktionsweise der Sinnessysteme und die resultierenden Wahrnehmungsphänomene unter Beachtung der Spezifika der jeweiligen Sinnesmodalität zu betrachten.

In ▶ Abschn. 3.2 werden die Grundzüge der auditiven Informationsverarbeitung erläutert, die uns dazu befähigen, aus der Analyse von Luftdruckschwankungen zu solch komplexen Leistungen wie Verstehen von Sprache und Erleben von Musik zu gelangen. Im Vordergrund stehen basale auditive Wahrnehmungsphänomene; höhere Aspekte des Sprachverstehens werden in ▶ Kap. 13 sowie 14 erörtert. Dabei sollte jedoch nicht vergessen werden, dass diese basale auditive Verarbeitung auch bei den komplexeren Leistungen stattfindet und quasi erst die Bühne für die sprachliche Kommunikation bereitet (Winkler und Schröger, 2015).

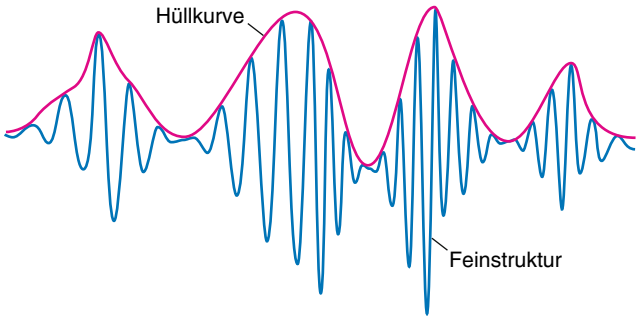
3.2 Physikalische Grundlagen des Hörens

Akustische Informationen werden durch Luftdruckveränderungen übertragen. Diese Veränderungen (*Schallwellen*) können oft als Überlagerung verschiedener sinusförmiger Oszillationen mit definierter Frequenz beschrieben werden. Beispielsweise sendet ein menschlicher Sprecher Signale einer bestimmten Grundfrequenz mit mehreren harmonischen Obertönen (ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz) aus. Die Grundfrequenz hängt primär von der momentanen Stimmlage des Sprechers ab, die Zusammensetzung der Obertöne von seiner Atemtechnik ebenso wie von anatomischen Parametern seines Stimmapparats.

Die Frequenz eines Tones wird in Hertz (Hz; Anzahl der Schwingungszyklen pro Sekunde) angegeben. Schnelle Schwingungen werden als hohe Töne, langsame Schwingungen als tiefe Töne wahrgenommen. Der Mensch kann nur Frequenzen innerhalb eines Bereichs von etwa 16 Hz bis 20 kHz hören. Dieser Frequenzbereich nimmt – insbesondere am oberen Ende – mit dem Alter deutlich ab.

Das zweite wichtige Charakteristikum einer Schwingung neben der Frequenz ist ihre Amplitude. Man kann vereinfachend sagen, dass sich dieser physikalische Parameter auf psychischer Ebene in das Lautheitsempfinden umsetzt (obgleich Lautheit auch durch verschiedene andere Faktoren wie beispielsweise Tondauer und -komplexität beeinflusst wird). Natürliche Schallwellen haben typischerweise keine konstante Amplitude, sondern zeigen Amplitudenveränderungen über die Zeit. Diese Amplitudenveränderungen lassen sich über die *Hüllkurve* (auch: Einhüllende; *envelope*) des Tones beschreiben. Im Gegensatz dazu bestimmt sich die *Feinstruktur* (*temporal fine structure*) aus der relativen Mischung der zu einem bestimmten Zeitpunkt auftretenden Frequenzanteile des Schallsignals (◘ Abb. 3.1). Überraschenderweise kann man allein anhand der Hüllkurve komplexe Signale wie z. B. Sprache recht gut verstehen; in lauten Umgebungen gewinnt jedoch die Feinstruktur an Bedeutung (Moon et al. 2014; Moore 2008).

Ein perzeptuell bedeutsamer Aspekt der Hüllkurve ist der Zeitverlauf zu Beginn eines Tones (*rise time*). Einige Töne beginnen mit einem sehr plötzlichen Amplitudenanstieg (z. B. ein Klavierton), während andere erst allmählich in ihrer Amplitude zunehmen (z. B. ein Orgelton). Daraus ergeben sich sehr unterschiedliche Wahrnehmungseindrücke, die es uns ermöglichen, die Musikinstrumente oder die Stimmen verschiedener Sprecher voneinander zu unterscheiden, auch wenn sie denselben Ton spielen oder dasselbe Wort artikulieren. Die charakteristische *Klangfarbe* einer Schallquelle wird neben dem Zeitverlauf zu Beginn des Tones auch maßgeblich durch die relativen Anteile der Obertöne an der Schallmischung bestimmt. Welche weiteren physikalischen Eigenschaften zum psychischen Erleben der Klangfarbe beitragen und wie sich Klangfarbe objektiv messen lässt, ist nach wie vor Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen (Rahne et al. 2010).



◘ **Abb. 3.1** Schematische Darstellung von Hüllkurve und Feinstruktur eines Schallsignals im Zeitverlauf

3.3 Physiologische Grundlagen: Umwandlung von Schallwellen in Hirnaktivität

Das auditive Sinnessystem wandelt Schwingungen innerhalb des hörbaren Frequenzbereichs in neuronale Aktivierungsmuster um. Die Schallwellen werden zunächst vom Außen- und Mittelohr gebündelt und verstärkt, um dann im Innenohr auf das eigentliche Sinnesorgan, das *Corti-Organ* auf der *Basilarmembran* im Inneren der Hörschnecke (*Cochlea*) zu treffen. Dort sitzen die *Haarzellen* als Rezeptoren des auditiven Systems (wie auch des Gleichgewichtssystems). Die Frequenz eines Tones wird neuronal über die Stelle der Auslenkung auf der Basilarmembran codiert. Dieses Prinzip der Ortscodierung nennt man *Tonotopie*. (Für Frequenzen unterhalb von etwa 5000 Hz gibt es neben der Ortscodierung einen zusätzlichen zeitbasierten Codiermechanismus über die *Phasenankopplung* der Aktivität von Neuronenpopulationen, die sozusagen mit der akustischen Stimulation „mitschwingen"; dieser Mechanismus stößt jedoch bei höheren Frequenzen an seine Grenzen.)

Tonotopie ist das wichtigste Organisationsprinzip im auditiven System. Sie findet sich in allen zeitlich und anatomisch nachgelagerten Stufen des auditiven Verarbeitungspfades im Gehirn. In dieser Hinsicht bestehen Analogien zwischen der tonotopen Codierung im auditiven System, der retinotopen Codierung im visuellen System (d. h. Codierung nach dem Ort der Aktivierung auf der Netzhaut/Retina) und der somatotopen Codierung im somatosensorischen System (d. h. Codierung nach dem Ort der Aktivierung auf dem Körper). Wichtig ist, dabei zu berücksichtigen, dass die ortsbasierte Codierung beim Sehen und Tasten aufgrund der physikalischen Beziehungen zwischen Sinnesreiz

und Rezeptor unmittelbar den tatsächlichen Ort in der Welt widerspiegelt, von dem die Aktivität ausging. Dies ist beim Hören *nicht* der Fall: Der Ort der Aktivierung auf der Cochlea steht in keinerlei Beziehung zum Ort, an dem sich die Schallquelle befindet, sondern er gibt wie oben beschrieben Aufschluss über die von der Schallquelle ausgesendeten Frequenzen.

Natürlich ist der Ort, von dem die Sinnesinformation ausging, auch beim Hören eine der wichtigsten Eigenschaften überhaupt – wie sonst könnte das auditive System seine Warnfunktion für den Organismus ausüben? Um schnell auf Warnsignale (die Hupe eines Fahrzeugs, das Brüllen eines Löwen) reagieren zu können, ist es unabdingbar, dass unser Hörsinn uns nicht nur darüber informiert, dass gerade „irgendwo" in der Umgebung Gefahr droht, sondern dass er auch unmittelbar die Richtung der Gefahr anzeigt. Da keine direkte (rezeptorcodierte) Ortsinformation vorliegt, besteht eine der wichtigsten Aufgaben des auditiven Systems darin, den Ort einer Schallquelle in späteren Verarbeitungsstufen indirekt zu errechnen. Die *Lokalisierung* von Schallquellen basiert zum großen Teil auf dem **binauralen Hören**, d. h. auf einer Integration der Informationen der beiden Ohren. In diesem Integrationsprozess werden interaurale Laufzeitunterschiede (*interaural time differences*, ITDs) und interaurale Intensitätsunterschiede (auch: Pegelunterschiede, *interaural level differences*, ILDs) ausgewertet, die Aufschluss über den Ort der Schallquelle geben. Ein Schallsignal, das von links kommt, erreicht das linke Ohr früher (ITD) und mit höherer Intensität (ILD) als das rechte – Letzteres aufgrund von Energieverlusten über die Zeit und aufgrund des Schallschattens durch den dazwischenliegenden Kopf. ITD und ILD sind keine direkt wahrnehmbaren Eigenschaften des Schalles (d. h., man hat keinen bewussten Zugang zu der Information, dass das linke Ohr früher bzw. lauter stimuliert wurde), sondern sie werden automatisch in Richtungsinformation umcodiert (d. h., das bewusste Perzept ist jenes einer Schallquelle, die sich links vom Hörer befindet). Die auflösbaren Laufzeitunterschiede liegen weit unter 1 ms – eine erstaunlich präzise Rechenleistung des auditiven Systems.

Die beschriebenen binauralen Hinweisreize helfen vor allem bei der horizontalen Lokalisierung von Schallquellen (links vs. rechts; *Azimut*). Die vertikale Lokalisierung (oben vs. unten; *Elevation*) basiert auf *monauralen* (d. h. auf der Basis der Informationen nur eines Ohres zugänglichen) Hinweisreizen. Diese werden durch Reflexionen und Beugungen der Schallwelle im Außenohr (bestehend aus Ohrmuschel und dem etwa 3 cm langen äußeren Gehörgang) erzeugt. Um diese im Außenohr entstehenden Veränderungen des Signals korrekt mit Bezug auf die Schallrichtung interpretieren zu können, ist allerdings eine gewisse Kenntnis der physikalischen Zusammensetzung des ursprünglichen Signals vonnöten. Diese muss – ebenso wie das Erfahrungswissen um die akustischen Eigenschaften des eigenen Außenohrs – im Laufe des Lebens erst gelernt werden.

Im Zusammenspiel monauraler und binauraler Hinweisreize lassen sich Schallquellen einigermaßen gut lokalisieren; dennoch verbleiben manchmal **Ambiguitäten** – d. h., ein bestimmtes Aktivierungsmuster lässt sich nicht eindeutig einer konkreten Schallrichtung zuordnen. In diesen Fällen behilft man sich als Hörer – oft ohne es zu merken – mit kleinen Kopfbewegungen, die das Aktivierungsmuster geringfügig verändern und damit die Mehrdeutigkeit auflösen. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass auch beim Hören Wahrnehmung und Motorik eng verknüpft sind – und zwar nicht nur in dem Sinne, dass die Wahrnehmung Grundlage für die Motorik ist, sondern eben auch im umgekehrten Sinn: „We must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive" (Gibson 1979, S. 223).

Neben der Schallrichtung (links/rechts, oben/unten) ist selbstverständlich auch die *Entfernung* der Schallquelle vom Hörer eine relevante Eigenschaft, um adäquat auf einen Sinnesreiz reagieren zu können (je näher das hupende Auto, desto größer die Notwendigkeit zu handeln). Abstandsinformation können wiederum nur indirekt erschlossen werden; sie basieren maßgeblich auf der Lautstärke des Signals, das zur bekannten bzw. durchschnittlichen Lautstärke der jeweiligen Schallquelle in Beziehung gesetzt wird – ähnlich wie das visuelle System die typische Größe von Objekten in die Abstandsberechnung einbezieht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass dem visuellen System – anders als dem auditiven System – im Regelfall zahlreiche weitere Hinweisreize für räumliche Tiefeninformation zur Verfügung stehen, beispielsweise Signale aus der Okulomotorik (Akkommodation, Konvergenzwinkel), binokularer Abgleich (Querdisparation) und monokulare Hinweisreize (z. B. Verdeckung, Bewegungsparallaxe). Trotz dieser Einschränkung im Vergleich zur visuellen Wahrnehmung können wir uns in vertrauter akustischer Umgebung, beispielsweise in der eigenen Wohnung, recht gut auditiv zurechtfinden. Auch in einer neuen akustischen Umwelt, wie etwa einem Hörsaal, in dem wir uns zum ersten Mal befinden, lernen wir sehr schnell, uns anhand der akustischen Information auditiv zu orientieren.

Scheinbar noch komplizierter, aber ökologisch relevanter ist die Lokalisierung einer Schallquelle, die sich im Raum bewegt (z. B. ein Fahrzeug, das auf uns zukommt oder sich von uns wegbewegt), sodass sich der Ort der akustischen Stimulation relativ zum Hörer stetig ändert. Interessanterweise scheint dies für das auditive System keine größeren Schwierigkeiten zu bereiten, da es sehr gut darauf vorbereitet ist, *sequenzielle* (über die Zeit erstreckte) Eingangssignale zu empfangen und miteinander in Beziehung zu setzen. Dies wird in ▶ Abschn. 3.5.1 zur sequenziellen Verarbeitung genauer betrachtet.

3.4 Der auditive Verarbeitungspfad

Während einige Eigenschaften des Schallsignals (z. B. Intensität) bereits auf der Cochlea codiert werden, müssen die meisten Eigenschaften erst aus dem Signal extrahiert werden. Dies geschieht im aufsteigenden auditiven Verarbeitungspfad (**Hörbahn**) zwischen der Cochlea und dem primären auditiven Cortex. Die Informationen verlassen die Cochlea über den Hörnerv, der aus Axonen gebildet wird, welche die von den Haarzellen in neuronale Erregung umgewandelte Information weiterleiten (analog zum Sehnerv, der aus Axonen der retinalen Ganglienzellen besteht). Im Kontrast zum visuellen System beinhaltet der auditive Verarbeitungspfad eine vergleichsweise hohe Anzahl an Schaltstellen (Nuclei, Ansammlungen von Nervenzellkörpern), ehe die Informationen den Cortex erreichen: den Cochleariskern (Nucleus cochlearis), die obere Olive (Oliva superior) und den

Zur Vertiefung 3.1

Die Leistung des Hörsinns

Was der Hörsinn zu leisten hat, ist erstaunlich. Uns erscheint es aus der Innenperspektive nicht als schwierig, aber wenn man sich einmal die physikalischen Grundlagen verdeutlicht, auf denen unsere Höreindrücke beruhen, ist man schnell beeindruckt von deren Komplexität. Albert Bregman (1990) wählt in seinem Buch *Auditory Scene Analysis* folgendes Bild: Stell Dir vor, Du bist an einem Seeufer, und ein Freund fordert Dich zu einem Spiel heraus. Das Spiel geht so: Dein Freund gräbt zwei enge Kanäle vom Seeufer aus landeinwärts. Die beiden Kanäle sind jeweils ein paar Zoll lang, ein paar Zoll breit und ein paar Fuß auseinander. Auf halber Strecke breitet er über jedem Kanal ein Taschentuch aus und befestigt es an den Seiten. Wellen, die das Seeufer erreichen, laufen die Kanäle hoch und versetzen die beiden Taschentücher in Bewegung. Du darfst nur auf die Taschentücher schauen und sollst durch die Beobachtung ihrer Bewegung eine Reihe von Fragen beantworten: Wie viele Boote sind auf dem See, und wo sind sie? Welches ist das stärkste? Welches ist näher? Bläst der Wind? Wurde irgendein Objekt plötzlich in den See geworfen? Die Aufgabe erscheint unlösbar.

Unser Hörsystem beantwortet analoge Fragen ganz mühelos: Wie viele Personen sprechen gerade und von wo? Welche spricht am lautesten? Was gibt es für Nebengeräusche? Dabei stehen uns gerade so viele Informationen zur Verfügung wie beim Strandspiel, nur mittels Luftwellen statt Wasserwellen. Darüber hinaus gelingt es uns mühelos, Sprecher und Ereignisse am Klang zu erkennen. Im obigen Spiel wären das Fragen wie: Was ist das für ein Boot? Was für ein Objekt wurde in den See geworfen? Eine andere Veranschaulichung der beeindruckenden Leitung unseres Gehörs stammt von dem ungarischen Hörforscher István Winkler (► http://en.wikipedia.org/wiki/Istv%C3%A1n_Winkler): Man stelle sich eine futuristische Bar vor, in der der Barkeeper allerlei Getränke wie Wasser, Bier, Kaffee, Saft und Tee in einem Gefäß zusammenmixt und dem Kunden bei der Bestellung eines bestimmten Getränks lediglich einen Strohhalm reicht, mit der Bitte, sich das gewünschte Getränk aus dem Gefäß zu saugen. Völlig unmöglich!? Ja, im Fall des Mischgetränks! Nein, im Falle des Hörens, denn de facto überlagern sich alle simultan aktiven Schallquellen im Medium Luft (so wie sich die Flüssigkeiten in dem Gefäß überlagern) – und trotzdem sind wir in der Lage, eine bestimmte Schallquelle auszuwählen und ihr zuzuhören.

Lemniscus lateralis im Hirnstamm, die Colliculi inferiores am posterioren Ende des Mittelhirns und den medialen Kniehöcker (Corpus geniculatum mediale) als Teil des Thalamus. Zum Vergleich sei daran erinnert, dass im visuellen System der Thalamus (genauer gesagt: der seitliche Kniehöcker, Corpus geniculatum laterale; ► Kap. 2) die einzige Schaltstelle im gesamten Verarbeitungspfad zwischen Peripherie und Cortex darstellt. Die Vielzahl an Schaltstellen beim Hören deutet auf ein hohes Ausmaß an Vorverarbeitung hin, da an den entsprechenden Synapsen – wie überall im Nervensystem – Information nicht nur 1 : 1 weitergeleitet, sondern akzentuiert und neu kombiniert wird.

Die Weiterleitung von Signalen im auditiven Verarbeitungspfad erfolgt weitgehend hierarchisch, obgleich die meisten Kerngebiete Informationen von mehr als einer weiter peripher gelegenen Schaltstelle erhalten. Tonotopie als Organisationsprinzip bleibt in allen Kerngebieten und bis zum auditiven Cortex erhalten, d. h., benachbarte Neuronenpopulationen reagieren auf ähnliche Frequenzen. Anders als beispielsweise im somatosensorischen System gibt es keine eindeutig lateralisierte (also ipsilaterale oder contralaterale) Informationsweiterleitung, sondern die Verarbeitungspfade für Signale aus dem linken und rechten Ohr treffen in mehreren Kerngebieten aufeinander. Dies ermöglicht einen Austausch der von beiden Ohren empfangenen Signale. Das erste maßgebliche Kerngebiet für binaurale Integration ist die obere Olive, wo Laufzeit- und Pegelunterschiede (ITDs, ILDs) als Basis für die Schalllokalisierung errechnet werden.

Der *auditive Cortex* des Menschen liegt bilateral im superioren Planum temporale (*superior temporal plane*) des Temporallappens und ist weitgehend im Sulcus lateralis (Sylvische Furche, *lateral sulcus* oder *Sylvian fissure*) „versteckt". Der Hörcortex setzt sich zusammen aus dem primären auditiven Cortex, der sich über den medialen Anteil des transversen temporalen Gyrus (auch Heschl'scher Gyrus) erstreckt, sowie aus mehreren sekundären und Assoziationsarealen, die in benachbarten Gebieten der anterioren (*planum polare*) und posterioren (*planum temporale*) superioren temporalen Ebene gelegen sind. Die anatomische Struktur des auditiven Cortex zeigt große Unterschiede sowohl zwischen Personen als auch zwischen der linken und rechten Hemisphäre ein und derselben Person. Man nimmt an, dass die Hemisphärenunterschiede funktionale Spezialisierungen in Bezug auf Sprach- und Musikverarbeitung widerspiegeln.

Ähnlich zum Modell der dualen (Was-/Wo-)Verarbeitung im visuellen System wird auch für das auditive System postuliert, dass es ausgehend vom primären auditiven Cortex zwei wesentliche Pfade zur Weiterverarbeitung der Informationen gibt. Der *ventrale Pfad*, der den auditiven Cortex über den anterioren Temporallappen mit dem Frontallappen verbindet, spielt eine wesentliche Rolle bei der Erkennung und Identifizierung von Schallsignalen. Der *dorsale Pfad*, der zwischen auditivem Cortex und Parietallappen verläuft, wird mit der Lokalisierung von Schallquellen in Verbindung gebracht. Insgesamt weist der auditive Cortex zahlreiche Verbindungen zu Frontalhirnarealen auf (Plakke und Romanski 2014).

Die hier gewählte Beschreibung des auditiven Systems als aufsteigender Verarbeitungspfad soll keineswegs implizieren, dass Informationen nur in eine Richtung fließen (*bottom-up*: von der Peripherie zu zentralen Verarbeitungsstufen). Im Gegenteil: Auf jeder Zwischenverarbeitungsstufe gibt es Feedbackschleifen, deren Funktion von der Initiierung reflexartiger Handlungen (z. B. zum Schutz des Innenohrs vor lärmbedingten Schädigungen) bis hin zur *Top-down-Modulation* der neuronalen Verarbeitung reicht. Anatomisch gesehen gibt es häufig sogar wesentlich mehr Top-down- als Bottom-up-Verbindungen. Funktional wird die Verarbeitung auf frühen Stufen im Rahmen von Top-down-Modulation im Einklang mit impliziten Erwartungen, aktuellen Wahrnehmungsinteressen und Handlungszielen des Hörers modifiziert: Beispielsweise werden bestimmte akustische Informationen in der Verarbeitung bevorzugt, um sich auf einzelne Schallquellen in der Umgebung (z. B. den Gesprächspartner) zu konzentrieren, während andere Schallquellen (z. B. Straßenlärm) aus der Verarbeitung weitgehend ausgeblendet werden (► Zur Vertiefung 3.1).

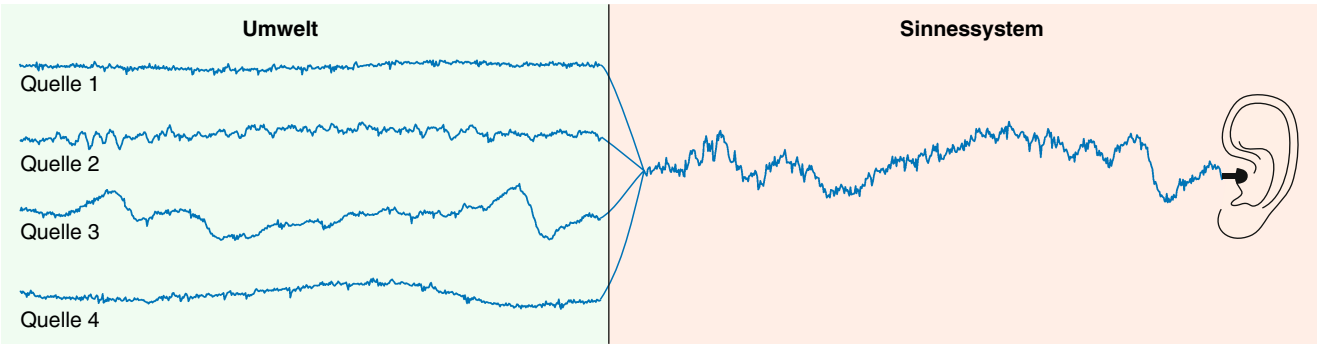


Abb. 3.2 Schematische Darstellung der Überlagerung von Schallwellen. Die Signale von vier Schallquellen, die zeitgleich aktiv sind (*links*), summieren sich vor dem Eingang in das Sinnessystem auf (*rechts*) und müssen im Rahmen der auditiven Wahrnehmung erst wieder in die Ursprungssignale zergliedert werden

3.5 Wichtige Aufgaben und Leistungen der auditiven Informationsverarbeitung

In ▶ Abschn. 3.3 wurde bereits die Lokalisierung von Schallquellen als wichtige Herausforderung an das auditive System betont. Mindestens ebenso herausfordernde Probleme ergeben sich aus zwei weiteren Eigenschaften des akustischen Signals: der „Vergänglichkeit" von Schallsignalen und der quasitransparenten Überlagerung der Signale, die von verschiedenen Schallquellen ausgesendet werden.

Die Vergänglichkeit bzw. der *flüchtige Charakter* von Schallsignalen bezieht sich auf den Umstand, dass akustische Information immer als Veränderung über die Zeit definiert ist. Am klarsten lässt sich dies am Beispiel des Sprachverstehens illustrieren: Ein einmal ausgesprochenes Wort „verschwindet" sofort wieder; es ist nicht möglich, dieselbe physikalische Information noch einmal zu „inspizieren". Beim Sehen gilt dasselbe beispielsweise für den Gesichtsausdruck und die Gesten eines Sprechers, nicht jedoch für viele statische Parameter wie etwa seine Haarfarbe oder seine Statur, die problemlos mehrfach betrachtet werden können. Der hochveränderliche auditive Input stellt harte Anforderungen hinsichtlich einer *Echtzeitanalyse* an das auditive System. Um keine Information zu verpassen, ist die optimale Ausrichtung *zeitlicher Aufmerksamkeit* ein wichtiger Mechanismus der auditiven Informationsverarbeitung.

Auditive **Überlagerung** bezieht sich auf den Umstand, dass sich die ausgesendeten Signale gleichzeitig aktiver Schallquellen aufsummieren (◘ Abb. 3.2). Auf das Sinnesorgan wirkt daher eine komplexe Mischung unterschiedlicher Schallsignale ein, die zunächst entzerrt werden muss, um dann das Signal einer einzelnen Quelle sinnvoll analysieren zu können. Dies steht wiederum im Kontrast zum visuellen System, in dem sich gleichzeitig vorhandene Objekte gegenseitig verdecken, woraus ein ganz anderes Problem entsteht (die verdeckte, also fehlende Information muss rekonstruiert werden, um sinnvolle Objekte wahrzunehmen). Den Prozess, eine Mischung auditiver Signale in die zugrunde liegenden Schallquellen zu sortieren, nennt man **auditive Szenenanalyse** (Bregman 1990). Dieser Prozess funktioniert in den meisten Hörumgebungen und bei den meisten Hörern erstaunlich gut – viel besser als beispielsweise beim Geschmackssinn, der ebenfalls mit einer Mischung überlagerter Signale konfrontiert ist. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass das auditive System den Zeitverlauf der Aktivierungsmuster der verschiedenen Schallquellen ausnutzen kann und dadurch wertvolle Zusatzinformation zur Verfügung hat. Beispielsweise fängt eine Schallquelle etwas eher an, Signale auszusenden; der Hörer kennt diese dann schon, wenn sich die zweite Schallquelle „dazumischt", und kann sie dann aus der Mischung leichter heraushören (z. B. Hedrick und Madix 2009). Ähnliche Vorteile ergeben sich, wenn eine der Schallquellen kurz pausiert – ein vergleichbarer Informationsgewinn ist für den Geschmackssinn kaum denkbar. Die Nutzung des Zeitverlaufs im auditiven System stellt einen umso größeren Vorteil dar, als der Zeitverlauf oftmals in gewissem Grad vorhersagbar ist, wodurch sich das Entzerrungsproblem stark vereinfacht (Bendixen 2014; Winkler et al. 2009). Die Rolle von Vorhersagbarkeit für die auditive Verarbeitung wird in ▶ Abschn. 3.5.1 näher erläutert.

Nachdem eine Schallmischung in die zugrunde liegenden Schallquellen zerlegt wurde, besteht eine weitere Herausforderung für das auditive System darin, *selektive Aufmerksamkeit* auf eine der Schallquellen (z. B. den Gesprächspartner) zu richten und andere Schallquellen (z. B. andere Personen, die sich in der unmittelbaren Umgebung ebenfalls unterhalten) zu ignorieren. Aktuellen Theorien zufolge wird das durch eine Kombination zweier wesentlicher Mechanismen bewerkstelligt: zum einen die *zeitliche Aufmerksamkeitsausrichtung* (das Hinhören „im richtigen Moment", z. B. wenn die momentan relevante Schallquelle gerade die Mischung dominiert; Deroche et al. 2014) und zum anderen die *Schärfung rezeptiver Felder* zugunsten akustischer Attribute der relevanten Schallquelle (Ahveninen et al. 2011). Vorwissen über die Eigenschaften dieser Schallquelle (z. B. die Tonlage und Klangfarbe der Stimme des Gesprächspartners sowie seine Position im Raum) begünstigt die effiziente Anwendung dieser Mechanismen.

Obwohl es mitunter schwierig ist, die **Aufmerksamkeit** auf eine gewünschte Schallquelle zu richten (z. B. wenn man versucht, sich auf einer lauten Feier zu unterhalten), fällt es noch viel schwerer, die Aufmerksamkeit *nicht* auf bestimmte Schallereignisse zu lenken. Das auditive System ist mit einem effizienten Mechanismus ausgestattet, unwillkürlich (bottom-up) Aufmerksamkeit auf saliente auditive Ereignisse zu richten, selbst wenn die willentliche bzw. willkürliche (top-down) Aufmerksamkeit zuvor ganz anders ausgerichtet war. Aus ökologischer Sicht lässt sich dies mit der Warnfunktion des Hörsinns für den

Organismus erklären: Er versorgt uns mit Informationen darüber, was im buchstäblichen Sinne „hinter unserem Rücken" geschieht (anders als der Sehsinn, dessen Sichtfeld auf einen bestimmten Ausschnitt des Raumes begrenzt ist), er kann uns vor visuell verdeckten Objekten warnen, und er funktioniert auch im Dunkeln und selbst während des Schlafens. Unwillkürliche Aufmerksamkeitsprozesse spielen daher eine weitere zentrale Rolle in der psychologischen Forschung zur auditiven Verarbeitung.

3.5.1 Sequenzielle Verarbeitung, Gedächtnis und Prädiktion

Die physikalischen Eingangssignale für das auditive System sind immer sequenziell, d. h., sie erstrecken sich über die Zeit. Oftmals steckt in der sequenziellen Anordnung viel relevantere Information als in einem einzelnen Schallereignis. So sagt beispielsweise der Klang eines einzelnen Schrittes wenig aus, einer Aneinanderreihung von Fußstapfen kann der Hörer jedoch entnehmen, ob sich jemand nähert oder entfernt, ob er schnell oder langsam läuft, vielleicht wie der Boden beschaffen ist oder sogar in welcher Stimmung sich die andere Person befindet. Unser auditives System ist sehr gut darin, sequenzielle Ereignisse miteinander in Beziehung zu setzen. Es greift dafür auf *sensorische Gedächtnisfunktionen* zurück, die weitgehend automatisch (also ohne Zuwendung von Aufmerksamkeitsressourcen) funktionieren.

Das sensorische Gedächtnis lässt sich von anderen Formen des Gedächtnisses dadurch unterscheiden, dass es eine modalitätsspezifische Encodierung von Information aufweist und dass seine Inhalte nichtkategorialer Natur sind. Mit der *modalitätsspezifischen Codierung* ist gemeint, dass die Inhalte nicht ohne Weiteres in eine andere Modalität transformiert werden können, also beispielsweise die Tonhöhe im Auditiven nicht als Farbe im Visuellen repräsentiert werden kann. Das Kriterium der *nichtkategorialen Repräsentationen* meint, dass wir keine vollständigen Begriffe zur Beschreibung der Inhalte des sensorischen Gedächtnisses aufweisen. Anders ausgedrückt erlaubt das Format der Inhalte des sensorischen Gedächtnisses eine Unterscheidung von zwei nur leicht differierenden Reizen, die in die gleiche konzeptuelle Kategorie fallen. So können wir beispielsweise unterschiedliche Versionen des Vokals /a/ perzeptuell unterscheiden, auch wenn wir keine unterschiedlichen Begriffe dafür haben. Analog können wir einen dargebotenen Ton mit einem kurz vorher gehörten Ton sehr genau vergleichen, auch wenn wir nicht über ein absolutes Gehör (also die Fähigkeit, die Töne kategorial zu benennen) verfügen; dabei können wir schon bei Frequenzunterschieden von weniger als 0,5 % (etwa 1/12 Ton auf der Tonleiter) die Ungleichheit von zwei Tönen feststellen.

Das auditive sensorische Gedächtnis weist ansonsten eine große Zahl von Übereinstimmungen mit klassischem Kurzzeitgedächtnis für kategoriale Inhalte auf, z. B. bezüglich der Lebensdauer und Kapazität (Kaernbach 2003). Der Vollständigkeit halber seien noch zwei weitere differenzielle Charakteristika des auditiven Gedächtnisses aufgeführt, die jedoch noch näher untersucht werden müssen:

1. *Art möglicher Interferenz:* Beim sensorischen Gedächtnis ist im Gegensatz zum Kurzzeitgedächtnis vorwiegend retroaktive Interferenz (ein späterer Reiz beeinträchtigt die Verarbeitung des vorangegangenen Reizes) möglich, proaktive (der vorangehende Reiz beeinträchtigt die Verarbeitung des nachfolgenden) jedoch kaum.
2. *Art der Aktivierung:* Inhalte des sensorischen Gedächtnisses werden exogen aktiviert, ein Aufrechterhalten der Aktivierung durch *Rehearsal*, wie es für das Kurzzeitgedächtnis typisch ist, ist (vermutlich) für Repräsentationen des sensorischen Gedächtnisses nicht möglich oder sogar nachteilig.

Die Integrations- und Persistenzphänomene verdeutlichen Leistungen des auditiven sensorischen Gedächtnisses. Ein *Integrationsphänomen* stellt die Abhängigkeit der Lautheit bei kurzen Schallen von der Dauer des Schalles dar. Bis zu einer Dauer von ca. 200 ms bewirkt eine Verlängerung des Schalles bei gleicher physikalischer Intensität eine Erhöhung seiner wahrgenommenen Lautheit. Ein *Persistenzphänomen* ist die Überschätzung der Dauer von kurzen Schallen. Wenn ein Schall länger als 10 ms (aber kürzer als ca. 150 ms) ist, wird er (unter bestimmten Bedingungen) als ca. 150 ms lang beurteilt. Diese beiden Phänomene verdeutlichen eine Grundfunktion des auditiven sensorischen Gedächtnisses, nämlich die Integration von zeitlich benachbarter Reizinformation, wie sie etwa für die Kategorisierung von Konsonanten erforderlich ist. Eine andere Grundfunktion ist die Verfügbarhaltung von Information für weitere Verarbeitungsprozesse. Die Verfügbarhaltung von Information ist wichtig beim Satzverstehen oder beim Nutzen von Information aus nicht beachteten Schallquellen.

Entsprechend dieser beiden Grundfunktionen werden in der Literatur auch zwei aufeinanderfolgende Phasen auditiver Speicherung unterschieden (Cowan 1984; Massaro 1975). Der kurze (*präperzeptuelle*) auditive Speicher, der eine Speicherdauer von ca. 200 ms aufweist, wird dabei für die Integrations- und Persistenzphänomene verantwortlich gemacht, und der lange (*synthetisierte*) auditive Speicher, dessen Dauer etwa 10–30 s beträgt, stellt eine statischere Form der Speicherung dar, die als Datenbasis für weitere Verarbeitung dient. Die Wahrnehmung in der auditiven Modalität ist also nicht ohne die im auditiven Gedächtnis geleistete Vorverarbeitung des Schallsignals zu verstehen.

Das auditive sensorische Gedächtnis wird üblicherweise als automatisch in dem Sinne angesehen, dass die in die Encodierung involvierten Prozesse auch dann stattfinden, wenn die Person keine explizite Intention dazu aufweist. Vielmehr werden die Repräsentationen des sensorischen Gedächtnisses als Ausgangsbasis aufgabenbezogener Verarbeitungsprozesse verstanden. Das klassische Beispiel hierfür ist die Beobachtung, dass man gelegentlich eine Frage auch dann beantworten kann, wenn man während der Fragestellung noch mit etwas anderem beschäftigt war und die Aufmerksamkeit erst nachträglich auf den Sprecher gerichtet hat. Die klassische Forschung zum sensorischen Gedächtnis rekurriert jedoch meist auf aufmerksamkeitsabhängige Prozesse, weil sie auf offenes Verhalten angewiesen ist. Eine Ausnahme bilden psychophysiologische Indikatoren, die aufgabenunabhängig ausgelöst und erhoben werden können (► Abschn. 3.6).

Die Betrachtung der sensorischen Vorverarbeitung als Gedächtnisleistung betont den rückwärts (in die Vergangenheit)

gerichteten Abgleich von Informationen. In den letzten Jahren setzt sich jedoch verstärkt die Ansicht durch, dass frühe sensorische Verarbeitungsprozesse auch Informationen vorwärts (in die Zukunft) projizieren. Dies wird in der einflussreichen Theorie der prädiktiven Codierung (*predictive coding*; Friston 2005, 2010) beschrieben, die als modalitätsübergreifende Theorie formuliert ist, aber nicht ohne Grund empirisch zuerst am Beispiel des Hörens betrachtet wurde (z. B. Baldeweg 2006). Die Theorie geht von der Beobachtung aus, dass Sinnessignale in aller Regel nicht zufällig aufeinanderfolgen, sondern in einer gewissen Regelmäßigkeit angeordnet sind. Das Gehirn versucht nun, auf verschiedensten Ebenen Modelle dieser Regelmäßigkeiten zu extrahieren und auf dieser Basis die an den Rezeptoren eintreffenden Signale bestmöglich vorherzusagen (**Prädiktion**). Falsche Vorhersagen (also Signale, die nicht mit dem Modell übereinstimmen) werden als Vorhersagefehler zurückgemeldet und dienen dazu, die prädiktiven Modelle beständig zu verbessern.

Wenn die Verarbeitung von Informationen aus den Sinnessystemen tatsächlich nach dem Prinzip der prädiktiven Codierung funktioniert, würde dies die sensorische Verarbeitung erheblich entlasten. Es müssten nur noch unerwartete („neue") Informationen verarbeitet werden. Alles, was bereits vollständig bekannt ist (z. B. das Hintergrundgeräusch des Ventilators oder des Automotors), könnte hingegen ohne Informationsverlust ausgeblendet werden, da es ohnehin redundant zu den aktuellen mentalen Modellen ist (Schröger et al. 2014; Winkler und Schröger, 2015). Aufgrund der theoretischen Plausibilität dieses Modells und aufgrund zahlreicher empirischer Belege, die mit der Theorie der prädiktiven Codierung im Einklang stehen (Schröger et al. 2013), wird gerade für das auditive System die Theorie gemeinhin als valide angesehen. Allerdings ist es oft schwer, zwischen einer im echten Sinne prädiktiven und einer „nur sehr schnellen" retrospektiven (gedächtnisbasierten) Strategie zu unterscheiden. Unstrittig ist jedoch, dass der Hörsinn sehr effizient mit Vorhersagbarkeit in den Eingangssignalen umgehen kann, sodass jede Form von Regelhaftigkeit die nachfolgende Verarbeitung verbessert: Sie hilft bei der schnelleren Verarbeitung der Signale einer einzelnen Schallquelle (z. B. Lange 2009), beim Sprachverstehen (Arnal et al. 2009), bei der Trennung von Signalen verschiedener Schallquellen (Bendixen 2014) und sogar bei der Unterscheidung zwischen selbstgenerierten und extern generierten Schallsignalen (Baess et al. 2009) – schließlich sind wir von Schallsignalen, die wir selbst erzeugt haben, in aller Regel nicht überrascht.

3.5.2 Aufmerksamkeitsausrichtung

Die Prozesse der willkürlichen und unwillkürlichen Aufmerksamkeitsausrichtung sind Gegenstand von ▶ Kap. 5. Hier sollen einige Phänomene beschrieben werden, die sich speziell auf das Hören beziehen. Als klassisches Problem der auditiven Aufmerksamkeitsforschung wird die Situation betrachtet, dass die willkürliche (Top-down-)Aufmerksamkeit selektiv auf eine Schallquelle fokussiert werden soll (z. B. auf den Gesprächspartner, während ringsumher auch andere Gespräche stattfinden). Diese erstaunliche Leistung des auditiven Aufmerksamkeitssystems wurde von Cherry (1953) als Cocktailparty-Phänomen in die Literatur eingeführt und wird bis heute intensiv beforscht (vgl. Übersichtsarbeit von Bronkhorst, 2015). Andere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Verteilung von Aufmerksamkeitsressourcen zwischen den Modalitäten, also z. B. zwischen Hören und Sehen (Saupe et al. 2009). Sehr viel weniger Beachtung haben Situationen gefunden, in denen auditiver Input mit dem Fokus auf Gedanken und andere mentale Zustände um Aufmerksamkeitsressourcen konkurriert (vgl. aber aktuelle Arbeiten zum sogenannten Gedankenabschweifen [*mind wandering*], z. B. Kam et al. 2013). In allen drei Situationen spielt auch der gegenläufige Prozess der unwillkürlichen (bottom-up) auditiven Aufmerksamkeitsablenkung eine zentrale Rolle. Im Sinne einer bestmöglichen Anpassung an die Umwelt ist optimale Aufmerksamkeitsausrichtung nicht gleichzusetzen mit einer perfekten Fokussierung auf die momentan relevante Schallquelle, sondern mit dem Ausloten einer guten Balance zwischen Abschirmung (um akustische Informationen relativ verlustfrei aufzunehmen) und Offenheit für Neues (um Gefahren in der Umwelt – oder auch noch interessantere Schallquellen – rechtzeitig zu erkennen (*Distrahierbarkeit*; Wetzel und Schröger 2014)). Schließlich besteht eine weitere wichtige auditive Aufmerksamkeitsfunktion im relativ mühelosen Fokuswechsel zwischen verschiedenen Schallquellen – man denke an eine lebhafte Unterhaltung, in der sich verschiedene Sprecher schnell und ohne Vorankündigung abwechseln (Shinn-Cunningham und Best 2008).

Während die Fähigkeit zum Aufmerksamkeitswechsel erst in den letzten Jahren verstärkt Beachtung findet (Koch et al. 2011), existieren psychologische Paradigmen zur selektiven Aufmerksamkeitsausrichtung und zur unwillkürlichen Ablenkung bereits seit den 1950er Jahren (Cherry 1953; Moray 1959; Treisman 1960). Im klassischen *Paradigma des dichotischen Hörens* (▶ Kap. 5) werden über Kopfhörer dem linken und rechten Ohr unterschiedliche akustische Reize (z. B. Geschichten zweier verschiedener Sprecher) präsentiert, wobei sich der Hörer auf eine Seite konzentrieren und die entsprechenden Inhalte simultan oder im Anschluss wiedergeben soll. Fragt man am Ende nach Inhalten aus dem nicht beachteten Ohr, können diese typischerweise kaum wiedergegeben werden – mit Ausnahme besonders salienter Inhalte. Die Salienz kann physikalisch (z. B. große Lautstärkeveränderung) oder psychologisch (z. B. hochrelevanter Inhalt, etwa der eigene Name oder das Klingeln des eigenen Mobiltelefons; Roye et al. 2013) bedingt sein.

Die dichotische Präsentationsform stellt allerdings eine starke Verzerrung der realen Hörsituation dar, denn im Alltag erreichen Signale sämtlicher Schallquellen sowohl das linke als auch das rechte Ohr (wenn auch zu unterschiedlichen Anteilen). Vielleicht noch schwerer wiegt, dass im Alltag in den seltensten Fällen genau zwei Schallquellen miteinander um Aufmerksamkeitsressourcen konkurrieren. Neuere Forschungsarbeiten stellen daher natürlichere Hörumgebungen her, in denen mehrere Schallquellen parallel aktiv sind und diese anhand realistischer Raumpositionen wiedergegeben werden (Best et al. 2008; Getzmann et al. 2014). Damit soll geklärt werden, welche Mechanismen es ermöglichen, sich erfolgreich auf eine Schallquelle zu konzentrieren und andere Quellen zu ignorieren. Neben dem genuin grundlagenwissenschaftlichen Interesse hat diese Fra-

gestellung auch hohe praktische Relevanz (Shinn-Cunningham und Best 2008): Personen mit (z. B. altersbedingt) nachlassenden Hörfähigkeiten haben in aller Regel besonders große Schwierigkeiten, wenn mehrere Schallquellen gleichzeitig aktiv sind (z. B. im Restaurant). Auf der Basis eines besseren Verständnisses der Aufmerksamkeitsmechanismen bei gesundem Gehör sollen die entsprechenden Prozesse bei nachlassenden Hörfähigkeiten perspektivisch unterstützt bzw. kompensiert werden.

Eine entscheidende Rolle für die Aufmerksamkeitsausrichtung spielt offenbar die Position der Schallquelle im Raum. Die binaurale Verarbeitung (also der Abgleich der Informationen aus beiden Ohren) kann sich unterschiedliche Schallrichtungen für die selektive Fokussierung bzw. Unterdrückung von Signalen zunutze machen (z. B. Kollmeier und Koch 1994; Warzybok et al. 2014). Der binaurale „Datenaustausch" findet sich mittlerweile auch in modernen Hörgeräten und führt zu merklichen Verbesserungen in der Unterdrückung von Hintergrundgeräuschen und Nachhall (Hohmann 2008). Für ihre Leistungen auf diesem Gebiet erhielten Oldenburger und Münchner Hörforscher und Ingenieure den Deutschen Zukunftspreis 2012 – ein bundesweit einmal jährlich vergebener Preis, der besondere Innovationen in Forschung und Entwicklung honoriert. Hier handelt es sich um ein eindrückliches Beispiel dafür, dass Grundlagenforschung zur (auditiven) Wahrnehmung in alltagsrelevante Entwicklungen einfließen und damit Lebensqualität nachhaltig verbessern kann.

Auch andere akustische Unterschiede zwischen den Schallquellen wie beispielsweise Stimmlage, Klangfarbe, Sprechgeschwindigkeit und Dialekt zweier Sprecher sind hilfreich zur besseren Fokussierung. Große Forschungsbemühungen drehen sich momentan um die zugrunde liegenden Mechanismen. Wird die selektive Aufmerksamkeitsausrichtung durch eine Verstärkung der Repräsentation der Zielschallquelle oder durch eine Abschwächung der Repräsentation der Störschallquelle oder durch eine Kombination beider Mechanismen erreicht (z. B. Bidet-Caulet et al. 2010)? Nach wie vor gestaltet sich der Entwurf einer neutralen Kontrollbedingung als schwierig, weswegen diese Frage noch als ungeklärt gelten darf. Unabhängig davon gibt es bereits aktive und partiell erfolgreiche Bemühungen, die aktuelle Zielschallquelle eines Hörers aus dessen Hirnaktivität zu decodieren (Ding und Simon 2012; Mesgarani und Chang 2012; O'Sullivan et al., 2015; Zion Golumbic et al. 2012). Eine mögliche Zukunftsvision ist, solche Informationen zur gezielten Steuerung eines Hörgeräts zu verwenden, sodass die „intelligente Hörhilfe" automatisch die Schallquelle in den Fokus rückt, der das aktuelle Interesse des Hörers gilt. Bis zur erfolgreichen Implementierung dieses Ansatzes sind aber noch zahlreiche allgemeinpsychologische und technische Fragen zu klären.

Eine viel beachtete Theorie der willentlichen auditiven Aufmerksamkeit stammt von Näätänen und Kollegen (Näätänen et al. 1978; Näätänen 1990): die *attentional-trace*-Theorie. Nach dieser Theorie basiert die Erkennung von momentan relevanten Schallen darauf, dass wir willkürlich eine Repräsentation der relevanten Merkmale aufrechterhalten, also eine Aufmerksamkeitsspur (*attentional trace*) erstellen und diese mit dem Schallsignal vergleichen. Die Aufmerksamkeitsspur ist eine Repräsentation (Gedächtnisspur) im Sinne des in ▶ Abschn. 3.5.1 eingeführten sensorischen Gedächtnisses – mit dem Unterschied, dass an dessen (sensorischem) Inhalt willkürlich festgehalten wird. Jedes neu eintreffende Schallsignal wird nun mit dieser Repräsentation verglichen, und zwar so lange, bis der Vergleichsprozess eine hinreichend große Übereinstimmung (*match*) ergibt und das Signal als relevant akzeptiert werden kann – oder so lange, bis der Vergleichsprozess abgebrochen wird, weil der Vergleich einen Unterschied (*mismatch*) ergibt und der Schall somit als irrelevant klassifiziert werden kann. Bei einem großen Unterschied zwischen Schallsignal und Aufmerksamkeitsspur fällt der Vergleich leicht, und der Prozess kann schnell beendet werden; je ähnlicher sich die beiden sind, desto diffiziler wird der Vergleich und bezieht immer filigranere Aspekte der Repräsentation ein, bis schließlich doch ein Unterschied festgestellt wird oder der Reiz als relevant „erkannt" wird.

Neben den beachtlichen Leistungen der auditiven Aufmerksamkeitsausrichtung, die das Hören in lauten Alltagsumgebungen überhaupt erst ermöglichen, konzentrieren sich einige andere Forschungsarbeiten auf überraschende Fehlleistungen desselben Systems. So werden beispielsweise einige Veränderungen in der akustischen Umwelt nicht registriert oder zumindest nicht vom unwillkürlichen Aufmerksamkeitssystem so weit verarbeitet, dass sie in die bewusste Wahrnehmung vordringen würden. Dieses Phänomen nennt man Unaufmerksamkeitstaubheit (*inattentional deafness*) – in Analogie zur Unaufmerksamkeitsblindheit (*inattentional blindness*) beim Sehen. Die frappierendste Demonstration stammt von Fenn et al. (2011), die zeigen konnten, dass ihre Probanden während eines Telefonats nicht bemerkten, dass sie plötzlich mit einem anderen Gesprächspartner verbunden waren. Dies kann man – wie auch das verwandte Phänomen der Veränderungstaubheit (*change deafness*; z. B. Puschmann et al. 2013) als Scheitern des unwillkürlichen Aufmerksamkeitssystems interpretieren.

Umgekehrt zeigt auch die willkürliche auditive Aufmerksamkeit interessante Beschränkungen. Es scheint nicht möglich zu sein, einer Schallquelle ein kontinuierlich gleichbleibendes Maß an Aufmerksamkeit zuzuwenden, selbst wenn der Hörer dies eigentlich intendiert. Stattdessen spricht man von *waxing and waning*, einer stetigen Zu- und Abnahme der Aufmerksamkeit, die einer rhythmischen Schwingung gleicht (Jones und Boltz 1989; Henry und Herrmann 2014). Neuere Arbeiten bringen dies mit periodischen Fluktuationen der neuronalen Erregbarkeit in Verbindung (Lakatos et al. 2013). Einem gleichbleibenden Hörreiz können wir daher abwechselnd besser und schlechter zuhören (Henry und Obleser 2012). Dies klingt so, als wäre es im Alltag von Nachteil – tatsächlich sind aber die wenigsten (alltagsrelevanten) Schallquellen genau gleichbleibend, sondern sie weisen ihre eigenen rhythmischen Fluktuationen auf (z. B. Sprechtempo und Sprachmelodie), an die sich unser auditives Aufmerksamkeitssystem anpassen kann (Thorne und Debener 2014). Dafür ist wiederum die zeitliche Vorhersagbarkeit der Schallquelle, die uns gerade interessiert, von großer Bedeutung. Ein verwandtes Phänomen ist das Aufmerksamkeitsblinzeln (*attentional blink*) – vereinfacht gesagt die Unfähigkeit, direkt nach einem relevanten Reiz einem weiteren Zielreiz ausreichend Beachtung zu schenken (Horváth und Burgyán 2011); hier scheint es sich allerdings um eine modalitätsübergreifende Einschränkung zu handeln, die man in sehr ähnlicher Form auch beim Sehen und Tasten findet (Lipp et al. 2003).

Phänomene der willkürlichen selektiven Aufmerksamkeit lassen sich mit der Theorie der prädiktiven Codierung (▶ Abschn. 3.5.1) in Einklang bringen. Nach dieser Theorie bilden wir interne prädiktive Modelle, die auf einer bestimmten Verarbeitungsebene Vorhersagen generieren, die an die darunterliegende Verarbeitungsebene vermittelt werden (top-down). Diese Vorhersagen beziehen sich auf den Inhalt und die Vertrauenswürdigkeit des aus der unteren Verarbeitungsebene eintreffenden Signals (z. B. einer weitergeleiteten Information über einen Sinnesreiz). Der Vorhersagefehler berechnet sich aus dem Unterschied zwischen dem eintreffenden Signal und der Vorhersage. Er wird zur Verbesserung des Modells genutzt. Dies erfolgt so lange, bis der Vorhersagefehler gleich null ist, bis also das Wahrnehmungsproblem gelöst ist und wir eine Interpretation aufgebaut haben, die unsere akustische Umwelt vollständig beschreibt.

Wie kommt hier Aufmerksamkeit ins Spiel? Nach einem Vorschlag von Schröger et al. (2015) ist der per Instruktion (oder auch per Motivationslage) relevante Aspekt des eintreffenden Signals ein Teil der Vorhersage, dem zudem eine hohe Vertrauenswürdigkeit zugewiesen wird. Dies wiederum erhöht die Präzision des Vorhersagefehlers und führt zu einer zusätzlichen Optimierung des prädiktiven Modells. Die durch Aufmerksamkeit induzierte Vorhersage entspricht der Aufmerksamkeitsspur der oben erwähnten *attentional-trace*-Theorie; die Aufmerksamkeit definiert also (teilweise) den Inhalt der Vorhersage. Das relevante Signal wird in diesem Sinn „erwartet"; somit erhöht Aufmerksamkeit zugleich die Konfidenz in das eintreffende Signal. Dies erklärt die verbesserten Diskriminationsleitungen von Schallen bei Zuwendung von Aufmerksamkeit. Da das prädiktive Modell aber auch von anderen Faktoren beeinflusst wird, wie etwa von der Vorhersagbarkeit des eintreffenden Sinnessignals oder der Vorhersagbarkeit des Kontexts, kann es zu diversen Interaktionen dieser Faktoren kommen (Schröger et al. 2015). Phänomene der willkürlichen und unwillkürlichen Aufmerksamkeit (s. oben) sowie der Ambiguität (▶ Abschn. 3.5.4) können dadurch in einem kohärenten theoretischen Rahmen beschrieben werden. Phänomene unwillkürlicher Aufmerksamkeit sind dadurch definiert, dass wir für ein eintretendes Schallereignis keine adäquate Vorhersage getroffen haben; das Signal kommt unerwartet und „überrascht" uns. Der Unterschied zwischen dem eintreffenden Signal und der Vorhersage (der Vorhersagefehler) ist also sehr groß und kann bis in Verarbeitungsebenen weitergereicht werden (bottom-up), in denen dann willkürliche Aufmerksamkeit ausgelöst wird, die wiederum auf untere Verarbeitungsebenen (top-down) zurückwirkt.

3.5.3 Auditive Szenenanalyse

Wie in ▶ Abschn. 3.5.2 ausgeführt, steht das auditive System oft vor der Herausforderung, aus mehreren Schallquellen eine einzelne für die weitere Verarbeitung auszuwählen. Allein durch die Investition von Aufmerksamkeitsressourcen ist dieses Problem jedoch nicht gelöst: Ehe Aufmerksamkeit fokussiert werden kann, muss ergründet werden, welche Schallquellen überhaupt existieren und welche Anteile des komplexen Schallsignals zu welcher Quelle gehören. Dieser Prozess wird als auditive Szenenanalyse bezeichnet (Bregman 1990). Einige psychologische Theorien konzipieren die Bildung von Schallquellen und die Auswahl einer dieser Schallquellen als ein und denselben Prozess (z. B. Shamma et al. 2011); andere sehen die beiden Funktionen als sequenziell an: erst die auditive Szenenanalyse, dann die Auswahl durch das Aufmerksamkeitssystem (z. B. Bregman 1990).

Die auditive Szenenanalyse stellt den Hörsinn deshalb vor ein kompliziertes Problem, weil es für jedes Schallsignal in der Theorie eine unendliche Anzahl, in der Praxis zumindest mehrere mögliche Konfigurationen gibt, die genau dieses Signal erzeugt haben. Selbst eine einfache Sinusschwingung von 400 Hz kann theoretisch von zwei Schallquellen verursacht worden sein, die beide genau synchron mit 400 Hz schwingen und deren Amplituden in der Summe der des wahrgenommenen Schallsignals entsprechen. Man kann sich leicht vorstellen, wie die Anzahl möglicher – und tatsächlich plausibler – Konfigurationen bei komplexeren Eingangssignalen steigt (◘ Abb. 3.3). Das Hörsystem muss also stets mehrere Möglichkeiten bedenken, aber zugleich auch eine schnelle Entscheidung hinsichtlich der vorhandenen Schallquellen treffen, da das Eingangssignal nur kurz verfügbar ist und gleich wieder von neuen Signalen abgelöst wird (vgl. die oben bereits angesprochene Notwendigkeit der *Echtzeitanalyse*).

Eine von Bregman (1990) vorgeschlagene und noch breit vertretene Theorie besagt, dass sich das Hörsystem mit *Heuristiken* behilft, d. h. mit Regeln, die in der Mehrzahl der Fälle zutreffen und deren Anwendung das Problem der auditiven Szenenanalyse massiv vereinfachen – unter Inkaufnahme eines gelegentlichen Irrtums. Es gibt zwei wesentliche Formen solcher Heuristiken:

1. *Bottom-up-Heuristiken* basieren auf Charakteristika des Signals und beschreiben typische Anzeichen dafür, dass bestimmte Schallanteile zusammengehören, also von ein und derselben Quelle ausgesendet wurden. Sie sind bekannter unter dem Begriff *auditive Gestaltgesetze* und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.
2. *Top-down-Heuristiken* beschreiben Vorannahmen des Hörers, beispielsweise bezüglich der in einer bestimmten Hörumgebung zu erwartenden Schallquellen.

Die auditiven Gestaltgesetze formulieren abstrakte Prinzipien dafür, ob bestimmte Schallanteile in der Wahrnehmung *integriert* (d. h. als zusammengehörig empfunden bzw. ein und derselben Schallquelle zugeordnet) oder *segregiert* (d. h. als getrennt empfunden bzw. verschiedenen Schallquelle zugeordnet) werden. Sowohl Integration als auch Segregation können sich auf einen bestimmten Zeitpunkt beziehen (also auf die Frage, wie viele Schallquellen jetzt gerade aktiv sind; man spricht dann von *instantaner* oder *simultaner* Integration bzw. Segregation). Beide Mechanismen sind aber auch über die Zeit wirksam – dann geht es z. B. um die Frage, ob der gerade gehörte Laut zu dem Sprecher gehört, der zuvor schon mehrere Wörter artikuliert hatte (*sequenzielle Integration*), oder ob ein anderer Sprecher dazwischengeredet hat (*sequenzielle Segregation*). Wenn instantane und/oder sequenzielle Schallquellenzuordnung fehlschlagen, wird der Hörer den Sinn des Gesprochenen bestenfalls mithilfe von Top-down-Mechanismen (z. B. unter Zuhilfenahme seines mentalen Lexikons) rekonstruieren können.

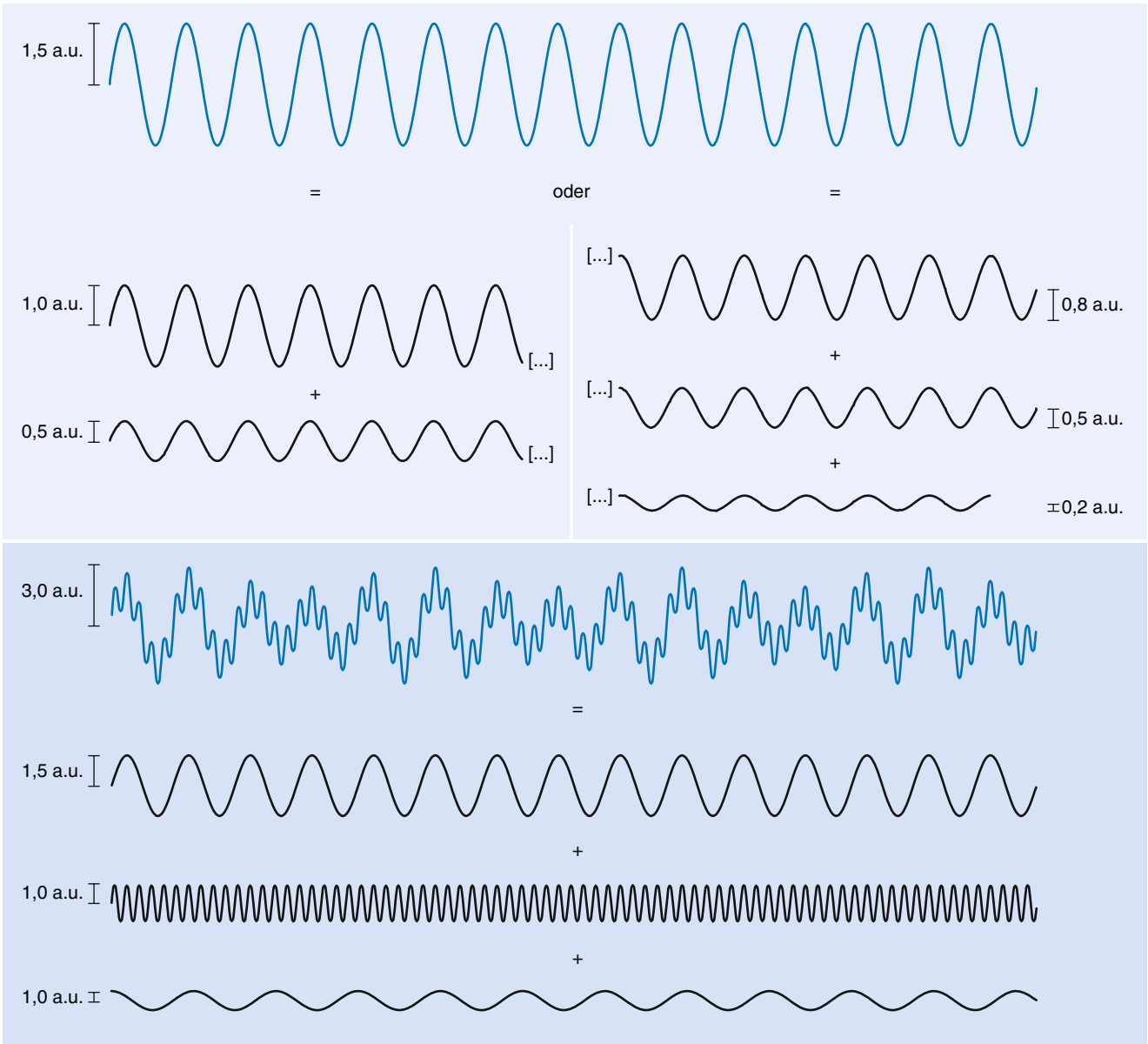


Abb. 3.3 Schematische Darstellung möglicher Schallquellenkonfigurationen, die ein gegebenes Schallsignal erzeugt haben könnten. Eine einfache Sinusschwingung mit einer Amplitude von 1,5 a.u. kann von einer Schallquelle erzeugt worden sein, aber auch von zwei (*oben links*), drei (*oben rechts*) oder noch mehr Schallquellen, deren Amplitudenwerte sich so aufsummieren, dass eine Sinusschwingung mit einer Amplitude von 1,5 a. u. resultiert. Die zeitsynchrone Aktivierung mehrerer Schallquellen mit exakt derselben Frequenz ist allerdings recht unwahrscheinlich, sodass das Problem der nichteindeutigen Ursprungskonfiguration hier eher auf theoretischer Ebene besteht. Plausibler werden unterschiedliche Zerlegungsmöglichkeiten im Fall komplexerer Eingangssignale (*unten*). *a.u. = arbitrary units*

In der psychologischen Forschung werden instantane und sequenzielle auditive Szenenanalyse weitgehend getrennt voneinander untersucht, obgleich sie in der Realität natürlich interagieren. Die Entscheidung, ob gleichzeitig erklingende Schallanteile integriert oder segregiert werden sollten, beruht auf instantan vorhandenen Schallmerkmalen wie beispielsweise dem Ort oder der harmonischen Struktur. Die Validität einer solchen instantanen Heuristik ist intuitiv nachvollziehbar: Schallanteile, die zum gleichen Zeitpunkt aus verschiedenen Richtungen kamen, können offensichtlich nicht von derselben Schallquelle produziert worden sein und sollten daher perzeptuell segregiert werden. Ähnlich verhält es sich mit der harmonischen Struktur. Natürliche Schallquellen produzieren Obertöne, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz darstellen. Wenn eine einzelne Schallkomponente aus einer solchen harmonischen Mischung herausfällt, wird sie perzeptuell segregiert und einer anderen Quelle zugeordnet; man spricht von inharmonizitätsbasierter Schallquellentrennung. Umgekehrt gibt es keinen guten Grund anzunehmen, dass eine Mischung aus Tönen in perfekter harmonischer Beziehung zueinander zufällig von verschiedenen Schallquellen produziert wurde; es findet daher perzeptuelle Integration statt. Dieser Mechanismus ist so fest verankert, dass die Grundfrequenz sogar fehlen kann und dennoch gehört wird, weil sie sich aus den anderen Anteilen der Mischung herleiten lässt. Dieser *missing fundamental*-Effekt findet sich bereits bei viermonatigen Kindern (He und Trainor 2009), was oft so interpretiert

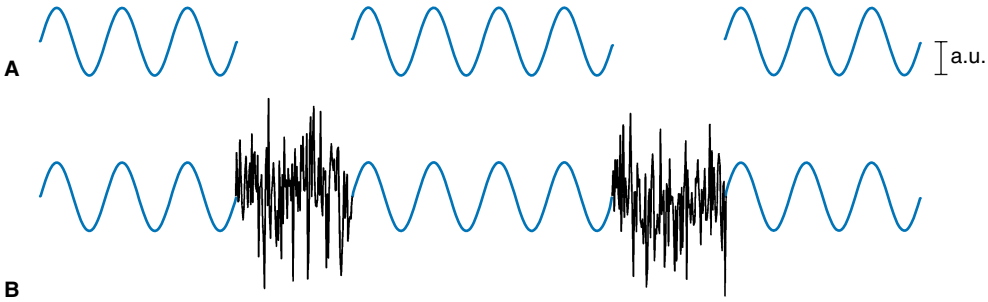


Abb. 3.4 Kontinuitätsillusion. **A** Eine Sinusschwingung, die mit Lücken durchsetzt ist, wird als unterbrochener Ton gehört. **B** Werden die Lücken durch Rauschen gefüllt, das laut genug ist, um den Ton plausibel zu verdecken, so entsteht das Perzept eines durchgängigen (kontinuierlichen) Tones. *a.u. = arbitrary units*

wird, dass es sich um eine automatisierte Heuristik handelt, die keiner aufwendigen kognitiven Analyse bedarf.

Die perzeptuelle Integration einer perfekt harmonischen Schallmischung kann dennoch außer Kraft gesetzt werden, wenn beispielsweise eine einzelne Komponente von einem anderen Ort erklingt oder etwas später beginnt als die anderen – das Auflösungsvermögen liegt hier bei erstaunlichen 10 ms. Die aktuelle psychologische Forschung zur instantanen auditiven Szenenanalyse beschäftigt sich vor allem mit der Frage, wie die unterschiedlichen Merkmale (Ort, harmonische Beziehung, leichte zeitliche Verschiebungen) miteinander interagieren (Du et al. 2011) und ob sich die Genauigkeit der Encodierung einzelner Merkmale mit dem Alter verändert (Alain und McDonald 2007).

Die sequenzielle auditive Szenenanalyse hat insgesamt mehr Beachtung in der psychologischen Forschung gefunden. Die Entscheidung, ob nacheinander (sequenziell) erklingende Schallanteile perzeptuell integriert oder segregiert werden sollten, beruht ganz allgemein gesagt auf der Ähnlichkeit der einzelnen Signale: Je unterschiedlicher die Signale sind, desto unwahrscheinlicher ist es, dass sie von derselben Schallquelle stammen. Dies entspricht dem visuellen Gestaltgesetz (▶ Kap. 2) der Ähnlichkeit, wobei sich die Ähnlichkeit auf ganz unterschiedliche Merkmale beziehen kann: Frequenz, Ort, Lautstärke, Klangfarbe usw. (Eine „große Ähnlichkeit im Ort" ließe sich auch durch das Gestaltgesetz der Nähe beschreiben; wie auch im visuellen sind die auditiven Gestaltgesetze teilweise redundant zueinander.) Dem Gesetz der Ähnlichkeit liegt die Idee zugrunde, dass jede Schallquelle nur in einem wohldefinierten Merkmalsbereich überhaupt Töne erzeugen kann (z. B. Klangfarbe und Frequenz/Stimmumfang eines menschlichen Sprechers) bzw. dass sie während eines kurzen Zeitraumes innerhalb eines wohldefinierten Merkmalsbereichs verbleibt (z. B. Ort und Lautstärke). Allerdings ist es natürlich möglich, dass die Schallquelle während einer längeren Pause ihren Ort verändert bzw. nach der Pause mit anderer Frequenz und Lautstärke fortsetzt. Daher wird die physikalische Ähnlichkeit der Signale perzeptuell zum Zeitpunkt seit Erklingen des vorangegangenen Signals in Beziehung gesetzt: Je größer die Pause ist, desto unähnlicher können die Signale sein, um nach wie vor derselben Schallquelle zugeordnet zu werden. Das Gestaltgesetz der Ähnlichkeit geht damit in das Gestaltgesetz der guten Fortsetzung über: Je geringer das Ausmaß der Merkmalsveränderung pro Zeiteinheit ist, desto größer die Tendenz zur Gruppierung (Integration).

Das Wissen darum, dass abrupte Veränderungen zur perzeptuellen Segregation (also zum Eindruck unterschiedlicher Schallquellen) führen, war übrigens schon lange vor der wahrnehmungspsychologischen Forschung in diesem Bereich existent: Bereits Barock-Komponisten machten sich dieses Prinzip zunutze, um mit nur einem Instrument den Eindruck von Zweistimmigkeit zu erzeugen (*implizite Polyphonie*). Erreicht wird dies durch schnellen Wechsel zwischen zwei verschiedenen Frequenzbereichen; beispielsweise für Violine oder Flöte wurden viele derartige Stücke komponiert.

Das Gesetz der guten Fortsetzung erzeugt beim Hören eine starke Tendenz (*Bias*), in einer Schallmischung zunächst nach plausiblen Weiterführungen bereits bekannter Schallquellen zu suchen und erst danach neue Schallquellen in Betracht zu ziehen (*old-plus-new heuristic*; Bregman 1990). Diese Tendenz wirkt mitunter so erfolgreich, dass Signale als „fortgesetzt" bzw. kontinuierlich empfunden werden, obwohl sie es in Wirklichkeit gar nicht sind. Wenn man beispielsweise einen Ton mit regelmäßigen Lücken durchsetzt (Abb. 3.4), wird dieser Ton korrekt als unterbrochen wahrgenommen; füllt man jedoch die Lücken mit lautem Rauschen, wird der Ton plötzlich als durchgängig empfunden (Dannenbring 1976; ▶ http://webpages.mcgill.ca/staff/Group2/abregm1/web/downloadstoc.htm#29). Das Hörsystem nimmt hier also eine Schallquellentrennung vor, indem es aus dem Rauschen einen Ton heraussegregiert, der tatsächlich nicht vorhanden ist (aber hinsichtlich der physikalischen Lautstärkeverhältnisse enthalten sein könnte). Dieses Phänomen nennt man *Kontinuitätsillusion*. Frappierenderweise funktioniert das auch, wenn Sprache in regelmäßigen Abständen mit Rauschen verdeckt wird (Warren 1970). Man kann dem Sprachsignal wesentlich besser folgen, als wenn es anstelle des Rauschens von Lücken durchsetzt wäre – und das obwohl physikalisch gesehen dieselbe sprachliche Information vorliegt und man denken könnte, dass das zusätzliche Rauschen den Hörer eher verwirrt. Überzeugen kann man sich von diesem Effekt unter ▶ http://webpages.mcgill.ca/staff/Group2/abregm1/web/downloadstoc.htm#31. Solche Beispiele illustrieren eindrucksvoll, wie hilfreich die Verwendung von Heuristiken für die auditive Wahrnehmung ist.

Das Gesetz der guten Fortsetzung hat allerdings nicht immer einen derart dominanten Einfluss auf die Wahrnehmung wie in den oben genannten Beispielen. In Abb. 3.5 ist eine Situation dargestellt, in der das Gesetz der guten Fortsetzung eine andere Wahrnehmung vorhersagt als das Gesetz der Ähnlichkeit. Interessanterweise wird dieser Widerspruch beim Hören anders aufgelöst als beim Sehen. Während sich beim Hören das Prinzip der Ähnlichkeit durchsetzt, gewinnt beim Sehen das Prinzip der guten Fortsetzung. Eine solche Situation, in der sich zwei Gestaltgesetze widersprechen, zeigt auch die Grenzen der auditiven

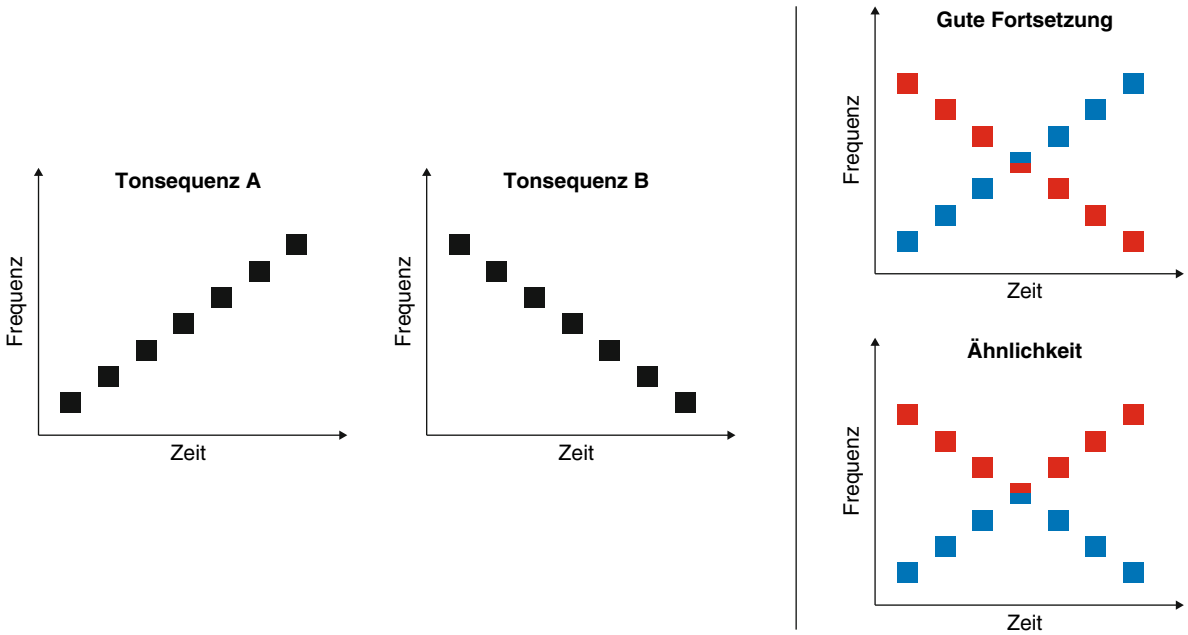


Abb. 3.5 Unterschiedliche Perzeptvorhersagen durch das Gesetz der Ähnlichkeit und das Gesetz der guten Fortsetzung. Dargestellt sind zwei zeitgleich abgespielte Tonreihen (*links*). Das Gesetz der guten Fortsetzung sagt vorher, dass eine aufsteigende und eine absteigende Tonreihe gehört werden, die sich in der Mitte kreuzen (*rechts oben*). Das Gesetz der Ähnlichkeit hingegen sagt vorher, dass der Frequenzverlauf der Tonreihen am Kreuzungspunkt seine Richtung ändert, sodass eine Tonreihe gehört wird, die erst ab- und dann wieder aufsteigt, und eine zweite Tonreihe, die erst auf- und dann wieder absteigt (*rechts unten*). Die tatsächliche Wahrnehmung hängt von den Zeit- und Frequenzabständen ab; für die meisten Parameterkombinationen trifft allerdings die Vorhersage des Gesetzes der Ähnlichkeit zu

Gestaltgesetze auf, die sie mit ihren visuellen Pendants teilen. Die Gesetze haben zwar unmittelbar einsichtigen Erklärungswert, dieser hat jedoch in aller Regel retrospektiven Charakter. Es ist schwer bis unmöglich, allein aus den Gestaltgesetzen vorherzusagen, wie ein Hörer eine neue Hörsituation wahrnehmen wird.

Ein weiteres bekanntes visuelles Gestaltgesetz ist das des gemeinsamen Schicksals. Objekte, die sich gemeinsam bewegen, werden als zusammengehörig interpretiert. Auch dieses Prinzip findet sich beim Hören wieder. Zwar hat die gemeinsame Ortsveränderung (Bewegung) von Schallanteilen überraschend wenig Einfluss auf die Wahrnehmung (Bőhm et al. 2013), aber die gemeinsame Veränderung der Amplitude spielt für die Integration von Schallanteilen eine große Rolle (Bizley und Cohen 2013). Dies betrifft zum einen den Zeitpunkt des Amplitudenanstiegs zu Beginn des Schallsignals (bei gemeinsamem Beginn, *common onset*, ist es wahrscheinlich, dass alle Schallanteile zu einer Quelle gehören), zum anderen Amplitudenveränderungen während des Tones (gemeinsame Amplitudenmodulationen, *comodulation*, verstärken wiederum den Eindruck einer Schallquelle). Auf der Basis dieses Prinzips wurde in jüngerer Vergangenheit die einflussreiche Theorie der *temporal coherence* formuliert (Shamma et al. 2011). Kohärente Veränderungen können sich neben der Amplitude auch in der Frequenz der Signalanteile finden. Mit der Frequenzveränderung des Grundtones (z. B. Intonation am Ende eines Fragesatzes) gehen auch alle Obertöne mit, woraus sich wiederum ein Hinweis auf den gemeinsamen Ursprung der Signalanteile ergibt. Die zeitliche Kohärenz von Amplituden- und Frequenzveränderungen findet sich sowohl auf kurzen als auch auf längeren Zeitskalen und ist damit an der Schnittstelle zwischen instantaner und sequenzieller auditiver Szenenanalyse angesiedelt. Möglicherweise ergibt sich daraus die lange vernachlässigte Verbindung zwischen diesen beiden Mechanismen der Schallquellenzuordnung und damit die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf ökologisch validere Hörsituationen.

3.5.4 Ambiguität und Multistabilität beim Hören

Wie in ▶ Abschn. 3.5.3 beschrieben, ergründet das Hörsystem im Zuge der auditiven Szenenanalyse, welche Schallquellenkonfiguration am wahrscheinlichsten die Schallmischung erzeugt hat, die gerade auf die Rezeptoren trifft. Mithilfe von Heuristiken entscheidet es sich schnell („in Echtzeit“) für eine von mehreren möglichen Konfigurationen. In den letzten Jahren hat sich in der psychologischen Hörforschung zunehmend die Sichtweise etabliert, dass neben der Verwendung von Heuristiken eine zweite wichtige Strategie des Hörsystems darin besteht, sich mehrere Möglichkeiten „offenzuhalten“ (Denham und Winkler 2006; Schwartz et al. 2012). Das System bildet parallel verschiedene mentale Repräsentationen derselben Schallmischung, die unterschiedliche Interpretationen der Mischung wiedergeben, z. B. eine Interpretation, in der nur eine Schallquelle das gesamte Schallsignal erklärt (*integrierte Konfiguration*), und eine andere Interpretation, in der sich zwei Schallquellen abwechseln (*segregierte Konfiguration*); möglicherweise auch mehr als nur zwei Interpretationen (Denham et al. 2014). Bewusst erlebt der Hörer immer nur eine der möglichen Interpretationen; aber durch das Vorliegen mehrerer Repräsentationen kann er sich schnell „um-

entscheiden", wenn die verfügbaren Hinweisreize plötzlich doch für eine andere Schallquellenkonfiguration sprechen.

Es stellt sich natürlich die Frage, wie man die Existenz konkurrierender Repräsentationen experimentell zeigen kann. Dafür hat sich ein Paradigma bewährt, in dem über längere Zeiträume dasselbe Schallsignal (z. B. eine kurze Tonsequenz) immer wieder präsentiert wird. Bittet man die Probanden, ihre Wahrnehmung zu beschreiben oder per Tastendruck anzuzeigen, so werden sie sich zunächst für eine Interpretation entscheiden. Nach einiger Zeit berichten jedoch viele Probanden einen Wechsel zu einer anderen Interpretation. Typischerweise hält auch diese wieder nur für einen bestimmten Zeitraum an und wechselt dann zurück zur ersten Interpretation oder zu einer dritten, bislang nicht erlebten. Dieses Phänomen nennt man auditive **Bistabilität** (im Fall des Wechselns zwischen zwei Alternativen) bzw. **Multistabilität** (bei mehr als zwei Alternativen). Ein wichtiges Charakteristikum ist, dass sich das physikalische Eingangssignal nicht ändert, sondern nur die Interpretation des Signals durch das Wahrnehmungssystem. Beim Sehen sind ähnliche Phänomene aus sogenannten Kippbildern bekannt (z. B. Rubins Vase oder der Necker-Würfel).

Voraussetzung für Multistabilität ist das Vorliegen von *Ambiguität*. Die physikalischen Eingangssignale müssen in dem Sinne mehrdeutig sein, dass sie mindestens zwei verschiedene perzeptuelle Interpretationen zulassen. Erst wenn diese Interpretationen sich intraindividuell über die Zeit abwechseln, spricht man von Multistabilität; insofern ist Ambiguität eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für multistabile Wahrnehmung. Neueren Befunden zufolge sind sowohl Ambiguität als auch Multistabilität jedoch Eigenschaften fast jedes Schallsignals (Denham et al. 2013) – zwar scheint manchmal aufgrund des starken Wirkens von Heuristiken eine Interpretation zunächst sehr dominant, aber bei ausreichend langen Expositionszeiten werden allmählich von den meisten Hörern auch andere Interpretationen erlebt.

Manche Forscher bezweifeln solche Befunde allerdings unter Hinweis auf den zu starken Aufforderungscharakter entsprechender Experimentalsituationen: Die Probanden könnten aufgrund der Instruktion zweier Antwortmöglichkeiten dazu geneigt sein, beide früher oder später auch zu verwenden. Sie könnten schlimmstenfalls die beiden Antworttasten einfach zufällig drücken oder bestenfalls ihre Wahrnehmung intentional (top-down) zugunsten der einen oder anderen Interpretation steuern. Solche Einwände sind recht schwer auszuräumen, da es sich bei den erhobenen Daten um introspektive Wahrnehmungsurteile handelt, die prinzipiell schwer validierbar sind. Hinweise auf die Existenz echter Multistabilität, die zumindest gegen ein zufälliges Antwortverhalten sprechen, ergeben sich aus Studien, die parallel Korrelate des aktuellen Perzepts in der Hirnaktivität erheben und dabei systematische Beziehungen zu den aktuellen Berichten der Probanden finden (z. B. Hill et al. 2011; Szalárdy et al. 2013). Diese Tendenz, dass neurowissenschaftliche Erkenntnisse zu einer Art „Wiederbelebung" der Introspektion als klassische Forschungsmethode der Wahrnehmungspsychologie führen, lässt sich auch für andere Sinnesmodalitäten beobachten. Nichtsdestotrotz bleibt die Wahrnehmungspsychologie gefragt, in diesem Bereich neuere experimentelle Ansätze zu entwickeln, um Antworttendenzen besser kontrollieren zu können.

Interessanterweise ist die Existenz multistabiler Interpretationen beim Hören im Bereich der Sprachwahrnehmung schon viel länger bekannt. Sie wird hier als *verbal transformation effect* bezeichnet (Warren 1968) und beschreibt das Phänomen, dass die wiederholte Präsentation desselben Wortes (z. B. Blau-Blau-Blau-Blau-…) nach einer Weile andere Interpretationen auslöst (z. B. Blau-Blau-Blau-Blau-Blau-Laub-Laub-Laub-…). Die alternativen Interpretationen können auf einer Umgruppierung der Wortbestandteile basieren (wie im Fall von „Blau" und „Laub") oder aber auch auf starken phonetischen Verzerrungen, die mit dem Ausgangswort nur noch wenige Gemeinsamkeiten haben (Warren 1968). Auch hier finden sich mit der Zeit Wechsel zwischen den Interpretationen, zurück zu einer vorherigen Interpretation oder zu einer weiteren neuen.

Welchen Nutzen sollte es für das Hörsystem haben, unterschiedliche Interpretationen desselben physikalischen Reizes parat zu haben und zwischen diesen Interpretationen hin und her zu wechseln? Gegenwärtige psychologische Theorien gehen davon aus, dass das System Alternativen gegeneinander prüft (Gregory 1980; Winkler et al. 2012) und sich so jederzeit anhand der vorliegenden Hinweisreize (akustischen Merkmale) für die plausibelste Alternative entscheiden kann. Diese Eigenschaft des Systems lässt sich am besten durch künstliche Signale (exzessive Wiederholung desselben Wortes bzw. derselben Tonsequenz) erlebbar machen, ist aber in Ansätzen auch im Alltag erfahrbar. Man mag sich die Situation vorstellen, dass man einen artikulierten Satz des Gegenübers zunächst nicht zu verstehen glaubt, dann aber plötzlich eine Art „Aha-Effekt" doch noch zum nachträglichen Verständnis führt. In diesem Fall hat offenbar nicht die erste Gruppierungsalternative des Hörsystems zu einem plausiblen Perzept geführt, sondern erst die zweite oder dritte. Selbstverständlich spielen hier aber auch Repräsentationen höherer Ordnung (z. B. semantische Interpretationen) eine Rolle, sodass es schwer ist, im Alltag eine reine Form der perzeptuellen Multistabilität zu erleben.

3.6 Psychophysiologische Korrelate auditiver Verarbeitung

Auditive Verarbeitung wird, ebenso wie Wahrnehmungsleistungen in allen anderen Sinnesmodalitäten, neben der schon lange bestehenden psychophysischen Tradition auch mit neurowissenschaftlichen Verfahren beforscht. Zusätzlich zu den durch Verhaltensreaktionen des Hörers (behavioral) erfassten subjektiven Wahrnehmungseindrücken bzw. objektiv prüfbaren Wahrnehmungsleistungen kann so Aufschluss über einzelne Verarbeitungsstadien gewonnen werden. Es ist auch möglich, auditive Verarbeitungsleistungen abzubilden, die der bewussten Wahrnehmung nicht zugänglich sind (z. B. Verarbeitung von Hörreizen außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus bzw. während des Schlafens; „unbewusste" Wahrnehmung; ▶ Kap. 6) oder die aufgrund von Besonderheiten der Stichprobe nicht bewusst berichtet werden können. Beispielsweise kann mittels Elektroenzephalografie (EEG; ▶ Kap. 2) erfasst werden, zu welchen Hörleistungen Neugeborene bereits in der Lage sind (Partanen et al. 2013); mittels Magnetenzephalografie (MEG; ▶ Kap. 2) ist dies sogar schon vor

der Geburt im Mutterleib möglich (Sheridan et al. 2010). Entsprechende Studien zeigen konsistent, dass Neugeborene sehr gut in der Lage sind, Veränderungen in sonst gleichförmigen Tonsequenzen zu erkennen (Alho et al. 1990; Háden et al., 2015), dass sie also Neues in ihrer akustischen Umwelt mühelos entdecken. Solche Ergebnisse sind nicht nur aus entwicklungspsychologischer Perspektive, sondern auch aus Sicht der Allgemeinen Psychologie interessant. Prozesse, die sich bei schlafenden Neugeborenen zeigen lassen, beruhen mit großer Sicherheit auf automatisierten Verarbeitungsschritten. So lässt sich plausibel machen, dass viele Aspekte des Hörens auch bei erwachsenen Hörern automatisch (sozusagen im Hintergrund) ablaufen.

Auch bei anderen Gruppen, die z. B. krankheitsbedingt keine bewussten Wahrnehmungseindrücke wiedergeben können, versucht man, mittels EEG Aussagen über die Verarbeitung von Hörreizen zu treffen und daraus unter Umständen sogar Rückschlüsse auf den kognitiven Allgemeinzustand der Patienten zu ziehen. So beschäftigt sich ein Forschungszweig mit dem Versuch, die auditiven Verarbeitungsleistungen von Komapatienten mithilfe des EEG zu erfassen und anhand der gewonnenen Maße Prognosen über den Verlauf des Komas abzuleiten (Morlet und Fischer 2014). Relevante Fragestellungen sind beispielsweise, ob die Präsentation eines Hörreizes überhaupt zu messbaren Korrelaten auditiver Verarbeitung im EEG führt und ob diese Korrelate darauf hindeuten, dass der Patient Unterschiede zwischen verschiedenen Hörreizen erkennen kann. Obwohl dieser Ansatz mittlerweile auf Gruppenebene konsistente Ergebnisse hervorbringt, ist die Übertragung von der allgemeinpsychologischen (d. h. im Gruppenmittel gültige Zusammenhänge) auf die differenzialpsychologische Ebene (d. h. ein im Einzelfall gültiger Zusammenhang) nach wie vor schwierig, weswegen die tatsächliche klinische Prognose von Komaverläufen für den einzelnen Patienten noch nicht auf der Basis auditiv-psychophysiologischer Korrelate vorgenommen werden kann.

Selbstverständlich werden psychophysiologische Korrelate des Hörens nicht nur für entwicklungs- und neuropsychologische Fragestellungen eingesetzt, sondern können auch genuine Fragen der Allgemeinen Psychologie beantworten. Dies soll hier am Beispiel auditiver EEG-Studien illustriert werden. Jeder überschwellige Hörreiz löst eine charakteristische Folge von Komponenten im ereigniskorrelierten Potenzial (EKP) aus, die man durch Mittelung der Hirnaktivität auf viele identische Präsentationen des Reizes sichtbar machen kann. Diese lassen sich grob in Hirnstammantworten (1–10 ms nach Beginn des Reizes), *middle latency responses* (MLR, die deutsche Übersetzung ist ungebräuchlich; 10–50 ms nach Reizbeginn) und späte Antworten (*long latency responses*, LLR; ab 50 ms nach Reizbeginn) einteilen (z. B. Alain und Winkler 2012). Frühere Komponenten weisen im Allgemeinen eine geringere Amplitude auf und erfordern daher eine höhere Anzahl (bis zu mehreren Tausend) an Ereignispräsentationen, um sich aus dem „Hintergrundrauschen" abzuheben. Neben der Analyse von EKPs sind auch evozierte und induzierte Hirnoszillationen sowie auditive Steady-State-Antworten (*auditory steady state responses*, ASSR) gebräuchliche abhängige Variablen (z. B. Ross 2013).

Die Hirnstammpotenziale sind ihrerseits aus einer charakteristischen Abfolge an Komponenten zusammengesetzt, die auf verschiedenen subcorticalen Verarbeitungsstufen entstehen und mit den römischen Ziffern I bis VII bezeichnet werden. Ihre Morphologie wird durch Eigenschaften des akustischen Reizes (z. B. Intensität, Frequenzzusammensetzung, Hüllkurve) und der Versuchsperson (z. B. Geschlecht, Alter, Körpertemperatur) beeinflusst, nicht jedoch durch psychologische Faktoren wie Aufmerksamkeit oder Grad der Wachheit – selbst im Schlaf finden sich die Hirnstammpotenziale unverändert. Sie galten daher lange Zeit als reines Korrelat der Bottom-up-Weiterleitung auditiver Informationen, das zu diagnostischen Zwecken interessant ist, jedoch kaum für wahrnehmungspsychologische Fragestellungen.

In den letzten Jahren hat sich jedoch gezeigt, dass es neben den obligatorischen Hirnstammkomponenten I bis VII noch eine weitaus variablere frühe Reaktion des auditiven Systems gibt, die als komplexe auditive Hirnstammantwort (*complex auditory brainstem response*, cABR) bezeichnet wird. Sie wird vorwiegend in den Colliculi inferiores generiert und zeigt sich als Reaktion auf komplexere Reize, z. B. Sprache und Musik. Die frappierendste Eigenschaft der komplexen Hirnstammantwort ist ihre enorme Ähnlichkeit zu den Eigenschaften des generierenden Stimulus. Besteht der Reiz beispielsweise in einer periodischen Oszillation, so findet man eine Oszillation mit denselben Frequenzanteilen (leicht zeitverschoben) auch in der Hirnstammantwort. Die Ähnlichkeit ist so groß, dass man den ursprünglichen Stimulus (z. B. ein Musikstück oder bestimmte Wörter) heraushören kann, wenn man die aufgezeichnete EEG-Hirnstammantwort als Tondatei wieder abspielt (Galbraith et al. 1995; Skoe und Kraus 2010).

Aus (wahrnehmungs-)psychologischer Sicht entscheidend ist nun die Tatsache, dass das Ausmaß dieser Ähnlichkeit von zahlreichen Eigenschaften des Hörers abhängt, die keinen Einfluss auf die einfacheren Hirnstammantworten haben, z. B. Musikalität, sprachliche Fähigkeiten, kognitive Parameter wie Aufmerksamkeit und Gedächtnis (Kraus und Chandrasekaran 2010; Kraus und Nicol 2014). Es zeigen sich also hier sehr frühe „kognitive" Einflüsse auf die Wahrnehmung bzw., genauer gesagt, auf die neuronale Informationsweiterleitung, die der Entstehung eines bewussten Perzepts zugrunde liegt. Dies wird durch Feedbackschleifen und efferente Verbindungen ermöglicht, mit denen „höhere" (anatomisch später gelegene) Stufen der auditiven Verarbeitung auf frühere Stufen rückwirken. Durch solche Top-down-Einflüsse wird die historische Trennung in *obligatorische frühe Verarbeitungsschritte* (rein sensorisch bedingt) und *endogene späte Verarbeitungsschritte* (mit Beteiligung genuin psychischer Prozesse wie Aufmerksamkeit und Erwartung) relativiert. Damit wird deutlich, dass man nicht ohne Weiteres in periphere und (vermeintlich psychologisch relevantere) zentrale Verarbeitungsprozesse unterscheiden kann: Auditive Wahrnehmung entsteht (wie auch in allen anderen Modalitäten) im Wechselspiel von Bottom-up- und Top-down-Informationsfluss.

Als wichtiges Forschungsthema kristallisiert sich derzeit die Rolle der Codiergenauigkeit auf der Ebene des Hirnstamms für die Fähigkeit heraus, in schwierigen Hörsituationen (z. B. lauten Umgebungen) Gesprächen folgen zu können (z. B. Kraus und Chandrasekaran 2010; Ruggles et al. 2011). Auch die Frage, ob und gegebenenfalls wie die Encodierung auf Hirnstammebene durch Veränderungen psychischer Prozesse (z. B. selektive

Aufmerksamkeitszuweisung) verbessert werden kann, ist Gegenstand aktiver Forschungsbemühungen (z. B. Lehmann und Schönwiesner 2014).

An die Hirnstammantworten schließen sich die MLR-Komponenten von 10–50 ms nach Reizbeginn an, die thalamocorticalen Ursprungs sind und wiederum in unterschiedliche Peaks mit unterschiedlichen Generatoren eingeteilt werden (N0, P0, Na, Pa, Nb, Pb). Wie die einfachen Hirnstammantworten wurden die MLR-Komponenten lange Zeit primär zu diagnostischen Zwecken verwendet und erst in jüngerer Vergangenheit für die psychologische Forschung „wiederentdeckt". Man weiß nun, dass sich Prozesse wie Aufmerksamkeit und Erwartung bereits ab ca. 20 ms nach Reizbeginn in den MLR-Amplituden niederschlagen. Beispielsweise lässt sich zeigen, dass akustische Reize, die vom Hörer selbst generiert wurden (z. B. indem er eine Tür zuschlägt), abgeschwächte MLR-Komponenten im Vergleich zu fremdgenerierten Reizen hervorrufen (Baess et al. 2009). In eine ähnliche Richtung gehen Befunde, denen zufolge sich höhere Amplituden einzelner MLR-Komponenten auf unerwartete Reize in einer Abfolge von sonst gleichförmigen akustischen Stimuli finden (Escera et al. 2014). In beiden Fällen ist entscheidend, ob der Hörer den Reiz erwartet hat (durch sein eigenes Handeln bzw. durch die Gleichförmigkeit der Stimulation) oder nicht (▶ Abschn. 3.5.1). Bei den MLR-Veränderungen könnte es sich wie bei den Hirnstammantworten um Top-down-Einflüsse durch höher gelagerte (corticale/„kognitive") Verarbeitungsstufen handeln; es wird jedoch auch die Möglichkeit diskutiert, dass die Generatorgebiete der MLR-Komponenten selbst bereits eigene Mechanismen zum Erkennen von gleichbleibenden und demnach zu erwartenden Parametern der akustischen Umwelt haben (Escera und Malmierca 2014). Die zweite Möglichkeit wird gelegentlich so interpretiert, als würde sie die psychologische Bedeutung der entsprechenden Effekte infrage stellen, weil die Prozesse bereits während der Vorverarbeitung des Reizes zum Tragen kommen – aber selbstverständlich muss das psychologische Konstrukt „Erwartung" nicht notwendigerweise erst auf späten, zentralen Verarbeitungsstufen wirken.

Auf die MLR-Komponenten folgen einige obligatorische (P1-N1-P2-Komplex) und viele nichtobligatorische LLR-Komponenten, die hier nur auszugsweise vorgestellt werden sollen (zahlreiche weitere Komponenten, z. B. N2b, P3a, P3b, werden zwar oft in auditiven Experimenten berichtet, sind aber nicht im eigentlichen Sinne spezifisch für auditive Verarbeitung). Die nichtobligatorischen Komponenten werden – anders als die bisher vorgestellten Komponenten – nicht in Reaktion auf einen einzelnen auditiven Reiz identifiziert, sondern als differenzielle Reaktion auf zwei verschiedene Reize oder auf ein und denselben Reiz in unterschiedlichen Bedingungen. Nach der Donders'schen Subtraktionslogik lassen sich damit psychologische Prozesse isolieren, die mit bestimmten EKP-Komponenten einhergehen. So bildet beispielsweise die MMN-Komponente (MMN = *mismatch negativity*; ▶ Zur Vertiefung 3.2) den Verarbeitungsunterschied zwischen einem aufgrund eines (impliziten) prädiktiven Modells erwarteten und einem unerwarteten Reiz in einer sequenziellen Abfolge von Stimuli ab (Schröger 2007); der zugehörige psychologische Prozess lässt sich als Erkennung der Erwartungsverletzung bzw. als Korrektur der zugrunde liegenden Erwartung interpretieren (Winkler und Czigler 1998). Die ORN-Komponente (ORN = *object-related negativity*) ist ein Korrelat der auditiven Objektbildung (Alain et al. 2001), also des Erkennens zweier unterschiedlicher Schallquellen in einer komplexen Schallmischung. Beide Komponenten werden weitgehend unabhängig von der Aufmerksamkeitszuwendung des Hörers auf den auditiven Input ausgelöst (Alain et al. 2001; Sussman 2007) und werden daher gern verwendet, um auditive Verarbeitungsprozesse zu untersuchen, die mühelos (quasi „automatisch") im Hintergrund ablaufen, während der Hörer mit anderen Dingen beschäftigt ist. Gleichzeitig korrelieren MMN- und ORN-Befunde meist recht gut mit behavioral erhobenen Wahrnehmungsurteilen, sodass ein Rückbezug der psychophysiologischen Daten auf die psychologisch erfahrbaren Wahrnehmungsinhalte möglich ist. Diese Korrespondenz erleichtert die Untersuchung von Probandengruppen, deren bewusste Wahrnehmung nicht erfragt werden kann – man denke an die eingangs erwähnten Beispiele von Neugeborenen oder Komapatienten. Darüber hinaus werden beide Komponenten zunehmend auch im Kontext altersrelatierter Störungen der auditiven Verarbeitung genutzt.

Während die MMN als Konsequenz einer Erwartungsverletzung aufgefasst werden kann, wird die *processing negativity* (PN; z. B. Näätänen 1990) ausgelöst, solange ein Vergleichsprozess zwischen der Repräsentation des eintreffenden Schallsignals und der Aufmerksamkeitsspur (▶ Abschn. 3.5.2) eine Übereinstimmung (*match*) ergibt. Da man den Effekt der Aufmerksamkeit aber nur über den Vergleich der Hirnantworten auf aufgabenrelevante und aufgabenirrrelevante Schallsignale extrahieren kann (im Falle von EKPs ergibt dieser Vergleich häufig eine *negative difference*, Nd), kann man die PN auf aufgabenirrelevante Reize (die initial auch ausgelöst wird) meist nicht erkennen. Trotzdem erlaubt die Messung der PN (bzw. Nd), differenzierte Effekte der willkürlichen Aufmerksamkeit zu erfassen. Es gibt noch zahlreiche weitere EKP-Komponenten, die spezifischere Aspekte der Verarbeitung auditiver Signale abbilden, beispielsweise für die Musikverarbeitung (z. B. Koelsch 2012) oder für die Verarbeitung sprachlicher Signale (z. B. Friederici 2011).

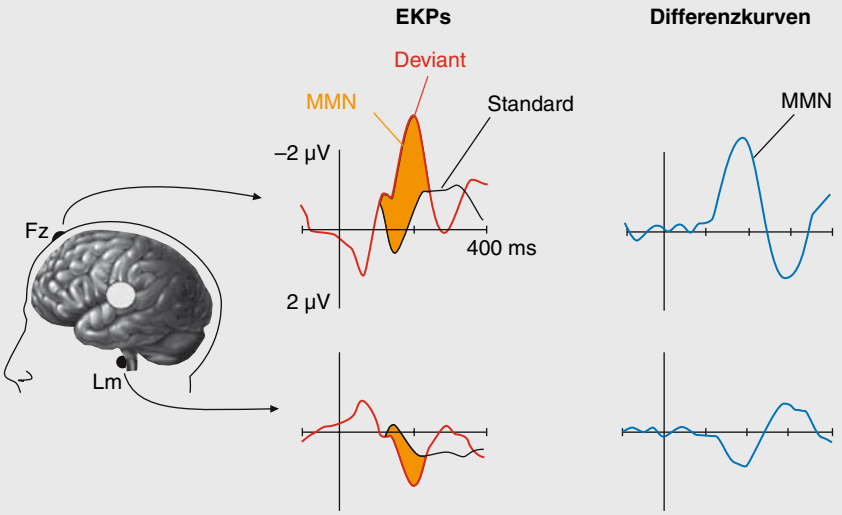
3.7 Störungen des Hörsinns und mögliche Kompensationen

Hörfähigkeiten lassen bei einem beträchtlichen Teil der Bevölkerung mit dem Alter nach. Diese Fähigkeitseinbußen entstehen oft durch eine Kombination verschlechterter peripherer Eingangssignale (reduzierte Sensitivität und Selektivität der Schallcodierung auf der Cochlea) und veränderter zentraler Verarbeitung. Zentrale Veränderungen können aus den Veränderungen des peripheren Eingangssignals resultieren, aber auch unabhängig davon entstehen; man weiß generell noch recht wenig über ihre Entstehung und interindividuellen Ausprägungsgrade. Im Volksmund werden altersbedingte Hörprobleme meist der Peripherie zugeschrieben und unter „Schwerhörigkeit" subsummiert; im klinischen bzw. audiologischen Kontext spricht man in der Mehrzahl der Fälle von *sensorineuralem Hörverlust*. Daneben gibt es noch eine Reihe nicht altersrelatierter spezifischer Hörstörungen, die zum Teil spezifisch für den auditiven

Zur Vertiefung 3.2

Die Mismatch Negativity (MMN) als Indikator des auditiven sensorischen Gedächtnisses

Die Mismatch Negativity (MMN) wird ausgelöst, wenn die durch eine Serie von Standardreizen gebildete Regularität durch gelegentlich auftretende regelwidrige Reize verletzt wird. Sie zeichnet sich durch eine an frontozentralen Elektrodenpositionen (z. B. Fz) erhöhte Negativierung des ereigniskorrelierten Potenzials auf den veränderten Reiz (Deviant) im Vergleich zum Potenzial auf den Standardreiz im Bereich von etwa 100–250 ms relativ zum Beginn der Veränderung aus. An posterolateralen Elektrodenpositionen (z. B. Mastoiden) ist bei Nasenreferenz das EKP auf den veränderten Reiz positiver als das auf den Standardreiz. Der im EKP reflektierte Unterschied zwischen der Verarbeitung des Standards und des Deviants wird am besten in der Differenzkurve (Deviant minus Standard) sichtbar (Schröger 1998). Die MMN wird (größtenteils) im Hörcortex erzeugt (weißer Kreis in ◘ Abb. 3.6) und spiegelt das Ergebnis eines Vergleichs der Repräsentation der aktuellen Stimulation mit der Repräsentation der Invarianten der vorangegangenen Stimulation wider. Sobald eine Diskrepanz zwischen diesem Modell und der aktuellen Stimulation erkannt wird, wird die MMN ausgelöst. Das Auftreten der MMN-Komponente impliziert also Gedächtnisrepräsentationen der entsprechenden Reizmerkmale. Durch geeignete Wahl von Standardreiz und verändertem Reiz lassen sich Eigenschaften des auditiven Gedächtnisses untersuchen. Die MMN ist also ein objektiver Indikator für sensorische (Gedächtnis-)Repräsentationen, aus denen auditive Perzepte konstruiert werden (Näätänen 1992). Inzwischen sind mit der MMN auch die Verarbeitung komplexer auditiver Reize (z. B. Sprache, Musik) an gesunden Probanden und an verschiedenen klinischen Populationen untersucht worden. Ein wichtiger Ertrag dieser Forschung ist die Erkenntnis, dass unser auditives System sehr viel an Reizinformation extrahiert, relativ komplexe Invarianten der akustischen Umwelt erkennt und kurzfristig in sensorischen Gedächtnisspuren repräsentiert, auch wenn die Versuchsperson den Reizen keine Beachtung schenkt (Schröger 2007).



◘ **Abb. 3.6** Die Mismatch-Negativity-(MMN-)Komponente des ereigniskorrelierten Potenzials (EKP). Die Detektion eines abweichenden Tones (Deviants) in einer Sequenz sonst gleichförmiger Töne (Standards) löst die MMN-Komponente aus, die bei Nasenreferenz an frontozentralen Elektroden als Negativierung und an den Mastoidelektroden als Positivierung zu beobachten ist. Der Verarbeitungsunterschied zwischen Standards und Deviants lässt sich am besten in der Differenzkurve (Deviant minus Standard; *rechts*) darstellen. *Fz* = frontozentrale Elektrode, *Lm* = linker Mastoid. (Modifiziert nach einer Abbildung, die von Teija Kujala, Universität Helsinki, zur Verfügung gestellt wurde)

Sinn sind, z. B. *Amusia* (Defizite in der Tonhöhen- und Melodiewahrnehmung; Cousineau et al. 2015) und zum Teil in Anlehnung an entsprechende visuelle Auffälligkeiten beschrieben wurden, beispielsweise *Phonagnosie* (Defizite in der Erkennung von Stimmen; Roswandowitz et al. 2014), analog zu *Prosopagnosie* (Defizite in der Gesichtererkennung), *Deaf Hearing*, analog zu Blindsicht (Garde und Cowey 2000), und auditiver Neglect (Gokhale et al. 2013).

Der weitaus häufigste und gesellschaftlich relevanteste Fall einer Hörbeeinträchtigung ist sicher der sensorineurale Hörverlust. Die Folgen sind zum Teil gravierend und reichen bis zum völligen sozialen Rückzug aufgrund der nachlassenden Fähigkeit, sich an verbalen Interaktionen zu beteiligen – mit negativen Konsequenzen nicht nur für das psychische Wohlbefinden, sondern im Extremfall auch für die kognitiven Fähigkeiten der Betroffenen (Dawes et al. 2015; Pronk et al. 2011). Aufgrund der steigenden Prävalenz von Hörbeeinträchtigungen wird diesem Themenfeld momentan große gesellschaftliche Bedeutung beigemessen. Der Grundlagenforschung zum intakten Hörsystem kommt hier insofern eine wichtige Rolle zu, als ihre Erkenntnisse in die Konzeption entsprechender Hörhilfen oder gar in die Prävention von Schädigungen des Hörsystems einfließen können.

Als Hauptursache für den sensorineuralen Hörverlust gilt gemeinhin das Alter; dabei wird eine zweite wichtige Ursache – Lärmexposition – vernachlässigt (Gourévitch et al. 2014). Alters- und/oder lärmbedingter Hörverlust ist meist auf den Funktionsverlust von Haarzellen zurückzuführen, der in gewisser Weise als „Überlastungserscheinung" verstanden werden kann. Haarzellverlust führt zunächst zu einer abnormen Erhöhung der absoluten Hörschwellen, die klinisch mittels Reinton**audiometrie** erfasst wird. Oft treten Schwierigkeiten im Sprachverständnis hinzu, vor allem in Umgebungen mit vielen Schallquellen (also mit hohen Anforderungen an die Fähigkeiten zur auditiven Szenenanalyse und Aufmerksamkeitsausrichtung; Shinn-Cunningham und Best 2008). Das Ausmaß der audiometrisch gemessenen Schwellenerhöhung lässt jedoch eine relativ schlechte Prognose darüber zu, in welchem Umfang auch das Sprachverstehen des Patienten beeinträchtigt ist. Es gibt sogar Patienten, die kaum Schwellenerhöhungen aufweisen und dennoch über Sprachverständnisprobleme klagen. Diese hohe interindividuelle Varianz wurde

über viele Jahre zentralen Veränderungen des Hörsystems (z. B. Veränderungen in der zeitlichen Genauigkeit der Codierung) zugeschrieben, über die noch vergleichsweise wenig bekannt ist. Darüber hinaus wurde ein Einfluss allgemeiner kognitiver Faktoren wie z. B. bestimmter Maße der Gedächtnisspanne oder des semantischen Wissens gezeigt (Füllgrabe et al. 2015), die jedoch wiederum nur einen Teil der Varianz erklären. Lange wurde es als wichtiges Thema der auditiven Wahrnehmungs- und Kognitionspsychologie angesehen, diese Erklärungslücke zu schließen.

Erst in jüngerer Vergangenheit entwickelte sich die These, dass ein großer Teil der alters- und lärmbedingten Hörprobleme doch auf periphere Faktoren zurückzuführen ist, die mit dem Reintonaudiogramm nicht erfasst werden können. Dies hat als Phänomen des **versteckten Hörverlusts** (*hidden hearing loss*) Eingang in die Literatur gefunden und beruht auf bahnbrechenden Untersuchungen von Kujawa und Liberman (2009), die im Tiermodell zeigten, dass es neben dem schon lange bekannten Funktionsverlust von Haarzellen eine zweite Form der peripheren Schädigung des auditiven Systems gibt, die mit einer Degeneration der Synapsen zwischen Haarzellen und Hörnerv beginnt und in der Konsequenz zu einer Degeneration bestimmter Teile des Hörnervs führt. Diese Schädigung entsteht durch ein Ausmaß an Lärmexposition, bei dem sich die Absoluthörschwellen vorübergehend verschlechtern, aber nach einigen Stunden bis Tagen wieder auf ihre Ausgangswerte zurückgehen. Man war bisher davon ausgegangen, dass eine solche reversible Verschlechterung des Audiogramms (anders als eine irreversible) auf lange Sicht harmlos ist; das scheint jedoch nicht der Fall zu sein. Vor diesem Hintergrund wandelt sich auch gerade das Verständnis dafür, welches Ausmaß an Geräuschexposition über welche Zeitdauern als akzeptabel bzw. unschädlich anzusehen ist (Gourévitch et al. 2014).

Folgestudien haben inzwischen Modelle dafür entworfen, warum von den beschriebenen synaptischen Veränderungen nicht die Absolutschwellen, wohl aber die Hörleistungen im überschwelligen Bereich langfristig betroffen sind (z. B. Bharadwaj et al. 2014). Momentan konzentrieren sich die Forschungsbemühungen in diesem Bereich darauf, den versteckten Hörverlust zu einem messbaren Phänomen zu machen, also diagnostische Maße für die Unversehrtheit des Hörnervs zu entwickeln (z. B. Sergeyenko et al. 2013). Auch aus Sicht der wahrnehmungspsychologischen Forschung sind noch weitere Implikationen des versteckten Hörverlusts zu beachten. Für Untersuchungen, in denen die Hörfähigkeit von Probandengruppen mittels Reintonaudiometrie kontrolliert wurde, kann man nicht mehr mit Sicherheit sagen, ob es nicht doch Gruppenunterschiede im peripheren Hörvermögen gab – Schlussfolgerungen hinsichtlich zentraler oder kognitiver Unterschiede zwischen experimentellen Gruppen bedürfen daher einer sorgfältigen Überprüfung auf der Basis des jetzt verfügbaren Wissens.

Noch für einen weiteren psychologisch relevanten Bereich spielt der versteckte Hörverlust möglicherweise eine Rolle: für das eingangs beschriebene Störungsbild des Tinnitus, das Wahrnehmen von Tönen, Pfeif- oder Klickgeräuschen ohne physikalische Grundlage. Für einen geringen Teil der Patienten ist der Tinnitus objektivierbar (d. h. auch von außen für andere hörbar) und lässt sich dann in der Regel auf physiologische Ursachen zurückführen, z. B. auf Besonderheiten im Pulsieren des Blutes oder auf ein Zucken der Mittelohrmuskeln. Mehr als 90 % der Patienten weisen hingegen einen sogenannten *subjektiven Tinnitus* auf, der nur von ihnen selbst wahrnehmbar ist. Ein Teil dieser Patienten hat wiederum einen mittels Audiogramm diagnostizierbaren Hörverlust, und für diese Subgruppe existieren Störungsmodelle, die den Tinnitus als kompensatorische Reaktion des Gehirns auf die veränderten peripheren Eingangssignale erklären (z. B. Schaette 2014). Auch wenn längst noch nicht alle Mechanismen geklärt sind oder gar eine für alle Patienten erfolgreiche Therapie etabliert wäre, so ist doch die Forschung für diesen Teil der Patienten auf einem vielversprechenden Weg.

Tinnituspatienten ohne messbaren Hörverlust hingegen stand man lange Zeit ratlos gegenüber; auch hier wird nun intensiv geprüft, ob es sich bei dieser Subgruppe um Patienten mit verstecktem Hörverlust handeln könnte, sodass wiederum periphere Beeinträchtigungen eine wichtige kausale Rolle für die Entstehung des Tinnitus spielen. Aufschlussreich sind hier Studien an gesunden Probanden, bei denen durch ein einwöchiges kontinuierliches Tragen von Gehörschutzstöpseln (und damit einer drastischen Verminderung der peripheren Eingangssignale) zu über 60 % Tinnitus ausgelöst wurde (Schaette et al. 2012). Ungeachtet der möglichen peripheren Erklärungsmodelle spielen aber auch zentrale Mechanismen eine Rolle, da Tinnitus bei vielen Patienten beispielsweise stressabhängig in seiner Intensität variiert. Die Wiederherstellung des peripheren Hörvermögens beseitigt auch nicht bei allen – aber immerhin bei einigen – Patienten die Tinnitussymptomatik.

Vor allem die „klassischen" sensorineuralen Sensitivitätsverluste in der Peripherie können durch ein *Hörgerät*, das die eintreffenden Schallsignale verstärkt, teilweise ausgeglichen werden. Diese Verstärkung erfolgt – basierend auf dem individuellen Audiogramm – selektiv für bestimmte Frequenzen. Moderne Hörgeräte sind zusätzlich in der Regel mit Algorithmen zur automatischen Störgeräuschunterdrückung oder zur selektiven (z. B. richtungsabhängigen) Verstärkung bestimmter Schallquellen ausgestattet. Diese Algorithmen basieren auf wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen und versuchen die Funktionsweise des gesunden Hörsystems zu imitieren oder sogar zu übertreffen.

Vielleicht noch frappierender als die Verstärkung mittels Hörgerät ist die Möglichkeit, (fast) vollständig dysfunktionale periphere Informationsweiterleitung mit einem *Cochleaimplantat* zu umgehen, das Schallsignale direkt in elektrische Stimulation umwandelt. Die zentralen Verarbeitungsstufen des auditiven Systems können lernen, die vom CI gelieferten Information zu interpretieren, was zu beachtlichen Hörerfolgen bei vielen CI-Trägern führt. Beispielsweise ist nach einigem Training in vielen Fällen das Telefonieren, also das Sprachverstehen bei reduzierter Signalqualität ohne Unterstützung durch Lippenlesen oder andere visuelle Hinweise, wieder möglich. Solche Erfolge machen das Cochleaimplantat zur bis heute mit Abstand erfolgreichsten Sinnesprothese; sie beruhen wahrscheinlich zu großen Teilen auf der hochgradigen Plastizität und Lernfähigkeit der Hirnstrukturen und -prozesse des auditiven Systems. Sowohl für Hörgeräte als auch für Cochleaimplantate ist aber die interindividuelle Variabilität im erreichten Hörerfolg aus weithin ungeklärten Grün-

den beträchtlich. Auch hier besteht also noch Forschungsbedarf in der Wahrnehmungspsychologie und verwandten Disziplinen.

3.8 Anwendungsbeispiele

Anwendungen der auditiven Wahrnehmungspsychologie begegnen uns im Alltag auf Schritt und Tritt – nur sind wir uns dessen selten bewusst.

▪ Raumakustik

Warum sind beispielsweise Durchsagen auf dem Bahnhof so schwer zu verstehen? Könnte man nicht bessere Lautsprecher konstruieren, die für eine verständlichere Wiedergabe sorgen? Tatsächlich handelt es sich hier um ein Problem der Raumakustik. Der erlebte Qualitätsverlust der Durchsage hat weniger mit dem Lautsprecher zu tun als vielmehr mit den schwierigen akustischen Eigenschaften großer Bahnhofshallen. Der vom Lautsprecher ausgesendete Schall (Primärschall) erreicht den Hörer nicht nur auf direktem Weg, sondern wird von Wänden, Decke und Boden reflektiert, sodass jede Schallwelle noch mehrere weitere Male auf den Hörer eintrifft. Der Wahrnehmungsapparat steht nun vor dem Problem, den Primärschall vom reflektierten Schall zu unterscheiden. Das ist nicht nur auf dem Bahnhof so, sondern auch in jedem anderen Raum. In einem möblierten Wohn- oder Büroraum mit typischen Ausmaßen entstehen daraus jedoch keine größeren Probleme, da zum einen ein beträchtlicher Teil des Schalles absorbiert („verschluckt“) wird und zum anderen der verbleibende, reflektierte Schall nur kurze Wege zurück zum Hörer zurückzulegen hat. Wenn der reflektierte Schall sehr schnell auf den Primärschall folgt, kann unser Wahrnehmungsapparat die Schallwellen leicht miteinander verschmelzen und korrekt interpretieren. Wenn jedoch die Abstände zu den reflektierenden Medien größer werden, gelingt diese Integration nicht mehr – in Extremfällen nehmen wir den reflektierten Schall als zeitlich versetztes Echo war (und auch dann ist die Unterscheidung zwischen Primär- und reflektiertem Schall wieder einfach). Schwierig ist der dazwischen liegende Fall: Wenn der reflektierte Schall so eintrifft, dass er gerade nicht mehr mit dem Primärschall verschmolzen werden kann, aber diesen noch zeitlich überlagert, dann entsteht für unsere auditive Wahrnehmung ein kompliziertes Entzerrungsproblem – und dies erschwert das Verständnis auf dem Bahnhof erheblich.

Im genannten Beispiel kommt zum Tragen, dass die Menge und Dauer des reflektierten Schalles (die Nachhallzeit) stark von Parametern des Raumes abhängig ist, z. B. von der Absorptionsmenge an Wänden, Decke und Boden sowie von deren Abständen relativ zu Schallquelle und Hörer. Aus demselben Grund ist übrigens die Konstruktion von Konzertsälen eine ausgesprochen knifflige Angelegenheit – eine zu lange Nachhallzeit führt dazu, dass die Töne „verschmieren“, wenn man Musikstücke in zügigem Tempo aufführt; eine zu kurze Nachhallzeit klingt hingegen „trocken“. Nicht zu unterschätzen ist dabei, dass die Reflexionscharakteristika des Raumes auch davon abhängen, wie viele Personen im Publikum sitzen. Wenn also das Hörvergnügen bei einem gut gefüllten Konzertsaal größer ist, muss das nicht daran liegen, dass die Musiker ein schlecht besuchtes Konzert mit weniger Musizierfreude angehen, sondern es können auch sehr einfache akustische Effekte verantwortlich sein.

▪ mp3-Codierung

Aus dem Bereich der Musik stammt auch das wohl erfolgreichste Anwendungsbeispiel auditiver Wahrnehmungsprinzipien überhaupt: die mp3-Codierung (ausführlich: MPEG-1 Layer III; MPEG = Moving Picture Experts Group). Sie wurde maßgeblich am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) in Erlangen entwickelt. Die Grundidee der mp3-Codierung besteht darin, bei der digitalen Aufbewahrung von Musikstücken Speicherplatz (und damit auch Rechenleistung beim Abspielen) einzusparen, indem man Signalanteile entfernt, die der Mensch ohnehin nicht wahrnehmen könnte (Brandenburg et al. 2013). Tatsächlich lässt sich die Datenmenge eines typischen Musikstücks ohne hörbaren Qualitätsverlust mühelos auf ein Zehntel reduzieren. Dabei werden zentrale Erkenntnisse der auditiven Wahrnehmungspsychologie genutzt, z. B. Maskierungseffekte und das Wissen um Absolutschwellen der Wahrnehmung für unterschiedliche Frequenzen. Maskierung bedeutet, dass bei großen Intensitätsunterschieden ein Schallereignis ein anderes so stark überdeckt, dass das Ereignis im Hintergrund unter keinen Umständen mehr wahrnehmbar ist. Es kann dann ohne Qualitätseinbußen aus der Mischung entfernt werden.

Aus demselben Grund können auch Schallereignisse, deren Intensität unterhalb der Absolutschwelle liegt, aus der digitalen Aufzeichnung entfernt werden. Hierfür können Normdaten zu den typischen Absolutschwellen für verschiedene Frequenzbereiche (Tonhöhen) genutzt werden. Dabei wird selbstverständlich ein gewisser Spielraum eingeplant, um auch die Varianz (Streuung) um die mittlere Absolutschwelle zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz kann es gelegentlich passieren, dass einzelne Personen, deren Hörleistung um mehrere Standardabweichungen vom Mittelwert der Bevölkerung abweicht, den Unterschied zwischen einem original eingespielten Musikstück und der mp3-codierten Variante doch wahrnehmen. Hier wird deutlich, dass es sich bei der mp3-Codierung um einen allgemeinpsychologischen, nicht um einen differenzialpsychologischen Ansatz handelt – für den Großteil, aber nicht für alle Hörer, haben die immer weiter verbesserten Codierungsverfahren einen „perfekten“ (d. h. subjektiv völlig verlustfreien) praktischen Nutzen.

3.9 Ausblick

Ausgehend von den physikalischen und physiologischen Grundlagen des Hörens haben wir in diesem Kapitel einen – notwendigerweise selektiven – Überblick über die psychologisch relevanten Funktionen der auditiven Wahrnehmung gegeben. Wie komplex und faszinierend diese Funktionen tatsächlich sind und welchen entscheidenden Beitrag zum menschlichen Hören sie leisten, wird leider oft erst deutlich, wenn Ausfälle spezifischer Funktionen resp. des Hörvermögens im Allgemeinen zu verzeichnen sind. Einen ersten, ungefähren Eindruck können aber entsprechende Hörbeispiele und audiovisuelle Illustrationen vermitteln; eine exzellente Sammlung findet sich auf der Webseite www.auditoryneuroscience.com zum gleichnamigen Buch

von Schnupp et al. (2011). Auch die im Text bereits erwähnte Webseite ▶ http://webpages.mcgill.ca/staff/Group2/abregm1/web von Albert Bregman sei dem Leser nochmals ans Herz gelegt. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass das Forschungsfeld der auditiven Wahrnehmungsforschung momentan stark expandiert – man darf auf ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen ebenso gespannt sein wie auf neu aufgeworfene Forschungsfragen, die sich in den nächsten Jahren ergeben.

3.10 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Unsere auditive Wahrnehmung basiert auf der Rezeption und Interpretation von Luftdruckschwankungen, die von schallerzeugenden Objekten ausgelöst werden.
- Große Herausforderungen an die auditive Wahrnehmung entstehen durch den flüchtigen (vergänglichen) Charakter des Schalles, der eine Echtzeitanalyse verlangt, sowie durch die Überlagerung von Signalen gleichzeitig aktiver Schallquellen.
- Eine zentrale Leistung des auditiven Systems besteht in der Zergliederung von Signalanteilen in die zugrunde liegenden Schallquellen (auditive Szenenanalyse).
- Über selektive (willkürliche) Aufmerksamkeitsprozesse werden einzelne Schallquellen für die weitere Verarbeitung ausgewählt.
- Aufgrund der Warnfunktion des Hörsinns spielen unwillkürliche Aufmerksamkeitsprozesse (Distraktion durch saliente Schallquellen) eine wichtige Rolle.
- Komplexe Hörprobleme werden durch die Eigenschaft des auditiven Systems vereinfacht, seinen Input bestmöglich vorherzusagen.
- Neueren Theorien zufolge werden parallel mehrere konkurrierende Repräsentationen möglicher Schallquellenkonstellationen derselben Schallmischung aufrechterhalten, um bei Bedarf schnell zwischen verschiedenen Interpretationen wechseln zu können.
- Die Lokalisierung von Schallquellen gelingt maßgeblich durch den Abgleich der Information aus beiden Ohren.
- Zahlreiche psychophysiologische Indikatoren geben Aufschluss über generelle Prozesse der auditiven Wahrnehmung und werden zum Teil auch diagnostisch verwendet.
- Hörstörungen entstehen durch periphere und zentrale (kognitive) Faktoren sowie deren komplexes Wechselspiel und können durch geeignete Maßnahmen teilweise kompensiert werden (z. B. Hörgerät, Cochleaimplantat, Tinnitustherapie).

Schlüsselbegriffe

Ambiguität (*ambiguity*) Mehrdeutigkeit in der Interpretation eines Schallereignisses.

Audiometrie (*audiometry*) Erfassung der Leistungsfähigkeit des Hörsystems, z. B. Sprachverständlichkeitstest (Sprachaudiometrie) oder Bestimmung von Absolutschwellen für Sinustöne definierter Frequenzen (Reintonaudiometrie).

Auditive Szenenanalyse (*auditory scene analysis*) Strukturieren einer Schallmischung in die konstituierenden Schallquellen, indem zusammengehörende Signalanteile verbunden (integriert) und nicht zusammengehörende Anteile getrennt (segregiert) werden.

Aufmerksamkeit (*attention*) Priorisierung der Verarbeitung eines Schallereignisses auf Kosten anderer Schallereignisse; ausgelöst durch Intentionen des Hörers (willkürlich) oder durch Eigenschaften des Schallereignisses (unwillkürlich).

Binaurales Hören (*binaural hearing*) Abgleich der am linken und rechten Ohr anliegenden Informationen; von großer Bedeutung für die Lokalisierung von Schallquellen und für die ortsbasierte Zuwendung von Aufmerksamkeit auf eine Schallquelle.

Bistabilität (*bistability*) Eigenschaft des auditiven Systems, im Fall ambigen Inputs zwei konkurrierende mentale Repräsentationen zu bilden und zwischen diesen hin und her zu wechseln.

Hörbahn (*auditory pathway*) Verarbeitungspfad auditiver Informationen zwischen Peripherie und Cortex; beinhaltet im Vergleich zum visuellen System eine hohe Anzahl an Schaltstellen, was auf ein hohes Maß an Vorverarbeitung hinweist.

Multistabilität (*multistability*) Eigenschaft des auditiven Systems, im Fall ambigen Inputs mehrere konkurrierende mentale Repräsentationen zu bilden und zwischen diesen hin und her zu wechseln.

Prädiktion (*prediction*) Vorhersage zukünftiger auditiv-sensorischer Informationen auf der Basis mentaler Modelle (die beispielsweise anhand von Regularitäten in der Reizabfolge gebildet werden); vereinfacht zahlreiche Probleme der auditiven Wahrnehmung.

Tinnitus (*tinnitus*) Subjektive Wahrnehmung von Geräuschen (z. B. Klingeln) im Ohr ohne adäquate externe Reize; oft bedingt durch corticale Reorganisationsprozesse nach peripherer Schädigung des Hörsystems; gelegentlich auf interne physiologische Geräusche zurückzuführen (objektiver Tinnitus).

Überlagerung (*superposition*) Eigenschaft von Schallwellen, sich bei gleichzeitigem Vorhandensein mehrerer Schallquellen aufzusummieren (im Unterschied zur Verdeckung im visuellen System).

Versteckter Hörverlust (*hidden hearing loss*) Periphere Schädigung des auditiven Systems, die sich nicht in erhöhten Absolutschwellen für die Detektion auditiver Reize niederschlägt und daher in der Vergangenheit fälschlicherweise als zentrale Schädigung interpretiert wurde.

Weiterführende Literatur

Bregman, A. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound.* Cambridge, MA: MIT Press. (Ein sehr umfangreiches und anschaulich geschriebenes Buch zur auditiven Szenenanalyse.)

Kraus, N. & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews Neuroscience, 11*, 599-605. (Überblick über die Auswirkungen von Musikerfahrung auf andere auditive Leistungen sowie über deren neuronale Korrelate auf Hirnstammebene.)

Moore, B. C. J. (2013). *An introduction to the psychology of hearing*. Bingley, UK: Emerald. (Ein prägnantes Lehrbuch mit psychoakustischem Schwerpunkt, das trotz seiner Kürze viel Stoff beinhaltet.)

Poeppel, D., Overath, T., Popper, A. N. & Fay, R. R. (2012). *The human auditory cortex. Springer handbook of auditory research*. New York, NY: Springer. (Informative Beiträge über den auditiven Cortex.)

Schnupp, J., Nelken, I. & King, A. (2011). *Auditory neuroscience: Making sense of sound.* Cambridge, MA: MIT Press. (Eine hervorragende, für den interessierten Leser gut verständliche Einführung in die Neurowissenschaft des Hörens.)

Schröger, E., SanMiguel, I. & Bendixen, A. (2013). Prädiktive Modellierung in der auditiven Wahrnehmung. In E. Schröger & S. Koelsch (Hrsg.), *Affektive und Kognitive Neurowissenschaften: Enzyklopädie der Psychologie (Serie II: Kognition, Band 5)* (S. 11–45). Göttingen: Hogrefe. (Systematik über den prädiktiven Charakter des Hörens.)

Shinn-Cunningham, B. & Best, V. (2008). Selective attention in normal and impaired hearing. *Trends in Amplification, 12*, 283-299. (Anschauliche Darstellung der Schwierigkeiten auditiver Aufmerksamkeitsausrichtung für Personen mit intaktem bzw. beeinträchtigtem Hörvermögen.)

Webseiten

- www.auditoryneuroscience.com – Zahlreiche audiovisuelle Demonstrationen zur Funktionsweise des intakten sowie des beeinträchtigen Hörsystems.
- http://webpages.mcgill.ca/staff/Group2/abregm1/web – Umfangreiche Sammlung von Tonbeispielen und Erklärungen zum Prozessder auditiven Szenenanalyse.

Literatur

Ahveninen, J., Hämäläinen, M., Jääskeläinen, I. P., Ahlfors, S. P., Huang, S., Lin, F. H., Raij, T., Sams, M., Vasios, C. E., & Belliveau, J. W. (2011). Attention-driven auditory cortex short-term plasticity helps segregate relevant sounds from noise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*, 4182–4187.

Alain, C., & McDonald, K. L. (2007). Age-related differences in neuromagnetic brain activity underlying concurrent sound perception. *Journal of Neuroscience*, *27*, 1308–1314.

Alain, C., & Winkler, I. (2012). Recording event-related potentials: Application to study auditory perception. In D. Poeppel, T. Overath, A. N. Popper, & R. R. Fay (Hrsg.), *The Human Auditory Cortex* Handbook of Auditory Research. (S. 69–96). New York: Springer.

Alain, C., Arnott, S. R., & Picton, T. W. (2001). Bottom-up and top-down influences on auditory scene analysis: Evidence from brain potentials. *Journal of Experimental Psychology*, *27*, 1072–1089.

Alho, K., Sainio, K., Sajaniemi, N., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1990). Event-related brain potential of human newborns to pitch change of an acoustic stimulus. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *77*, 151–155.

Arnal, L. H., Morillon, B., Kell, C. A., & Giraud, A.-L. (2009). Dual neural routing of visual facilitation in speech processing. *Journal of Neuroscience*, *29*, 13445–13453.

Baess, P., Widmann, A., Roye, A., Schröger, E., & Jacobsen, T. (2009). Attenuated human auditory middle latency response and evoked 40-Hz response to self-initiated sounds. *European Journal of Neuroscience*, *29*, 1514–1521.

Baldeweg, T. (2006). Repetition effects to sounds: Evidence for predictive coding in the auditory system. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 93–94.

Bendixen, A. (2014). Predictability effects in auditory scene analysis: A review. *Frontiers in Neuroscience*, *8*, 60.

Best, V., Ozmeral, E. J., Kopčo, N., & Shinn-Cunningham, B. G. (2008). Object continuity enhances selective auditory attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*, 13174–13178.

Bharadwaj, H. M., Verhulst, S., Shaheen, L., Liberman, M. C., & Shinn-Cunningham, B. G. (2014). Cochlear neuropathy and the coding of supra-threshold sound. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *8*, 26.

Bidet-Caulet, A., Mikyska, C., & Knight, R. T. (2010). Load effects in auditory selective attention: evidence for distinct facilitation and inhibition mechanisms. *Neuroimage*, *50*, 277–284.

Bizley, J. K., & Cohen, Y. E. (2013). The what, where and how of auditory-object perception. *Nature Reviews Neuroscience*, *14*, 693–707.

Bőhm, T. M., Shestopalova, L., Bendixen, A., Andreou, A. G., Georgiou, J., Garreau, G., Pouliquen, P., Cassidy, A., Denham, S. L., & Winkler, I. (2013). The role of perceived source location in auditory stream segregation: Separation affects sound organization, common fate does not. *Learning and Perception*, *5*, 55–72.

Brandenburg, K., Faller, C., Herre, J., Johnston, J. D., & Kleijn, W. B. (2013). Perceptual coding of high-quality digital audio. *Proceedings of the IEEE*, *101*, 1905–1919.

Bregman, A. (1990). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. Cambridge, MA: MIT Press.

Bronkhorst, A. W. (2015). The cocktail-party problem revisited: early processing and selection of multi-talker speech. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *77*, 1465–1487.

Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with 2 ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, *25*, 975–979.

Cowan, N. (1984). On short and long auditory stores. *Psychological Bulletin*, *96*, 341–370.

Cousineau, M., Oxenham, A. J., & Peretz, I. (2015). Congenital amusia: a cognitive disorder limited to resolved harmonics and with no peripheral basis. *Neuropsychologia*, *66*, 293–301.

Dannenbring, G. L. (1976). Perceived auditory continuity with alternately rising and falling frequency transitions. *Canadian Journal of Psychology*, *30*, 99–114.

Dawes, P., Emsley, R., Cruickshanks, K. J., Moore, D. R., Fortnum, H., Edmondson-Jones, M., McCormack, A., & Munro, K. J. (2015). Hearing loss and cognition: the role of hearing aids, social isolation and depression. *PLoS One*, *10*, e0119616.

Denham, S. L., & Winkler, I. (2006). The role of predictive models in the formation of auditory streams. *Journal of Physiology, Paris*, *100*, 154–170.

Denham, S. L., Gyimesi, K., Stefanics, G., & Winkler, I. (2013). Perceptual bi-stability in auditory streaming: how much do stimulus features matter? *Learning and Perception*, *5*, 73–100.

Denham, S. L., Bőhm, T. M., Bendixen, A., Szalárdy, O., Kocsis, Z., Mill, R., & Winkler, I. (2014). Stable individual characteristics in the perception of multiple embedded patterns in multistable auditory stimuli. *Frontiers in Neuroscience*, *8*, 25.

Deroche, M. L., Culling, J. F., Chatterjee, M., & Limb, C. J. (2014). Speech recognition against harmonic and inharmonic complexes: spectral dips and periodicity. *Journal of the Acoustical Society of America*, *135*, 2873–2884.

Ding, N., & Simon, J. Z. (2012). Emergence of neural encoding of auditory objects while listening to competing speakers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*, 11854–11859.

Du, Y., He, Y., Ross, B., Bardouille, T., Wu, X., Li, L., & Alain, C. (2011). Human auditory cortex activity shows additive effects of spectral and spatial cues during speech segregation. *Cerebral Cortex*, *21*, 698–707.

Elmer, S., Rogenmoser, L., Kühnis, J., & Jäncke, L. (2015). Bridging the gap between perceptual and cognitive perspectives on absolute pitch. *Journal of Neuroscience*, *35*, 366–371.

Escera, C., & Malmierca, M. S. (2014). The auditory novelty system: an attempt to integrate human and animal research. *Psychophysiology*, *51*, 111–123.
Escera, C., Leung, S., & Grimm, S. (2014). Deviance detection based on regularity encoding along the auditory hierarchy: electrophysiological evidence in humans. *Brain Topography*, *27*, 527–538.
Fenn, K. M., Shintel, H., Atkins, A. S., Skipper, J. I., Bond, V. C., & Nusbaum, H. C. (2011). When less is heard than meets the ear: change deafness in a telephone conversation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *64*, 1442–1456.
Friederici, A. D. (2011). The brain basis of language processing: from structure to function. *Physiological Reviews*, *91*, 1357–1392.
Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *360*, 815–836.
Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 127–138.
Füllgrabe, C., Moore, B. C., & Stone, M. A. (2015). Age-group differences in speech identification despite matched audiometrically normal hearing: contributions from auditory temporal processing and cognition. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *6*, 347.
Galbraith, G. C., Arbagey, R. B., Comerci, N., & Rector, P. M. (1995). Intelligible speech encoded in the human brain stem frequency-following response. *Neuroreport*, *6*, 2363–2367.
Garde, M. M., & Cowey, A. (2000). „Deaf hearing": unacknowledged detection of auditory stimuli in a patient with cerebral deafness. *Cortex*, *36*, 71–80.
Getzmann, S., Lewald, J., & Falkenstein, M. (2014). Using auditory pre-information to solve the cocktail-party problem: electrophysiological evidence for age-specific differences. *Frontiers in Neuroscience*, *8*, 413.
Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
Gokhale, S., Lahoti, S., & Caplan, L. R. (2013). The neglected neglect: auditory neglect. *JAMA Neurology*, *70*, 1065–1069.
Gourévitch, B., Edeline, J. M., Occelli, F., & Eggermont, J. J. (2014). Is the din really harmless? Long-term effects of non-traumatic noise on the adult auditory system. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*, 483–491.
Gregory, R. L. (1980). Perceptions as hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *290*, 181–197.
Háden, G. P., Németh, R., Török, M. & Winkler, I. (2015). Predictive processing of pitch trends in newborn infants. *Brain Research*, *1626*, 14–20.
He, C., & Trainor, L. J. (2009). Finding the pitch of the missing fundamental in infants. *Journal of Neuroscience*, *29*, 7718–8822.
Hedrick, M. S., & Madix, S. G. (2009). Effect of vowel identity and onset asynchrony on concurrent vowel identification. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *52*, 696–705.
Henry, M., & Herrmann, B. (2014). Low-frequency neural oscillations support dynamic attending in temporal context. *Timing & Time Perception*, *2*, 62–68.
Henry, M. J., & Obleser, J. (2012). Frequency modulation entrains slow neural oscillations and optimizes human listening behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*, 20095–20100.
Hill, K. T., Bishop, C. W., Yadav, D., & Miller, L. M. (2011). Pattern of BOLD signal in auditory cortex relates acoustic response to perceptual streaming. *BMC Neuroscience*, *12*, 85.
Hohmann, V. (2008). *Signal processing in hearing aids*. Handbook of Signal Processing in Acoustics, Bd. II, S. 205–212). New York: Springer.
Horváth, J., & Burgyán, A. (2011). Distraction and the auditory attentional blink. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *73*, 695–701.
Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, *96*, 459–491.
Kaernbach, C. (2003). Auditory sensory memory and short-term memory. In C. Kaernbach, E. Schröger, & H. Müller (Hrsg.), *Psychophysics beyond Sensation: Laws and Invariants of Human Cognition*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
Kam, J. W., Dao, E., Stanciulescu, M., Tildesley, H., & Handy, T. C. (2013). Mind wandering and the adaptive control of attentional resources. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*, 952–960.
Kavšek, M. J. (1996). Multidimensionale Skalierung von Farbmustern aus der DIN-Farbenkarte. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, *43*, 547–570.
Koch, I., Lawo, V., Fels, J., & Vorländer, M. (2011). Switching in the cocktail party: exploring intentional control of auditory selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *37*, 1140–1147.
Koelsch, S. (2012). *Brain and Music*. Chichester: Wiley-Blackwell.
Kollmeier, B., & Koch, R. (1994). Speech enhancement based on physiological and psychoacoustical models of modulation perception and binaural interaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, *95*, 1593–1602.
Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 599–605.
Kraus, N., & Nicol, T. (2014). The cognitive auditory system: The role of learning in shaping the biology of the auditory system. In A. N. Popper, & R. R. Fay (Hrsg.), *Perspectives on Auditory Research* Handbook of Auditory Research. (S. 299–319). New York: Springer.
Kujawa, S. G., & Liberman, M. C. (2009). Adding insult to injury: cochlear nerve degeneration after „temporary" noise-induced hearing loss. *Journal of Neuroscience*, *29*, 14077–14085.
Lakatos, P., Musacchia, G., O'Connel, M. N., Falchier, A. Y., Javitt, D. C., & Schroeder, C. E. (2013). The spectrotemporal filter mechanism of auditory selective attention. *Neuron*, *77*, 750–761.
Lange, K. (2009). Brain correlates of early auditory processing are attenuated by expectations for time and pitch. *Brain and Cognition*, *69*, 127–137.
Lehmann, A., & Schönwiesner, M. (2014). Selective attention modulates human auditory brainstem responses. *PLoS One*, *9*, e85442.
Lipp, O. V., Neumann, D. L., Pretorius, N. R., & McHugh, M. J. (2003). Attentional blink modulation during sustained and after discrete lead stimuli presented in three sensory modalities. *Psychophysiology*, *40*, 285–290.
Massaro, D. W. (1975). *Experimental psychology and information processing*. Chicago: Rand McNally.
Merabet, L. B., & Pascual-Leone, A. (2010). Neural reorganization following sensory loss: the opportunity of change. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 44–52.
Mesgarani, N., & Chang, E. F. (2012). Selective cortical representation of attended speaker in multi-talker speech perception. *Nature*, *485*, 233–236.
Moon, I. J., Won, J. H., Park, M. H., Ives, D. T., Nie, K., Heinz, M. G., Lorenzi, C., & Rubinstein, J. T. (2014). Optimal combination of neural temporal envelope and fine structure cues to explain speech identification in background noise. *Journal of Neuroscience*, *34*, 12145–12154.
Moore, B. C. (2008). The role of temporal fine structure processing in pitch perception, masking, and speech perception for normal-hearing and hearing-impaired people. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, *9*, 399–406.
Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instruction. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *9*, 56–60.
Morlet, D., & Fischer, C. (2014). MMN and novelty P3 in coma and other altered states of consciousness: a review. *Brain Topography*, *27*, 467–479.
Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences*, *13*, 201–288.
Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Näätänen, R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, *42*, 313–329.
Okamoto, H., Stracke, H., Stoll, W., & Pantev, C. (2010). Listening to tailor-made notched music reduces tinnitus loudness and tinnitus-related auditory cortex activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 1207–1210.
O'Sullivan, J. A., Power, A. J., Mesgarani, N., Rajaram, S., Foxe, J. J., Shinn-Cunningham, B. G., Slaney, M., Shamma, S. A. & Lalor, E. C. (2015). Attentional selection in a cocktail party environment can be decoded from single-trial EEG. *Cerebral Cortex*, *25*, 1697–1706.
Pantev, C., Rudack, C., Stein, A., Wunderlich, R., Engell, A., Lau, P., Wollbrink, A., & Shaykevich, A. (2014). Study protocol: Münster tinnitus randomized controlled clinical trial-2013 based on tailor-made notched music training (TMNMT). *BMC Neurology*, *14*, 40.
Partanen, E., Kujala, T., Näätänen, R., Liitola, A., Sambeth, A., & Huotilainen, M. (2013). Learning-induced neural plasticity of speech processing before birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*, 15145–15150.
Plakke, B., & Romanski, L. M. (2014). Auditory connections and functions of prefrontal cortex. *Frontiers in Neuroscience*, *8*, 199.
Pronk, M., Deeg, D. J., Smits, C., Tilburg, T. G. van, Kuik, D. J., Festen, J. M., & Kramer, S. E. (2011). Prospective effects of hearing status on loneliness and

depression in older persons: identification of subgroups. *International Journal of Audiology*, *50*, 887–896.

Puschmann, S., Sandmann, P., Ahrens, J., Thorne, J., Weerda, R., Klump, G., Debener, S., & Thiel, C. M. (2013). Electrophysiological correlates of auditory change detection and change deafness in complex auditory scenes. *Neuroimage*, *75*, 155–164.

Rahne, T., Rasinski, C., & Neumann, K. (2010). Measuring timbre discrimination with cross-faded synthetic tones. *Journal of Neuroscience Methods*, *189*, 176–179.

Ross, B. (2013). Steady-state auditory evoked responses. In G. G. Celesia (Hrsg.), *Disorders of peripheral and central auditory processing* Handbook of Clinical Neurophysiology, (Bd. 10, S. 155–176). Amsterdam: Elsevier.

Roswandowitz, C., Mathias, S. R., Hintz, F., Kreitewolf, J., Schelinski, S., & Kriegstein, K. von (2014). Two cases of selective developmental voice-recognition impairments. *Current Biology*, *24*, 2348–2353.

Roye, A., Jacobsen, T., & Schröger, E. (2013). Discrimination of personally significant from nonsignificant sounds: A training study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *13*, 930–943.

Ruggles, D., Bharadwaj, H., & Shinn-Cunningham, B. G. (2011). Normal hearing is not enough to guarantee robust encoding of suprathreshold features important in everyday communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *108*, 15516–15521.

Sandmann, P., Dillier, N., Eichele, T., Meyer, M., Kegel, A., Pascual-Marqui, R. D., Marcar, V. L., Jäncke, L., & Debener, S. (2012). Visual activation of auditory cortex reflects maladaptive plasticity in cochlear implant users. *Brain*, *135*, 555–568.

Saupe, K., Schröger, E., Andersen, S. K., & Müller, M. M. (2009). Neural mechanisms of intermodal sustained selective attention with concurrently presented auditory and visual stimuli. *Frontiers in Human Neuroscience*, *3*, 58.

Schaette, R. (2014). Tinnitus in men, mice (as well as other rodents), and machines. *Hearing Research*, *311*, 63–71.

Schaette, R., Turtle, C., & Munro, K. J. (2012). Reversible induction of phantom auditory sensations through simulated unilateral hearing loss. *PLoS One*, *7*, e35238.

Schnupp, J., Nelken, I., & King, A. (2011). *Auditory neuroscience: Making sense of sound*. Cambridge, MA: MIT Press.

Schröger, E. (1998). Measurement and interpretation of the Mismatch Negativity (MMN). *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *30*, 131–145.

Schröger, E. (2007). Mismatch negativity: a microphone into auditory memory. *Journal of Psychophysiology*, *21*, 138–146.

Schröger, E., SanMiguel, I., & Bendixen, A. (2013). Prädiktive Modellierung in der auditiven Wahrnehmung. In E. Schröger, & S. Koelsch (Hrsg.), *Affektive und Kognitive Neurowissenschaft.* Enzyklopädie der Psychologie (Serie II: Kognition, (Bd. 5, S. 11–45). Göttingen: Hogrefe.

Schröger, E., Bendixen, A., Denham, S. L., Mill, R. W., Böhm, T. M., & Winkler, I. (2014). Predictive regularity representations in violation detection and auditory stream segregation: From conceptual to computational models. *Brain Topography*, *27*, 565–577.

Schröger, E., Marzecová, A., & SanMiguel, I. (2015). Attention and prediction in human audition: a lesson from cognitive psychophysiology. *European Journal of Neuroscience*, *41*, 641–664.

Schwartz, J.-L., Grimault, N., Hupé, J.-M., Moore, B. C. J., & Pressnitzer, D. (2012). Multistability in perception: Binding sensory modalities, an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *367*, 896–905.

Sergeyenko, Y., Lall, K., Liberman, M. C., & Kujawa, S. G. (2013). Age-related cochlear synaptopathy: an early-onset contributor to auditory functional decline. *Journal of Neuroscience*, *33*, 13686–13694.

Shamma, S. A., Elhilali, M., & Micheyl, C. (2011). Temporal coherence and attention in auditory scene analysis. *Trends in Neurosciences*, *34*, 114–123.

Sheridan, C. J., Matuz, T., Draganova, R., Eswaran, H., & Preissl, H. (2010). Fetal magnetoencephalography – achievements and challenges in the study of prenatal and early postnatal brain responses: A review. *Infant and Child Development*, *19*, 80–93.

Shinn-Cunningham, B., & Best, V. (2008). Selective attention in normal and impaired hearing. *Trends in Amplification*, *12*, 283–299.

Skoe, E., & Kraus, N. (2010). Auditory brainstem response to complex sounds: A tutorial. *Ear & Hearing*, *31*, 302–324.

Sussman, E. S. (2007). A new view on the MMN and attention debate: the role of context in processing auditory events. *Journal of Psychophysiology*, *21*, 164–175.

Szalárdy, O., Winkler, I., Schröger, E., Widmann, A., & Bendixen, A. (2013). Foreground-background discrimination indicated by event-related brain potentials in a new auditory multistability paradigm. *Psychophysiology*, *50*, 1239–1250.

Thorne, J., & Debener, S. (2014). Look now and hear what's coming: On the functional role of cross-modal phase reset. *Hearing Research*, *307*, 144–152.

Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 242–248.

Warren, R. M. (1968). Verbal transformation effect and auditory perceptual mechanisms. *Psychological Bulletin*, *70*, 261–270.

Warren, R. M. (1970). Perceptual restoration of missing speech sounds. *Science*, *167*, 392–393.

Warzybok, A., Rennies, J., Brand, T., & Kollmeier, B. (2014). Prediction of binaural speech intelligibility in normal-hearing and hearing-impaired listeners: a psychoacoustically motivated extension. In *Fortschritte der Akustik* (S. 351–352). Berlin/Oldenburg: DEGA.

Wetzel, N., & Schröger, E. (2014). On the development of auditory distraction: A review. *PsyCh Journal*, *3*, 72–91.

Winkler, & Czigler, I. (1998). Mismatch negativity: deviance detection or the maintenance of the 'standard'. *NeuroReport*, *9*, 3809–3813.

Winkler, I, & Schröger, E. (2015). Auditory perceptual objects as generative models: Setting the stage for communication by sound. *Brain & Language*, *148*, 1–22.

Winkler, I., Denham, S. L., & Nelken, I. (2009). Modeling the auditory scene: Predictive regularity representations and perceptual objects. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*, 532–540.

Winkler, I., Denham, S. L., Mill, R., Bőhm, T. M., & Bendixen, A. (2012). Multistability in auditory stream segregation: A predictive coding view. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *367*, 1001–1012.

Zion Golumbic, E. M., Poeppel, D., & Schroeder, C. E. (2012). Temporal context in speech processing and attentional stream selection: A behavioral and neural perspective. *Brain & Language*, *122*, 151–161.

Multisensorische Informationsverarbeitung

Knut Drewing

4.1 Einleitung und Überblick – 76

4.2 Multisensorische Kombination – 77

4.3 Multisensorische Integration – 78

4.3.1 Intersensorische Beeinflussungen – 78

4.3.2 Modelle zur Integration redundanter Information – 79

4.4 Das Korrespondenzproblem – 81

4.4.1 Zeitliche und räumliche Nähe – 82

4.4.2 Semantische und synästhetische Korrespondenzen – 83

4.5 Abgleich zwischen den Sinnen – 84

4.6 Aufmerksamkeit über Sinne hinweg – 86

4.6.1 Räumlich selektive Aufmerksamkeit – 86

4.6.2 Aufmerksamkeit und multisensorische Integration – 87

4.7 Neurophysiologische Grundlagen – 89

4.7.1 Multisensorische Verarbeitung in einzelnen Neuronen – 89

4.7.2 Multisensorische Konvergenzzonen – 90

4.7.3 Multisensorische Verarbeitung in „unisensorischen" Arealen – 91

4.8 Anwendungsbeispiele – 92

4.9 Ausblick – 94

4.10 Weiterführende Informationen – 95

Literatur – 97

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_4

4

Im Blickfang

Multisensorische Sprachwahrnehmung

Unsere verschiedenen Sinne liefern uns Informationen über unterschiedliche Aspekte unserer Umwelt. Wir hören, was eine Person zu uns sagt. Wir sehen, wer mit uns spricht. Wenn diese Person uns berührt, fühlen wir die Berührung auf unserer Haut. Im Alltag scheint es oft, als wären unsere Sinneskanäle voneinander getrennt. Tatsächlich aber wird Information aus den verschiedenen Sinnen in vielfältiger Weise gemeinsam, *multisensorisch*, verarbeitet. Dies ist deutlich zu erkennen, wenn sich Informationen aus verschiedenen Sinnen gegenseitig beeinflussen.

Ein klassisches Beispiel für **intersensorische Beeinflussung** ist der **McGurk-Effekt** (McGurk und McDonald 1976): In einem Video wird das Gesicht einer Person von vorn gezeigt, die eine einzelne Silbe mehrfach ausspricht (Abb. 4.1). Zeitgleich wird eine andere Silbe akustisch präsentiert. Sind die beiden Silben verschieden, so hören wir unter bestimmten Bedingungen eine dritte Silbe. Sehen wir etwa die Mundbewegungen für /ga-ga/ in Kombination mit der akustischen Präsentation /ba-ba/, dann hören die meisten von uns /da-da/. Schließen wir hingegen die Augen, sodass die visuelle Information nicht aufgenommen werden kann, hören wir klar und deutlich /ba-ba/. Der McGurk-Effekt zeigt eindrücklich, wie visuelle Information die Verarbeitung akustischer Information, das Hören, verändern kann. Dabei ist der Effekt unwillkürlich und robust: Weder Wissen um den Unterschied zwischen den beiden Silben noch deren wiederholte gemeinsame Präsentation ermöglichen es, die akustisch präsentierte Silbe ohne visuelle Beeinflussung wahrzunehmen (Rosenblum 2010).

Wahrnehmungsforscher versuchen, u. a. anhand intersensorischer Beeinflussungen, zu verstehen, wie die Verarbeitung der Information aus verschiedenen Sinnen aneinandergekoppelt ist und wie es dem Wahrnehmungssystem gelingt, aus den Informationen aus verschiedenen Sinnen zu einer kohärenten und einheitlichen Interpretation unserer Umwelt zu kommen. Der McGurk-Effekt belegt, dass unsere Sprachwahrnehmung standardmäßig auf Information aus verschiedenen Sinnen zurückgreift. Hinweise dafür, was eine Person gesagt hat, erhalten wir eben nicht nur von unserem Ohr, sondern auch von unserem Auge, und im Alltag stimmen diese Informationen überein. Gerade unter schwierigen Hörsituationen, etwa auf einem Musikkonzert oder bei Personen mit beeinträchtigtem Hörsinn, können zusätzliche visuelle Informationen helfen, das Gesprochene besser zu verstehen (Middelweerd und Plomp 1987). Deren unwillkürliche Einbindung verbessert also im Normalfall unsere Wahrnehmung.

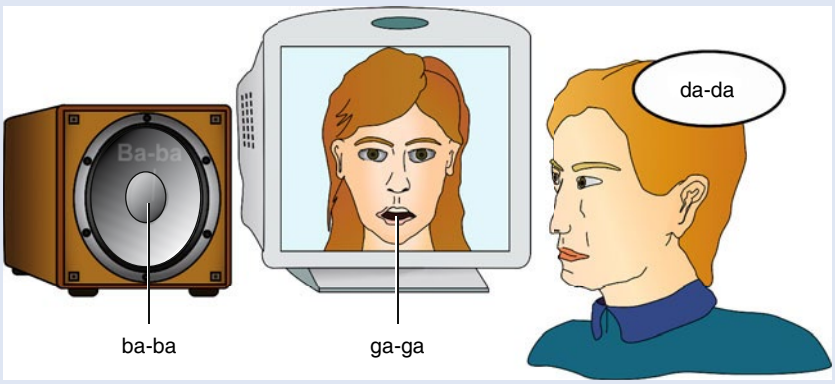


Abb. 4.1 McGurk-Effekt. Dem Mann wird eine Silbe akustisch präsentiert, während er die Mundbewegungen für eine andere Silbe sieht. Er hört eine dritte Silbe. Der Effekt zeigt eindrücklich, dass in der Sprachwahrnehmung auditive und visuelle Information gemeinsam genutzt werden

4.1 Einleitung und Überblick

Zweifellos ist es ein Vorteil, dass wir über mehrere Sinne verfügen. Jeder Sinn ist hoch spezialisiert für bestimmte Reize und Situationen. Das gemeinsame Wirken der Sinne erlaubt uns eine vollständigere und genauere Erfassung der für uns relevanten Aspekte der Umwelt, als es ein einzelner Sinn vermag. Verschiedene Sinne tragen einander ergänzende und auch teils überlappende Informationen zur Wahrnehmung und Handlungssteuerung bei. Eine essenzielle Leistung unseres Wahrnehmungssystems ist es dabei, Informationen von den verschiedenen Sinnen in eine einheitliche und handlungsleitende Repräsentation unserer Umwelt zu transformieren. So nehmen wir beispielsweise problemlos wahr, dass es ein und dieselbe Person ist, die zu uns spricht, ein bestimmtes Aussehen hat, uns berührt und ein bestimmtes Parfüm benutzt. Oder wir verknüpfen den lauten Knall unmittelbar mit dem Auffahrunfall, den wir vor uns sehen.

Beide beispielhaft geschilderten Situationen zeigen, dass Informationen aus verschiedenen Sinnen zum Teil multisensorisch verarbeitet werden. In beiden Situationen *kombinieren* wir ergänzende Aspekte aus verschiedenen Sinnen zu einer gemeinsamen und umfassenderen Repräsentation eines Objekts oder Ereignisses. Wenn wir mit einer anderen Person sprechen, hören wir, was die Person zu uns sagt, und kombinieren dies mit der gefühlten Berührung. Dies erlaubt uns eine bessere Einordnung des Gesprochen. In beiden Situationen gibt es auch überlappende Informationen zwischen den Sinnen, die wir zu einer einheitlichen Wahrnehmung *integrieren*. So integriert unsere Wahrnehmung etwa bei einem Auffahrunfall aus dem Zeitpunkt, an dem wir den Knall hören, und dem Zeitpunkt, an dem wir den Zusammenstoß sehen, einen einzelnen wahrgenommenen Unfallzeitpunkt. Gerade zur Frage, wie wir überlappende, sogenannte **redundante Information**, aus verschiedenen Sinnen integrieren, sind in den letzten Jahren Forschung und Theoriebildung deutlich vorangeschritten. Multisensorische Kombination und Integration setzen dabei voraus, dass erkannt wird, welche Information aus den verschiedenen Sinnen zu demselben Ereignis in der Welt gehören und aufeinander bezogen werden sollten. Dieses **Korre-**

spondenzproblem ist nicht trivial, denn in natürlichen Umwelten liegt eine Vielzahl von Informationen gleichzeitig an jedem unserer Sinne an. In einer Menschenmenge kann das Problem darin bestehen, Gesprochenes und Sprecher einander zuzuordnen. Unser Wahrnehmungssystem macht sich für solche Zuordnungen strukturelle und wohl auch semantische Korrespondenzen zwischen den zusammengehörigen Informationen in den verschiedenen Sinnen zunutze. Eine weitere Voraussetzung der Verarbeitung redundanter Information aus verschiedenen Sinnen ist, dass diese in der Wahrnehmung auf einer gemeinsamen Skala in Bezug zur Umwelt abgebildet ist. Beispielsweise sollte ein Objekt für unsere Augen etwa genauso groß aussehen, wie es sich mit unseren Händen anfühlt. Nur dann kann die Information aus verschiedenen Sinnen sinnvoll miteinander integriert oder verglichen werden. Wie unser Wahrnehmungssystem für einen entsprechenden Abgleich der Information zwischen den Sinnen sorgt, wurde vielfach mit Adaptationsparadigmen untersucht.

Auch Aufmerksamkeit spielt für das Zusammenspiel der Sinne eine wichtige Rolle. Eindrücke in einem Sinn können die Aufmerksamkeit für einen anderen Sinn auf das zugrunde liegende Ereignis lenken, etwa wenn wir dort hinschauen, wo wir einen lauten Knall gehört haben. Aufmerksamkeit steht aber auch in Wechselbeziehungen zur multisensorischen Verarbeitung: In manchen Fällen ist Aufmerksamkeit erforderlich, damit multisensorische Verarbeitung stattfindet. In anderen Fällen zieht umgekehrt ein multisensorisches Ereignis besonders effektiv Aufmerksamkeit auf sich, etwa wenn Kinder in der Schule beim Melden gleichzeitig hörbar mit den Fingern schnipsen.

Im Gehirn wurde multisensorische Verarbeitung bis vor wenigen Jahren ausschließlich in höheren corticalen Arealen verortet, in denen stark vorverarbeitete Information aus vermeintlich unisensorischen Arealen konvergiert. Neuere Befunde zeigen jedoch, dass auch traditionell als unisensorisch angesehene Areale durch Informationen in anderen Sinnen beeinflusst werden. Hier deutet sich ein möglicher Paradigmenwechsel in der Vorstellung vom generellen Aufbau des Cortex an. Am Ende des Kapitels werden drei Beispiele berichtet, in denen Erkenntnisse zur multisensorischen Informationsverarbeitung in klinischen und technischen Kontexten angewandt werden.

4.2 Multisensorische Kombination

Der Großteil der Forschung zur multisensorischen Informationsverarbeitung hat in den letzten zwei Dekaden stattgefunden, und Begrifflichkeiten in diesem Feld sind zum Teil noch umstritten. Hier soll den Empfehlungen von Stein et al. (2010) gefolgt und jegliche Interaktion zwischen den Sinnen mit dem Oberbegriff **multisensorische Verarbeitung** bezeichnet werden. Dabei wird gemäß Ernst und Bülthoff (2004) zwischen **multisensorischer Kombination** und **multisensorischer Integration** (▶ Abschn. 4.3) unterschieden. Sensorische Kombination bezeichnet dann diejenigen Prozesse, bei denen *einander ergänzende, nicht überlappende* Informationen zu einer gemeinsamen, validen und unter Umständen mehrdimensionalen Repräsentation von Objekten oder Ereignissen miteinander verknüpft werden. Dazu zählen Prozesse, die mehrere unterschiedliche Aspekte wie das Aussehen und die Stimme einer Person in einer gemeinsamen Repräsentation zusammenfassen. Dazu zählen aber auch Prozesse, bei denen Information aus einem Sinn zur Interpretation oder Ergänzung von Information aus einem anderen Sinn herangezogen wird.

Ein Beispiel für die Kombination nicht überlappender Information ist die **Disambiguierung**, bei der Information aus einem Sinn erst durch Information aus einem anderen Sinn eindeutig wird. Wenn wir etwa in einem Zug aus dem Fenster schauen, sind wir manchmal nicht sicher, ob wir uns bewegen oder ob sich der Zug neben uns bewegt. Dies liegt daran, dass unser visuelles System nur relative Bewegungsinformation liefert: Wenn sich das Bild des Zuges auf dem Auge bewegt, kann das an der Bewegung des Zuges liegen oder an der Eigenbewegung des Körpers und damit auch des Auges (▶ Kap. 2). Nach kurzer Zeit meldet jedoch unser Gleichgewichtsorgan im Ohr, ob wir uns selbst bewegen. Wir sehen nun auch, ob sich unser oder der andere Zug bewegt. In diesem Fall erlaubt die *vestibuläre* Information aus dem Gleichgewichtssinn eine eindeutige Interpretation der visuellen Information: Die vestibuläre Information disambiguiert die visuelle Information.

Ein anderes Beispiel für multisensorische Kombination ist die *Kooperation* zwischen Sinnen (Ernst und Bülthoff 2004), womit die Nutzung komplementärer Information aus verschiedenen Sinnen gemeint ist. Wenn wir etwa die Form von Objekten lernen, die für uns neu sind, so zeigt sich – wenig erstaunlich –, dass wir visuell das Objekt am besten von der Seite erlernen, die uns zugewandt ist, und es auch am besten von dieser Seite wiedererkennen können. Haptisch, also mit den Händen tastend, können wir hingegen am besten die Rückseite des Objekts erlernen und wiedererkennen, zumindest bei fixierten, etwa handgroßen Objekten. Erkunden wir solche Objekte dann sowohl visuell als auch haptisch, nehmen wir mit den beiden Sinnen komplementäre Information über die Objektform auf und erlernen die Form der Objekte so am besten (Newell et al. 2003).

Wie aus den Beispielen ersichtlich, kann sich Information aus verschiedenen Sinnen in unterschiedlicher Weise ergänzen und miteinander kombiniert werden. Im Gegensatz dazu bezeichnet der Begriff „multisensorische Integration" die gemeinsame Verarbeitung überlappender, redundanter Information aus verschiedenen Sinnen. Redundante Information bildet dabei in verschiedenen Sinnen dieselbe Eigenschaft eines Objekts oder Ereignisses ab. ◘ Abb. 4.2 macht den Unterschied zwischen Kombination und Integration deutlich: Verschiedene Sinne geben Auskunft darüber, an welchem Ort die Frau an die Tür klopft: Prinzipiell hört, sieht und fühlt sie, wo sie klopft. Es handelt sich um redundante Information, die über die Sinne integriert werden kann. Allerdings muss die visuelle und auditive Ortsinformation dazu zunächst in dasselbe körperzentrierte **Koordinatensystem** transformiert werden, in der die propriozeptive Information vorliegt. Denn aus der visuellen Information alleine lässt sich nicht erkennen, wo die klopfende Hand in Bezug zum Körper positioniert ist, sondern nur, wo die Hand auf der Netzhaut des Auges abgebildet wird (augenzentriertes Koordinatensystem). Die Position auf der Netzhaut variiert aber mit Augen- und Kopfstellung. Ähnliches gilt für die auditive Information. Daher müssen die visuellen und auditiven Ortsinformationen erst u. a. mit

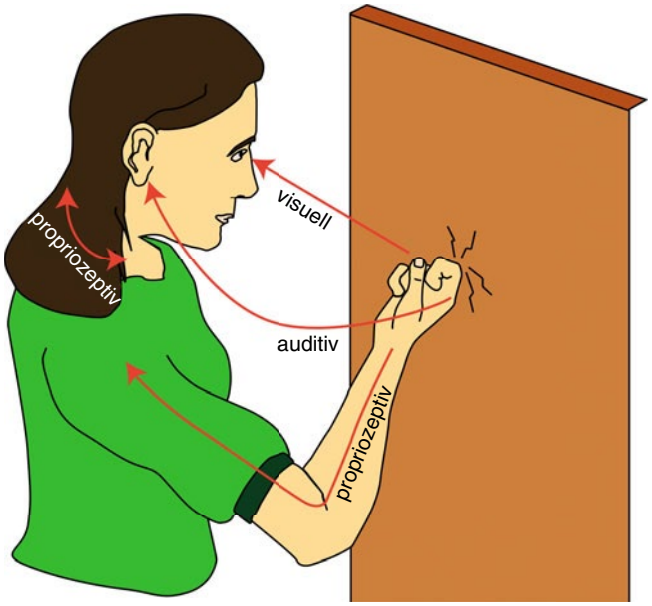


Abb. 4.2 Die Frau sieht, hört und fühlt, wo sie klopft. Sie hat also redundante visuelle, auditive und propriozeptive Ortsinformation über das Klopfereignis. Im Prinzip kann diese Information durch multisensorische Integration zu einer Gesamtwahrnehmung des Ortes verrechnet werden. Dazu muss die Information aus den drei Sinnen aber zunächst in demselben Koordinatensystem codiert sein, etwa in Referenz zum Körper der Frau. Hier ist die multisensorische Kombination auditiver und visueller Ortsinformation mit propriozeptiver Information erforderlich. Auditive Ortsinformation alleine codiert z. B. den Ort eines Ereignisses nur relativ zum Kopf. Erst in Kombination mit der propriozeptiv wahrgenommenen Kopfstellung ergibt sich Ortsinformation relativ zum Körper. (Adaptiert nach Ernst und Bülthoff 2004)

propriozeptiver Information über die momentane Kopfstellung kombiniert werden, damit die Informationen aus den drei Sinnen in demselben körperzentrierten Koordinatensystem vorliegt. Durch diese Kombination ergänzender Informationen wird dann die Integration der redundanten Information ermöglicht (Ernst und Bülthoff 2004).

4.3 Multisensorische Integration

Wie wird redundante Information aus verschiedenen Sinnen, die über ein und dieselbe Eigenschaft der Umwelt Auskunft gibt, in der Wahrnehmung genutzt? Wenn wir ein Objekt in den Händen halten, dessen Größe wir gleichzeitig sehen und fühlen können, welche Information verwenden wir dann, um die Größe des Objekts zu beurteilen: nur die gesehene Größe, nur die gefühlte Größe oder beide gemeinsam? Intersensorische Beeinflussungen, wie der eingangs beschriebene McGurk-Effekt (McGurk und McDonald 1976), können Aufschluss darüber geben, inwieweit Informationen aus verschiedenen Sinnen gemeinsam verwendet werden. Beim McGurk-Effekt zeigt sich eine gemeinsame Nutzung und Verrechnung der auditiven mit der visuellen Information, denn das auditiv wahrgenommene Wahrnehmungsresultat (/da-da/) ergibt sich weder aus der auditiven Information (/ba-ba/) noch aus der visuellen Information (/ga-ga/) alleine. Eine Vielzahl weiterer intersensorischer Beeinflussungen zeigt eindrücklich, wie redundante multisensorische Information in der Wahrnehmung miteinander verrechnet wird (▶ Abschn. 4.3.1), und zwar nach Prinzipien, die theoretisch inzwischen recht gut beschrieben sind (▶ Abschn. 4.3.2).

4.3.1 Intersensorische Beeinflussungen

Intersensorische Beeinflussungen sind Phänomene, bei denen die Wahrnehmung in einem Sinn durch Information aus einem anderen Sinn beeinflusst wird. Neben dem McGurk-Effekt ist der **Bauchrednereffekt** (auch Ventriloquismuseffekt genannt) ein vielfach untersuchtes Beispiel. Bauchredner sprechen mit minimalen Lippenbewegungen und bewegen dabei den Mund und Kopf einer Puppe in einer Weise, die synchron und passend zur gesprochenen Sprache ist. Die Betrachter haben den Eindruck, dass die Puppe spricht. Wie beim McGurk-Effekt beeinflusst auch beim Bauchrednereffekt visuelle Information die Verarbeitung akustischer Information, hier hinsichtlich des wahrgenommenen Ortes des Schalls. Im Alltag erleben wir den Bauchrednereffekt beim Fernsehen. Wir lokalisieren die Quelle dessen, was wir hören, bei sichtbaren Ereignissen auf dem Bildschirm, etwa bei verschiedenen Sprechern. Die tatsächliche Schallquelle, der Lautsprecher, befindet sich aber neben dem Bildschirm. Dabei ist die Zuordnung des Schalls beim Fernsehen flexibel. Schall aus demselben Lautsprecher wird bei verschiedenen Ereignissen lokalisiert, je nachdem welches Ereignis gerade am besten mit dem Gehörten korrespondiert. Experimentell wird der Bauchrednereffekt mittels vereinfachten visuellen und auditive Reizen, etwa Lichtblitzen und gleichzeitig dargebotenen kurzen Tönen, untersucht. Visuelle und auditive Reize werden dabei an leicht unterschiedlichen Orten dargeboten, und der Einfluss des visuellen Reizes auf die Lokalisation des auditiven Reizes wird untersucht. Entsprechend den Alltagsbeobachtungen ist das Urteil über den Ort des auditiven Reizes hier regelmäßig deutlich zum Ort des visuellen Reizes hin verschoben. Allerdings findet sich bei der experimentellen Variante des Bauchrednereffekts nicht nur ein starker Einfluss des Ortes des visuellen Reizes auf die Lokalisierung des auditiven Reizes, sondern auch ein schwächerer Einfluss des Ortes des auditiven Reizes auf die Lokalisierung des visuellen Reizes (z. B. Bertelson und Radeau 1981). Hier zeigt sich ein inzwischen vielfach beobachtetes Prinzip bei intersensorischen Beeinflussungen: Meist beeinflussen sich Informationen in den verschiedenen Sinnen *gegenseitig*, wenn auch unterschiedlich stark. Dabei hat aber keineswegs immer der visuelle Sinn den stärkeren Einfluss, wie manche Forscher früher dachten (z. B. Rock und Victor 1964).

Shams et al. (2000) berichten etwa in einer anderen Wahrnehmungsaufgabe einen besonders starken Einfluss auditiver auf visuelle Information. Bei der **Shams-Illusion** beeinflusst die Anzahl auditiver Reize die Anzahl gleichzeitig gesehener Lichtblitze. Präsentiert werden für wenige Millisekunden ein heller Kreis auf schwarzem Grund und gleichzeitig kein, ein, zwei, drei oder vier Töne von ebenfalls sehr kurzer Dauer. Hören Versuchspersonen keinen oder nur einen Ton, so berichten sie korrekt, nur einen Lichtblitz wahrgenommen zu haben. Bei zwei oder mehr Tönen berichten die Versuchspersonen allerdings von zwei und teils sogar mehr Lichtblitzen. Umgekehrt beeinflusst die Anzahl an

Lichtblitzen die Anzahl berichteter Töne wenig (Wozny et al. 2008). Auch bei Einbezug taktiler Reize zeigen sich ähnliche Illusionen (Bresciani et al. 2008; Bresciani et al. 2005). Die Anzahl kurzer „Schläge" an der Fingerkuppe beeinflusst die Anzahl gesehener Lichtblitze, und die Anzahl gehörter Töne beeinflusst die Anzahl gefühlter Schläge. Intersensorische Beeinflussungen finden also für verschiedene Sinneskombinationen statt. Dabei wird das Ausmaß gegenseitiger Beeinflussungen durch die konkreten Darbietungsbedingungen moderiert. Unter normalen Bedingungen beeinflusst die Anzahl gefühlter Schläge kaum die Anzahl gehörter Töne. Dies geschieht jedoch, wenn die Töne in Rauschen eingebettet und nicht gut zu hören sind.

Einen wichtigen Versuch, die Beobachtungen zusammenzufassen, liefert die Hypothese der Modalitätsangemessenheit (*modality appropriateness*) von Welch und Warren (1980). Nach dieser Hypothese werden Diskrepanzen (also Abweichungen) zwischen redundanten Informationen in zwei Sinnen, etwa Diskrepanzen zwischen der Anzahl gesehener und gehörter Ereignisse, zugunsten des für diese Information „angemesseneren" oder präziseren Sinnes aufgelöst. Dieser Sinn beeinflusst die Wahrnehmung dann stärker als der andere Sinn und ist intersensorischen Beeinflussungen weniger ausgesetzt. Das wäre bei räumlichen Aufgaben, wie der Lokalisation von Reizen, typischerweise der Sehsinn, während bei zeitlichen Aufgaben eher der auditive Sinn dominieren sollte (Ernst und Bülthoff 2004). Allerdings greift diese Hypothese zu kurz, da, wie wir gesehen haben, nicht nur die Art der Wahrnehmungsaufgabe, sondern auch die konkreten Darbietungsbedingungen für das Ausmaß der intersensorischen Beeinflussungen eine wichtige Rolle spielen. Die Einflüsse eines einzelnen Sinnes hängen also nicht von der „übergreifenden Angemessenheit" des Sinnes für die Wahrnehmungsaufgabe ab. Gängige quantitative Modelle zur multisensorischen Integration betrachten stattdessen die Präzision der aktuell durch ein Sinnessystem verarbeiteten Information als entscheidend, wie sie sich aus dem Zusammenspiel von Aufgabe, Sinneseigenschaften und Darbietungsbedingungen ergibt. Diese Modelle werden in ▶ Abschn. 4.3.2 dargestellt.

Zunächst soll jedoch noch ein bis vor wenigen Jahren kontrovers diskutierter Punkt geklärt werden. Woraus können wir schließen, dass intersensorische Beeinflussungen tatsächlich auf Effekten in der *perzeptuellen* Verarbeitung beruhen und nicht etwa auf Effekten in *postperzeptuellen* Prozessen der Beurteilung? Hören Versuchspersonen z. B. beim Bauchrednereffekt den Schallreiz tatsächlich an einem Ort nahe dem räumlich abweichenden Lichtreiz, oder kommt dieser Effekt erst während der Beurteilung des Ortes zustande? Den Versuchspersonen wird zwar gesagt, dass der visuelle Reiz irrelevant ist. Aber sie könnten sich trotzdem Gedanken über diesen visuellen Reiz machen, die in ihre Beurteilung einfließen, und sei es nur, um den Versuchsleitern einen Gefallen zu tun. Wichtig ist es daher, intersensorische Beeinflussungen in Situationen zu untersuchen, in denen Diskrepanzen zwischen den Sinnen nicht bemerkt werden (Bertelson und Aschersleben 1998). Wenn die Diskrepanz nicht bemerkt werden kann, etwa weil sie sehr klein ist, lassen sich willentliche Antworttendenzen als Erklärung für Beeinflussungen ausschließen. Andere Studien haben mit den Methoden der Signalentdeckungstheorie (▶ Kap. 2) die Beiträge von Wahrnehmung (Sensitivität) und postperzeptuellen Antworttendenzen zu intersensorischen Beeinflussungen voneinander getrennt, neurophysiologische Effekte intersensorischer Beeinflussungen in frühen Wahrnehmungsarealen im Cortex nachgewiesen oder gezeigt, dass intersensorische Beeinflussungen sich nicht dadurch verändern lassen, dass den Versuchspersonen ihre intersensorisch beeinflussten „Fehlurteile" zurückgemeldet werden (Rosenthal et al. 2009; Watkins et al. 2006). Für die hier behandelten intersensorischen Beeinflussungen und viele weitere legen die Ergebnisse heute eine Basis in Wahrnehmungsprozessen nahe.

4.3.2 Modelle zur Integration redundanter Information

Im Bereich der Wahrnehmungspsychologie sind in den letzten Jahren Modelle des *idealen Beobachters* in den Fokus wissenschaftlicher Betrachtung gerückt. Diese Modelle beschreiben, wie gut eine Aufgabe, z. B. eine Wahrnehmungsaufgabe, auf der Basis der verfügbaren Information bei *idealer* Informationsverarbeitung gelöst werden kann (Geisler 2003). Die Modelle sind probabilistisch, denn die Information wird als begrenzt präzise angenommen. Die ideale Lösung der Aufgabe stellt dann eine Obergrenze für die Leistung des informationsverarbeitenden Systems dar, die mit der tatsächlichen Leistung des Wahrnehmungssystems verglichen werden kann.

Innerhalb des Ansatzes des idealen Beobachters wurden Modelle für die Integration redundanter Information in einen einheitlichen Wahrnehmungseindruck formuliert. Auch hier ist die Annahme, dass jede einzelne Sinnesinformation über eine Eigenschaft unserer Umwelt von begrenzter Präzision ist. Wenn wir z. B. die Größe eines bestimmten Objekts erfühlen, dann sind wir unsicher über die genaue Größe, und unsere haptischen Schätzer der Größe werden bei mehrfachen Schätzversuchen leicht variieren. Dasselbe gilt für visuelle Größenschätzungen. Die Modelle beschreiben nun, wie mehrere begrenzt präzise Sinnesinformationen, etwa gefühlte und gesehene Größe, miteinander integriert werden sollten, damit eine möglichst präzise Gesamtschätzung der Eigenschaft resultiert (Landy, Maloney, Johnston und Young 1995): Dazu wird zunächst, ausgehend von jeder einzelnen Information, die Eigenschaft separat geschätzt. Im Beispiel werden also zunächst ein haptischer und ein visueller Größenschätzer erstellt. Um zu einem Wahrnehmungseindruck zu gelangen, werden diese separaten Schätzer zu einem Gesamtschätzer integriert. Dies erfolgt durch gewichtete Mittelung. Jeder einzelne Schätzer $\hat{s}_i$ bekommt ein Gewicht w_i, z. B. 60 %, mit dem er zum Wahrnehmungseindruck P beiträgt:

$$P = \sum_i w_i \hat{s}_i \qquad \text{mit} \sum_i w_i = 1; \quad 0 \leq w_i \leq 1.$$

Die Gewichte aller Schätzer summieren sich zu 100 %, und jedes einzelne Gewicht liegt zwischen 0 und 100 %. Das Gewicht jedes einzelnen Schätzers richtet sich nach dessen **Präzision**. Je präziser der Schätzer ist, desto mehr sollte er zum Wahrnehmungseindruck beitragen. Zum Beispiel könnte visuell das Objekt

als ungefähr 10 cm lang und sicher zwischen 9 und 11 cm lang geschätzt werden, während die haptische Schätzung ebenfalls 10 cm ergibt, aber mit einem Unsicherheitsbereich zwischen 8 und 12 cm (natürlich arbeitet das Wahrnehmungssystem nicht mit der Einheit Zentimeter). Dann würde die gefühlte Länge weniger zum Gesamteindruck beitragen als die gesehene, da sie weniger präzise ist. In einer anderen Situation, etwa wenn wir das Objekt nur im Mondlicht sehen, könnte die Unsicherheit in der gesehenen Länge größer sein, und der visuelle Beitrag zum Wahrnehmungseindruck wäre kleiner. Die Gewichtung gemäß Präzision findet statt, wenn alle Einzelschätzer einander ähnlich sind, also im obigen Beispiel gefühlte und gesehene Länge ungefähr übereinstimmen, also auch wenn die gefühlte Länge vielleicht ein paar Millimeter größer oder kleiner ist als die gesehene. Die Integration der Schätzer mittelt kleinere Fehler aus, die Gewichtung gemäß Präzision sorgt dafür, dass der Gesamteindruck seinerseits besonders präzise ist. Allerdings kann es auch vorkommen, dass ein einzelner Schätzer stark von allen anderen verfügbaren Schätzern abweicht. Dann bekommt er gemäß Modell ein sehr geringes Gewicht oder wird komplett ignoriert, denn der abweichende Schätzer ist vermutlich mit einem großen Fehler behaftet. Dieses Verhalten macht den Wahrnehmungseindruck *robust* gegenüber Ausreißern. Die dargestellten Prinzipien der Integration werden insgesamt als **robuste schwache Fusion** bezeichnet. Sie wurden im Feld des maschinellen Sehens entwickelt und von dort zunächst auf die Frage übertragen, wie Menschen die vielen verschiedenen visuellen Hinweisreize zur Tiefe (▶ Kap. 2) zu einem Gesamteindruck der Tiefe zusammenfügen (Landy et al. 1995).

Für die empirische Überprüfung dieser Prinzipien wurde die **Perturbationstechnik** entwickelt, mittels derer die Gewichtungen separater Schätzer genau berechnet und dann für verschiedene Präzisionsbedingungen verglichen werden können (Landy et al. 1995). Bei dieser Technik werden künstliche Objekte konstruiert, die verschiedenen Sinnen leicht voneinander abweichende Information über eine Objekteigenschaft liefern. Zum Beispiel kann ein Objekt durch eine Linse etwas größer aussehen, als es sich anfühlt. Die Diskrepanzen zwischen den Informationen sollten so klein sein, dass sie von den Versuchspersonen nicht bemerkt werden können (▶ Abschn. 4.3.1). Kleine Diskrepanzen entsprechen auch dem Normalfall in natürlichen Situationen, wo verschiedene Einzelschätzer zwar wegen der begrenzten Präzision leicht voneinander abweichen können, aber nicht gänzlich voneinander verschieden sind. Gemessen wird dann, wie groß das multisensorisch definierte Objekt wahrgenommen wird. Die wahrgenommene Größe P wird z. B. in Bezug gesetzt zur nur gesehenen Größe $\hat{s}_v$ und zur nur gefühlten Größe $\hat{s}_h$. Entspricht die wahrgenommene Größe der gesehenen Größe, so ist das visuelle Gewicht $w_v = 100\,\%$ und das haptische Gewicht $w_h = 0\,\%$. Entspricht sie der gefühlten Größe, so ist das visuelle Gewicht 0 % und das haptische Gewicht 100 %. In der Regel liegt die wahrgenommene Größe aber zwischen gesehener und gefühlter Größe, und die Gewichte lassen sich wie folgt berechnen (Drewing und Kaim 2009):

$$w_v = \frac{P - \hat{s}_h}{\hat{s}_v - \hat{s}_h}, \; w_h = \frac{P - \hat{s}_h}{\hat{s}_h - \hat{s}_v}.$$

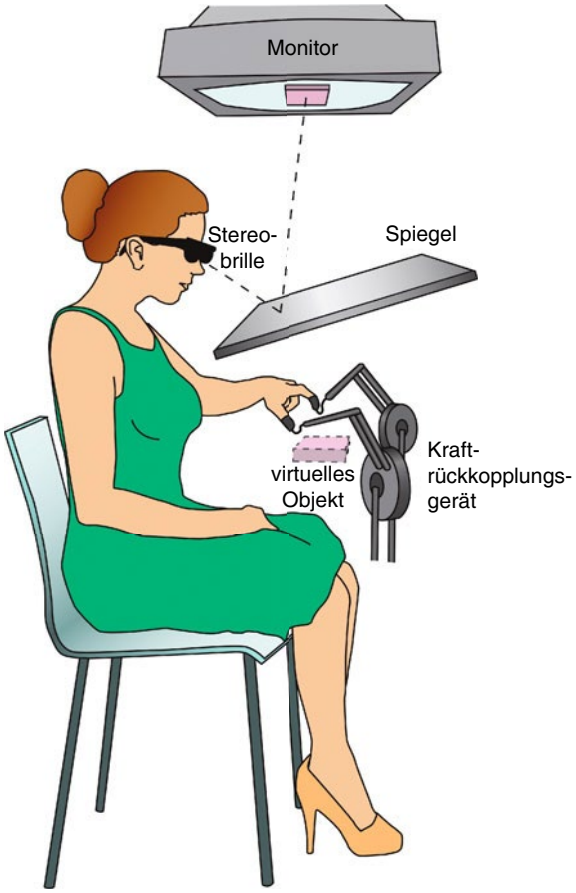


Abb. 4.3 Versuchsaufbau zur Darbietung virtueller dreidimensionaler visuohaptischer Reize. Visuelle Reize werden stereoskopisch dargeboten und über einen Spiegel und eine Stereobrille betrachtet. Sie erscheinen an demselben Ort wie die haptischen Reize. Haptische Reize werden mittels zwei Kraftrückkopplungsgeräten an Daumen und Zeigefinger dargeboten. Die Geräte simulieren Kräfte, die beim Berühren von Objekten entstehen. (Adaptiert nach Ernst und Banks 2002)

Für die Integration multisensorischer Information wurden die Prinzipien der schwachen Fusion sehr elegant von Ernst und Banks (2002) überprüft. Die Forscher untersuchten, wie visuelle mit haptischer Größeninformation integriert wird. Sie nutzten einen Versuchsaufbau, der es erlaubt, dreidimensionale *virtuelle* sichtbare und fühlbare Reize an demselben Ort darzubieten (Abb. 4.3). Die sichtbaren Reize wurden stereoskopisch (▶ Kap. 2) auf einem Bildschirm dargeboten und über einen Spiegel betrachtet. Die gefühlten Reize wurden am scheinbaren Ort der visuellen Reize von Kraftrückkopplungsgeräten produziert. Diese Geräte sind mit den Fingern (in diesem Fall je eins mit Daumen und Zeigefinger) verbunden und simulieren die Kräfte, die beim Berühren eines Objekts entstehen.

Die Forscher bestimmten zum einen, *wie präzise* die Länge von virtuellen Quadern rein haptisch, rein visuell und mit beiden Sinnen gleichzeitig beurteilt werden kann. In jedem Versuchsdurchgang wurden nacheinander zwei Quader dargeboten, und die Aufgabe war, den längeren Quader zu benennen. Mit der Konstanzmethode (▶ Kap. 2) maßen die Forscher die visuellen, haptischen und visuohaptischen Unterschiedsschwellen für die Quaderlänge. Die Unterschiedsschwellen geben an, wie sehr die zwei Quader sich in der Länge unterscheiden müssen, damit Ver-

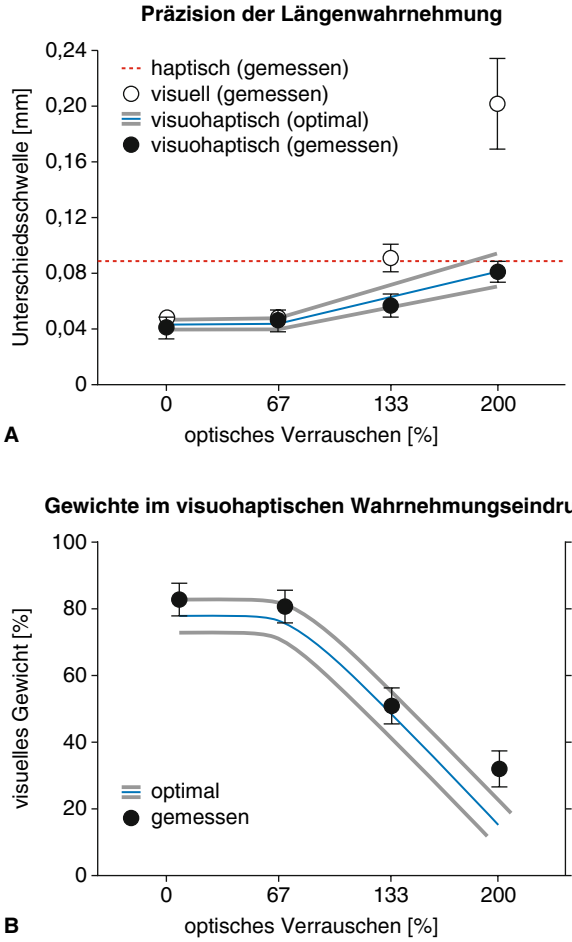


Abb. 4.4 Daten aus dem Experiment von Ernst und Banks (2002) zur Integration visueller und haptischer Längeninformation. Im Experiment wurde die Qualität visueller Information in vier Stufen (optisches Verrauschen) manipuliert. Gemessen wurden rein visuelle, rein haptische und visuohaptische Unterschiedsschwellen (**A**) und die Gewichte der visuellen und haptischen Information in der visuohaptischen Wahrnehmung (**B**). Kleinere Unterschiedsschwellen bedeuten eine größere Präzision der Wahrnehmung, und visuelle und haptische Gewichte addieren sich zu 100 %. Die optimalen visuohaptischen Unterschiedsschwellen und Gewichte (blaue Linien mit weiß-grauen Konfidenzintervallen) wurden aus den rein visuellen und haptischen Schwellen vorhergesagt. Sie entsprechen den gemessenen Werten. Dieses Ergebnis bestätigt die Prinzipien optimaler Integration. (Adaptiert nach Ernst und Banks 2002)

suchspersonen zu einem bestimmten Prozentsatz korrekt den längeren identifizieren können. Sie sind ein Maß für die Präzision der Längenwahrnehmung. Zum anderen nutzten die Autoren in der visuohaptischen Bedingung die *Perturbationstechnik*: Einer der beiden Quader sah etwas länger oder kürzer aus, als er sich anfühlte. Die wahrgenommene Länge des Quaders mit diskrepanter visuohaptischer Längeninformation ergab sich als Punkt subjektiver Gleichheit zu Vergleichsquadern mit konsistenter Längeninformation ebenfalls aus der Konstanzmethode. Aus dieser wahrgenommenen Länge wurden das visuelle und haptische Gewicht im Gesamteindruck berechnet.

Im Experiment gab es vier verschiedene Qualitätsstufen der visuellen Information, die durch mehr oder weniger starkes „optisches Verrauschen" der visuell präsentierten Quader definiert wurden. Die Ergebnisse in den Unterschiedsschwellen (Abb. 4.4A) zeigen, dass die rein visuelle Präzision bei bester visueller Qualität größer ist als die rein haptische Präzision (kleinere Unterschiedsschwelle), aber mit geringerer visueller Qualität die haptische dann unterschreitet. Die Gewichte (Abb. 4.4B) folgen diesem Verhältnis: Das visuelle Gewicht im Gesamteindruck ist bei bester visueller Qualität größer als das haptische und nimmt dann mit abnehmender visueller Qualität ab. Die Gewichtung richtet sich also, entsprechend den Prinzipien der schwachen Fusion, nach der Präzision der Schätzer.

Das Vorgehen von Ernst und Banks (2002) zeichnet sich nun dadurch aus, dass aus den Unterschiedsschwellen rein visueller Schätzer und den Unterschiedsschwellen rein haptischer Schätzer sogar *optimale* Gewichte ($w_{\mathrm{opt},j}$) sowie die dazugehörige *optimale* visuohaptische Unterschiedsschwelle ($\sqrt{2}\sigma_{\mathrm{opt},P}$) mathematisch exakt vorhergesagt wurden. Optimal sind die Gewichte, wenn sie bei gegebener Präzision unisensorischer Schätzer die Präzision der multisensorischen Wahrnehmung maximieren, also mit möglichst kleinen multisensorischen Unterschiedsschwellen einhergehen. Die exakte Berechnung erfolgt, unter gewissen mathematischen Zusatzannahmen, aus den Varianzen σ_i^2 der unisensorischen Schätzer, die sich ihrerseits aus den visuellen und haptischen Unterschiedsschwellen ($\sqrt{2}\sigma_i$) bestimmen lassen:

$$w_{\mathrm{opt},j} = \frac{\frac{1}{\sigma_j^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad \sigma^2_{\mathrm{opt},P} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}.$$

Abb. 4.4 zeigt, dass die mit der Perturbationstechnik gemessenen Gewichte den optimalen Gewichten entsprechen, ebenso wie die gemessenen visuohaptischen Unterschiedsschwellen den vorhergesagten optimalen Unterschiedsschwellen entsprechen. Damit belegt dieses Experiment, dass Menschen in der Lage sind, Informationen aus verschiedenen Sinnen, nicht nur gemäß den Prinzipien der schwachen Fusion, sondern sogar optimal zu integrieren.

Eine Reihe weiterer Experimente bestätigt die Prinzipien **optimaler Integration** für viele multisensorische Situationen, z. B. für die multisensorische Wahrnehmung des Ortes eines audiovisuellen Ereignisses (Bauchrednereffekt), die visuell-taktil-auditorische Wahrnehmung von Ereignisanzahlen (Shams-Illusion) oder die propriozeptiv-visuelle Wahrnehmung der Bewegung der eigenen Hand (Alais und Burr 2004; Bresciani et al. 2008; van Beers et al. 1999). Es gibt aber auch Situationen, für die die Prinzipien optimaler Integration nicht im Detail bestätigt wurden, sodass der genaue Gültigkeitsbereich noch intensiv diskutiert wird (z. B. Cellini et al. 2013; Rosas et al. 2007).

4.4 Das Korrespondenzproblem

Die multisensorische Verarbeitung von Information setzt voraus, dass erkannt wird, welche Informationen aus den verschiedenen Sinnen zu demselben Ereignis in der Umwelt gehören und miteinander integriert oder kombiniert werden sollten. Dieses Problem wird als Korrespondenzproblem bezeichnet, analog zum Problem der Zuordnung korrespondierender Bildpunkte in beiden Augen beim Stereosehen (▶ Kap. 2). Das Problem ist

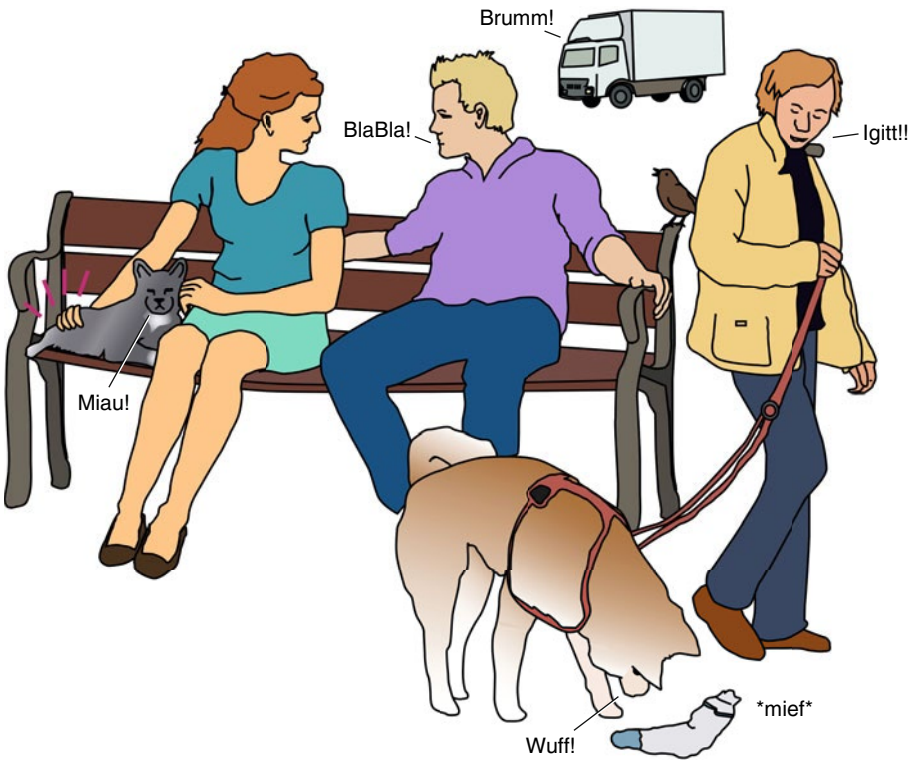


Abb. 4.5 In natürlichen Umwelten liegt eine Vielzahl von Reizen an jedem unserer Sinne an. Das Korrespondenzproblem besteht darin zu erkennen, welche Informationen aus den verschiedenen Sinnen zu demselben Ereignis oder Objekt gehören und daher multisensorisch verarbeitet werden sollten

nicht trivial, denn in natürlichen Umwelten liegt eine Vielzahl von Reizen an jedem unserer Sinne an. Nach welchen Kriterien wird z. B. in Abb. 4.5 bestimmt, welche der sprechenden Personen welche Wörter gesagt hat oder welches sichtbare Ereignis in der Umgebung gerade das laute Geräusch verursacht hat? Unter welchen Umständen trifft unser Wahrnehmungssystem – zumindest implizit – die Annahme, dass Informationen aus verschiedenen Sinnen die gleiche Ursache zugrunde liegt? Die Forschung zeigt, dass hier viele verschiedene Faktoren eine Rolle spielen (z. B. Welch und Warren 1980). Wichtige Faktoren auf der Reizseite sind die zeitliche und räumliche Nähe der sensorischen Information in den verschiedenen Sinnen sowie Ähnlichkeiten in der raumzeitlichen Struktur, wie etwa beim gleichzeitigen Beobachten und Hören einer Sequenz von Trommelschlägen. Aber auch eher kognitive Faktoren, wie die semantische Nähe der Informationen, Erwartungen oder Vorwissen, können die wahrgenommene Zusammengehörigkeit beeinflussen. ▶ Abschn. 4.4.1 und 4.4.2 werden sich mit einigen dieser Faktoren beschäftigen.

4.4.1 Zeitliche und räumliche Nähe

Wenn an verschiedenen Sinnen gleichzeitig Reize anliegen, die von demselben Ort in der Umwelt stammen, so ist dies ein starker Hinweis, dass die Reize dieselbe Ursache haben. Die Frau in Abb. 4.5 hört ein Schnurren und fühlt gleichzeitig eine Vibration an ihrer rechten Hand, die beide bei der Katze verortet sind, und kann diese beiden Reize entsprechend in Zusammenhang bringen.

Die *zeitliche Nähe* von Reizen in verschiedenen Sinnen fördert deren gemeinsame multisensorische Verarbeitung, solange die Reize in einem begrenzten gemeinsamen Zeitfenster liegen. Die Reize müssen also nicht exakt gleichzeitig sein, damit sie gemeinsam verarbeitet werden. Aber ab zeitlichen Abständen von ca. 100 ms oder mehr zeigt sich in Studien in vielen Fällen nur noch eine reduzierte oder gar keine multisensorische Verarbeitung der Reize. Dies gilt etwa für das Antwortverhalten multisensorischer Neurone (▶ Abschn. 4.7) oder für das Ausmaß verschiedener intersensorischer Beeinflussungen (z. B. Slutsky und Recanzone 2001; Stein und Meredith 1993). Dass es überhaupt ein Zeitfenster der gemeinsamen Verarbeitung gibt, trägt dem Punkt Rechnung, dass sich der Zeitbedarf der Reizübertragung vom Ereignis bis zum Cortex zwischen Reizen unterscheiden kann. Physikalisch gleichzeitige Reize kommen daher im Cortex nicht immer gleichzeitig an. Die Übertragungszeit variiert mit physikalischen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Reize; man denke nur an Schall und Licht, und mit physiologischen Verarbeitungszeiten, die von Faktoren wie dem gereizten Sinnesorgan und der Reizintensität abhängen. In der Regel werden auditive Reize etwas schneller verarbeitet als visuelle und intensivere Reize etwas schneller als schwächere. Das Zeitfenster gemeinsamer Verarbeitung sorgt dann dafür, dass trotz unterschiedlicher Verarbeitungszeiten zusammengehörige Informationen in den meisten Fällen gemeinsam verarbeitet werden. Eine Ausnahme sind Blitz und Donner, die wegen der großen Übertragungszeitunterschiede oft als getrennte Ereignisse wahrgenommen werden.

Auch *räumliche Nähe* kann die multisensorische Verarbeitung von Reizen fördern (Stein und Meredith 1993). In einigen Studien zeigt sich bei zunehmendem räumlichen Abstand zwischen Reizen eine Abnahme multisensorischer Verarbeitung, z. B. für den Bauchrednereffekt oder die Integration redundanter visuohaptischer Größeninformation (z. B. Gepshtein et al. 2005; Slutsky und Recanzone 2001). Die Relevanz räumlicher Nähe als

Hinweisreiz für die Zusammengehörigkeit von Reizen scheint jedoch stärker von der konkreten Wahrnehmungssituation abzuhängen als bei zeitlicher Nähe. In einigen Situationen hat sich räumliche Nähe sogar als kaum relevant für die gemeinsame Verarbeitung gezeigt. Wichtige Beispiele sind der McGurk-Effekt (Colin et al. 2001) und der sogenannte zeitliche Bauchredner-effekt, bei dem zwei leicht asynchrone Reize aus verschiedenen Sinnen zeitlich näher beieinander wahrgenommen werden, als sie sind (Vroomen und Keetels 2006). Es ist dabei noch nicht geklärt, unter welchen generellen Bedingungen räumliche Nähe notwendig für die gemeinsame Verarbeitung von Reizen ist und wann nicht.

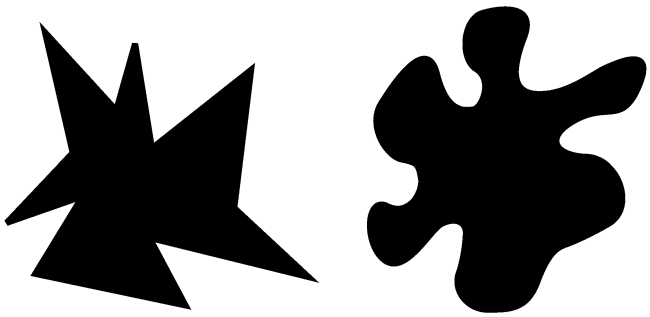


Abb. 4.6 Welche der beiden Formen ist „Bouba", welche ist „Kiki"? Über 90 % der befragten Personen treffen diese Zuordnung in gleicher Weise (Lösung im Text). Dies weist auf synästhetische Korrespondenzen zwischen Sprachlauten und visueller Form hin. (Adaptiert nach Ramachandran und Hubbard 2001)

4.4.2 Semantische und synästhetische Korrespondenzen

Das Wahrnehmungssystem assoziiert Reize in verschiedenen Sinnen nicht nur auf der Basis struktureller Ähnlichkeiten wie ihrer raumzeitlichen Nähe. Intensiv untersucht wurden auch semantische und synästhetische Korrespondenzen (Spence 2011). Mit *semantischer Korrespondenz* ist dabei gemeint, dass zwei Reize für Beobachter ähnliche oder identische Bedeutungen haben. Eine hohe semantische Korrespondenz weisen etwa gesehene Objekte mit den typischerweise von ihnen verursachten Geräuschen auf, z. B. der Anblick einer Katze und das gehörte Miauen. Von *synästhetischer Korrespondenz* wird gesprochen, wenn basale Reizeigenschaften bei einer Mehrzahl von Personen miteinander assoziiert sind. Dabei ist eine synästhetische Korrespondenz durch Veränderungen in der Verarbeitung eines Reizes in einem Sinn durch die Darbietung eines zweiten Reizes in einem anderen Sinn definiert. Sie lässt sich nur empirisch feststellen. Ein Beispiel ist die Assoziation zwischen der auditiven Höhe von Tönen und der visuellen Größe von Objekten; höhere Töne korrespondieren für die meisten Menschen mit kleineren Objekten (Evans und Treisman 2010). Synästhetische Korrespondenzen sollten nicht mit Synästhesien verwechselt werden: Menschen mit Synästhesien erleben einen Reiz, *der nur einem Sinn dargeboten wird*, zugleich auch in einem anderen Sinn; bei synästhetischen Korrespondenzen geht es um Interaktionen zwischen zwei tatsächlich vorhandenen Reizen.

Für das Zustandekommen synästhetischer und semantischer Korrespondenzen zwischen Reizen in verschiedenen Sinnen wurden verschiedene mögliche Ursachen ausgemacht: Erstens könnten sie *auf der Basis natürlicher Korrelationen* erlernt werden. Natürliche Korrelationen bestehen z. B. zwischen der Größe von Objekten und ihrer Resonanzfrequenz – je größer ein Objekt ist, desto tiefer ist diese Frequenz. Zweitens könnten sie in der neuronalen Organisation des perzeptuellen Systems, sozusagen als Nebeneffekte, angelegt sein, etwa durch ähnliche Codierungsprinzipen bei assoziierten Reizeigenschaften. Schließlich könnten Korrespondenzen auch durch semantische Überlappungen vermittelt werden, z. B. wenn wir den Begriff der Höhe sowohl für Tonfrequenzen als auch für Gesehenes verwenden (Überblick in Spence 2011).

In der Forschung stand bisher der *Nachweis semantischer und synästhetischer Korrespondenzen* zwischen Reizen in verschiedenen Sinnen im Fokus. Erste Hinweise liefern Assoziationen zwischen Reizen, die von einer Mehrheit der Befragten geteilt werden. Zum Beispiel wurde gezeigt, dass die Mehrzahl der Menschen dem Kunstwort „Mal" große Objekte und dem Wort „Mil" kleinere Objekte zuordnet oder den Wörtern „Baluma" und „Bouba" abgerundete Formen und den Wörtern „Takete" und „Kiki" eckige Formen (Köhler 1929; Ramachandran und Hubbard 2001; Sapir 1929; Abb. 4.6). Ähnliche Assoziationen nehmen Menschen auch entlang kontinuierlicher Dimensionen vor, etwa zwischen Tonhöhe und Höhe im visuellen Feld (z. B. Mudd 1963). Dass sich solche Assoziationen auf die Reizverarbeitung auswirken, wurde von Bernstein und Edelstein (1971) gezeigt. In ihrem Experiment erschien ein visueller Reiz in der Umgebung eines Fixationskreuzes, und die Versuchspersonen sollten so schnell wie möglich entscheiden, ob der Reiz unterhalb oder oberhalb des Fixationskreuzes („tiefer" vs. „hoher" visueller Reiz) zu sehen war. Zeitgleich mit dem visuellen Reiz wurde ein Ton von tiefer oder hoher Tonhöhe (100 vs. 1000 Hz) abgespielt. Dieser Ton war nicht relevant für die Aufgabe. Trotzdem antworteten Versuchspersonen auf hohe visuelle Reize schneller, wenn zugleich ein hoher Ton zu hören war, und auf tiefe visuelle Reize antworteten sie schneller, wenn zugleich ein tiefer Ton zu hören war. Die Reaktion auf den visuellen Reiz wird also durch einen zeitgleichen *kongruenten* auditiven Reizes beschleunigt. Kongruenz zwischen Tonhöhe und Höhe im visuellen Feld beschleunigt sogar dann die Reaktion, wenn Versuchspersonen über ein von der Höhe der Reize unabhängiges Merkmal entscheiden sollen, etwa über die Orientierung des visuellen Reizes oder über das Musikinstrument, mit dem der Ton gespielt wurde (Evans und Treisman 2010). Solche indirekten Effekte sind ein starkes Argument dafür, dass Kongruenz zwischen auditiver Tonhöhe und Höhe im visuellen Feld tatsächlich die *perzeptuelle Verarbeitung* der Reize beschleunigt, dass also eine synästhetische Korrespondenz vorliegt (vgl. Ansatz redundanter Zielreize in Miller 1991). Ähnlich wurden synästhetische Korrespondenzen zwischen Tonhöhe und visueller Objektgröße oder zwischen Tonhöhe und visueller räumliche Frequenz nachgewiesen und werden für viele weitere Paare von Reizdimensionen in verschiedenen Sinnen diskutiert (Evans und Treisman 2010; Gallace und Spence 2006; Überblick in Spence 2011).

Widersprüchliche Befunde gibt es hinsichtlich der Frage, ob synästhetische und semantische Korrespondenzen auch die gemeinsame multisensorische Verarbeitung von Reizen fördern (Marks et al. 2003; Parise und Spence 2009), wie es sich für raumzeitliche Nähe zeigt. Es erscheint jedoch plausibel, dass sie zumindest eine Rolle bei der Lösung des Korrespondenzproblems in einer realen mit mannigfaltigen sensorischen Reizen versehenen Umwelt spielen (Spence 2011).

4.5 Abgleich zwischen den Sinnen

Damit das Wahrnehmungssystem redundante Information aus verschiedenen Sinnen korrekt aufeinander beziehen kann, muss die geschätzte Umwelteigenschaft auf einer für alle Sinne gemeinsamen Skala abgebildet sein. Objekte müssen sich also beispielsweise genauso groß anfühlen, wie sie aussehen, damit visuelle und haptische Größenschätzer sinnvoll miteinander verglichen oder integriert werden können. Das heißt nicht, dass die sinnesspezifischen Schätzer für jeden einzelnen Wahrnehmungsvorgang genau identisch sein müssen. Dies ist, wie wir in ▶ Abschn. 4.3 gesehen haben, wegen der begrenzten Präzision der Information nicht möglich. Es heißt jedoch, dass Abweichungen zwischen Schätzern unsystematisch sein und im Mittel über mehrere Wahrnehmungsvorgänge gegen null tendieren sollten. Aber was passiert, wenn Informationen aus verschiedenen Sinnen tatsächlich *systematisch* nicht zusammenpassen, etwa wenn unser Körpersinn (Propriozeption) uns im Mittel eine andere Position unseres Armes angibt als unser visueller Sinn? Dies ist gar nicht so selten der Fall. So erscheint uns das Abbild unseres Armes durch die Lichtbrechung an verschobener Stelle, wenn wir unvermittelt eine starke Brille tragen müssen. Systematische Veränderungen in Bezug auf Sinnesinformation zur Umwelt ergeben sich auch regelmäßig in der körperlichen Entwicklung. Zum Beispiel hat ein Objekt, das wir gerade so berühren und erfühlen können, mit zunehmender Körpergröße eine zunehmende Entfernung zu unseren Augen. Ähnlich hängt am Computer der Zusammenhang zwischen gefühlten Mausbewegungen und gesehenen Mauszeigerbewegungen von den Computereinstellungen ab und entspricht nicht immer dem Zusammenhang, den wir gewohnt sind. Die Forschung hat jedoch gezeigt, dass unser Wahrnehmungssystem über effektive Mechanismen verfügt, die für einen kontinuierlichen Abgleich (**Rekalibrierung**) zwischen den Schätzern in den verschiedenen Sinnen sorgt, sodass systematische Abweichungen zwischen den Schätzern in der Regel von begrenzter Dauer sind.

Mit dem Paradigma der **visuomotorischen Adaptation** war Hermann von Helmholtz (1909) einer der Ersten, der Situationen untersucht hat, in denen Informationen des Sehsinnes verändert und in systematische Diskrepanz zu anderen Sinnen und der Motorik gebracht wurden (▶ Kap. 19). Er ließ sich eine Prismenbrille konstruieren, die das Abbild der Umwelt auf der Netzhaut seitlich (bei Helmholtz um etwa 17° visueller Winkel) verschiebt. Dadurch weichen gesehene Positionen von Objekten und des eigenen Körpers von ihren gefühlten Positionen ab. Auch sensomotorische Leistungen werden durch die Brille beeinträchtigt. Helmholtz untersuchte das schnelle Zeigen mit dem Zeigefinger

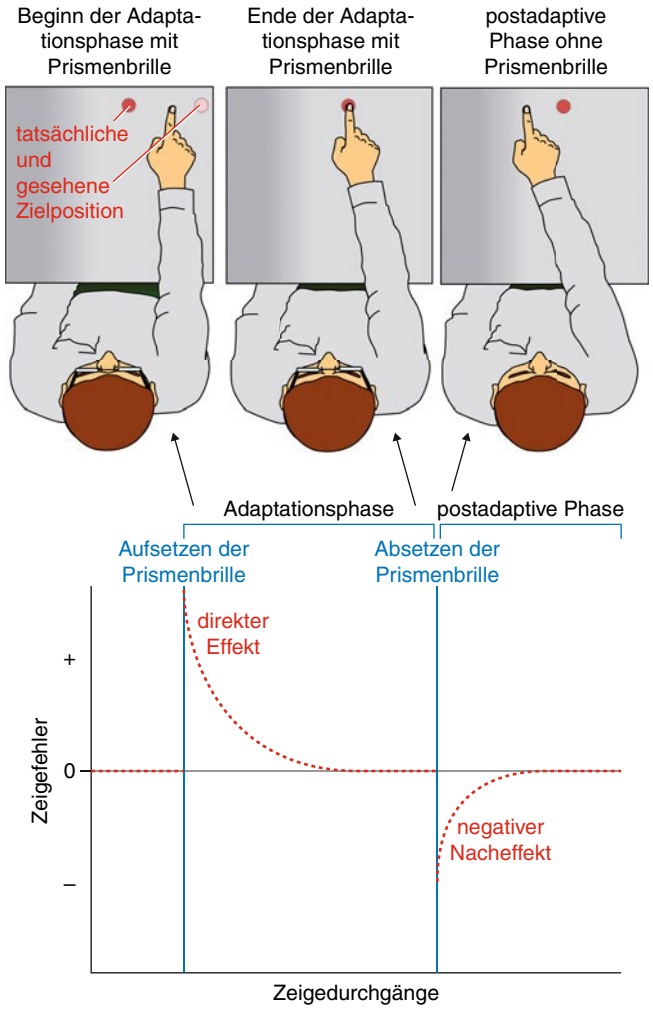


Abb. 4.7 Beim schnellen Zeigen mit einer Prismenbrille verfehlt der Finger zunächst einen visuellen Zielpunkt in der Richtung, in die das Abbild des Zielpunktes verschoben ist (Beginn der Adaptationsphase). In wenigen Zeigedurchgängen wird der Zeigefehler reduziert (vgl. Ende der Adaptationsphase). Postadaptiv, direkt nach Absetzen der Brille, wird der Zielpunkt in Gegenrichtung zur vorherigen Verschiebung seines Abbildes verfehlt

auf einen sichtbaren Zielpunkt (Abb. 4.7). Die Versuchspersonen sehen den Zeigefinger an der Endposition, aber nicht an der Startposition der Bewegung. Wie die Experimente von Helmholtz und vieler weiterer Forscher zeigen, wird der Zielpunkt zunächst verfehlt, und zwar in genau die Richtung, in die die gesehene Position verschoben ist. Ist also der Zielpunkt visuell nach rechts verschoben, so verfehlt der Finger den Zielpunkt auch zunächst auf dessen rechter Seite. Diese Zeigefehler werden als *direkter Effekt* der Prismenbrille bezeichnet. Da die Versuchspersonen ihren Zeigefinger an der Endposition der Bewegung sehen, sehen sie auch ihre Zeigefehler und nur wenige weitere Durchgänge mit der Brille reichen (weniger als 15 Versuche; Rossetti et al. 1993), um die Bewegung so zu korrigieren, dass sie den Zielpunkt wieder trifft. Typischerweise werden aber deutlich mehr Zeigebewegungen (50 und mehr) mit Brille durchgeführt. Nach dieser *Adaptationsphase* wird die Brille entfernt. Beim folgenden Zeigen ohne Brille zeigt sich nun ein *negativer Nacheffekt*. Der Finger verfehlt Zielpunkte systematisch in Gegenrichtung zur vorherigen Verschiebung durch die Prismenbrille (hier: auf der

linken Seite). Der Nacheffekt ist *generalisiert*: Er tritt für verschiedene Aufgaben und Zielpunkte gleichermaßen auf, auch wenn während der Adaptationsphase nur ein Zielpunkt trainiert wurde (Bedford 1999). Wenn die Versuchspersonen diese Zeigefehler sehen dürfen, so verschwindet auch der Nacheffekt nach wenigen Durchgängen.

Die Effekte bei der visuomotorischen Adaptation werden von den meisten Forschern durch das Zusammenwirken verschiedener Mechanismen erklärt, insbesondere durch die Kombination schneller *strategischer motorischer Korrekturen* und einer langsamen *räumlichen Rekalibrierung* („echte Adaptation") zwischen den beteiligten Sinnen (Clower und Boussaoud 2000; Redding et al. 2005). Die schnelle Reduktion von Zeigefehlern am Anfang der Adaptationsphase wird auf motorische Korrekturen zurückgeführt. Sieht die Versuchsperson, dass der Zeigefinger beim initialen Tragen der Prismenbrille rechts vom Ziel gelandet ist, so wird sie beim nächsten Versuch, das Ziel zu treffen, mit dem Finger etwas weiter nach links zielen. Die strategisch angepasste Bewegung wird nur assoziativ für den trainierten Zielpunkt gelernt und geht nicht mit einem generalisierten Nacheffekt einher (Überblick in Newport und Schenk 2012; Welch 1978). Generalisierte Nacheffekte treten erst nach einer Adaptationsphase auf, die deutlich über die initiale Korrektur der Zeigefehler hinausgeht. Diese Nacheffekte zeigen das Wirken der langsameren räumlichen Rekalibrierung zwischen den Sinnen. Die Rekalibrierung betrifft nicht nur einzelne Zielpositionen, sondern die gesamten Koordinatensysteme der beteiligten Sinne (Bedford 1999; Redding und Wallace 1993). Die initialen Zeigefehler beim Tragen einer Prismenbrille basieren auf der Abweichung zwischen visuellen und propriozeptiven Koordinatensystemen. Eine Bewegung wird geplant, die den Zeigefinger von der gefühlten Position der Hand zum gesehenen Zielpunkt führt. Normalerweise sind propriozeptive und visuelle Koordinatensysteme valide ineinander transformierbar, und die korrekte Bewegung zwischen gefühlter und gesehener Position kann berechnet werden. Die Prismenbrille verschiebt jedoch das visuelle Koordinatensystem, in unserem Beispiel nach rechts, und visuelle Positionsschätzer sind in Bezug zur Umwelt relativ zu propriozeptiven Positionsschätzern nach rechts verschoben. Die Bewegung wird entsprechend falsch berechnet und endet zu weit rechts. Über viele Durchgänge hinweg, in denen gefühlte und gesehene Positionen voneinander abweichen, werden jedoch die propriozeptiven und visuellen Koordinatensysteme wieder räumlich miteinander abgeglichen. Dies ist ein gradueller langsamer Prozess, der ebenso wie die motorischen Korrekturen Zeigefehler reduziert, aber nicht nur für eine spezifische Zielposition, sondern für alle Positionen (Cressman und Henriques 2010). Wird die Prismenbrille nach der Rekalibrierung abgelegt, dann zeigen sich generalisierte Nacheffekte, weil nun die rekalibrierten visuellen und propriozeptiven Koordinatensysteme voneinander abweichen, und zwar in Gegenrichtung zur Wirkung der Brille.

Sowohl propriozeptive als auch visuelle Koordinatensysteme sind von der Rekalibrierung betroffen. Gezeigt wurde dies in Studien, in denen Versuchspersonen nach der Adaptationsphase eine vorgegebene Position, z. B. direkt vor ihrer Nase, sowohl durch die Einstellung der Position eines *rein visuellen Reizes* als auch durch Zeigen mit geschlossenen Augen, also *unter Verwendung propriozeptiver Information*, angeben. Verschiebungen des visuellen Reizes von der vorgegebenen Position belegen die Rekalibrierung des visuellen Koordinatensystems und Verschiebungen in der gezeigten Position (in Gegenrichtung) die Rekalibrierung des propriozeptiven Koordinatensystems. Die Summe der propriozeptiven und visuellen Verschiebung entspricht dabei ungefähr dem negativen Nacheffekt beim Zeigen auf ein gesehenes Ziel. Negative Nacheffekte werden damit durch die Rekalibrierung der Koordinatensysteme der beteiligten Sinne gut erklärt (z. B. Harris 1965; Hay und Pick 1966; Henriques und Cressman 2012; Redding und Wallace 1993). Welches Koordinatensystem in erster Linie rekalibriert wird, hängt davon ab, wie lange die Hand während der Zeigebewegung in der Adaptationsphase sichtbar ist. Wird die Handposition nur am Zielpunkt gezeigt, dann spielt propriozeptive Information eine wichtige Rolle bei der Bewegungssteuerung, und vor allem das visuelle Koordinatensystem wird verschoben. Ist die Hand jedoch während längerer Phasen der Bewegung sichtbar, so bekommt visuelle Information das größere Gewicht in der Bewegungssteuerung, und vor allem das propriozeptive Koordinatensystem wird verschoben (Redding und Wallace 1988).

Das gut erforschte Beispiel visuomotorischer Adaptation zeigt, dass der Abgleich zwischen den Schätzern in verschiedenen Sinnen nicht nur für die multisensorische Wahrnehmung wichtig ist, sondern auch für die erfolgreiche Steuerung von Bewegungen. Rekalibrierung zwischen propriozeptiven und visuellen Positionsschätzern erfolgt in kurzer Zeit (wenn auch nicht ganz so schnell wie motorische Korrekturen) und ist regelgeleitet. Koordinatensysteme der Sinne werden relativ zueinander verschoben oder auch relativ zueinander gestaucht und gestreckt; spezifische Verknüpfungen zwischen Schätzern einzelner Positionen wurden hingegen bei visuomotorischer Adaptation nicht beobachtet (Bedford 1999). Dabei zeigen sich gegenseitige Rekalibrierungen von Sehen und Propriozeption.

Rekalibrierung erfolgt aber nicht nur in Verbindung mit motorischen Aufgaben. Sie zeigt sich in ähnlicher Weise, wenn Personen systematischen intersensorischen Diskrepanzen „passiv" ausgesetzt sind. So wurden Versuchspersonen wiederholt gleichzeitige Lichtblitze und Töne an abweichenden Positionen präsentiert (z. B. Blitz immer 2 cm rechts vom Ton). Um zu testen, ob eine Rekalibrierung auditiver und visueller Positionsschätzer stattfindet, mussten die Versuchspersonen vor und nach der Adaptationsphase zu separat dargebotenen Lichtblitzen oder Tönen zeigen. Es treten auch hier Nacheffekte auf. Die Zeigebewegung zu Tönen ist nach der Adaptation in die Richtung verschoben, in der die Lichtblitze in der Adaptationsphase dargeboten worden waren, und es zeigt sich auch eine leichte gegengerichtete Verschiebung der Zeigebewegung zu Lichtblitzen. Wie bei der visuomotorischen Adaptation nehmen die Effekte der Rekalibrierung mit der Länge der Adaptationsphase zu. Ganz generell zeigt sich hier eine Rekalibrierung zwischen auditiven und visuellen Positionsschätzern, die ähnlichen Bedingungen unterliegt wie die Rekalibrierung visueller und propriozeptiver Schätzer bei der visuomotorischen Adaptation (z. B. Bertelson et al. 2006; Radeau und Bertelson 1974; Überblick in Chen und Vroomen 2013). Viele weitere Fälle intersensorischer Rekalibrierung sind belegt, etwa für diskrepante taktile und auditive Positionen (Bruns et al.

2011), für haptische und visuelle Tiefeninformation (Atkins et al. 2003; Adams et al. 2004) oder für zeitliche Asynchronien zwischen visuellen, auditiven und taktilen Reizen (z. B. DiLuca et al. 2009; Fujisaki et al. 2004; Überblick in Vroomen und Keetels 2010). Intersensorische Rekalibrierung scheint also nicht nur ein effizienter, sondern auch ein übergreifender Mechanismus in der multisensorischen Informationsverarbeitung zu sein.

Rekalibrierung dient dabei nicht nur der langfristigen Kompensation radikaler Veränderungen des Wahrnehmungssystems, etwa infolge körperlicher Entwicklung. Hilfreich ist sie auch, um die Wahrnehmung kurzfristig auf unterschiedliche Umgebungen einzustellen, etwa auf veränderte akustische Umgebungen, wenn wir einen anderen Raum betreten, oder auf optische Verschiebungen in Unterwassersituationen. Etliche Forscher nehmen sogar an, dass sich unser Wahrnehmungssystem in einem kontinuierlichen Zustand der Rekalibrierung befindet (z. B. Chen und Vroomen 2013; Held 1965).

4.6 Aufmerksamkeit über Sinne hinweg

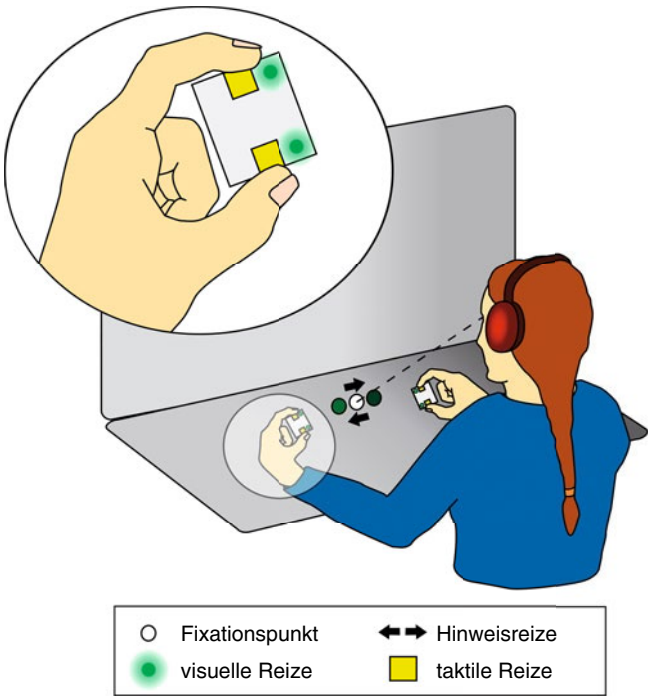
Eine wichtige Funktion der Aufmerksamkeit ist die Selektion von Information (▶ Kap. 5). In den meisten Situationen ist nicht jede an den Sinnen vorliegende Information gleich relevant und muss daher auch nicht in gleicher Tiefe verarbeitet werden. Stattdessen konzentriert Aufmerksamkeit die Informationsverarbeitung nach bestimmten Selektionskriterien auf relevante Sachverhalte. Im Zusammenhang mit multisensorischer Informationsverarbeitung wurde zum einen untersucht, inwieweit selektive Aufmerksamkeit, insbesondere räumliche selektive Aufmerksamkeit, zwischen den Sinnen gekoppelt ist (▶ Abschn. 4.6.1). Zum anderen wurden die Zusammenhänge zwischen selektiver Aufmerksamkeit und der multisensorischen Integration von redundanten Informationen beleuchtet (▶ Abschn. 4.6.2).

4.6.1 Räumlich selektive Aufmerksamkeit

Wenn wir mit unserer rechten Hand ein Insekt von unserem linken Arm entfernen möchten, sollten wir unsere Aufmerksamkeit auf den Ort richten, auf dem das Insekt herumkrabbelt. Dies führt dazu, dass Reize an diesem Ort besser verarbeitet werden. Die Ausrichtung der räumlichen Aufmerksamkeit kann dabei endogen oder exogen erfolgen. Man spricht von *exogener* oder *reizgetriggerter Aufmerksamkeit*, wenn ein auffälliger Reiz die Aufmerksamkeit reflexiv an einen bestimmten Ort zieht. In unserem Beispiel könnte die gefühlte Berührung des Insekts auf unserer Haut oder dessen aus dem Augenwinkel gesehene Bewegung solch ein Reiz sein. Von *endogener Aufmerksamkeit* spricht man bei kontrollierter, willentlicher Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort. In unserem Beispiel könnte uns ein Mitmensch auf das Insekt hinweisen, und wir könnten dann endogen die Aufmerksamkeit auf unseren linken Arm richten oder nicht (▶ Kap. 5).

Aber führt die gefühlte Berührung eines Insekts oder der Hinweis des Mitmenschen nun zur Ausrichtung sowohl der visuellen als auch der taktilen und der auditiven räumlichen Aufmerksamkeit auf den Arm? Dass sowohl die endogene als auch die exogene Ausrichtung räumlicher Aufmerksamkeit zwischen den Sinnen gekoppelt ist, zeigen etliche Studien. Spence und Driver (1997; Spence et al. 2000) entwickelten dazu ein elegantes Paradigma, die **orthogonale Hinweisreizaufgabe** (Cueing-Aufgabe). In dieser Aufgabe müssen Versuchsperson schnell auf Zielreize reagieren, die für verschiedene Sinne links oder rechts von der Körpermittellinie und dort dann jeweils an einer oberen oder unteren Position erscheinen können. Für den taktilen Sinn können z. B. Reize an beiden Zeigefingern und Daumen appliziert werden, wobei die Unterarme und Hände so auf einem Tisch platziert sind, dass der Daumen unten liegt und der Zeigefinger sich oberhalb vom Daumen befindet (◘ Abb. 4.8). Visuelle Reize werden dann nahe der Daumen und Zeigefinger durch Leuchtdioden gegeben. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, so schnell wie möglich per Drücken einer oberen oder unteren Taste zu entscheiden, ob ein Zielreiz – unabhängig von der Seite – oben oder unten dargeboten wurde. Die Aufmerksamkeit wird so manipuliert, dass sie auf die linke oder rechte Seite gerichtet ist. Damit wird die Aufmerksamkeit *orthogonal* und unabhängig zur beurteilten Reizdimension und zur geforderten Reaktion manipuliert.

Endogene Aufmerksamkeit wird manipuliert, indem ein symbolischer Hinweisreiz, etwa ein Pfeil in der Mitte des Bildschirms, die Seite (rechts oder links) anzeigt, wo *mit höherer Wahrschein-*



◘ **Abb. 4.8** Schematischer Aufbau für visuell-taktile Experimente gemäß der orthogonalen Hinweisreizaufgabe (Cueing-Aufgabe). Versuchspersonen halten einen Schaumwürfel in jeder Hand. Visuelle oder taktile Reize können an jedem Zeigefinger („unten") oder Daumen („oben") appliziert werden, und die Versuchsperson soll so schnell wie möglich (per Fußschalter, etwa durch Heben des großen Zehs vs. der Ferse; nicht abgebildet) entscheiden, ob ein oberer oder unterer Zielreiz dargeboten wurde. Die Aufmerksamkeit kann endogen durch einen symbolischen Hinweisreiz in der Mitte oder exogen durch Vorreize an einer der Hände auf eine Seite gelenkt werden. (Adaptiert nach Spence et al. 2000)

lichkeit der nächste Zielreiz für den *primären* Sinn erscheint. Die Seite für gelegentliche Zielreize in einem anderen, dem *sekundären* Sinn wird durch den Hinweisreiz nicht vorhergesagt. Ein optimales Verhalten wäre es, willentlich die Aufmerksamkeit für Reize im primären Sinn auf die angezeigte Seite zu richten, während die Aufmerksamkeit für Reize im sekundären Sinn nicht räumlich fokussiert werden sollte. Eine endogene Ausrichtung der Aufmerksamkeit lässt sich daran erkennen, dass schneller auf Zielreize auf der angezeigten Seite im Vergleich zur anderen Seite reagiert wird. Generell zeigt sich in den Reaktionszeitvorteilen, dass Versuchspersonen, die ihre Aufmerksamkeit für Reize im primären Sinn willentlich auf einen bestimmten Ort richten, dabei auch ihre Aufmerksamkeit für Reize im sekundären Sinn auf diesen Ort richten, wenn auch etwas weniger ausgeprägt (Driver und Spence 2004). Wenn Versuchspersonen ihre Aufmerksamkeit auf ihre linke Hand richten, weil sie dort einen taktilen Zielreiz erwarten, so wird auch ein visueller oder auditiver Zielreiz nahe der linken Hand beschleunigt verarbeitet. Das heißt, die endogene Aufmerksamkeitsausrichtung erfolgt gekoppelt über die Sinne hinweg, selbst wenn dies für die Verarbeitung von Reizen im sekundären Sinn nicht von Vorteil ist. Nur unter sehr speziellen Bedingungen gelingt es, die Aufmerksamkeit willentlich für verschiedene Sinne auf unterschiedliche Orte zu lenken. Die Aufmerksamkeitsvorteile sind dann weniger ausgeprägt als bei gekoppelter Ausrichtung (z. B. Driver und Spence 2004; Santangelo et al. 2010). Die Forschung legt also nahe, dass Menschen zwar über sinnesspezifische Mechanismen endogener räumlicher Aufmerksamkeit verfügen, diese aber im Normalfall eng aneinandergekoppelt sind.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man die *exogene Ausrichtung* der Aufmerksamkeit betrachtet. Zur Untersuchung exogener Aufmerksamkeitsausrichtung wird ebenfalls oft die orthogonale Hinweisreizaufgabe herangezogen. Die Manipulation der Aufmerksamkeit erfolgt, indem *vor* dem eigentlichen Zielreiz, auf den reagiert wird, ein kurzer Vorreiz *zufällig* auf der linken oder rechten Seite gegeben wird. Der Vorreiz erlaubt also keinerlei Vorhersage auf den Ort des Zielreizes. Eine exogene Ausrichtung der Aufmerksamkeit zeigt sich darin, dass schneller und akkurater reagiert wird, wenn Vorreiz und Zielreiz auf derselben Seite anstatt auf verschiedenen Seiten erscheinen. Tatsächlich verbessern passende Vorreize die Verarbeitung sowohl von Zielreizen, die in demselben Sinn präsentiert werden wie der Vorreiz, als auch von Zielreizen in andere Sinnen (Abb. 4.9). Taktile Vorreize verbessern die Verarbeitung visueller und auditiver Zielreize, auditive Vorreize verbessern die Verarbeitung visueller und taktiler Zielreize, und visuelle Vorreize verbessern die Verarbeitung taktiler und oft, aber nicht immer, auch auditiver Zielreize (z. B. McDonald et al. 2000; Spence et al. 1998; Ward et al. 2000). Auch die exogene Aufmerksamkeitsausrichtung ist also zwischen den Sinnen gekoppelt. Ein auffälliger Reiz in einem Sinn zieht die Aufmerksamkeit verschiedener Sinne zum Ort des Reizes und erlaubt dann eine schnellere und bessere Verarbeitung an diesem Ort.

Eine wichtige weitere Frage ist, ob die exogene Aufmerksamkeitsausrichtung über die Sinne hinweg *komplett automatisch* erfolgt. Ein Kriterium dafür wäre, dass sie gegen unsere Intention geschieht, etwa wenn wir im Zug sitzen und ein Buch lesen möchten, aber unsere Aufmerksamkeit ständig zum Gespräch

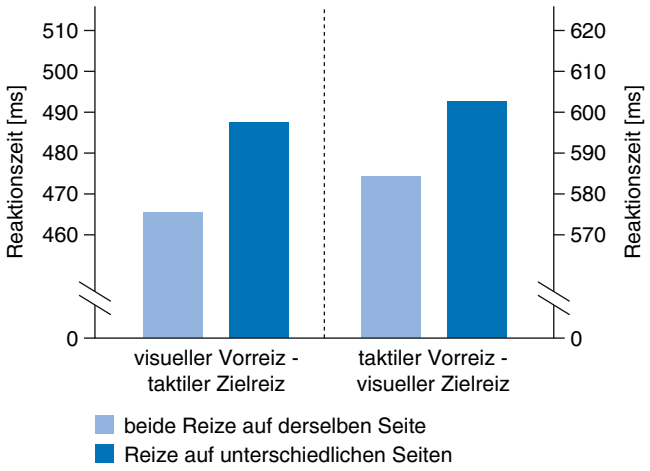


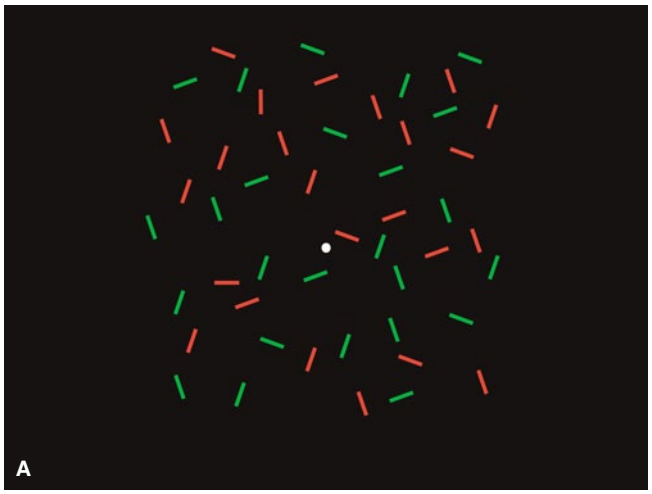
Abb. 4.9 Exemplarische Daten zur Kopplung exogener Aufmerksamkeit. Verwendet wurde das orthogonale Hinweisreizparadigma. In den dargestellten Bedingungen wurden 200 ms vor einem visuellen bzw. taktilen Zielreiz zufällig auf der linken oder rechten Seite taktile bzw. visuelle Vorreize präsentiert (Abb. 4.8). In beiden Experimenten erfolgte die Reaktion auf den Zielreiz signifikant schneller, wenn er auf derselben Seite wie der Vorreiz erschien statt auf der anderen Seite. (Daten aus Spence et al. 1998; links: Exp. 2, rechts: Exp. 3)

unserer Mitreisenden wandert. In Varianten der orthogonalen Hinweisreizaufgabe zeigte sich genau dies: Auditive Vorreize lenkten die Aufmerksamkeit für visuelle Zielreize vom intendierten Ort ab. Der Ort intendierter Aufmerksamkeit war dabei durch 100%ig valide Hinweisreize manipuliert (z. B. van der Lubbe und Postma 2005; Überblick in Koelewijn et al. 2010). Allerdings gibt es auch Bedingungen, unter denen exogene Aufmerksamkeitsablenkung nicht möglich ist. Auffällige Vorreize haben keinen Effekt, wenn Personen gleichzeitig mit einer zweiten stark fordernden Wahrnehmungsaufgabe beschäftigt sind (Santangelo und Spence 2007). Da auffällige Reize Aufmerksamkeit zwar gegen unsere Intention, aber nicht bei bereits beanspruchter Wahrnehmung an sich ziehen, stellt die exogene Ausrichtung unserer Aufmerksamkeit über die Sinne also keinen komplett automatischen Prozess dar.

4.6.2 Aufmerksamkeit und multisensorische Integration

Die Rolle der Aufmerksamkeit bei der multisensorischen Verarbeitung ist nicht darauf beschränkt, dass Reize in einem Sinne die Fokussierung auf Reize in einem anderen Sinn erleichtern. Auch die multisensorische Integration redundanter Information steht in Wechselbeziehungen zur Aufmerksamkeit. In bestimmten Situationen erfordert multisensorische Integration Aufmerksamkeit, wie wir am Ende des Abschnitts sehen werden. In anderen Situationen werden Informationen aus verschiedenen Sinnen automatisch und unabhängig von Aufmerksamkeit integriert, können dann aber besonders effektiv die Aufmerksamkeit an sich ziehen.

In ▶ Abschn. 4.6.1 wurde beschrieben, dass ein auffälliger visueller oder auditiver Reiz die Aufmerksamkeit *nicht* anzieht, wenn Personen bereits durch eine zweite Wahrnehmungsaufgabe



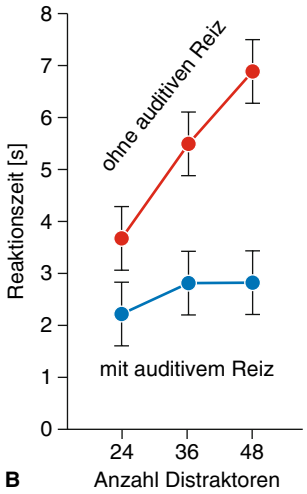


Abb. 4.10 **A** Zwischen den diagonalen Distraktoren ist eine horizontale oder vertikale Ziellinie versteckt (eine rote vertikale Linie im oberen, eher linken Bereich). Im Experiment von Van der Burg et al. (2008) änderten die Linien zufällig ihre Farbe. Versuchspersonen benötigten mehrere Sekunden, um die Ziellinie zu finden. Je mehr Distraktorlinien zu sehen waren, umso länger brauchten sie (**B**, rote Kreise). Wurde aber ein kurzer auditiver Reiz präsentiert, während die Ziellinie ihre Farbe änderte, so wurde sie viel schneller und fast unabhängig von der Distraktoranzahl gefunden (**B**, blaue Kreise). (Adaptiert nach Talsma et al. 2010)

sehr gefordert sind. Ein multisensorischer, in diesem Fall audiovisueller Reiz hingegen erobert auch während der fordernden Wahrnehmungsaufgabe die räumliche Aufmerksamkeit (Santangelo und Spence 2007). Dass multisensorische Integration die Aufmerksamkeitswirkung von Reizen erhöht, zeigt sich auch andernorts (z. B. Matusz und Eimer 2011). Besonders interessant ist der Pip-und-Pop-Effekt (Van der Burg et al. 2008). Im Experiment sehen Versuchspersonen auf dem Bildschirm diagonale Distraktorlinien und dazwischen eine vertikale oder horizontale Zielreizlinie (Abb. 4.10). Sie müssen nun so schnell wie möglich die Zielreizlinie finden und deren Orientierung angeben. Dabei ändert sich immer wieder zufällig die Farbe von Reizen (alternierend rot und grün), wobei sich die Farbe des Zielreizes nie gleichzeitig mit der eines Distraktors ändert. Typisch für schwierige visuelle Suchaufgaben nimmt der Zeitbedarf für die Suche des Zielreizes mit der Anzahl der Distraktoren systematisch zu. Wird aber ein kurzer Ton, ein „Pip" präsentiert, während der Zielreiz seine Farbe ändert, so wird er sehr viel schneller und fast unabhängig von der Distraktoranzahl gefunden. Der Zielreiz „poppt" durch den begleitenden Ton aus dem visuellen Feld heraus. Der Pip-und-Pop-Effekt ist am stärksten, wenn die Farbänderung des visuellen Zielreizes und der Ton genau gleichzeitig beginnen, und nimmt ab, wenn der Ton früher oder später erklingt. Dies schließt eine Erklärung durch eine direkte hinweisende Wirkung des Tones auf den visuellen Zielreiz aus, denn solche Effekte sind maximal bei einer Vorlaufzeit des Tones von 100–300 ms (Shore et al. 2006). Vielmehr wird der Pip-und-Pop-Effekt dadurch erklärt, dass die multisensorische Integration des visuellen Zielreizes mit dem Ton, die bei Gleichzeitigkeit der beiden Reize besonders wahrscheinlich ist (▶ Abschn. 4.4), die Auffälligkeit des visuellen Zielreizes erhöht und so die Aufmerksamkeit zum Zielreiz lenkt (Überblick in Talsma et al. 2010). Diese Erklärung setzt voraus, dass multisensorische Integration automatisch erfolgt, was auch für einige Situationen, etwa den Bauchredner-effekt oder die visuohaptische Integration von Größeninformation, gut belegt ist (Bertelson et al. 2000; Helbig und Ernst 2008).

In anderen Situationen hingegen scheint Aufmerksamkeit erforderlich zu sein, damit multisensorische Integration stattfindet. Dies zeigte sich etwa in einem Experiment, in dem Versuchspersonen Sprachsequenzen hörten und gleichzeitig zwei Filmsequenzen von Sprechern sahen. Die Lippenbewegungen in einem Film passten zur gesprochenen Sprache, die im anderen Film nicht. Versuchspersonen fixierten den Blick genau zwischen den beiden Filmen, richteten aber verdeckt ihre Aufmerksamkeit auf eine der beiden Filmsequenzen. Gemessen wurde mittels funktionaler Magnetresonanztomografie (fMRI; ▶ Kap. 2) die Aktivität in multisensorischen Hirnarealen. Höhere Aktivität in multisensorischen Arealen indizierte mehr Integration, wenn die Aufmerksamkeit auf die passenden Lippenbewegungen gerichtet war (Fairhall und Macaluso 2009). Ähnlich wird auch der McGurk-Effekt, bei dem gehörte Sprachlaute durch unpassende Lippenbewegungen verändert werden (▶ Im Blickfang), schwächer, wenn Aufmerksamkeit durch eine zweite Aufgabe abgezogen wird (Alsius et al. 2007). Was aber unterscheidet Situationen, in denen multisensorische Integration Aufmerksamkeit erfordert, von Situationen mit automatischer multisensorischer Integration? Hierzu gibt es verschiedene Erklärungsansätze. Eine Hypothese besagt, dass Aufmerksamkeit dann erforderlich ist, wenn die Reizsituation komplex ist und mehrere Reize in einem Sinn um Verarbeitungsressourcen konkurrieren (Talsma et al. 2010). Dies ist etwa der Fall, wenn wir gehörte Sprache mit den Lippenbewegungen eines von mehreren gesehenen Sprechern verknüpfen wollen. In einfachen Reizsituationen mit nur einem auffälligen Reiz je Sinn, wie sie oft in Experimenten realisiert werden, erfolgt die multisensorische Integration hingegen reizgesteuert und damit automatisch. Diese Hypothese impliziert damit eine wichtige Rolle der Aufmerksamkeit für multisensorische Integration in komplexen natürlichen Wahrnehmungssituationen. Gemäß einer anderen Hypothese hingegen hängt die Rolle der Aufmerksamkeit nicht mit der Komplexität der Reizsituation, sondern mit der Komplexität der Reize zusammen (Calvert und Thesen 2004; Koelewijn et al. 2010). Diese Hypothese besagt, dass multisensorische Integration auf verschiedenen Ebenen im Gehirn stattfindet (▶ Abschn. 4.7). *Frühe Integration* findet durch Interaktionen zwischen traditionell als unisensorisch angesehenen Hirnarealen statt, betrifft entsprechend eher einfache Reize und erfolgt automatisch. *Späte Integration* findet eher in höheren multisensorischen Arealen statt, betrifft meist komplexe Reize (z. B. Sprachreize) und erfordert Aufmerksamkeit. Welcher der

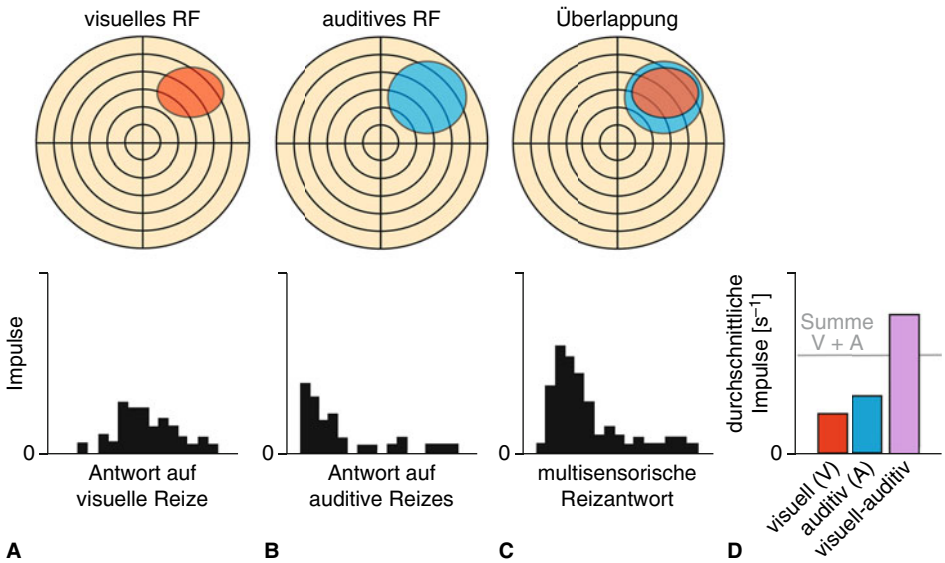


Abb. 4.11 Schematische Darstellung eines multisensorischen Neurons im CS der Katze. Dieses Neuron feuert auf visuelle Reize in einem rezeptiven Feld (RF), das in Referenz zum Auge definiert ist (**A**), und auf auditive Reize in einem ebenfalls augenzentrierten rezeptiven Feld (**B**). Es feuert am stärksten auf gleichzeitige auditive und visuelle Reize in ihren jeweiligen (überlappenden) rezeptiven Feldern (**C**). Dabei ist die multisensorische Reizantwort dieses Neurons superadditiv, denn die Feuerungsrate bei der audiovisuellen Reizkombination übersteigt die Summe der Feuerungsraten bei auditiven und visuellen Einzelreizen (**D**). (Adaptiert nach Stein und Stanford 2008)

beiden Ansätze besser die Rolle der Aufmerksamkeit für die multisensorische Integration erklärt, ist jedoch noch offen.

4.7 Neurophysiologische Grundlagen

Vor etwa 30 Jahren wurden die ersten Studien zur Neurophysiologie multisensorischer Verarbeitung von Informationen mit den Methoden der Einzelzellableitung am Tiermodell durchgeführt. Als weiterer wichtiger methodischer Ansatz erwies sich das anatomische Studium der neuronalen Verbindungen, die von „unisensorischen" Hirnarealen ausgehen. Bildgebende Verfahren erlaubten es, ergänzende Untersuchungen auch am Menschen durchzuführen. Die Studien fokussieren auf die grundlegenden neuronalen Mechanismen multisensorischer Verarbeitung (▶ Abschn. 4.7.1) sowie auf die Lokalisation von *multisensorischen Arealen*, also solcher Areale, deren einzelne Neurone Information von verschiedenen Sinnen erhalten. Multisensorische Verarbeitung wurde traditionell nur in **multisensorischen Konvergenzzonen** lokalisiert (▶ Abschn. 4.7.2), höheren Arealen, in denen stark vorverarbeitete Information aus verschiedenen „unisensorischen" Arealen konvergiert (Ghazanfar und Schroeder 2006). Die traditionelle Sichtweise war, dass die sensorischen Cortices, also etwa der visuelle, auditorische oder somatosensorische Cortex, strikt unisensorisch seien und nur Reize aus dem jeweils zugehörigen Sinn verarbeiten. Allerdings ändert sich diese Sicht, denn viele neuere Studien belegen, dass schon frühe, sogar primäre „unisensorische" Areale durch Informationen aus anderen Sinnen beeinflusst werden (▶ Abschn. 4.7.3). Hier sollen sie daher in Anführungszeichen gesetzt werden.

4.7.1 Multisensorische Verarbeitung in einzelnen Neuronen

Die Pionierarbeiten zu den neurophysiologischen Grundlagen der multisensorischen Verarbeitung stammen von Meredith, Stein und Kollegen (Überblick in Stein und Stanford 2008). Beginnend in den 1980er Jahren untersuchten die Forscher mittels Einzelzellableitungen Neurone im Colliculus superior (CS) der Katze, einem subcorticalen Areal im Mesencephalon. Der CS kontrolliert Orientierungsverhalten, etwa Blickbewegungen, hin zu verschiedenen Reizen. Das Areal bekommt Eingänge aus aufsteigenden sensorischen Bahnen (visuell, auditiv, somatosensorisch) und auch aus absteigenden Bahnen vom Cortex. Viele einzelne Neurone in diesem Bereich reagieren sowohl auf visuelle als auch auf auditive Reize – und sogar auf somatosensorische Reize – und werden damit als **multisensorische Neurone** klassifiziert. Interessant ist, wie die multisensorischen Neurone auf eine Kombination von Reizen aus verschiedenen Sinnen reagieren. Multisensorische Reizkombinationen können die Reizantwort im Vergleich zur Reaktion auf den stärksten unisensorischen Reiz sowohl *verstärken* als auch *abschwächen*. Als *superadditiv* wird eine Reizantwort bezeichnet, wenn die Feuerungsrate des Neurons auf die multisensorische Kombination größer ist als die Summe der Feuerungsraten für jeden einzelnen der Reize (Abb. 4.11), und als *subadditiv*, wenn die Feuerungsrate auf die multisensorische Kombination kleiner ist als diese Summe (Stein et al. 2004). Dabei kann eine subadditive multisensorische Reizantwort sowohl eine Verstärkung als auch eine Abschwächung gegenüber einer unisensorischen Reizantwort darstellen.

Eine multisensorische Verstärkung der Reizantwort im CS kann bei der Entdeckung eines Ereignisses helfen und die Orientierungsreaktion zu diesem Objekt hin beschleunigen (Bell et al. 2005; Diederich und Colonius 2004; Rowland et al. 2007a). Meredith, Stein und Kollegen haben aus ihren Studien drei Prinzipien extrahiert, denen multisensorische Verstärkung in Neuronen des CS unterliegt: das räumliche Prinzip, das zeitliche Prinzip und das Prinzip inverser Effektivität.

Das *räumliche Prinzip* besteht darin, dass multisensorische Verstärkung zu beobachten ist, wenn die Reize aus verschiedenen Sinnen, auf die ein Neuron reagiert, einander räumlich nah sind (▶ Abschn. 4.4). Multisensorische Neurone im CS haben multiple exzitatorische rezeptive Felder, eins für jeden Sinn, auf dessen Reize sie reagieren. Das heißt, sie feuern je Sinn auf Reize, die in einer bestimmten umgrenzten räumlichen Region erscheinen

(Abb. 4.11). Dabei zeigt sich eine hochgradige Überlappung der rezeptiven Felder. Fallen nun Reize aus verschiedenen Sinnen jeweils in ihre exzitatorischen rezeptiven Felder, so feuert das Neuron stärker als bei nur einem Reiz aus einem Sinn. Gemäß der Ausdehnung und Überlappung der rezeptiven Felder geschieht dies bei Reizen, die räumlich nah beieinander sind, ohne dass die Reize an identischen Orten erscheinen müssen (z. B. Kadunce et al. 2001). Fallen Reize aus verschiedenen Sinnen hingegen in die exzitatorischen rezeptiven Felder *verschiedener* Neurone im CS, dann zeigt sich entweder kein multisensorischer Effekt in den neuronalen Antworten oder sogar eine multisensorische Abschwächung. Die Abschwächung erfolgt in der Regel, wenn die Reize in aneinandergrenzenden, aber nicht überlappenden räumlichen Bereichen erscheinen (z. B. Meredith und Stein 1996). Multisensorische Verstärkung zeigt sich im CS für Reize, die *in der Umwelt* räumlich nah beieinander sind. Dies erfordert, dass die sinnesspezifischen rezeptiven Felder eines Neurons für Reize aus verschiedenen Sinnen an dasselbe Koordinatensystem gekoppelt bleiben, auch wenn sich die relativen Positionen der Sinnesorgane (Augen, Hände) zueinander verschieben. Rezeptive Felder für visuelle, auditive und somatosensorische Reize in Neuronen des CS reagieren wohl auf Reize in räumlichen Positionen, die einer bestimmten konstanten Region in einem augenzentrierten Koordinatensystem entsprechen. Werden die Augen bewegt, so bleiben die rezeptiven Felder eines Neurons in Referenz zum Auge gleich, aber sie verschieben sich in Referenz zur Umwelt entsprechend der Augenbewegung. Dies gilt nicht nur für die visuellen rezeptiven Felder, die bereits bei konstanter Verschaltung der Rezeptoren im Auge auf Neuronen im CS augenzentriert sind. Es gilt auch für auditive und somatosensorische rezeptive Felder, für deren Kopplung an augenzentrierte Koordinaten die Verschaltung somatosensorischer und auditiver Signale auf Neurone im CS dynamisch an die jeweilige Augenposition angepasst werden muss (z. B. Peck et al. 1995; Hartline et al. 1995). Erst dieser komplexe Mechanismus gewährleistet das räumliche Prinzip multisensorischer Verstärkung.

Das *zeitliche Prinzip* besteht darin, dass multisensorische Verstärkung im CS nur bei zeitlicher Nähe der Reize aus verschiedenen Sinnen auftritt, wobei die Reize in einem relativ großen Zeitfenster von 100 ms und mehr liegen können (▶ Abschn. 4.4; Stein und Meredith 1993). Dabei ist die multisensorische Verstärkung maximal bei maximaler zeitlicher Überlappung der Reizverarbeitung.

Schließlich gilt noch das *Prinzip inverser Effektivität*: Die größte multisensorische Verstärkung im CS wird bei besonders schwachen Reizen beobachtet. Hier kann die Antwort des Neurons auf eine multisensorische Reizkombination superadditiv sein. Bei stärkeren Reizen ist die multisensorische Antwort additiv und schließlich subadditiv, allerdings immer noch größer als die neuronalen Antworten auf die Einzelreize. Multisensorische Verstärkung ist also umso ausgeprägter, je schwächer die Einzelreize sind (z. B. Meredith und Stein 1986; Perrault et al. 2005). Ein solches Prinzip hilft natürlich sehr bei der Entdeckung ansonsten wenig auffälliger Ereignisse. Weitere Studien zeigen, dass multisensorische Verstärkung im CS erst durch eine elaborierte Verschaltung aufsteigender Information mit vom Cortex absteigender Informationen zustande kommt (Rowland et al. 2007b). Multisensorische Neurone, die teils ähnliche Eigenschaften wie die Neurone im CS haben, sind auch in corticalen Arealen von Katzen und Primaten gefunden worden (Überblick in Stein und Stanford 2008).

4.7.2 Multisensorische Konvergenzzonen

Eine Reihe von höheren multisensorischen Konvergenzzonen, in denen Information aus verschiedenen „unisensorischen" Arealen gemeinsam verarbeitet wird, ist heute für nichtmenschliche Primaten gut belegt. Wichtige Belege bestehen im anatomischen Nachweis auf dem Areal konvergierender afferenter Nervenbahnen, die von den „unisensorischen" Arealen ausgehen, sowie insbesondere im direkten Nachweis multisensorischer Neurone in der Einzelzellableitung. Beim Menschen werden nichtinvasive bildgebende Verfahren, insbesondere funktionale Magnetresonanztomographie (fMRI), eingesetzt. Der Nachweis einzelner multisensorischer Neurone, und damit multisensorischer Areale, ist mittels fMRI allerdings schwierig, da immer die Aktivität vieler Neurone gleichzeitig erfasst wird und die gemessenen BOLD-Signale (BOLD = *blood oxygenation level dependent*) nicht mit der neuronalen Aktivität gleichgesetzt werden können (Logothetis und Pfeuffer 2004). Viele elaborierte Ansätze wurden vorgeschlagen, um mit diesen Schwierigkeiten umzugehen, die jedoch ihrerseits interpretativen Einschränkungen unterliegen (Überblick in Noppeney 2012). Dennoch sind fMRI-Befunde am Menschen in vielen Fällen konsistent mit Belegen von nichtmenschlichen Primaten, sodass sich ein kohärentes Bild ergibt.

Multisensorische Konvergenzzonen liegen oft an den Grenzregionen „unisensorischer" Areale (Wallace et al. 2004). Bei nichtmenschlichen Primaten sind multisensorische Neurone in Teilen des superioren temporalen Sulcus (STS), des ventrolateralen präfrontalen Cortex (VLPFC) und des posterioren parietalen Cortex (PPC), hier insbesondere im lateralen, medialen und ventralen intraparietalen Areal (LIP, MIP und VIP; Abb. 4.12), gefunden worden. Für viele ähnliche Areale finden sich auch beim Menschen Belege für multisensorische Verarbeitung.

Die Subareale des PPC spielen eine zentrale Rolle bei der Steuerung von Bewegungen zu einem räumlichen Ziel hin. Dazu gehört die Transformation von Information aus verschiedenen Sinnen in ein gemeinsames Koordinatensystem (Stein und Stanford 2008). Neurone im LIP des Affen codieren z. B. visuelle, auditive und bisensorische Blickziele in augenzentrierten Koordinaten, die sich gut zur Steuerung von Blickbewegungen eignen (Stricanne et al. 1996). Neurone im MIP codieren visuelle und auditive Zielreize zur Steuerung zielgerichteter Handbewegungen (z. B. Cohen und Andersen 2000). Neurone im VIP reagieren auf Reize verschiedener Sinne, visuell, taktil, auditiv und vestibulär, und werden mit der Steuerung von Bewegungen im Gesichtsbereich in Zusammenhang gebracht (z. B. Avillac et al. 2007; Bremmer et al. 2002). Bildgebende Verfahren legen nahe, dass diese und benachbarte Regionen auch beim Menschen multisensorische Information über den Gesichts- und andere Körperbereiche verarbeiten (Huang et al. 2012; Sereno und Huang 2006), und auch in einigen anderen intraparietalen Bereichen zeigt sich beim Menschen multisensorische Konvergenz (Überblick in Amedi et al. 2005; Sereno

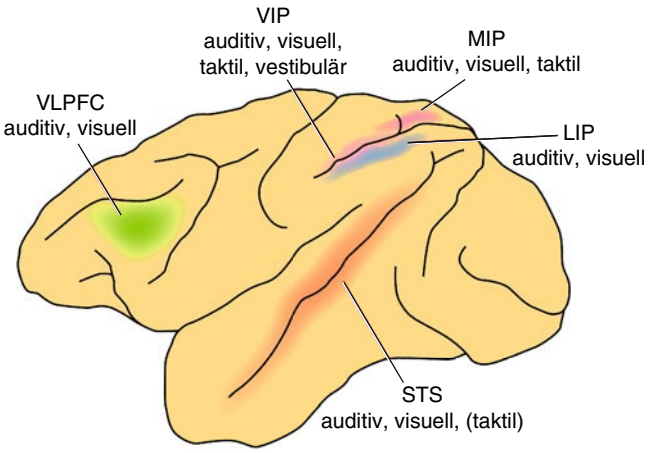


Abb. 4.12 Multisensorische Kovergenzzonen bei nichtmenschlichen Primaten und Eingangssignale. *STS* = superiorer temporaler Sulcus; *VLPFC* = ventrolateraler präfrontaler Cortex; *LIP*, *MIP* und *VIP* = laterales, mediales und ventrales intraparietales Areal. (Adaptiert nach Driver und Noesselt 2008; Stein und Stanford 2008)

und Huang 2014). Beim Vergleich zwischen Affe und Mensch muss berücksichtigt werden, dass homologe intraparietale Areale bei Mensch und Affe etwas unterschiedlich angeordnet sind (Silver und Kastner 2008). Insgesamt ergibt sich jedoch, dass bei menschlichen und nichtmenschlichen Primaten Teile des PPC multisensorische Information zur Bewegungssteuerung verarbeiten.

Der STS spielt eine Rolle bei der multisensorischen Verarbeitung semantisch kongruenter Information. Der STS liegt an der Grenze auditorischer und visueller Areale, erhält aber auch Informationen von somatosensorischen Arealen (Hikosaka 1993; Schroeder und Foxe 2002). Neurone im STS des Affen reagieren insbesondere auf Kombinationen aus gesehener Handlung und dazugehörigen Geräuschen (Barraclough et al. 2005). Für den Menschen sind mittels bildgebender Verfahren im Bereich des STS und des benachbarten superioren temporalen Gyrus (STG) ebenfalls multisensorische Interaktionen für kongruente audiovisuelle Kombinationen, etwa für audiovisuelle Sprachsignale oder für gesehene Tiere und Tiergeräusche, belegt (z. B. Calvert et al. 2000; Stevenson et al. 2007; Überblick in Amedi et al. 2005). Insgesamt legen die Befunde daher nahe, dass der STS für die gemeinsame Verarbeitung komplexer auditiver und visueller Reize zuständig ist und damit auf Verhaltensebene mit multisensorischer Sprachverarbeitung und semantischen Korrespondenzen (▶ Abschn. 4.4.2) assoziiert sein könnte.

4.7.3 Multisensorische Verarbeitung in „unisensorischen" Arealen

Neuere Forschung zeigt, dass neben den multisensorischen Konvergenzzonen auch „unisensorische" Areale zu einem gewissen Anteil Informationen von anderen als ihren angestammten Sinnen erhalten und verarbeiten. „Unisensorische" Areale sind demgemäß zwar *hauptsächlich* für Informationen aus einem Sinn zuständig, berücksichtigen dabei aber auch Informationen aus anderen Sinnen (Überblick in Driver und Noesselt 2008; Klemen und Chambers 2012).

Gut belegt sind multisensorische Interaktionen im auditorischen Cortex (z. B. Brosch et al. 2005; Fu et al. 2003; Ghazanfar et al. 2005; Kayser et al. 2005; Miller und D'Esposito 2005; Pekkola et al. 2005; Schroeder und Foxe 2002; van Atteveldt et al. 2004). Einzelzellableitungen an Affen zeigen visuelle und taktile Einflüsse auf Neurone im auditorischen Cortex inklusive des primären auditorischen Cortex, und bildgebende Verfahren legen vergleichbare Einflüsse beim Menschen nahe. Einige Studien assoziieren dabei die visuellen Einflüsse im auditorischen Cortex mit der Verarbeitung von Kommunikationssignalen. Aber auch umgekehrt sind auditorische Einflüsse auf Neurone im visuellen Cortex belegt, per Einzelzellableitung allerdings vor allem für Katzen (Morrell 1972). Allman und Kollegen (z. B. Allman et al. 2009) unterscheiden für den visuellen Cortex der Katze zwischen *unisensorischen*, *multisensorischen* und *unterschwellig multisensorischen* Neuronen. Unterschwellig multisensorische Neurone zeigen im Gegensatz zu multisensorischen Neuronen keine Reaktion auf unisensorische auditive Reize, aber ihre Reizantwort auf visuelle Reize wird durch gleichzeitige auditive Reize verändert. Wiederum legen bildgebende Verfahren auch für den Menschen multisensorische Einflüsse in verschiedenen visuellen Arealen nahe (z. B. Amedi et al. 2005; Hagen, Franzén et al. 2002; McDonald et al. 2003; Pietrini et al. 2004; Scheef et al. 2009): Bewegung auf der Haut und auch sich bewegende auditive Reize gehen etwa mit Aktivität im visuellen Bewegungsareal einher, und haptische Objekterkennungsaufgaben können visuelle Areale aktivieren, die mit visueller Objektwahrnehmung assoziiert sind.

Kontrovers ist die theoretische Einordnung der Befunde. Teils ist umstritten, ob die Aktivierung eines „unisensorischen" Areals durch einen Reiz aus einem anderen Sinn tatsächlich durch die *spezifische Verarbeitung* dieses Reizes zustande kommt oder durch einen *reizunspezifischen Mechanismus*, der auch anders ausgelöst werden kann. So wird etwa diskutiert, ob das Erfühlen von Objekten visuelle Areale aktiviert, weil die taktilen Reize spezifisch in diesen visuellen Arealen verarbeitet werden oder lediglich weil die Aufgabe unspezifisch zu einer bildlichen Vorstellung der Objekte animiert (Zhang et al. 2004; vgl. auch Klemen und Chambers 2012). Ein anderes Beispiel für einen reizunspezifischen Mechanismus ist aufmerksamkeitsbasierte Aktivierung. Ein „unisensorisches" Areal kann zwar über intersensorische Kopplung der Aufmerksamkeit (▶ Abschn. 4.6) durch einen Reiz aus einem anderen Sinn aktiviert werden, aber eben auch durch andere Auslöser (Macaluso et al. 2000).

Eine weitere wichtige Frage ist, inwieweit multisensorische Verarbeitung in „unisensorischen" Arealen auf *Rückkopplung* oder *Vorwärtskopplung* beruht (Driver und Noesselt 2008). Multisensorische Verarbeitung kann die *Rückprojektion* von Signalen aus höheren multisensorischen Konvergenzzonen in frühere Areale und damit Rückkopplungsprozesse widerspiegeln. Solche Rückkopplungsprozesse wurden etwa für Mechanismen der intersensorischen Aufmerksamkeitskopplung vorgeschlagen (Macaluso et al. 2000). Ein „unisensorisches" Areal könnte die Information aus anderen Sinnen aber auch per Vorwärtskopplung über direkte Verbindungen aus anderen „unisensorischen" Arealen oder sogar subcorticalen Arealen erhalten. Anatomische Studien an verschiedenen Tierarten belegen die Existenz direkter Nervenverbindungen zwischen Arealen des auditorischen, visu-

ellen und somatosensorischen Cortex (z. B. Budinger et al. 2006; Falchier et al. 2009; Rockland und Ojima 2003), die eine Grundlage für Vorwärtskopplung darstellen. Aber auch der subcorticale Thalamus könnte an multisensorischer Vorwärtskopplung beteiligt sein (Cappe et al. 2009). Der Thalamus erhält Eingänge aus verschiedenen Sinnesorganen, die zu den „unisensorischen" Cortices weitergeleitet werden, sowie Rückprojektionen vom Cortex. Zwischen Rückkopplung und Vorwärtskopplung kann anhand der Latenzzeit unterschieden werden, die vom Beginn eines Reizes bis zur Aktivierung des mit einem anderen Sinn assoziierten Areals verstreicht. Dies gelingt mit zeitlich hochauflösenden Verfahren (▶ Kap. 2). In EKP- und MEG-Studien (EKP = ereigniskorrelierte Potenziale, MEG = Magnetencephalografie) am Menschen wurden sowohl späte als auch frühe audiovisuelle Interaktionen berichtet (z. B. McDonald et al. 2003; Molholm et al. 2002; Talsma und Woldorff 2005; Überblick in Driver und Noesselt 2008). Frühe Interaktionen sind dabei bereits ab etwa 50 ms nach Reizbeginn beobachtet worden. Dies entspricht zumindest ungefähr dem Zeitpunkt, an dem auch die corticale Verarbeitung eines unisensorischen Reizes beginnt und ist insofern ein guter Beleg für Vorwärtskopplung. Späte Interaktionen wurden deutlich später, z. B. 180 ms nach Reizbeginn, beobachtet und legen Rückkopplung nahe. Noch zu klären ist, unter welchen genauen Bedingungen multisensorische Verarbeitung durch Vorwärtskopplung vs. durch Rückkopplung zustande kommt und mit welchen psychologischen Funktionen dies verbunden ist (Klemen und Chambers 2012).

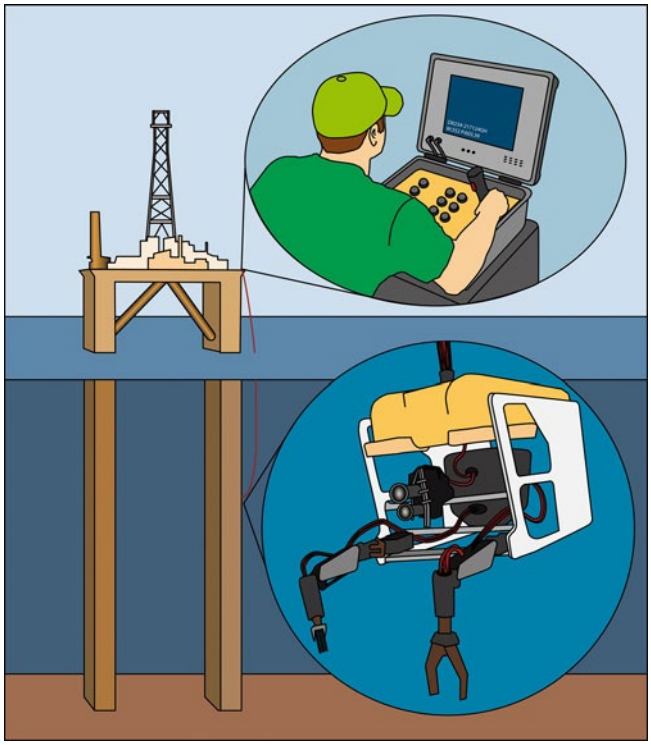


Abb. 4.13 Ein Beispiel für Teleoperationen: Fernsteuerbare Unterwasserfahrzeuge, die über Roboterarme verfügen, werden von Ölfirmen eingesetzt, um Wartungs- oder Reparaturarbeiten unter Wasser durchzuführen. Diese Unterwasserfahrzeuge sind über Kabelverbindungen mit der Ölplattform verbunden. Die Operatoren sitzen auf der Plattform und steuern die Bewegungen des Fahrzeugs und der Roboterarme über Joysticks fern und kontrollieren diese über eine Videokamera

4.8 Anwendungsbeispiele

Dieser Abschnitt stellt drei Beispiele dar, wie Erkenntnisse aus der Forschung zu multisensorischer Informationsverarbeitung in praktischen Zusammenhängen nutzbar gemacht werden können.

Teleoperationen und multisensorische Informationsverarbeitung

Bei *Teleoperationen* steuern menschliche Operatoren ein technisches Gerät aus Distanz fern und bekommen nur die sensorische Information über die Operationen und deren Wirkungen, die vom technischen System zurückgemeldet werden. Teleoperationen spielen derzeit in der Weltraumforschung, beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, bei Arbeiten in der Tiefsee und auch in der Chirurgie eine wichtige Rolle (z. B. Ferre et al. 2007). Fernsteuerbare Unterwasserfahrzeuge, die über Roboterarme verfügen, werden z. B. eingesetzt, um Wartungs- oder Reparaturarbeiten an Ölplattformen durchzuführen (Abb. 4.13). Bei der minimal invasiven Chirurgie werden durch minimale Hautschnitte ein Endoskop und chirurgische Instrumente in den Körper der Patienten eingeführt. Durch das Endoskop sehen die Chirurgen per Videokamera die Organe und die Wirkungen der chirurgischen Instrumente. Zunehmend werden dabei teleoperativ kontrollierte chirurgische Instrumente eingesetzt, die die Genauigkeit der Chirurgen erhöhen können (etwa durch Herausrechnen eines Tremors; Überblick in Dogangil et al. 2009).

Die Performanz bei Teleoperationen jeder Art – also der Zeitbedarf, die Fehlerhäufigkeit und die Feinabstimmung der angewandten Kräfte – ist dennoch in der Regel schlechter als bei direkter manueller Ausführung derselben Aufgabe. Sie hängt deutlich mit Eigenschaften des technischen Systems, nicht zuletzt mit der sensorischen Rückmeldung, zusammen (Überblick in Nitsch und Färber 2013; Prewett et al. 2010). Erkenntnisse zur multisensorischen Informationsverarbeitung liefern nun eine Vielzahl von Argumenten, in solchen technischen Systemen multisensorische Rückmeldung – statt wie oft üblich nur visuelle Rückmeldung – zu nutzen, um die Performanz zu steigern (Prewett et al. 2010; Sarter 2006): Redundante multisensorische Information ermöglicht eine präzisere und schnellere Wahrnehmung als Information aus nur einem Sinn (▶ Abschn. 4.3.2 und 4.7.1). Umgekehrt ist Information aus verschiedenen Sinnen oft komplementär, indem sie unterschiedliche Eigenschaften der Umwelt vermittelt oder für unterschiedliche Eigenschaften besonders präzise ist (▶ Abschn. 4.2). Visuelle Reize können etwa mit hoher räumlicher Präzision wahrgenommen werden, auditive Reize mit hoher zeitlicher Präzision und haptische Information liefert bei akzeptabler zeitlicher und räumlicher Präzision direkte Rückmeldung über Kräfte, die der Körper ausübt und die auf ihn einwirken (Freides 1974; Lieberman und Breazeal 2007; Welch und Warren 1980). Schließlich nehmen viele Forscher an, dass die kognitive Verarbeitung von Informationen aus verschiedenen Sinnen in teils unterschiedlichen Subsystemen erfolgt (s. Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell in ▶ Kap. 12) und daher eine bestimmte Informationsmenge besser verarbeitet werden

kann, wenn sie auf mehrere Sinne verteilt ist (z. B. Sarter 2006; Wickens 2002).

In diversen Teleoperationsszenarien wurde in den letzten Jahren untersucht, wie sich zusätzliche haptische Rückmeldung, meist in Ergänzung zu visueller Rückmeldung, auf die Performanz auswirkt. Den Operatoren wurde über das Steuergerät haptische Rückmeldung über den Kontakt eines ferngesteuerten Roboters mit einem Objekt in seiner Umgebung gegeben. In einem Szenario wurden z. B. Herzchirurgen bei der teleoperativen Durchführung typischer Aufgaben wie dem Knüpfen von Knoten in chirurgische Fäden oder der Entdeckung von Arteriosklerose an Arterienmodellen untersucht (Mayer et al. 2007). Die Chirurgen steuerten medizinische Instrumente, z. B. kleine Greifzangen, durch Bewegungen zweier verankerter Steuerstifte und mit dreidimensionaler Sicht durch Kameras. Die Kräfte, die auf die medizinischen Instrumente einwirken, konnten als haptische Rückmeldung direkt auf die Steuerstifte übertragen werden (*Kraftrückmeldung*). Die Kraftrückmeldung führte im Ergebnis zu einer vorsichtigeren Dosierung von Kräften und weniger Ermüdung der Chirurgen bei ansonsten gleicher Performanz. Beide Aspekte verbessern die Sicherheit der Patienten. Eine Metaanalyse von 32 Studien (Nitsch und Färber 2013) legt nahe, dass haptische Rückmeldung über Objektkontakt bei diversen Teleoperationen ausgeprägte positive Effekte auf die Performanz haben kann. Insbesondere Kraftrückmeldung beschleunigt die Aufgabenbearbeitung, reduziert die Fehlerrate und verbessert die Kraftregulation. Insofern wird die generelle Vorhersage aus der Grundlagenforschung bestätigt, dass multisensorische Rückmeldung die Performanz bei Teleoperationsaufgaben steigert. Allerdings muss weitere Forschung noch klären, welchem Mechanismus genau die positiven Effekte zu verdanken sind.

▪ Fahrerassistenzsysteme und Aufmerksamkeit über Sinne hinweg

Fahrerassistenzsysteme im Auto greifen in die Fahrzeugsteuerung ein, warnen die Fahrenden vor gefährlichen Situationen oder kombinieren diese Methoden. Vollautomatische Systeme, wie das bekannte Antiblockiersystem (ABS), gehören dazu, aber auch Einparkhilfen oder Kollisionsvermeidungssysteme, die primär auf die adäquate Reaktion der Fahrenden zielen. Einer kompletten Übernahme der Fahrzeugsteuerung durch viele dieser Systeme stehen rechtliche und teils noch technische Problematiken entgegen, aber auch die mangelnde Akzeptanz der Fahrenden. Stattdessen wird auf die Kombination von technischer Fahrunterstützung und Warnsignalen gesetzt. Beim Notbremsassistenten misst ein System von Sensoren und Kameras den Abstand und die Geschwindigkeitsdifferenz zu anderen Fahrzeugen und Hindernissen und detektiert die Gefahr einer Kollision. Wird ein potenzieller Auffahrunfall entdeckt, werden die Fahrenden zunächst durch Warnsignale auf die kritische Situation hingewiesen. Reagieren die Fahrenden nicht, reduzieren viele moderne Systeme die Geschwindigkeit des Autos und führen schließlich eine Notbremsung durch. Wichtig hierbei ist, dass die Fahrenden durch die Warnsignale zunächst auf die kritische Situation aufmerksam gemacht werden und es ihnen so ermöglicht wird, differenziert und situationsadäquat zu reagieren, bevor eine vorprogrammierte Standardreaktion erfolgt.

Die Warnsignale sollten dabei so gestaltet sein, dass sie effektiv und schnell die Aufmerksamkeit auf die Gefahrensituation lenken. Hier kommen psychologische Erkenntnisse ins Spiel. Die Erkenntnis, dass die exogene räumliche Aufmerksamkeit zwischen den Sinnen gekoppelt ist (▶ Abschn. 4.6.1), legt z. B. nahe, dass Warnsignale, die die visuelle Aufmerksamkeit auf eine mögliche Gefahrensituation lenken, *in einem beliebigen Sinn* präsentiert werden können. Dabei sollten sie möglichst direkt *auf den Ort der Gefahr* hinweisen. In Experimenten von Ho und Kollegen (Ho und Spence 2005; Ho et al. 2005, 2006) wurden diese Ideen in einem Fahrsimulator überprüft. Die Versuchspersonen sollten bremsen, wenn sie sich einem virtuellen Fahrzeug vor ihnen zu schnell näherten, und beschleunigen, wenn sich ein Fahrzeug von hinten zu schnell näherte (sichtbar im Rückspiegel). Warnsignale wurden vibrotaktil am Rücken und am Bauch gegeben (potenziell im Fahrersitz oder im Gurt) oder auditiv durch Lautsprecher vor und hinter dem Fahrersitz. Erwartungsgemäß beschleunigten mit der Gefahr räumlich kongruente taktile und auditive Signale (Signal von hinten für ein von hinten herannahendes Fahrzeug und Signal von vorn für die potenzielle Auffahrsituation) die richtige Reaktion im Vergleich zu inkongruenten Signalen. Probleme bei rein taktilen oder rein auditiven Warnsignalen sind jedoch, dass sie maskiert sein können, etwa durch dicke Bekleidung oder durch laute Geräusche (Gray et al. 2013), und dass ihr aufmerksamkeitslenkender Effekt durch eine fordernde zweite Aufgabe beeinträchtigt sein kann (▶ Abschn. 4.6.1). Schon das Autofahren stellt eine fordernde Aufgabe dar. Im Zusammenhang mit der Warnung vor Auffahrunfällen kommt hinzu, dass diese gehäuft auftreten, wenn die Fahrenden zusätzlich anderweitig abgelenkt sind, etwa durch ein freihändiges Gespräch am Mobiltelefon (Ho und Spence 2008). Im Fahrsimulator reduziert bereits ein einfaches Telefongespräch über das Wetter die Warnwirkung auditiver Signale und ein komplexes Geschäftsgespräch die Wirkung taktiler Signale (Mohebbi et al. 2009). Hier werden multisensorische Warnsignale interessant. Multisensorische Reize können die Aufmerksamkeit auf sich lenken, auch wenn Ressourcen bereits sehr beansprucht sind (▶ Abschn. 4.6.2). Dabei sollten die Reizbestandteile einander räumlich und zeitlich nahe sein (▶ Abschn. 4.4.1). In Fahrsimulatoren zeigen sich tatsächlich schnellere Bremsreaktionen auf entsprechende multisensorische Kollisionswarnsignale als auf unisensorische Warnsignale (z. B. Hupgeräusch von vorn und Vibration am Bauch; Ho et al. 2007; Van Erp und Van Veen 2004). Dieser Effekt tritt nicht auf, wenn die Signalbestandteile von verschiedenen Orten stammen (Lee et al. 2006). Insgesamt zeigt sich, dass beim Design von Warnsignalen gut an Erkenntnisse der Grundlagenforschung angeknüpft werden kann.

▪ Neglect und visuomotorische Adaptation

Neglect ist eine neuropsychologische Störung, bei der Betroffene eine Hälfte ihres Körpers und des sie umgebenden Raumes vernachlässigen. Neglect tritt infolge von unilateralen Schädigungen im Gehirn durch einen Schlaganfall oder Blutungen auf, und betrifft – direkt nach der Schädigung – einen sehr großen Teil der Patienten (Nys et al. 2007). Besonders anhaltende Symptome sind mit Hirnschädigungen in der *rechten* Hemisphäre verknüpft. Die Betroffenen weisen dann einen linksseitigen Neglect auf; sie

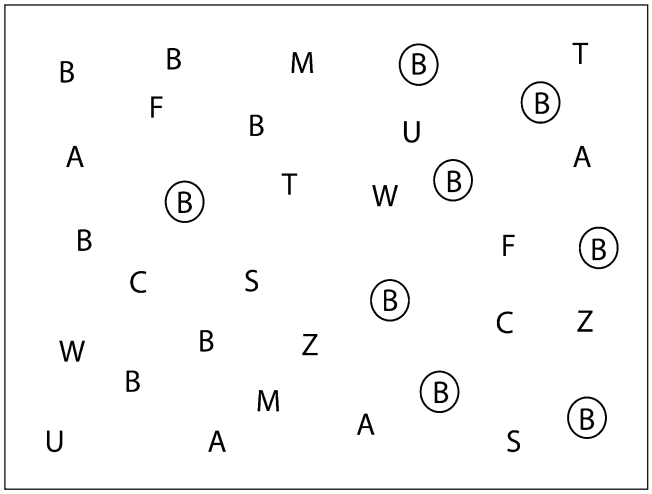


Abb. 4.14 Neglectpatienten ignorieren bei visuellen Suchaufgaben und ähnlichen Aufgaben weitgehend eine Seite. Schematisch ist hier eine typischerweise zu erwartende Performanz für das Einkreisen von Zielbuchstaben (hier des Buchstaben B) bei linksseitigem Neglect abgebildet. (Adaptiert nach Kaplan et al. 1991)

vernachlässigen Objekte und Ereignisse auf ihrer linken Seite. Das kann bedeuten, dass die Betroffenen nur die rechte Seite ihres Gesichts rasieren oder schminken, nur von der rechten Seite ihres Tellers essen, nur die rechte Seite von Objekten abzeichnen oder sich an Objekten auf ihrer linken Seite stoßen. Oft sind diese Defizite den Betroffenen nicht bewusst und führen zu Schwierigkeiten im Alltag (Newport und Schenk 2012). Neglect betrifft in der Regel mehrere Sinne, Sehen, Hören und Somatosensorik. Zur Symptomatik gehört auch, dass explorierende Augen- und Handbewegungen weitgehend auf eine Seite beschränkt sind (Behrmann et al. 1997; Husain et al. 2001), etwa wenn Blickbewegungen bei der visuellen Suche fast nur auf der rechten Hälfte des sichtbaren Feldes stattfinden (Abb. 4.14).

Neglect tritt bei Schädigungen in verschiedenen meist höheren Arealen des Cortex auf und lässt sich nicht auf Probleme in der primären sensorischen Verarbeitung zurückführen. Eine wichtige theoretische Perspektive ist, dass dem Neglect ein Defizit in der *Ausrichtung der räumlichen Aufmerksamkeit* zugrunde liegt. Mechanismen auf der geschädigten Hirnseite, die bei Gesunden für die Aufmerksamkeitszuwendung auf die kontralaterale Seite des Raumes sorgen, sollen gestört sein, und daher soll die Aufmerksamkeit von der unbeeinträchtigten zur vernachlässigten Seite hin abfallen (z. B. Corbetta et al. 2005). Eine andere theoretische Perspektive betont Defizite in der *Repräsentation des Raumes* (Bisiach und Luzzatti 1978). Karnath (2006) argumentiert, dass die Kernsymptomatik des Neglects in einer Verzerrung der *Orientierung der Wahrnehmung* typischerweise zur rechten Seite bestehe. Diese äußert sich in der fälschlichen Verschiebung der subjektiv wahrgenommenen körperlichen Mittellinie nach rechts und auch in einer spontanen Orientierung von Augen und Kopf um bis zu 30° nach rechts (Fruhmann-Berger und Karnath 2005).

Eine übliche Therapie bei Neglect besteht im ausgiebigen Üben visueller Suchaufgaben, bei denen Therapeuten die Betroffenen anleiten, auch die vernachlässigte Seite zu explorieren (Diller und Weinberg 1977). Diese Therapie ist jedoch recht zeitaufwendig und wirkt nur sehr spezifisch (Kerkhoff 1998). Eine Reihe neuerer Therapien setzt bei dem Symptom der Verzerrung der Wahrnehmungsorientierung an (Überblick in Kerkhoff und Schenk 2012). Besonders interessant hier ist die Therapie durch visuomotorische Adaptation (▶ Abschn. 4.5). In einer ersten Studie (Rossetti et al. 1998) mussten Betroffene mit linksseitigem Neglect 10 min lang mit einer Prismenbrille auf visuelle Ziele zeigen. Die Prismenbrille verschob das Abbild der Umwelt nach rechts. Eine Kontrollgruppe trug bei derselben Aufgabe Fensterglasbrillen. Nur in der Prismengruppe zeigte sich in verschiedenen Neglectsymptomen eine Verbesserung, die auch 2 h nach der Intervention noch zu beobachten war. Spätere Studien (Frassinetti et al. 2002; Serino et al. 2009) zeigten längerfristige Effekte nach längerem Training mit Prismenbrille (zweitägig über zwei Wochen). Neglectsymptome waren noch nach einen Monat reduziert, und zwar stärker als durch spontane Remission oder ein Training mit Fensterglas. Mit schwachen Prismen (6° statt 10–20° Verschiebung) oder sehr kurzem Training wirkte die Behandlung hingegen nicht (Rousseaux et al. 2006; Turton et al. 2010). Dabei ist die Reduktion der Symptome besonders erfolgreich, wenn während der Adaptation visuell nur Endpunktinformation der Zeigebewegung präsentiert wird (Ladavas et al. 2011). Wir haben in ▶ Abschn. 4.5 gesehen, dass visuomotorische Adaptation an eine Verschiebung des Abbilds nach rechts mit einer Verschiebung des visuellen Koordinatensystems nach links einhergeht, die unter Bedingungen mit Endpunktinformation besonders ausgeprägt ist. Es liegt nahe, dass solche Rekalibrierung die neglectbedingten Verzerrungen reduziert (Karnath 2006). Theoretisch ist aber noch nicht abschließend geklärt, wie Adaptation genau zur Behandlung von Neglect beiträgt (Newport und Schenk 2012). Auch zum Transfer in den Klinikalltag fehlt es derzeit noch an Erkenntnissen, z. B. darüber, welche Zusammenhänge zwischen Therapiedauer, -intensität und -zeitpunkt und ihrer Wirksamkeit bestehen (Barrett et al. 2012).

4.9 Ausblick

Multisensorische Informationsverarbeitung ist ein noch relativ junges Forschungsgebiet. Einen Großteil unserer heutigen Erkenntnisse verdanken wir Forschung aus den letzten vielleicht zwei Dekaden, auch wenn sich einige Forscher schon vorher intensiv mit der Thematik auseinandergesetzt und den Weg bereitet haben. Die Zunahme multisensorischer Forschung ist zum Teil sicher den besser gewordenen technischen Möglichkeiten zur Reizpräsentation geschuldet, etwa den Möglichkeiten virtueller Realitäten, die es ermöglichen, exakt aufeinander abgestimmte und systematisch manipulierbare visuelle, haptische und auditive Reize zu präsentieren. Aber sie zeigt auch eine Abkehr von dem lange vorherrschenden Ansatz, einzelne psychologische Funktionen wie Wahrnehmung und Motorik oder die sensorische Verarbeitung in verschiedenen Sinneskanälen als weitgehend voneinander getrennte Prozesse zu betrachten und isoliert zu untersuchen (▶ Abschn. 4.7). Wahrnehmung wird vielmehr zunehmend im Kontext eines übergeordneten Zweckes, erfolgreiches Handeln in natürlichen Umwelten zu ermöglichen, gesehen. Natürliche Umwelten sind multisensorisch, und die

Handlungssteuerung macht Gebrauch von Informationen aus verschiedenen Sinnen. Die Untersuchung multisensorischer Informationsverarbeitung kann damit als ein Teil des Bestrebens aufgefasst werden, Wahrnehmung unter solchen Bedingungen zu studieren, die die zentralen Aspekte natürlicher Wahrnehmungssituationen widerspiegeln. Zu demselben Bestreben gehören z. B. die Betrachtung sensomotorischer Prozesse als Wahrnehmungs-Handlungs-Schleifen, in denen Sensorik und Motorik kontinuierlich rückgekoppelt sind, und die zunehmende Erforschung der Zusammenhänge zwischen Wahrnehmung, Kognition, Motivation und Handlung. Insofern ist zu erwarten, dass multisensorische Informationsverarbeitung auch in den nächsten Dekaden ein zentrales Forschungsthema sein wird.

Dabei stellt sich, wie auch in diesem Kapitel ersichtlich, das junge Wissen zur multisensorischen Informationsverarbeitung oft noch als fragmentarisch dar. Die theoretische Einordnung und empirische Bearbeitung verschiedener Prozesse multisensorischer Kombination könnten stringenter sein, die Verknüpfung zwischen neurophysiologischen und psychologischen Befunden ist kontrovers und teilweise ungeklärt, genauso wie die Zusammenhänge zwischen multisensorischer Integration und Aufmerksamkeit; zentrale Begriffe, z. B. „multisensorische Integration", werden in unterschiedlichen Bereichen der Forschung unterschiedlich verwendet (Stein et al. 2010). Weitere aktuelle Teilfragestellungen der multisensorischen Informationsverarbeitung, die hier aus Platzgründen nicht näher beschrieben werden konnten, betreffen die Verwendung multisensorischer Informationen beim Werkzeuggebrauch (z. B. Müsseler und Sutter 2009; Sutter et al. 2013) oder bei der Selbstwahrnehmung des eigenen Körpers (z. B. Blanke 2009). Ein wichtiges aktuelles und zukünftiges Ziel der Forschung zur multisensorischen Informationsverarbeitung ist sicher auch die weitere Integration bestehender Fragestellungen, Erkenntnisse und Ansätze in ein kohärentes Ganzes. Mathematische Ansätze wie die idealen Beobachtermodelle (▶ Abschn. 4.3.1) und dabei Bayes-Ansätze zur Modellierung psychologischer Mechanismen könnten hierbei eine wichtige Rolle einnehmen.

4.10 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Verschiedene Sinne tragen komplementäre und redundante Informationen zur Wahrnehmung und Handlungssteuerung bei. Komplementäre Information kann zu einer gemeinsamen Repräsentation eines Ereignisses kombiniert werden. Die Integration redundanter Information ermöglicht eine präzisere und schnellere Wahrnehmung.
- Bei der Kombination komplementärer Information können unterschiedliche Aspekte eines Ereignisses in einer gemeinsamen Repräsentation zusammengefasst oder Information aus einem Sinn zur Interpretation von Information aus einem anderen Sinn genutzt werden.
- Bei intersensorischen Beeinflussungen, wie dem Bauchredner- oder McGurk-Effekt, wird die Wahrnehmung von Information aus einem Sinn durch Information aus einem anderen Sinn beeinflusst. Intersensorische Beeinflussungen belegen eindringlich die multisensorische Verarbeitung von Information.
- Gemäß Modellen der Integration redundanter Information wird eine Eigenschaft der Umwelt zunächst aus jeder einzelnen Information separat geschätzt. Die separaten Schätzer werden durch gewichtete Mittelung zu einem Gesamteindruck integriert. Das Gewicht jedes einzelnen Schätzers richtet sich nach dessen Präzision, sodass der Gesamteindruck besonders präzise wird.
- Multisensorische Verarbeitung setzt voraus, dass Reize an verschiedenen Sinnen als zusammengehörig wahrgenommen werden. Die zeitliche und räumliche Nähe von Reizen in verschiedenen Sinnen fördert deren gemeinsame multisensorische Verarbeitung; die Rolle semantischer und synästhetischer Korrespondenzen zwischen Reizen wird diskutiert.
- Unser Wahrnehmungssystem verfügt über effektive Mechanismen, die für einen kontinuierlichen Abgleich zwischen den Sinnen sorgen, sodass redundante Information aus verschiedenen Sinnen aufeinander bezogen werden kann. Es zeigen sich gegenseitige Rekalibrierungen der Sinne aneinander. Rekalibrierung kompensiert für Veränderungen des Wahrnehmungssystems und der Wahrnehmungsumgebung.
- Sowohl exogene als auch endogene Mechanismen räumlicher Aufmerksamkeit sind über die Sinne gekoppelt. Es gelingt nur schwer, die Aufmerksamkeit für verschiedene Sinne auf unterschiedliche Orte zu lenken. Auffällige Reize in einem Sinn ziehen gegen unsere Intention die Aufmerksamkeit über die Sinne hinweg an sich.
- Multisensorische Integration kann Aufmerksamkeit erfordern oder automatisch erfolgen. Multisensorische Reize, die automatisch integriert werden, ziehen ihrerseits besonders effektiv die Aufmerksamkeit an sich.
- Neurone im Colliculus superior der Katze reagieren besonders stark auf multisensorische Reizkombinationen, wenn die Einzelreize zeitlich und räumlich nah und relativ schwach sind. Visuelle, auditive und somatosensorische Reize werden hier in einem augenzentrierten Koordinatensystem codiert.
- Multisensorische Verarbeitung findet in höheren corticalen Arealen statt, in denen Information aus verschiedenen „unisensorischen" Arealen konvergiert, und in Grenzen auch in „unisensorischen" Arealen, die Informationen aus anderen Sinnen wohl teils direkt aus anderen „unisensorischen" Arealen und teils per Rückprojektion von höheren Arealen erhalten.

Schlüsselbegriffe

Bauchrednereffekt (*ventriloquist effect*) Intersensorische Beeinflussung, bei der der Ort eines auditiven Reizes zum Ort eines gleichzeitigen visuellen Reizes hin verschoben wahrgenommen wird. Dies geschieht etwa bei der Zuordnung gehörter Sprache zu den gesehenen Mundbewegungen der Puppe eines Bauchredners. Beim *zeitlichen* Bauchrednereffekt hingegen wird der *Zeitpunkt* eines meist visuellen Reizes zum Zeitpunkt eines leicht asynchronen auditiven Reizes hin verschoben wahrgenommen.

Disambiguierung (*disambiguation*) Multisensorische Kombination, bei der Information aus einem Sinn durch Information aus einem anderen Sinn eine eindeutige Interpretation erhält.

Intersensorische Beeinflussung (*crossmodal bias*) Die Wahrnehmung eines Reizes in einem Sinn wird durch einen gleichzeitigen Reiz in einem anderen Sinn systematisch beeinflusst.

Koordinatensystem (*coordinate frame*) Ein Koordinatensystem dient zur eindeutigen Bestimmung der Position eines Objekts oder Ereignisses. Bei der Verarbeitung sensorischer Information spielen verschiedene Koordinatensysteme eine Rolle, die Positionen z. B. relativ zum Auge, zum Kopf oder zum Körper codieren. Damit räumliche Information aus verschiedenen Sinnen aufeinander bezogen werden kann, ist in der Regel eine Transformation zwischen den Koordinatensystemen erforderlich.

Korrespondenzproblem (*correspondence problem*) In natürlichen Umwelten liegt eine Vielzahl von Reizen an jedem unserer Sinne an. Das Wahrnehmungssystem muss erkennen, welche Information aus den verschiedenen Sinnen zu demselben Ereignis oder Objekt gehört und daher gemeinsam verarbeitet werden sollte.

McGurk-Effekt (*McGurk effect*) Intersensorische Beeinflussung, bei der die gesehenen Mundbewegungen beim Aussprechen einer Silbe (z. B. /ga-ga/), die auditive Verarbeitung einer akustisch präsentierten zweiten Silbe (z. B. /ba-ba/) verändern. Gehört wird dann eine dritte Silbe (im Beispiel /da-da/). Der McGurk-Effekt zeigt, dass bei der Sprachwahrnehmung visuelle mit auditiver Information integriert wird.

Multisensorische Integration (*multisensory integration*) Prozesse, die redundante Information aus verschiedenen Sinnen zu einem einheitlichen Wahrnehmungseindruck über einen Aspekt eines Objekts oder Ereignisses verarbeiten. Beachten Sie, dass in einigen Teilen der Literatur der Begriff „multisensorische Integration" in einer umfassenderen Bedeutung verwendet wird.

Multisensorische Kombination (*multisensory combination*) Prozesse, die einander ergänzende, nicht überlappende Information aus verschiedenen Sinnen zu einer gemeinsamen, validen und unter Umständen mehrdimensionalen Repräsentation von einem Objekt oder Ereignis miteinander verknüpfen.

Multisensorische Konvergenzzone (*multisensory convergence zone*) Höheres corticales Areal, in dem afferente Nervenbahnen aus „unisensorischen" Arealen *verschiedener* Sinne konvergieren und in dem multisensorische Neurone die Information aus verschiedenen Sinnen gemeinsam verarbeiten. Multisensorische Konvergenzzonen liegen oft an den Grenzregionen „unisensorischer" Areale.

Multisensorische Verarbeitung (*multisensory process*) Oberbegriff für jedes beliebige multisensorische Phänomen und jede Interaktion zwischen mindestens zwei Sinnen.

Multisensorisches Neuron (*multisensory neuron*) Einzelnes Neuron, das auf Reize aus *verschiedenen* Sinnen reagiert. Das Vorhandensein multisensorischer Neurone belegt multisensorische Verarbeitung auf neurophysiologischer Ebene und stellt ein wichtiges Definitionskriterium für multisensorische Hirnareale dar.

Optimale Integration (*optimal integration*) Spezialfall der (robusten) schwachen Fusion, bei der die Gewichte der Einzelschätzer *optimal* gewählt sind, sodass sie bei gegebener Präzision der Einzelschätzer die Präzision des Gesamteindrucks maximieren. Die empirische Überprüfung, ob optimale Integration vorliegt, kann nur vorgenommen werden, wenn gleichzeitig gewisse mathematische Annahmen getroffen werden, etwa über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einzelschätzer.

Orthogonale Hinweisreizaufgabe (*orthogonal cueing-paradigm*) In dieser Aufgabe wird die Aufmerksamkeit durch einen Hinweisreiz (*cue*) auf die linke oder rechte Seite der Körpermittellinie der Versuchsperson gelenkt. Danach erscheint ein Zielreiz (links oder rechts) an einer oberen oder unteren Position. Versuchspersonen sollen per Drücken auf eine obere oder untere Taste schnell entscheiden, ob der Zielreiz oben oder unten erschienen ist. Die beurteilte Reizdimension und die Dimension der geforderten Reaktion sind orthogonal zur Dimension, entlang derer Aufmerksamkeit manipuliert wird. Hinweis- und Zielreiz können sich auf unterschiedliche Sinne beziehen, um die Kopplung der Aufmerksamkeit zwischen Sinnen zu studieren.

Perturbationstechnik (*perturbation technique*) Bei dieser Technik werden künstliche Objekte präsentiert, bei denen redundante Signale leicht diskrepante Information über eine Eigenschaft des Objekts liefern. Die Diskrepanzen sind klein, sodass sie nicht bemerkt werden können und auch durch die begrenzte Präzision sensorischer Verarbeitung zustande gekommen sein könnten. Der beim künstlichen Objekt wahrgenommene Wert der Eigenschaft wird zu den Werten der einzelnen Signale (oder besser zu deren wahrgenommener Größe) in Bezug gesetzt, um die Beiträge einzelner Signale bei der Integration redundanter Information zu bestimmen.

Präzision (*precision*) Der Begriff der Präzision bezieht sich hier auf das Ausmaß *unsystematischer* Ungenauigkeiten, mit denen ein Schätzer eine Eigenschaft der Umwelt abbildet. Abzugrenzen ist der Begriff „akkurat", der sich auf systematische Ungenauigkeiten bezieht. Die Präzision in der Wahrnehmung kann z. B. über Diskriminationsschwellen bestimmt werden.

Redundante Information (*redundant information*) Überlappende Information in verschiedenen Sinnen oder in verschiedenen Signalen eines Sinnes, die dieselbe Eigenschaft eines Objekts oder Ereignisses mehrfach abbildet.

Rekalibrierung (*recalibration*) Damit das Wahrnehmungssystem redundante Information aus verschiedenen Sinnen korrekt aufeinander beziehen kann, muss die geschätzte Umwelteigenschaft auf einer für alle Sinne gemeinsamen Skala abgebildet sein. Mechanismen der Rekalibrierung sorgen für einen kontinuierlichen

Abgleich zwischen Schätzern derselben Eigenschaft in verschiedenen Sinnen.

Robuste schwache Fusion (*robust weak fusion*) Prinzipien der Integration redundanter Information, gemäß denen zunächst separate Schätzer aus jeder Einzelinformation gebildet werden, die dann entsprechend ihrer Präzision gewichtet gemittelt und zu einem Gesamteindruck „verschmolzen" (Fusion) werden. Robust wird der Gesamteindruck dadurch, dass Einzelschätzer, deren Wert stark von allen anderen Schätzern abweicht, nur gering gewichtet werden.

Shams-Illusion (*Shams' illusion*) Intersensorische Beeinflussung, bei der die Anzahl kurzer auditiver Reize die Anzahl gleichzeitig gesehener visueller Reize systematisch beeinflusst. Initial gezeigt wurde, dass mehr als ein Lichtblitz gesehen wird, wenn ein einzelner Lichtblitz zusammen mit zwei oder mehr auditiven Reizen präsentiert wird.

Visuomotorische Adaptation (*visuomotor adaptation*) Experimentelles Paradigma, bei dem Informationen des Sehsinnes verändert und in systematische Diskrepanz zu anderen Sinnen und der Motorik gebracht werden. In der klassischen Variante wird eine Prismenbrille getragen, die das Abbild der Umwelt auf der Netzhaut seitlich verschiebt. In einer Adaptationsphase führen Versuchspersonen eine sensomotorische Aufgabe durch. Initial sind die sensomotorischen Leistungen durch die Brille beeinträchtigt, werden aber nach kurzer Adaptation korrigiert. Nach längerer Adaptationsphase treten nach Absetzen der Brille negative Nacheffekte in der sensomotorischen Leistung auf. Die Effekte bei der visuomotorischen Adaptation werden durch das Zusammenwirken schneller motorischer Korrekturen und langsamer räumlicher Rekalibrierung zwischen den Sinnen erklärt.

Weiterführende Literatur

Bennett, D., & Hill, C. (Eds.) (2014). Sensory Integration and the Unity of Consciousness. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. (Aufsatzsammlung mit Schwerpunkt auf psychologischen Prozessen multisensorischer Verarbeitung.)

Bremner, A. J., Lewkowicz, D. J., & Spence, C. (Eds.). (2012). Multisensory development. Oxford: Oxford University Press. (Aufsatzsammlung zur Entwicklungspsychologie multisensorischer Verarbeitung.)

Calvert, G., Spence, C., & Stein, B. E. (Eds.). (2004). The handbook of multisensory processes. Cambridge, Massachusetts: MIT press. (Umfassende Sammlung von Aufsätzen mit einer breiten Perspektive auf diverse Aspekte multisensorischer Informationsverarbeitung.)

Ho, C., & Spence, C. (2008). The multisensory driver: Implications for ergonomic car interface design. Hampshire: Ashgate Publishing. (Behandelt ergonomische Anwendungen von Erkentnissen zur multisensorischen Informationsverarbeitung.)

Murray, M. M., & Wallace, M. T. (Eds.). (2011). The neural bases of multisensory processes. Boca Raton: CRC Press. (Aufsatzsammlung mit Schwerpunkt auf neurophysiologischen Prozessen multisensorischer Verarbeitung.)

Spence, C. & Driver, J. (Eds.) (2004), *Crossmodal Space and Crossmodal Attention*. Oxford: Oxford University Press. (Aufsatzsammlung mit dem Schwerpunkt Aufmerksamkeit.)

Stein, B. E. (Ed.). (2012). The new handbook of multisensory processing. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. (Umfassende Sammlung von Aufsätzen mit einer breiten Perspektive auf diverse Aspekte multisensorischer Informationsverarbeitung.)

Trommershauser, J., Kording, K., & Landy, M. S. (Eds.). (2011). Sensory cue integration. Oxford: Oxford University Press. (Umfassende Sammlung von Aufsätzen zur mathematischen Modellierung der Integration redundanter Signale.)

Welch, R. B. (1978). *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. New York: Academic Press. (Trotz seines Alters ein lesenswertes Buch über visuomotorische Adaptation.)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Steffen D. Bruckbauer für die Erstellung der Abbildungen und Claire Weyel für die Unterstützung beim Literaturverzeichnis danken.

Literatur

Adams, W. J., Graf, E. W., & Ernst, M. O. (2004). Experience can change the 'light-from-above' prior. *Nature Neuroscience*, *7*(10), 1057–1058.

Alais, & Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near-optimal bimodal integration. *Current Biology*, *14*(3), 257–262.

Allman, B. L., Keniston, L. P., & Meredith, M. A. (2009). Not just for bimodal neurons anymore: The contribution of unimodal neurons to cortical multisensory processing. *Brain Topography*, *21*, 157–167.

Alsius, A., Navarra, J., & Soto-Franco, S. (2007). Attention to touch weakens audiovisual speech integration. *Experimental Brain Research*, *183*, 399–404.

Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, *4*, 324–330.

Amedi, A., Kriegstein, K. von, Atteveldt, N. M. van, Beauchamp, M. S., & Naumer, M. J. (2005). Functional imaging of crossmodal identification and object recognition. *Experimental Brain Research*, *166*, 559–571.

Atkins, J. E., Jacobs, R. A., & Knill, D. C. (2003). Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, *43*, 2603–2613.

Atteveldt, N. van, Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, L. (2004). Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron*, *43*, 271–282.

Avillac, M., Hamed, B. S., & Duhamel, J. R. (2007). Multisensory integration in the ventral intraparietal area of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, *27*(8), 1922–1932.

Barraclough, N. E., Xiao, D., Baker, C. I., Oram, M. W., & Perrett, D. I. (2005). Integration of visual and auditory information by superior temporal sulcus neurons responsive to the sight of actions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(3), 377–391.

Barrett, A. M., Goedert, K. M., & Basso, J. C. (2012). Prism adaptation for spatial neglect after stroke: Translational practice gaps. *Nature Reviews Neurology*, *8*(10), 567–577.

Bedford, F. L. (1999). Keeping perception accurate. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 4–12.

Beers, R. J. van, Sittig, A. C., & Gon, J. J. D. van der (1999). Integration of proprioceptive and visual position information: An experimentally supported model. *Journal of Neurophysiology*, *81*(3), 1355–1364.

Behrmann, M., Watt, S., Black, S. E., & Barton, J. J. S. (1997). Impaired visual search in patients with unilateral neglect: An oculographic analysis. *Neuropsychologia*, *35*, 1445–1458.

Bell, A. H., Meredith, M. A., Opstal, A. J. van, & Munoz, D. P. (2005). Crossmodal integration in the primate superior colliculus underlying the preparation and initiation of saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology*, *93*(6), 3659–3673.

Bernstein, I. H., & Edelstein, B. A. (1971). Effects of some variations in auditory input upon visual choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, *87*, 242–247.

Bertelson, P., & Aschersleben, G. (1998). Automatic visual bias of perceived auditory location. *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*(3), 482–489.

Bertelson, P., & Radeau, M. (1981). Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Perception & Psychophysics*, *29*, 578–584.

Bertelson, P., Vroomen, J., Gelder, B. de, & Driver, J. (2000). The ventriloquist effect does not depend on the direction of deliberate visual attention. *Perception & Psychophysics*, *62*, 321–332.

Bertelson, P., Frissen, I., Vroomen, J., & Gelder, B. de (2006). The aftereffects of ventriloquism: Patterns of spatial generalization. *Perception & Psychophysics*, *68*, 428–436.

Bisiach, E., & Luzzatti, C. (1978). Unilateral neglect of representational space. *Cortex*, *14*, 129–133.

Blanke, O. (2009). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature Reviews Neuroscience*, *13*, 556–571.

Bremmer, F., Klam, F., Duhamel, J. R., Hamed, B. S., & Graf, W. (2002). Visual-vestibular interactive responses in the macaque ventral intraparietal area (VIP). *European Journal of Neuroscience*, *16*, 1569–1586.

Bresciani, J. P., Dammeier, F., & Ernst, M. O. (2008). Tri-modal integration of visual, tactile and auditory signals for the perception of sequences of events. *Brain Research Bulletin*, *75*(6), 753–760.

Bresciani, J. P., Ernst, M. O., Drewing, K., Bouyer, G., Maury, V., & Kheddar, A. (2005). Feeling what you hear: Auditory signals can modulate tactile taps perception. *Experimental Brain Research*, *162*, 172–180.

Brosch, M., Selezneva, E., & Scheich, H. (2005). Nonauditory events of a behavioral procedure activate auditory cortex of highly trained monkeys. *Journal of Neuroscience*, *25*(29), 6797–6806.

Bruns, P., Liebnau, R., & Röder, B. (2011). Cross-modal training induces changes in spatial representations early in the auditory processing pathway. *Psychological Science*, *22*, 1120–1126.

Budinger, E., Heil, P., Hess, A., & Scheich, H. (2006). Multisensory processing via early cortical stages: Connections of the primary auditory cortical field with other sensory systems. *Neuroscience*, *143*, 1065–1083.

Calvert, G. A., & Thesen, T. (2004). Multisensory integration: Methodological approaches and emerging principles in the human brain. *Journal of Physiology-Paris*, *98*(1–3), 191–205.

Calvert, G. A., Campbell, R., & Brammer, M. J. (2000). Evidence from functional magnetic resonance imaging of crossmodal binding in the human heteromodal cortex. *Current Biology*, *10*(11), 649–657.

Cappe, C., Morel, A., Barone, P., & Rouiller, E. M. (2009). The thalamocortical projection systems in primate: An anatomical support for multisensory and sensorimotor interplay. *Cerebral Cortex*, *19*, 2025–2037.

Cellini, C., Kaim, L., & Drewing, K. (2013). Visual and Haptic integration in the estimation of softness of deformable objects. *i-Perception*, *4*, 516–531.

Chen, L. H., & Vroomen, J. (2013). Intersensory binding across space and time: A tutorial review. *Attention, Perception & Psychophysics*, *75*(5), 790–811.

Clower, D. M., & Boussaoud, D. (2000). Selective use of perceptual recalibration versus visuomotor skill acquisition. *Journal of Neurophysiology*, *84*(5), 2703–2708.

Cohen, Y. E., & Andersen, R. A. (2000). Reaches to sounds encoded in an eye-centered reference frame. *Neuron*, *27*(3), 647–652.

Colin, C., Radeau, M., Deltenre, P., & Morais, J. (2001). Rules of intersensory integration in spatial scene analysis and speechreading. *Psychologica Belgica*, *41*, 131–144.

Corbetta, M., Kincade, M. J., Lewis, C., Snyder, A. Z., & Sapir, A. (2005). Neural basis and recovery of spatial attentional deficits in spatial neglect. *Nature Neuroscience*, *8*, 1424–1425.

Cressman, E. K., & Henriques, D. Y. (2010). Reach adaptation and proprioceptive recalibration following exposure to misaligned sensory input. *Journal of Neurophysiology*, *103*, 1888–1895.

Diederich, A., & Colonius, H. (2004). Bimodal and trimodal multisensory enhancement: Effects of stimulus onset and intensity on reaction time. *Perception & Psychophysics*, *66*, 1388–1404.

Diller, L., & Weinberg, J. (1977). Hemi-inattention in rehabilitation: The evolution of a rational remediation program. *Advances in Neurology*, *18*, 63–82.

DiLuca, M., Machulla, T., & Ernst, M. O. (2009). Recalibration of multisensory simultaneity: Cross-modal transfer coincides with a change in perceptual latency. *Journal of Vision*, *9*, 1–16.

Dogangil, G., Davies, B. L., & Rodriguez y Baena, F. (2010). A review of medical robotics for minimally invasive soft tissue surgery. *Journal of Engineering in Medicine*, *224*(5), 653–679.

Drewing, K., & Kaim, L. (2009). Haptic shape perception from force and position signals varies with exploratory movement direction and the exploring finger. *Attention, Perception & Psychophysics*, *71*(5), 1174–1184.

Driver, J., & Noesselt, T. (2008). Multisensory interplay reveals crossmodal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*, *57*, 11–23.

Driver, J., & Spence, C. (2004). Crossmodal spatial attention: Evidence from human performance. In C. Spence, & J. Driver (Hrsg.), *Crossmodal Space and Crossmodal Attention* (S. 179–220). Oxford: Oxford University Press.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*, 429–433.

Ernst, M. O., & Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(4), 162–169.

Evans, K. K., & Treisman, A. (2010). Natural cross-modal mappingsbetween visual and auditory features. *Journal of Vision*, *10*(1), 1–12.

Fairhall, S. L., & Macaluso, E. (2009). Spatial attention can modulate audiovisual integration at multiple cortical and subcortical sites. *European Journal of Neuroscience*, *29*, 1247–1257.

Falchier, A., Schroeder, C., Hackett, T., Lakatos, P., Nascimento-Silva, S., Ulbert, I., Karmos, G., & Smiley, J. (2009). Projection from visual areas V2 and prostriata to caudal auditory cortex in the monkey. *Cerebral Cortex*, *20*(7), 1529–1538.

Ferre, M., Buss, M., Aracil, R., Melchiorri, C., & Balaguer, C. (Hrsg.). (2007). *Advances in Telerobotics*. Berlin: Springer.

Frassinetti, F., Angeli, V., Meneghello, F., Avanzi, S., & Ladavas, E. (2002). Long-lasting amelioration of visuospatial neglect by prism adaptation. *Brain*, *125*, 608–623.

Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality :Cross-modal functions, information complexity, memory, and deficit. *Psychological Bulletin*, *81*(5), 284–310.

Fruhmann-Berger, M., & Karnath, H. O. (2005). Spontaneous eye and head position in patients with spatial neglect. *Journal of Neurology*, *252*, 1194–1200.

Fu, K. M. G., Johnston, T. A., Shah, A. S., Arnold, L., Smiley, J., Hackett, T. A., Garraghty, P. E., & Schroeder, C. E. (2003). Auditory cortical neurons respond to somatosensory stimulation. *Journal of Neuroscience*, *23*, 7510–7515.

Fujisaki, W., Shimojo, S., Kashino, M., & Nishida, S. (2004). Recalibration of audiovisual simultaneity. *Nature Neuroscience*, *7*, 773–778.

Gallace, A., & Spence, C. (2006). Multisensory synesthetic interactions in the speeded classification of visual size. *Perception & Psychophysics*, *68*, 1191–1203.

Geisler, W. S. (2003). Ideal Observer Analysis. In L. M. Chalupa, & J. S. Werner (Hrsg.), *The Visual Neurosciences* (S. 825–837). Cambridge: MIT Press.

Gepshtein, S., Burge, J., Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2005). The combination of vision and touch depends on spatial proximity. *Journal of Vision*, *5*, 1013–1023.

Ghazanfar, A. A., & Schroeder, C. E. (2006). Is the neocortex essentially multisensory? *Trends in Cognitive Science*, *10*, 278–285.

Ghazanfar, A. A., Maier, J. X., Hoffman, K. L., & Logothetis, N. K. (2005). Multisensory integration of dynamic faces and voices in rhesusmonkey auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, *25*(20), 5004–5012.

Gray, R., Spence, C., Ho, C., & Tan, H. Z. (2013). Efficient multimodal cuing of spatial attention. *Proceedings of IEEE*, *101*(9), 2113–2122.

Hagen, M. C., Franzén, O., McGlone, F., Essick, G., Dancer, C., & Pardo, J. V. (2002). Tactile motion activates the human middle temporal/V5 (MT/VT) complex. *European Journal of Neuroscience*, *16*(5), 957–964.

Harris, C. S. (1965). Perceptual adaptation to inverted, reversed, and displaced vision. *Psychological Review*, *72*(6), 419–444.

Hartline, P. H., Vimal, R. L., King, A. J., Kurylo, D. D., & Northmore, D. P. (1995). Effects of eye position on auditory localization and neural representation of space in superior colliculus of cats. *Experimental Brain Research*, *104*, 402–408.

Hay, J. C., & Pick, H. L. (1966). Visual and proprioceptive adaptation to optical displacement of the visual stimulus. *Journal of Experimental Psychology*, *71*, 150–158.

Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2008). Visual-haptic cue weighting is independent of modality-specific attention. *Journal of Vision*, *8*(1), 1–16.

Held, R. (1965). Plasticity in sensory-motor systems. *Scientific American*, *213*(5), 84–94.

Helmholtz, H. v (1909). *Handbuch der physiologischen Optik* (3. Aufl.). Leipzig: Leonard Voss.

Henriques, D. Y., & Cressman, E. K. (2012). Visuomotor adaptation and proprioceptive recalibration. *Journal of Motor Behavior*, *44*(6), 435–444.

Hikosaka, K. (1993). The polysensory region in the anterior bank of the caudal superior temporal sulcus of the macaque monkey. *Biomedical Research*, *14*, 41–45.

Ho, & Spence, C. (2005). Assessing the effectiveness of various auditory cues in capturing a driver's visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *11*(3), 157–174.

Ho, & Spence, C. (2008). *The multisensory driver: Implications for ergonomic car interface design*. Hampshire: Ashgate Publishing.

Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2005). Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, *8*(6), 397–412.

Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2006). The differential effect of vibrotactile and auditory cues on visual spatial attention. *Ergonomics*, *49*(7), 724–738.

Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2007). Multisensory in-car warning signals for collision avoidance. *Human Factors*, *49*(6), 1107–1114.

Huang, R. S., Chen, C. F., Tran, A. T., Holstein, K. L., & Sereno, M. I. (2012). Mapping multisensory parietal face and body areas in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(44), 18114–18119.

Husain, M., Mannan, S., Hodgson, T., Wojciulik, E., Driver, J., & Kennard, C. (2001). Impaired spatial working memory across saccades contributes to abnormal search in parietal neglect. *Brain*, *124*, 941–952.

Kadunce, D. C., Vaughan, J. W., Wallace, M. T., & Stein, B. E. (2001). The influence of visual and auditory receptive field organization on multisensory integration in the superior colliculus. *Experimental Brain Research*, *139*, 303–310.

Kaplan, R. F., Verfaellie, M., Meadows, M. E., Caplan, L. R., Pessin, M. S., & DeWitt, L. D. (1991). Changing attentional demands in left hemispatial neglect. *Archives of Neurology*, *48*, 1263–1266.

Karnath, H. O. (2006). Neglect. In H. O. Karnath, & P. Thier (Hrsg.), *Neuropsychologie* (S. 213–222). Berlin: Springer.

Kayser, C., Petkov, C. I., Augath, M., & Logothetis, N. K. (2005). Integration of touch and sound in auditory cortex. *Neuron*, *48*, 373–384.

Kerkhoff, G. (1998). Cognitive neurovisual rehabilitation: A cross-over study in patients with neglect and hemianopia. *European Journal of Neuroscience*, *10*, 375.

Kerkhoff, G., & Schenk, T. (2012). Rehabilitation of neglect: An update. *Neuropsychologia*, *50*(6), 1072–1079.

Klemen, J., & Chambers, C. D. (2012). Current perspectives and methods in studying neural mechanisms of multisensory interactions. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*, 111–133.

Koelewijn, T., Bronkhorst, A., & Theeuwes, J. (2010). Attention and the multiple stages of multisensory integration: A review of audiovisual studies. *Acta Psychologica*, *134*(3), 372–384.

Köhler, W. (1929). *Gestalt psychology*. New York: Liveright.

Ladavas, E., Bonifazi, S., Catena, L., & Serino, A. (2011). Neglect rehabilitation by prism adaptation: Different procedures have different impacts. *Neuropsychologia*, *49*, 1136–1145.

Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B., & Young, M. (1995). Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, *35*(3), 389–412.

Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Marshall, D. (2006). Effects of adaptive cruise control and alert modality on driver performance. *Transportation Research Record*, *1980*, 49–56.

Lieberman, J., & Breazeal, C. (2007). TIKL: Development of a wearable vibrotactile feedback suit for improved human motor learning. *Robotics, IEEE Transactions on*, *23*(5), 919–926.

Logothetis, N. K., & Pfeuffer, J. (2004). On the nature of the BOLD fMRI contrast mechanism. *Magnetic Resonance Imagingm*, *22*(10), 1517–1531.

Lubbe, R. H. J. van der, & Postma, A. (2005). Interruption from irrelevant auditory and visual onsets even when attention is in a focused state. *Experimental Brain Research*, *164*(4), 464–471.

Macaluso, E., Frith, C. D., & Driver, J. (2000). Modulation of human visual cortex by crossmodal spatial attention. *Science*, *289*, 1206–1208.

Marks, L. E., Ben-Artzi, E., & Lakatos, S. (2003). Cross-modal interactions in auditory and visual discrimination. *International Journal of Psychophysiology*, *50*, 125–145.

Matusz, P. J., & Eimer, M. (2011). Multisensory enhancement of attentional capture in visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(5), 904–909.

Mayer, H., Nagy, I., Knoll, A., Braun, E. A., Bauernschmitt, R., & Lange, R. (2007). Haptic feedback in a telepresence system for endoscopic heart surgery. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *16*(5), 459–470.

McDonald, J. J., Teder-Salejarvi, W. A., Di Russo, F., & Hillyard, S. A. (2003). Neural substrates of perceptual enhancement by cross-modal spatial attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 10–19.

McDonald, J. J., Teder-Salejarvi, W. A., & Hillyard, S. A. (2000). Involuntary orienting of sound improves visual perception. *Nature*, *407*, 906–908.

McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing Lips and seeing voices. *Nature*, *264*, 746–748.

Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1986). Visual, auditory, and somatosensory convergence on cells in superior colliculus results in multisensory integration. *Journal of Neurophysiology*, *56*, 640–662.

Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1996). Spatial determinants of multisensory integration in cat superior colliculus neurons. *Journal of Neurophysiology*, *75*(5), 1843–1857.

Middelweerd, M. J., & Plomp, R. (1987). The effect of speechreading on the speech-reception threshold of sentences in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, *82*, 2145–2147.

Miller, J. O. (1991). Channel interaction and the redundant targets effect in bimodal divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *17*, 160–169.

Miller, L. M., & D'Esposito, M. (2005). Perceptual fusion and stimulus coincidence in the cross-modal integration of speech. *Journal of Neuroscience*, *25*, 5884–5893.

Mohebbi, R., Gray, R., & Tan, H. Z. (2009). Driver reaction time to tactile and auditory read-end collision warnings while talking on a cell phone. *Human Factors: Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *51*, 102–110.

Molholm, S., Ritter, W., Murray, M. M., Javitt, D. C., Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). Multisensory auditory-visual interactions during early sensory processing in humans: A high-density electrical mapping study. *Cognitive Brain Research*, *14*, 115–128.

Morrell, F. (1972). Visual system's view of acoustic space. *Nature*, *238*, 44–46.

Mudd, S. A. (1963). Spatial stereotypes of four dimensions of pure tone. *Journal of Experimental Psychology*, *66*, 347–352.

Müsseler, J., & Sutter, C. (2009). Perceiving one's own movements when using a tool. *Consciousness and Cognition*, *18*, 359–365.

Newell, F. N., Bülthoff, H. H., & Ernst, M. O. (2003). Cross-modal perception of actively explored objects. In H. S. Oakley, & S. O'Modhrain (Hrsg.), *Proceedings EuroHaptics 2003* (S. 291–299). Dublin: Trinity College Dublin.

Newport, R., & Schenk, T. (2012). Prisms and neglect: What have we learned? *Neuropsychologia*, *50*(6), 1080–1091.

Nitsch, V., & Färber, B. (2013). A meta-analysis of the effects of haptic interfaces on task performance with teleoperation systems. *IEEE Transactions on Haptics*, *6*(4), 387–398.

Noppeney, U. (2011). Characterization of multisensory integration with fMRI: Experimental design, statistical analysis, and interpretation. In M. M. Mur-

ray, & M. T. Wallace (Hrsg.), *The neural bases of multisensory processes* (S. 233–252). Boca Raton: CRC Press.

Nys, G. M. S., Zandvoort, M. J. E. van, Kort, P. L. M. de, Jansen, B. P. W., Haan, E. H. F. de, & Kappelle, L. J. (2007). Cognitive disorders in acute stroke: Prevalence and clinical determinants. *Cerebrovascular Diseases*, *23*, 408–416.

Parise, & Spence, C. (2009). When birds of a feather flock together: Synesthetic correspondences modulate audiovisual integration in non-synesthetes. *PLoS ONE*, *4*, e5664.

Peck, C. K., Baro, J. A., & Warder, S. M. (1995). Effects of eye position on saccadic eye movements and on the neuronal responses to auditory and visual stimuli in cat superior colliculus. *Experimental Brain Research*, *103*, 227–242.

Pekkola, J., Ojanen, V., Autti, T., Jääskeläinen, I. P., Möttönen, R., Tarkiainen, A., & Sams, M. (2005). Primary auditory cortex activation by visual speech: An fMRI study at 3 T. *Neuroreport*, *16*(2), 125–128.

Perrault Jr., T. J., Vaughan, J. W., Stein, B. E., & Wallace, M. T. (2005). Superior colliculus neurons use distinct operational modes in the integration of multisensory stimuli. *Journal of Neurophysiology*, *93*(5), 2575–2586.

Pietrini, P., Furey, M. L., Ricciardi, E., Gobbini, M. I., Wu, W. H. C., Cohen, L., Guazelli, M., & Haxby, J. V. (2004). Beyond sensory images: Object-based representation in the human ventral pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(15), 5658–5663.

Prewett, M. S., Johnson, R. C., Saboe, K. N., Elliott, L. R., & Coovert, M. D. (2010). Managing workload in human-robot interaction: A review of empirical studies. *Computers in Human Behavior*, *26*(5), 840–856.

Radeau, M., & Bertelson, P. (1974). The after-effects of ventriloquism. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *26*, 63–71.

Ramachandran, V. S., & Hubbard, E. M. (2001). Synaesthesia – A window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies*, *8*, 3–34.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1988). Components of prism adaptation in terminal and concurrent exposure – Organization of the eye-hand coordination loop. *Perception & Psychophysics*, *44*, 59–68.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1993). Adaptive coordination and alignment of eye and hand. *Journal of Motor Behavior*, *25*, 75–88.

Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *29*(3), 431–444.

Rock, I., & Victor, J. (1964). Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, *143*, 594–596.

Rockland, K. S., & Ojima, H. (2003). Multisensory convergence in calcarine visual areas in macaque monkey. *International Journal of Psychophysiology*, *50*, 19–26.

Rosas, P., Wichmann, F. A., & Wagemans, J. (2007). Texture and object motion in slant discrimination: Failure of reliability-based weighting of cues may be evidence for strong fusion. *Journal of Vision*, *7*, 1–21.

Rosenblum, L. D. (2010). *See what I'm saying: The extraordinary powers of our five senses*. New York: W. W. Norton & Company Inc.

Rosenthal, O., Shimojo, S., & Shams, L. (2009). Sound-induced flash illusion is resistant to feedback training. *Brain Topography*, *21*, 185–192.

Rossetti, Y., Koga, S., & Mano, T. (1993). Prismatic displacement of vision induces transient changes in the timing of eye-hand coordination. *Perception & Psychophysics*, *54*, 355–364.

Rossetti, Y., Rode, G., Pisella, L., Farne, A., Li, L., Boisson, D., & Perenin, M. T. (1998). Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect. *Nature*, *395*, 166–169.

Rousseaux, M., Bernati, T., Saj, A., & Kozlowski, O. (2006). Ineffectiveness of prism adaptation on spatial neglect signs. *Stroke*, *37*, 542–543.

Rowland, B., Quessy, S., Stanford, T. R., & Stein, B. E. (2007a). Multisensory integration shortens physiological response latencies. *Journal of Neuroscience*, *27*, 5879–5884.

Rowland, B., Stanford, T. R., & Stein, B. E. (2007b). A model of the neural mechanisms underlying multisensory integration in the superior colliculus. *Perception*, *36*, 1431–1443.

Santangelo, V., Fagioli, S., & Macaluso, E. (2010). The costs of monitoring simultaneously two sensory modalities decrease when dividing attention in space. *NeuroImage*, *49*(3), 2717–2727.

Santangelo, V., & Spence, C. (2007). Multisensory cues capture spatial attention regardless of perceptual load. Journal of Experimental Psychology. *Human Perception and Performance*, *33*, 1311–1321.

Sapir, E. (1929). A study in phonetic symbolism. *Journal of Experimental Psychology*, *12*, 225–239.

Sarter, N. B. (2006). Multimodal information presentation: Design guidance and research challenges. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *36*, 439–445.

Scheef, L., Boecker, H., Daamen, M., Fehse, U., Landsberg, M. W., Granath, D. O., Mechling, H., & Effenberg, A. O. (2009). Multimodal motion processing in area V5/MT: Evidence from an artificial class of audio-visual events. *Brain Research*, *1252*, 94–104.

Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). The timing and laminar profile of converging inputs to multisensory areas of the macaque neocortex. *Cognitive Brain Research*, *14*, 187–198.

Sereno, M. I., & Huang, R. S. (2006). A human parietal face area contains aligned head-centered visual and tactile maps. *Nature Neuroscience*, *9*, 1337–1343.

Sereno, M. I., & Huang, R. S. (2014). Multisensory maps in parietal cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, *24*, 39–46.

Serino, A., Barbiani, M., Rinaldesi, M. L., & Ladavas, E. (2009). Effectiveness of prism adaptation in neglect rehabilitation a controlled trial study. *Stroke*, *40*, 1392–1398.

Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. (2000). Illusions: What you see is what you hear. *Nature*, *408*, 788.

Shore, D. I., Barnes, M. E., & Spence, C. (2006). The temporal evolution of the crossmodal congruency effect. *Neuroscience Letters*, *392*, 96–100.

Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., & Wolf, P. (2013). Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*, 21–53.

Silver, M. A., & Kastner, S. (2009). Topographic maps in human frontal and parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*(11), 488–495.

Slutsky, D., & Recanzone, G. H. (2001). Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *Neuroreport*, *12*, 7–10.

Spence, C. (2011). Crossmodal correspondences: A tutorial review. *Attention, Perception & Psychophysics*, *73*, 971–995.

Spence, C., & Driver, J. (1997). Audiovisual links in exogenous covert spatial orienting. *Perception & Psychophysics*, *59*(1), 1–22.

Spence, C., Nicholls, M. E. R., Gillespie, N., & Driver, J. (1998). Cross-modal links in exogenous covert spatial orienting between touch, audition, and vision. *Perception & Psychophysics*, *60*(4), 544–557.

Spence, C., Pavani, F., & Driver, J. (2000). Crossmodal links between vision and touch in covert endogenous spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*(4), 1298–1319.

Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *Merging of the senses*. Cambridge: MIT Press.

Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration: Current issues from the perspective of the single neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(4), 255–266.

Stein, B. E., Stanford, T. R., Wallace, M. T., Vaughan, J. W., & Jiang, W. (2004). Crossmodal spatial interactions in subcortical and cortical circuits. In C. Spence, & J. Driver (Hrsg.), *Crossmodal Space and Crossmodal Attention* (S. 25–50). Oxford: Oxford University Press.

Stein, B. E., Burr, D., Constantinidis, C., Laurienti, P. J., Meredith, M. A., Perrault, T. J., Ramachandran, R., Röder, B., Rowland, B. A., Sathian, K., Schroeder, C. E., Shams, L., Stanford, T. R., Wallace, M. T., Yu, L., & Lewkowicz, D. J. (2010). Semantic confusion regarding the development of multisensory integration: a practical solution. *European Journal of Neuroscience*, *31*, 1713–1720.

Stevenson, R. A., Geoghegan, M. L., & James, T. W. (2007). Superadditive BOLD activation in superior temporal sulcus with threshold non-speech objects. *Experimental Brain Research*, *179*, 85–95.

Stricanne, B., Andersen, R. A., & Mazzoni, P. (1996). Eyecentered, head-centered, and intermediate coding of remembered sound locations in area LIP. *Journal of Neurophysiology*, *76*, 2071–2076.

Sutter, C., Sülzenbrück, S., Rieger, M., & Müsseler, J. (2013). Limitations of distal effect anticipation when using tools. *New Ideas in Psychology*, *31*, 247–257.

Talsma, D., & Woldorff, M. G. (2005). Selective attention and multisensory integration: Multiple phases of effects on the evoked brain activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*, 1098–1114.

Talsma, D., Senkowski, D., Soto-Faraco, S., & Woldorff, M. G. (2010). The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(9), 400–410.

Turton, A. J., O'Leary, K., Gabb, J., Woodward, R., & Gilchrist, I. D. (2010). A single blinded randomised controlled pilot trial of prism adaption for improving self-care in stroke patients with neglect. *Neuropsychological Rehabilitation*, *20*, 180–196.

Van Erp, J. B. F., & Veen, H. A. H. C. van (2004). Vibrotactile in-vehicle navigation system. *Transportation Ressearch Part F: Traffic Psychology and Behavior*, *7*, 247–256.

Van der Burg, E., Olivers, C. N. L., Bronkhorst, A. W., & Theeuwes, J. (2008). Pip and pop: Nonspatial auditory signals improve spatial visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *34*, 1053–1065.

Vroomen, J., & Keetels, M. (2006). The spatial constraint in intersensory pairing: No role in temporal ventriloquism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *32*, 1063–1071.

Vroomen, J., & Keetels, M. (2010). Perception of intersensory synchrony: A tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*, 871–884.

Wallace, M. T., Ramachandran, R., & Stein, B. E. (2004). A revised view of sensory cortical parcellation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*, 2167–2172.

Ward, L. M., McDonald, J. J., & Lin, D. (2000). On asymmetries in cross-modal spatial attention orienting. *Perception & Psychophysics*, *62*(6), 1258–1264.

Watkins, S., Shams, L., Tanaka, S., Haynes, J. D., & Rees, G. (2006). Sound alters activity in human V1 in association with illusory visual perception. *NeuroImage*, *31*(3), 1247–1256.

Welch, R. B. (1978). *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. New York: Academic Press.

Welch, R. B., & Warren, D. H. (1980). Immediate perceptual response to intersensory discrepancy. *Psychological Bulletin*, *88*(3), 638–667.

Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *3*(2), 159–177.

Wozny, D., Beierholm, U., & Shams, L. (2008). Human trimodal perception follows optimal statistical inference. *Journal of Vision*, *8*(3), 1–11.

Zhang, M., Weisser, V. D., Stilla, R., Prather, S. C., & Sathian, K. (2004). Multisensory cortical processing of object shape and its relation to mental imagery. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *4*(2), 251–259.

Aufmerksamkeit

Joseph Krummenacher und Hermann J. Müller

5.1 Einleitung – 104

5.2 Selektive Aufmerksamkeit – 105

5.2.1 Klassische Ansätze zur selektiven Aufmerksamkeit – 105

5.2.2 Selektive visuelle Aufmerksamkeit – 109

5.2.3 Visuelle Suche – 113

5.2.4 Temporale Mechanismen der selektiven Aufmerksamkeit – 118

5.2.5 Limitationen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit – 120

5.2.6 Neurokognitive Mechanismen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit – 122

5.2.7 Resümee – 131

5.3 Aufmerksamkeit und Performanz – 132

5.3.1 Aufgabenkombination und geteilte Aufmerksamkeit – 132

5.3.2 Automatische Verarbeitung – 137

5.3.3 Aufmerksamkeit und Umschalten zwischen Aufgaben – 141

5.3.4 Resümee – 141

5.4 Anwendungsbeispiele – 141

5.5 Ausblick – 142

5.6 Weiterführende Informationen – 143

Literatur – 146

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_5

Im Blickfang

Das Cocktailparty-Phänomen

Stellen Sie sich vor, Sie besuchen eine Feier, bei der sich die Anwesenden in Gruppen zu Gesprächen zusammenfinden, während im Hintergrund Musik gespielt wird. Sie gesellen sich selbst zu einer der Gruppen und unterhalten sich angeregt mit den Leuten. Den akustischen Hintergrund dieser Unterhaltung bildet eine Geräuschkulisse mit Gesprächen in den anderen Gruppen, der musikalischen Unterhaltung sowie all den Geräuschen, die durch das Kommen und Gehen von Partygästen, das Klingen der Gläser beim Anstoßen und viele andere akustische Ereignisse entstehen. In solch einer Situation können Sie leicht an sich selbst beobachten, dass Sie eine große Menge der im Raum vorhandenen akustischen Signale gleichzeitig – als undifferenzierte Geräuschkulisse – „hören". Hauptsächlich sind Sie aber an der Unterhaltung interessiert, die in der Gruppe abläuft, zu der Sie sich gesellt haben, und Sie konzentrieren sich auf die jeweils sprechende Person. Sie sind dann gut in der Lage, dem Beitrag dieser Person zu folgen. Dabei nehmen Sie die umgebende Geräuschkulisse als solche nicht mehr wahr (obwohl Sie sie natürlich immer noch „im Ohr" haben). Sie nehmen auch die Unterhaltung, die in einer benachbarten Gruppe stattfindet, nicht wahr, obwohl die dort gerade sprechende Person Ihnen möglicherweise näher (z. B. Rücken an Rücken) ist als die Person in der eigenen Gruppe, der Sie gerade zuhören. Wird aber in der Nachbargruppe Ihr eigener Name genannt, so kann es passieren, dass Sie plötzlich dem dort ablaufenden Gespräch eine Zeit lang folgen (um zu erfahren, was von anderen über Sie gesagt wird, wie Sie eingeschätzt werden, welche Gerüchte über Sie im Umlauf sind usw.), bevor Sie sich wieder der Unterhaltung in der eigenen Gruppe zuwenden. Von dieser haben Sie aber in der Zwischenzeit einen Teil verpasst, sodass es eine kurze Zeit dauert, bis Sie sich wieder in dieses Gespräch einfinden.

Diese Situation veranschaulicht einige wesentliche Funktionen der „Aufmerksamkeit", die in diesem Kapitel thematisiert werden. Obwohl alle an unserem Ohr ankommenden akustischen Reize sensorisch codiert werden, können wir nur einen kleinen Ausschnitt der in diesen Signalen enthaltenen Information zu einer gegebenen Zeit (bewusst) wahrnehmen. Wir richten also unsere Aufmerksamkeit auf einen Ausschnitt dieser Reize, d. h., wir stellen unseren Wahrnehmungsapparat auf die entsprechenden Signale ein und blenden damit den Rest der Signale mehr oder weniger effektiv aus. Worauf wir aufmerken, wird in der Regel durch unsere aktuellen „Motive", Absichten bzw. Ziele bestimmt (z. B. nützliche Neuigkeiten zu erfahren, über die in der eigenen Gruppe gerade gesprochen wird). Unsere Aufmerksamkeit kann aber auch ungewollt durch „externe", für unsere augenblicklichen Ziele irrelevante Reize abgelenkt werden. Wahrnehmung involviert also wesentlich Aufmerksamkeit, die dazu dient, dass die für zielgerichtete Handlungen erforderlichen Informationen fortlaufend aus der Fülle der sensorischen Eingangssignale ausgelesen werden. Wie diese Auslese bzw. die selektive Aufmerksamkeit funktioniert, ist eine der Hauptfragen dieses Kapitels.

5.1 Einleitung

William James (1842–1910), einer der Mitbegründer der modernen empirischen Psychologie, war folgender Ansicht:

» „Everyone knows what attention is. It is the taking possession of the mind, in clear and vivid form, of one out of several possible objects or trains of thought. Focalisation, concentration of consciousness are of its essence. It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others." (James 1890, S. 403 f.)

Im diesem Definitionsansatz wird eine zentrale Funktion von Aufmerksamkeit angesprochen: die **selektive Aufmerksamkeit**. Der Begriff bezieht sich auf die Auswahl von bestimmten Inhalten oder Informationen (die notwendigerweise mit einer Deselektion von anderen Informationen einhergeht) mit dem Ziel, bestimmte Informationen (möglichst ohne Interferenz durch andere Informationen) dem Bewusstsein bzw. der Steuerung von Denken und Handeln zugänglich zu machen. Diese Funktion der perzeptiven Selektion wird durch das oben beschriebene Cocktailparty-Phänomen veranschaulicht, das einen der Ausgangspunkte für die moderne Forschung zur selektiven Aufmerksamkeit darstellte (► Zur Vertiefung 5.1).

In der Forschung stand die Frage der **perzeptiven Selektion** lange Zeit so sehr im Vordergrund, dass eine weitere wichtige Funktion der Aufmerksamkeit außer Acht zu geraten drohte: die *handlungsvermittelnde Funktion*, die darin besteht, das Verarbeitungssystem mit allen seinen Komponenten – von der Wahrnehmung bis zur motorischen Reaktion – so einzustellen, dass die in der jeweils zu erledigenden Aufgabe spezifizierten Handlungsziele möglichst effizient (koordiniert) erreicht werden. Das heißt, das eigentliche durch die Aufmerksamkeit zu lösende Problem ist, „how to allow behaviour to be controlled by the right information at the right time to the right object in the right order" (Styles 1997, S. 118). Dem zufolge dient die selektive Aufmerksamkeit wesentlich der Handlungssteuerung bzw. der **handlungssteuernden Selektion**: der *selection for action* (Allport 1987; Neumann 1987; Van der Heijden 1992).

Allport (1987) illustriert dieses Selektionsproblem anhand einer Reihe von einfachen Situationen:

» „Viele Früchte sind in Reichweite und klar zu sehen; aber für jedes individuelle Hinreichen der Hand, für jeden Akt des Pflückens muss Information über genau eine von diesen das spezielle Muster und die Richtung der Bewegungen steuern. Die Anordnung der anderen Äpfel, schon vom Gehirn encodiert, muss irgendwie vorübergehend von der direkten Steuerung des Greifvorgangs entkoppelt werden, obgleich sie natürlich noch die Handlung beeinflussen kann, z. B. als Repräsentation eines Hindernisses, um das herumgegriffen werden muss, das aber nicht entfernt werden soll, und so weiter. Ein Raubtier (z. B. ein Sperber) trifft auf einen Schwarm von untereinander ähnlichen Beutetieren, aber es muss seinen Angriff selektiv auf eines von ihnen richten; das fliehende Opfer muss, mit gleicher Geschwindigkeit, genau einen der möglichen Fluchtwege auswählen." (Allport 1987, S. 396)

In solchen Situationen gibt es also eine biologische Notwendigkeit für einen attentionalen Mechanismus der sensorischen Kontrolle zielgerichteter Handlungen, d. h. einen

» „Mechanismus […], der selektiv eine Untermenge der verfügbaren und potenziell relevanten Information bezeichnen kann, um Kontrolle über ein bestimmtes Effektorsystem zu erlangen, und der selektiv den Rest [von Information] von solch einer Kontrolle abkoppeln kann. Diese Notwendigkeit […] entsteht direkt aus den unzähligen Kombinationen möglicher Zuordnungen zwischen Domänen des sensorischen Inputs und des motorischen Outputs innerhalb der hochgradig parallel verteilten Organisation des Nervensystems." (Allport 1987, S. 397)

Neumann (1987) entwickelte eine ähnliche Vorstellung. Ihm zufolge ist eine Handlung (*action*) eine Sequenz von nichtreflexiven Bewegungen, die durch dieselbe interne Kontrollstruktur gesteuert werden. Handlungen werden durch Fertigkeiten (*skills*) gesteuert, die als hierarchisch strukturierte Schemata im (prozeduralen) Langzeitgedächtnis gespeichert sind. *Selection for action* involviert dabei mehrere Selektionsprobleme, insbesondere das der Effektorrekrutierung und das der Spezifikation der Handlungsparameter. Für das Problem der Effektorrekrutierung illustriert Neumann zwei mögliche Lösungen, wobei er auf die Metapher eines viel befahrenen Eisenbahnnetzes zurückgreift, entweder mit einer zentralen Steuerungsinstanz oder aber mit multiplen dezentral-automatischen Kontrollsystemen, die eine Kapazitätsbeschränkung in der Ausführung von Handlungen bedingen: Eine Lösung für die Vermeidung von Zusammenstößen besteht in der Einrichtung einer zentralen Steuerungsstation, die die Züge auf den Gleiswegen kontrolliert; eine andere Lösung besteht in einem System, in dem das Gleisnetz in Abschnitte unterteilt ist und ein Zug, sobald er in einen Abschnitt einfährt, automatisch Signale setzt, die andere Züge von der gleichzeitigen Benutzung des Abschnitts abhalten. Wichtig ist, dass dies eine Kapazitätslimitierung nach sich zieht, „because one ongoing action inhibits all other possible actions" (Neumann 1987, S. 378).

Der Ansatz der *selection for action* weist also darauf hin, dass selektive Aufmerksamkeit nur im umfassenderen Kontext von Handlungen verstanden werden kann, wobei die funktionelle Architektur des gesamten Verarbeitungssystems mit zu betrachten ist. Diese Architektur bedingt, dass die menschliche Performanz (d. h. das Handlungspotenzial) limitiert ist: Sie gestattet nur die Ausführung von einer begrenzten Anzahl von Handlungen zu einer Zeit (im Extrem von nur einer Handlung). Die Untersuchung der funktionellen Architektur des Verarbeitungssystems, d. h. der Komponenten und ihrer Interaktionen, impliziert also die Frage, worin die Beschränkungen in der Ausführung von Handlungen begründet sind. Daneben stellt sich die Frage, wie solche Beschränkungen bei der Lösung praktischer Probleme so weit wie möglich umgangen werden können. Diese Fragen werden in der Forschung im Zusammenhang mit *Aufmerksamkeit und Performanz* thematisiert.

Der oben skizzierten thematischen Entwicklung entsprechend gliedert sich dieses Kapitel in zwei Teile. In ▶ Abschn. 5.2 werden vor allem die perzeptive Selektionsfunktion der Aufmerksamkeit und ihre experimentelle Darstellung im Rahmen der Informationsverarbeitungs- bzw. Kognitionspsychologie sowie in der Kognitiven Neurowissenschaft betrachtet. In ▶ Abschn. 5.3 werden handlungsbezogene Limitationen der Aufmerksamkeit (insbesondere solche, die für die gleichzeitige Ausführung multipler Tätigkeiten bedeutsam sind) sowie ihre Implikationen für die funktionelle Architektur des Verarbeitungssystems erörtert.

5.2 Selektive Aufmerksamkeit

Die Selektionsfunktion der Aufmerksamkeit wird deutlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass zu einem gegebenen Zeitpunkt eine schier unendliche Menge von auditiven, visuellen, taktilen etc. Reizen auf unsere verschiedenen Sinnesorgane einwirken und sensorische Rezeptionsprozesse in Gang setzen. Dabei werden wir uns allerdings nur eines kleinen Ausschnitts aus dieser Informationsmenge bewusst, bzw. nur ein kleiner Ausschnitt aus dieser Menge determiniert unsere fortlaufende Interaktion mit der Umwelt. Dies heißt, aus der Gesamtmenge der eingehenden Information (sowie der im Gedächtnis gespeicherten Information) muss ständig die relevante Teilmenge ausgewählt werden, um effizientes und störungsfreies Handeln zu ermöglichen. Auf welche Weise die Aufmerksamkeit diese Funktion erfüllt, ist Gegenstand der Forschung zur selektiven Aufmerksamkeit. Im Folgenden werden zunächst klassische Paradigmen, Befunde und theoretische Ansätze der experimentalpsychologischen Forschung zur selektiven auditiven Aufmerksamkeit dargestellt – nicht zuletzt, weil diese Forschung eine Reihe von theoretischen Kontroversen aufwarf, die die aktuellen Debatten nach wie vor bestimmen. Anschließend folgt eine Darstellung der „neueren" Forschung zur selektiven visuellen Aufmerksamkeit, die auch Schlüsselstudien zu den neurokognitiven Mechanismen einbezieht, die der visuellen Selektion zugrunde liegen.

5.2.1 Klassische Ansätze zur selektiven Aufmerksamkeit

Grundlegende Paradigmen und Befunde Methodisch begründet sich die moderne Forschung zur selektiven Aufmerksamkeit auf drei Paradigmen, von denen zwei Aufmerksamkeit in der (sprachlich-)auditiven Modalität untersuchten: Cherrys (1953) Paradigma des dichotischen Hörens (*dichotic listening*), Broadbents (1954) Split-Span-Paradigma und Welfords (1952) Paradigma zur Untersuchung der psychologischen Refraktärperiode (PRP; *psychological refractory period*). Die experimentellen Untersuchungen mittels dieser Paradigmen führten zur ersten Informationsverarbeitungstheorie der Aufmerksamkeit, der Filtertheorie von Broadbent (1958), die den Ausgangspunkt für alle späteren Theorievorschläge und theoretischen Kontroversen bildet.

Cherry (1953) war an dem sogenannten Cocktailparty-Phänomen (▶ Im Blickfang) interessiert, d. h. an der Frage, wie man es fertigbringt, einem bestimmten Gespräch in einer Umgebung zu folgen, in der es einen Kontext anderer Gespräche gibt. Zur experimentellen Untersuchung dieser Frage entwickelte Cherry das **Paradigma des dichotischen Hörens**. In diesem Paradigma werden dem linken und dem rechten Ohr eines Probanden gleichzeitig je eine „Nachricht" zugespielt, wobei eine der Nachrichten zu beschatten, d. h. laut nachzusprechen (also zu beach-

Zur Vertiefung 5.1

Alertness und Vigilanz

Aus den verschiedenen Modellen, die im Zuge der Erforschung der Aufmerksamkeit entwickelt wurden, lässt sich grob eine allgemeine Unterteilung in Intensitäts- und Selektivitätsaspekte ableiten. Während die in diesem Kapitel hauptsächlich behandelte Selektivität die geteilte und die selektive bzw. fokussierte Aufmerksamkeit umfasst, setzt sich die Intensitätsdimension aus Alertness, Vigilanz und Daueraufmerksamkeit zusammen (Fernandez-Duque und Posner 2001; Posner 2008; Posner und Petersen 1990; Sturm 2005; Van Zomeren und Brouwer 1994).

Der Begriff *Alertness* bezeichnet dabei eine generelle Aufmerksamkeitsaktivierung in Erwartung eines Zielreizes. Wird diese Aktivierung selbst generiert, so handelt es sich um intrinsische bzw. tonische Alertness, die tageszeitbedingten Schwankungen unterliegt. Phasische Alertness meint demgegenüber eine erhöhte Reaktionsbereitschaft gegenüber eintreffenden Stimuli infolge eines Warnreizes. Beide Formen werden hauptsächlich durch einfache Reaktionszeitaufgaben mit oder ohne unvorhersehbare Warnreize gemessen (Posner 2008; Sturm und Willmes 2001; Sturm et al. 1999). Mögliche Aufgaben finden sich etwa im Wiener Testsystem (Schuhfried 1992) oder in der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP; Zimmermann und Fimm 2009).

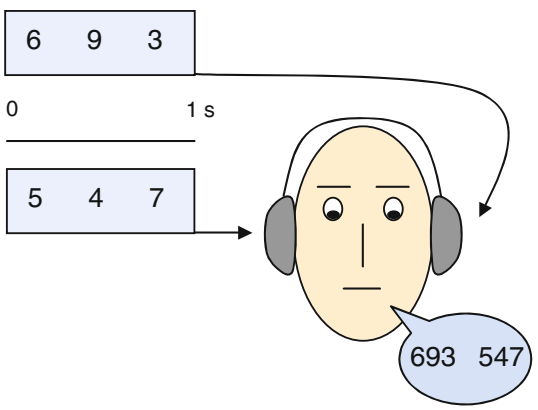
Vigilanz kann als eine Form der Daueraufmerksamkeit angesehen werden und wird häufig auch als äquivalent zur tonischen Alertness beschrieben. Dabei bezeichnet Daueraufmerksamkeit ganz allgemein ein Beobachten über einen längeren Zeitraum, wobei häufig auf Reize reagiert werden muss. Im Gegensatz dazu wird von Vigilanz gesprochen, wenn die Aufmerksamkeit über einen langen Zeitraum bei einer geringen Reizfrequenz aufrechterhalten werden muss (Mackworth 1948; Parasuraman 1986; Sadaghiani und D'Esposito 2014; Sturm und Willmes 2001; Warm et al. 2008). Als Beispiel nannte Norman Mackworth (1948), der Begründer der systematischen Vigilanzforschung, etwa die Überwachung eines Radarbildschirms. Die Aufrechterhaltung der Vigilanz scheint keine leichte Aufgabe und mit viel Stress verbunden zu sein. Bereits nach wenigen Minuten kann gerade bei hohen Aufgabenanforderungen und einer geringen Salienz der Zielreize eine Vigilanzminderung in Form höherer Reaktionszeiten und/oder einer geringeren Anzahl an Treffern über die Zeit beobachtet werden (Warm et al. 2008). Testaufgaben zu Daueraufmerksamkeit und Vigilanz sind per Definition eintönig und fokussieren typischerweise nicht nur auf die Reaktionsgeschwindigkeit, sondern auch auf die Anzahl an Treffern und Fehlern sowie deren Zeitverlauf. Beispiele dafür sind etwa der Continuous Performance Test (CPT; Rosvold et al. 1956), der Sustained Attention to Response Test (SART; Robertson et al. 1997) sowie Aufgaben aus dem Wiener Testsystem (Schuhfried 1992) und der TAP (Zimmermann und Fimm 2009).

Läsions- (Malhotra et al. 2009; Robertson et al. 1997), Split-Brain- (Diamond 1979) und Bildgebungsstudien (Langner und Eickhoff 2013; Paus et al. 1997; Sturm und Willmes 2001; Sturm et al. 1999; Thiel et al. 2004) weisen darauf hin, dass tonische Alertness und Vigilanz in einem rechtshemisphärischen Netzwerk verortet sind, das frontoparietale Anteile, den Hirnstamm und den Thalamus mit einschließt. Aufgaben zur phasischen Alertness erweitern dieses Netzwerk und dehnen es zudem auf frontoparietale Areale der linken Gehirnhemisphäre aus (Sturm und Willmes 2001). Neurophysiologisch wurden vor allem eine Beteiligung des cholinergen basalen Vorderhirnsystems und des noradrenergen Systems mit Ursprung im Locus coeruleus gefunden (Parasuraman et al. 1998; Posner und Petersen 1990).

Alertness und Vigilanz scheinen als grundlegende Aufmerksamkeitsaspekte die Basis für komplexere Funktionen wie selektive und räumliche Aufmerksamkeit zu bilden (Clemens et al. 2013; Coull et al. 1996; Husain und Rorden 2003; Matthias et al. 2010). So kann ein Training der tonischen sowie phasischen Alertness beispielsweise positive Auswirkungen auf die Symptomatik bei Neglectpatienten haben (DeGutis und Van Vleet 2010; Robertson et al. 1995; Sturm et al. 2006). Liegen allerdings Störungen dieser basalen Intensitätsaspekte vor, so ist zu deren Behandlung nur ein jeweils spezifisches Training hilfreich; ein zu komplexes Training scheint die Symptomatik unter Umständen sogar verschlechtern zu können (Sturm et al. 1997).

ten), ist. Die Methode wird daher auch als *Shadowing* bezeichnet. Im Anschluss an Beschattungsdurchgänge waren die Probanden kaum in der Lage, die Bedeutung der nichtbeachteten Nachricht wiederzugeben oder zu berichten, ob sie von einer Sprache (Englisch) in eine andere (Deutsch mit englischem Akzent) wechselte. Die Probanden bemerkten jedoch, wenn die Stimme des Sprechers sich von der eines Mannes zu der einer Frau änderte oder wenn ein Piepton präsentiert wurde. Bei Darbietung von zwei Nachrichten mit derselben Stimme in einem Ohr fanden die Probanden die Beschattung einer Nachricht (auf der Basis ihres Inhalts) äußerst schwierig.

In Broadbents (1954) *Split-Span-Paradigma* wird der Probandin beispielsweise eine Sequenz von simultanen Zahlenpaaren, die eine Zahl dem linken und die andere dem rechten Ohr, dargeboten (z. B. 2–7, 6–9, 1–5; ◘ Abb. 5.1). Die Probandin hat die Aufgabe, die Zahlen möglichst vollständig wiederzugeben. Dabei zeigte sich, dass die Wiedergabe bevorzugt nach Ohr (2–6–1, 7–9–5), nicht jedoch nach Darbietungspaaren (2–7, 6–9, 1–5), erfolgte. Broadbent (1958) schloss aus diesen Befunden, dass aufgabenirrelevante Nachrichten vor ihrer vollen Verarbeitung abgeblockt werden (dichotisches Hören), dass physikalische Merkmale der Eingangsinformation effektive Hinweisreize (*cues*) sind, um die unterschiedlichen Nachrichten auseinanderzuhalten (dichotisches Hören), dass nur physikalische (nicht aber inhaltliche) Merkmale der nichtbeachteten Nachricht entdeckt werden können (dichotisches Hören) und dass folglich die Nachrichtenselektion auf der Basis physikalischer Reizmerkmale (z. B. Reizort, Ohr, Frequenz) erfolgt.



◘ **Abb. 5.1** Das Paradigma des dichotischen Hörens, illustriert am Beispiel der Split-Span-Aufgabe (Broadbent 1954). Eine Sequenz von simultanen Zahlenpaaren, von denen die eine Zahl dem linken und die andere dem rechten Ohr (6–5, 9–4, 3–7) dargeboten wird, wird bevorzugt nach Ohr (6–9–3, 5–4–7) wiedergegeben

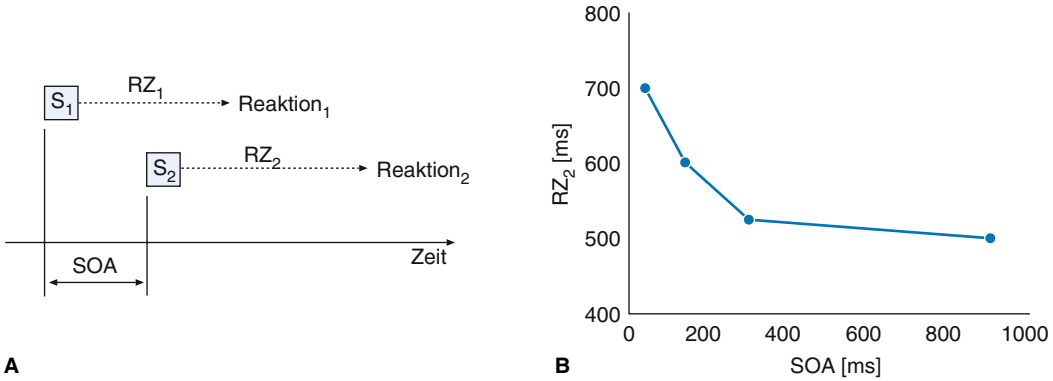


Abb. 5.2 **A** Das Paradigma zur experimentellen Darstellung der psychologischen Refraktärperiode. **B** Abbildung der Reaktionszeit auf S_2, RZ_2, als Funktion des SOA zwischen S_1 und S_2, wenn Probanden so schnell wie möglich auf zwei Stimuli reagieren müssen, die in schneller Aufeinanderfolge dargeboten werden. RZ_2 wird durch die SOA zwischen dem Einsetzen von S_1 und S_2 determiniert. *S* = Stimulus, *SOA* = *stimulus onset asynchrony*, *RZ* = Reaktionszeit

Eine weitere wichtige Quelle von Befunden für Broadbent waren Welfords (1952) Untersuchungen zur **Psychologischen Refraktärperiode** (PRP; Abb. 5.2; s. auch ▶ Kap. 18). Einem Probanden wurden zwei Reize in schneller Aufeinanderfolge dargeboten, und der Proband musste so rasch wie möglich auf jeden der Reize reagieren. Dabei zeigte sich, dass die Reaktionszeit auf den zweiten Reiz von der Zeitverzögerung zwischen dem Einsetzen des ersten und dem des zweiten Reizes abhängt, der *stimulus onset asynchrony* (SOA): Bei kurzen SOAs ist die Reaktionszeit umso länger, je kürzer die Zeitverzögerung ist. Welford (1952) interpretierte die Reaktionszeitverlängerung im Sinne einer PRP, die auf einen Engpass oder Flaschenhals (*bottleneck*) im Verarbeitungssystem zurückgeht: Die Verarbeitung des ersten Reizes muss abgeschlossen sein, bevor die des zweiten Reizes beginnen kann (serielle Verarbeitung). Da die zwei Reize sensorisch (d. h. peripher) unmittelbar registriert werden, betrachtete man die PRP als Evidenz für eine zentrale Beschränkung in der menschlichen Informationsverarbeitungskapazität.

Die Filtertheorie der Aufmerksamkeit Broadbent (1958) versuchte, diese Befunde in seiner **Filtertheorie der Aufmerksamkeit** zu integrieren (Abb. 5.3). Der Filtertheorie zufolge erlangen zwei gleichzeitig dargebotene Eingangsreize bzw. Nachrichten parallel, d. h. simultan, Zugang zu einem sensorischen Speicher. Nur einer der Reize darf auf der Basis seiner physikalischen Merkmale (z. B. Ohr) einen selektiven Filter passieren. Der andere Reiz wird abgeblockt, verbleibt aber für einen eventuellen späteren Zugriff vorübergehend im Speicher. Der Filter ist der Theorie zufolge notwendig, um ein kapazitätslimitiertes, strikt serielles Verarbeitungssystem (*limited-capacity channel*) jenseits des Filters vor Überlastung zu schützen. Dieses System verarbeitet die Eingangsinformation gründlich, d. h. semantisch. Nur Information, die dieses System durchläuft, kann bewusst und im Langzeitgedächtnis gespeichert werden.

Die Filtertheorie geht also von den folgenden „starken" Grundannahmen aus: Der Ort der Nachrichtenselektion ist früh (*early selection*; d. h., die Selektion erfolgt auf der Basis physikalischer Reizmerkmale); die Weiterleitung von Nachrichten erfolgt nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip, und die Art des Hinweisreizes, der der Nachrichtenselektion zugrunde liegt (d. h. physikalische Merkmale), reflektiert die Verarbeitungsstufe, die

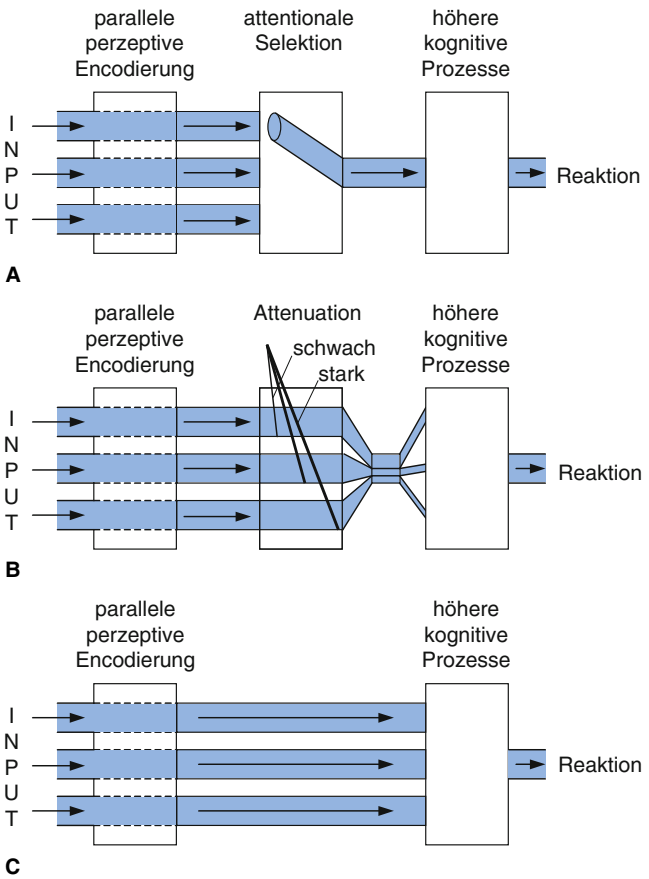


Abb. 5.3 Schematische Dar- und Gegenüberstellung der Theorien der frühen Selektion von Broadbent (1958; Filtertheorie, A) und Treisman (1964; Attenuationstheorie, B) und der Theorie der späten Selektion von Deutsch und Deutsch (1963, C). **A** Nach Broadbent wird ein selektiver Filtermechanismus auf einen von mehreren parallel arbeitenden Eingangskanälen gerichtet; den höheren, kapazitätslimitierten Verarbeitungsprozessen wird nur über diesen Kanal Information zugeleitet. **B** Nach Treisman wird Information über alle Kanäle parallel übertragen, der Informationsfluss wird aber von einem Attenuatormechanismus mehr oder weniger stark abgeschwächt (die Gesamtmenge an übertragener Information bleibt konstant). **C** Nach Deutsch und Deutsch erfolgt keine Informationsselektion vor den höheren (semantischen) Verarbeitungsprozessen

nichtbeachtete Nachrichten erreichen; und es gibt nur einen seriellen, kapazitätslimitierten zentralen Prozessor (Ein-Kanal-Hypothese; Welford 1952). Folglich erfordert eine Teilung der Aufmerksamkeit zwischen zwei (oder mehr) Eingangskanälen ein rasches Umschalten des Filters zwischen den Kanälen (auch als *Multiplexing* bezeichnet).

Die Attenuationstheorie der Aufmerksamkeit Im Anschluss an die oben dargestellten Arbeiten wurde jedoch eine Reihe von Befunden berichtet, die mit den starken Grundannahmen der Filtertheorie unvereinbar waren und die eine Revision der Theorie notwendig machten. Diese Befunde betrafen die Frage, ob und welche Menge an Information vom nichtbeachteten Kanal verarbeitet wird. Zum einen zeigte sich, dass es zu einem Durchbruch nichtbeachteter Information durch den Filter kommen kann; so entdeckte z. B. etwa ein Drittel der Probanden ihren eigenen Namen im nichtbeachteten Kanal (z. B. Moray 1959). Zum anderen konnte gezeigt werden, dass Information im nichtbeachteten Kanal semantisch bis zu einer bestimmten Stufe verarbeitet wird und die Interpretation von Information im beachteten Kanal beeinflussen kann (z. B. Von Wright et al. 1975). Zudem kann die Entdeckung kritischer Informationen im nichtbeachteten Kanal durch Übung wesentlich gesteigert werden (z. B. Underwood 1974).

Treisman (1964) versuchte, diesen Befunden in ihrer **Attenuationstheorie der Aufmerksamkeit** Rechnung zu tragen (◘ Abb. 5.3). Die Theorie lässt eine abgeschwächte Weiterleitung und Verarbeitung nichtbeachteter Information zu, d. h., die Weiterleitung erfolgt nach dem Mehr-oder-weniger-Prinzip (nicht nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip wie in Broadbents [1958] Filtertheorie). Weiterhin ist der Ort der Selektion flexibel, wenngleich auch in der Attenuationstheorie von einer relativ frühen Selektion auf einer perzeptiven Stufe ausgegangen wird. Nach Treisman (1964) durchläuft die Analyse der Eingangsinformation eine Hierarchie von Verarbeitungsstufen (physikalisches Reizmuster → Silben → Wörter → usw.), wobei die verfügbare Verarbeitungskapazität das erreichbare Analyseniveau determiniert. In diesem Zusammenhang entwickelte Treisman (1960) ein Modell der Worterkennung, dem zufolge das Verarbeitungssystem eine Reihe von lexikalischen Einheiten enthält, von denen jede einem Wort entspricht. Jede Einheit integriert sowohl perzeptive als auch semantische Evidenz (d. h. Aktivierung von perzeptiven und semantischen Verarbeitungseinheiten, mit denen sie verknüpft ist). Einheiten feuern, wenn ihre Aktivierung eine Schwelle übersteigt, wodurch die Wortbedeutung bewusst werden kann. Die Einheiten haben unterschiedliche Aktivierungsschwellen, abhängig von der Auffälligkeit (Salienz) und Auftretenshäufigkeit der entsprechenden Wörter. Wenn der Attenuator eine Reduktion (Abschwächung) des perzeptiven Inputs vom nichtbeachteten Kanal bewirkt, so kann eine Einheit nur dann feuern, wenn ihre Aktivierungsschwelle hinreichend niedrig ist. Dies trifft z. B. auf die Einheit für den eigenen Namen zu, wodurch erklärbar wird, warum der eigene Name im nichtbeachteten Kanal zum „Durchbruch" kommt.

Die Theorie der späten Selektion Ein radikal anderer Vorschlag wurde von Deutsch und Deutsch (1963) in einer theoretischen Arbeit gemacht. Während sowohl Broadbent (1958) als auch Treisman (1964) annehmen, dass die Selektion (relativ) *früh* – am Eingangsende des Verarbeitungssystems – erfolgt, schlugen Deutsch und Deutsch vor, dass die Selektion *spät* – näher am Ausgabeende (d. h. der Reaktion) des Systems – erfolgt (*late selection*; ◘ Abb. 5.3). Mit anderen Worten nahmen Deutsch und Deutsch an, dass alle Eingangsreize vollständig analysiert werden:

> „a message will reach the same perceptual and discriminatory mechanisms whether attention is paid to it or not; and such information is then grouped or segregated by these mechanisms." (Deutsch und Deutsch 1963, S. 83)

Eine Weiterverarbeitung (wie z. B. Speicherung im Gedächtnis bzw. Determination der motorischen Reaktion) erfolgt dann nur für die Reize, die für die momentane Aufgabe am relevantesten sind. Dies setzt einen effizienten Prozess der Gewichtung aller Eingangsreize nach ihrer Relevanz voraus – bei einem seriell arbeitenden Prozessor (wie er von Broadbent [1958] postuliert wurde) würden die erforderlichen multiplen Vergleiche zu viel Zeit beanspruchen. Als Alternative zu einem seriellen Vergleich verwiesen Deutsch und Deutsch auf die Analogie der parallelen Bestimmung des größten Schülers in einer Klasse durch das Absenken einer gemeinsamen Messlatte über den Köpfen aller Schüler: Der Schüler, dessen Kopf die Latte berührt, ist der größte. (In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass später entwickelte konnektionistische Ansätze in der Lage sind, das multiple Vergleichsproblem effizient zu lösen.)

Frühe vs. späte Selektion In der Folge kam es zu einer theoretischen Kontroverse zwischen Treisman (z. B. Treisman und Geffen 1967; Treisman und Riley 1969) und Deutsch und Deutsch (1967) bezüglich des Ortes der Selektion – früh vs. spät –, deren Ausgang aber „unentschieden" blieb. Erst in neuerer Zeit gab es befriedigendere Versuche, dieses Problem zu lösen. Eine mögliche Lösung wurde von Johnston und Heinz (1978) vorgeschlagen, die folgende Annahmen machten: Je mehr Verarbeitungsstadien vor der Selektion durchlaufen werden, umso größer ist der Bedarf an Verarbeitungskapazität; und die Selektion erfolgt so früh in der Verarbeitung, wie es die Aufgabenanforderungen erlauben, um den Kapazitätsbedarf zu minimieren. Johnston und Wilson (1980) konnten empirische Belege für diesen Vorschlag erbringen.

Eine weitere Lösung wurde von Lavie (1995, S. 463) vorgeschlagen, der von der Annahme ausgeht, dass „perceptual load plays a causal role in determining the efficiency of selective attention". Ob die Aufmerksamkeit früh oder spät wirkt, hängt von den Anforderungen der Aufgabe an die Selektion des relevanten Reizes (Zielreizes) ab, also von der Belastung der perzeptuellen Verarbeitung (auch als *perceptual load* bezeichnet). Sind die attentionalen Anforderungen gering, so werden irrelevante Distraktoren mitverarbeitet (weil Kapazität übrig ist) und können Antwortinterferenz verursachen. Beansprucht die Zielreizselektion dagegen die Aufmerksamkeit vollständig, so werden keine Distraktoren verarbeitet. Zur Prüfung dieser Hypothese verwendete Lavie (1995) das *Flankierreizparadigma* von Eriksen und Eriksen (1974), in dem den Probanden eine Reihe von Buch-

staben (z. B. „BAB“) dargeboten wird und sie eine bestimmte Reaktion (Drücken einer Taste mit der linken Hand) auf den zentralen Zielbuchstaben (im Beispiel „A“) auszuführen haben; falls die Flankierreize („B“) eine damit inkompatible Reaktion (Tastendruck mit der rechten Hand) erfordern, kann es zu einer Verlängerung der Reaktionszeit kommen, die als Flankierreiz-Kompatibilitätseffekt (FKE) bezeichnet wird.

Lavie variierte nun die Anforderungen der Aufgabe an die Zielreizselektion und beobachtete die Auswirkungen dieser Variation auf den FKE. In Experiment 1 variierte sie die Menge der möglichen Zielreize (zwischen 1 und 6); ein FKE, der auf Mitverarbeitung der Flankierreize hinweist, manifestierte sich nur bei geringer *perceptual load*. In Experiment 2 wurde die Reaktion auf den Zielreiz (in einer Go/NoGo-Aufgabe, in der nur bei Anwesenheit eines Zielreizes reagiert werden soll, während bei Abwesenheit keine Reaktion erfolgt) vom Vorhandensein eines farbigen Formstimulus neben dem Zielreiz abhängig gemacht. In einer *low-load*-Bedingung durften die Probanden nur reagieren (*go*), wenn dieser Stimulus blau war, aber nicht (*no go*), wenn er rot war. Dagegen durfte die Probanden in einer *high-load*-Bedingung nur reagieren (*go*), wenn der Stimulus ein blaues Quadrat oder ein roter Kreis war, nicht aber (*no go*), wenn er ein rotes Quadrat oder ein blauer Kreis war. Das Ergebnis war wie folgt: *High load* reduzierte die Interferenzwirkung eines Distraktors, der zusätzlich zu dem farbigen Formstimulus im Display enthalten war (aktueller Überblicksartikel zu Lavies *perceptual-load*-Theorie in Lavie et al. 2014).

Es gibt also gute Evidenz dafür, dass der Ort der Aufmerksamkeitsselektion flexibel ist und von spezifischen Aufgabenfaktoren abhängig sein kann. Folglich kann es auf die Frage, ob die Selektion früh oder spät erfolgt, als solche keine singuläre Antwort geben (Allport 1989). Dennoch ist es interessant, dass es im Bereich der visuellen Aufmerksamkeit eine Reihe von modernen Ansätzen gibt, die als strenge Theorien der späten Selektion einzuordnen sind (z. B. Duncan und Humphreys 1989, 1992).

5.2.2 Selektive visuelle Aufmerksamkeit

In den 1960er und den 1970er Jahren hat sich die Aufmerksamkeitsforschung zunehmend der Frage der Selektion in der visuellen Umwelt zugewandt. Diese Forschung hat im Wesentlichen zu drei Ansätzen geführt, die die selektive visuelle Aufmerksamkeit entweder als *ortsbasiert*, *objektbasiert* oder *dimensionsbasiert* begreifen. Diese Ansätze werden im Folgenden diskutiert.

▪ Ortsbasierte visuelle Aufmerksamkeit

Paradigmen und Modelle Der Ansatz der **ortsbasierten visuellen Aufmerksamkeit** beruht im Wesentlichen auf zwei Paradigmen: dem Flankierreizparadigma von Eriksen und Eriksen (1974; s. oben) sowie dem Spatial-Cueing-Paradigma von Posner (1980; ▶ Zur Vertiefung 5.2). Eriksen und Eriksen konnten zeigen, dass sich der Interferenzeffekt inkompatibler Flankierreize auf die Reaktion auf einen zentralen Zielbuchstaben dadurch reduzieren lässt, dass der Ort des Zielbuchstabens vor der Präsentation der Buchstabenreihe durch einen Markierstimulus angezeigt wird.

Im Spatial-Cueing-Paradigma von Posner handelt es sich entweder um ein zentral dargebotenes Symbol wie z. B. einen Pfeil, der auf eine bestimmte Position zeigt (zentraler Cue), oder eine kurzzeitige Luminanzänderung direkt am indizierten Ort (peripherer Cue). Der Hinweisreiz veranlasst die Probanden, ihre ortsbezogene Aufmerksamkeit auf die angezeigte Position zu richten und nichtindizierte Positionen zu ignorieren. In den entsprechenden Cueing-Experimenten zeigten sich verkürzte Reaktionszeiten relativ zu einer neutralen Cue-Bedingung, wenn der Zielreiz am angezeigten Ort erschien (valider Cue: Reaktionszeit-„Gewinne“), und verlängerte Reaktionszeiten, wenn der Zielreiz an einem nichtindizierten Ort erschien (invalider Cue: Reaktionszeit-„Kosten“).

Die Untersuchungen von Posner (1978, 1980) und Posner et al. (1980) führten zu der Vorstellung, dass die visuelle Aufmerksamkeit wie ein Lichtkegel (*spotlight*) funktioniert, der einen bestimmten Ort beleuchtet (**Lichtkegelmetapher der Aufmerksamkeit**). Stimuli, die an einem attentional „angeleuchteten“ Ort erscheinen, werden rascher und gründlicher verarbeitet als Stimuli an anderen Orten. Zwei kontroverse Annahmen des Lichtkegelansatzes sind, dass der Durchmesser des attentionalen Lichtkegels von konstanter Größe ist und dass der Lichtkegel in kontinuierlich-analoger Weise, ähnlich einer glatten Augenfolgebewegung (d. h. der Bewegung mit den Augen, wenn sie einem Objekt folgen, das sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt) von einem Ort an den anderen verlagert wird. Posner (1988; vgl. auch Posner et al. 1988) schlug vor, dass die Orientierung der Aufmerksamkeit durch drei separate Mechanismen gesteuert wird:

1. *Move-Mechanismus*, der für die Verlagerung der Aufmerksamkeit von einem Ort an einen anderen verantwortlich ist.
2. *Disengage-Mechanismus*, der die Aufmerksamkeit (vor der Verlagerung) von einem gegebenen Ort bzw. Objekt ablöst und die objektbezogene Verarbeitung beendet.
3. *Engage-Mechanismus*, der die Aufmerksamkeit (nach der Verlagerung) an den neuen Ort bzw. ein dort befindliches Objekt „anbindet“.

Die Untersuchungen mittels des Flankierreizparadigmas (z. B. Eriksen und Eriksen 1974; Eriksen und Yeh 1985; Eriksen und St. James 1986) haben zu einer alternativen Vorstellung geführt, in der die Aufmerksamkeit als eine variable *Gummilinse* (*zoom lens*) konzipiert wird. Das heißt, die Aufmerksamkeit kann entweder auf einen kleinen Bereich (von minimal 1° Sehwinkel Durchmesser) fokussiert werden, mit hoher Auflösung innerhalb dieses Bereichs (fokussierte Einstellung), oder sie kann über einen weiten Bereich eingestellt werden, mit entsprechend verringerter Auflösung (unfokussierte Einstellung). Mittels der Gummilinsenanalogie hat man versucht, den Befund zu erklären, dass sich die Interferenzwirkung von inkompatiblem Flankierreiz auf die Zielreizreaktion mit zunehmender Zeitverzögerung (SOA) zwischen dem Hinweisreiz und der Buchstabenreihe reduziert. Die Vorstellung ist die, dass die Aufmerksamkeit auf den Cue hin in einem Prozess, der eine bestimmte Zeit in Anspruch nimmt, von einem unfokussierten Zustand in einen fokussierten Zustand übergeht.

Einigen alternativen Vorstellungen zufolge ist die ortsbezogene visuelle Aufmerksamkeit im Sinne eines Gradientenmodells zu begreifen (z. B. Downing 1988; LaBerge und Brown 1989),

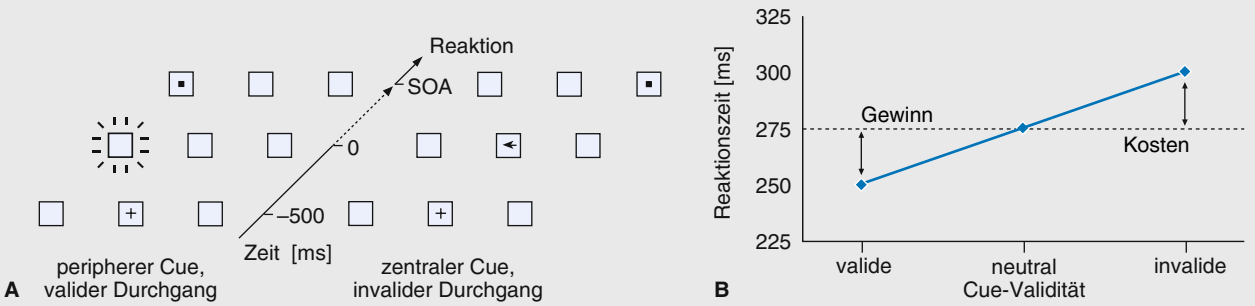
Zur Vertiefung 5.2

Das Spatial-Cueing-Paradigma von Posner

Im Spatial-Cueing-Paradigma von Posner (1980; ◘ Abb. 5.4) wird den Probanden ein ortsbezogener Hinweisreiz (*spatial cue*) dargeboten, d. h. ein Hinweisreiz, der die Position eines nachfolgenden Zielreizes mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (Validität) indiziert. Ein Beispiel ist ein zentraler Fixationspunkt mit zwei Kästchen links und rechts, wobei der Hinweisreiz z. B. das rechte Kästchen als wahrscheinlichen Ort des Zielreizes anzeigt. In der Standardaufgabe hat die Probandin die Aufgabe, auf das Einsetzen des Zielreizes so schnell wie möglich mit einem einfachen Tastendruck zu reagieren (einfache Reaktionszeitaufgabe). Eine wichtige Variable ist die Cue-Validität. Zum Beispiel erscheint der Zielreiz mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % am indizierten und mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 % am nichtindizierten Ort. Neben validen und invaliden Durchgängen gibt es auch neutrale Durchgänge, in denen der Cue nur als zeitliches Warnsignal (z. B. in Form eines zentralen Kreuzes), nicht aber als ortsbezogener Hinweisreiz fungiert (d. h., auf einen neutralen Cue hin erscheint der Zielreiz gleich wahrscheinlich im linken bzw. im rechten Kästchen).

Eine weitere wichtige Variable ist die Art des Hinweisreizes: Man unterscheidet zentrale Cues – in der Regel handelt es sich dabei um einen symbolischen Stimulus am Fixationsort (z. B. ein nach rechts zeigender Pfeil) – und periphere Cues, in der Regel eine kurzzeitige Luminanzänderung direkt am indizierten Ort (z. B. ein Aufleuchten des rechten Kästchens). Der Hinweisreiz dient dazu, die Probanden zu veranlassen, ihre ortsbezogene Aufmerksamkeit auf die angezeigte (d. h. bei hoher Cue-Validität die wahrscheinliche Zielreiz-)Position zu richten und nichtindizierte (d. h. wenig wahrscheinliche Zielreiz-)Positionen zu ignorieren. Die Logik ist also analog zu der im Paradigma des dichotischen Hörens, in dem die Aufmerksamkeit der Probandin dadurch auf einen Kanal bzw. Ohr konzentriert wird, dass die dort dargebotene Nachricht zu beschatten ist (s. oben).

In Posners Cueing-Experimenten zeigte sich, dass die einfache Reaktionszeit auf den Zielreiz schneller erfolgte, wenn dieser am angezeigten Ort erschien (*valider Cue*), als wenn er am nicht angezeigten Ort erschien (*invalider Cue*). Genauer ergaben sich Reaktionszeitgewinne für valide Cues und Kosten für invalide Cues relativ zu neutralen Cues (◘ Abb. 5.4).



◘ **Abb. 5.4** Spatial-Cueing-Paradigma von Posner (1980). **A** (*links*) Peripherer Hinweisreiz und nachfolgender Zielreiz an der indizierten Position (valider Durchgang); **A** (*rechts*) Zentraler (Pfeil-)Hinweisreiz und nachfolgender Zielreiz an der nichtindizierten Position (invalider Durchgang). In beiden Fällen fixiert die Versuchsperson zunächst ein Fixationskreuz im Zentrum. **B** Reaktionszeit auf den Zielreiz als Funktion der Hinweisreizvalidität. Es ergeben sich Gewinne für valide Durchgänge (Zielreiz an indizierter Position) relativ zu einer Neutralbedingung und Kosten für invalide Durchgänge (Zielreiz an nichtindizierter Position)

dem zufolge die attentionale „Auflösungskraft" innerhalb der beachteten Region vom Maximum im Zentrum kontinuierlich zur Peripherie hin abfällt (wobei die Steilheit des Gradienten den Aufgabenanforderungen entsprechend variiert). Eine neuere theoretische Entwicklung ist die des *Gradienten-Filter-Modells* von Cheal et al. (1994).

Mechanismen der Aufmerksamkeitsorientierung Wie auch immer die ortsbezogene Aufmerksamkeit konzipiert wird, es besteht Übereinstimmung darüber, dass die Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf einen Ort durch zwei komplementäre Mechanismen vermittelt werden kann (z. B. Müller und Rabbitt 1989):

1. *Exogene* (durch externale Reize ausgelöste, reflexive) *Orientierung* auf an peripheren Displaypositionen dargebotene Cues, die durch eine kurze Latenz (≈ 50 ms), eine transiente Aktivierung (50–200 ms) und eine relativ *automatische Funktionsweise* gekennzeichnet ist.
2. *Endogene* (durch internale Prozesse ausgelöste, willentlich kontrollierte) *Orientierung* auf an einer zentralen Displayposition dargebotene Cues, die durch eine relativ lange Latenz (> 200 ms), relativ lange aufrecht erhaltbare Aktivierung (> 500 ms) und eine *kontrollierte Funktionsweise* gekennzeichnet ist.

Besonders effektive exogene Auslösereize sind transiente Luminanzänderungen, wobei plötzliche Reiz-Onsets wirksamer sind als Reiz-Offsets (z. B. Jonides und Yantis 1988). Eine Reihe von Untersuchungen hat sich mit der Frage beschäftigt, auf welche Weise die beiden Mechanismen der Aufmerksamkeitsorientierung funktionieren: reflexiv *automatisch* bzw. willentlich *kontrolliert*. Diese Untersuchungen zeigten, dass exogene Orientierung, im Gegensatz zu endogener Orientierung, unabhängig von einer Zweitaufgabe ablaufen und selbst durch räumlich nichtinformative Hinweisreize ausgelöst werden kann (Jonides 1980). Weiterhin kann endogene Orientierung auf valide Cues durch exogene, die Aufmerksamkeit anziehende, Auslösereize unterbrochen werden (Müller und Rabbitt 1989). Dabei hängt das Auftreten der Unterbrechung von der Cue-Validität ab: Der Unterbrechungseffekt ist bei sehr hoher Validität reduziert (Yantis und Jonides 1990). Dieses Befundmuster legt nahe, dass die

exogene Aufmerksamkeitsorientierung *top-down* modulierbar (Folk et al. 1992) und somit nur partiell automatisch ist, während die endogene Orientierung kontrolliert abläuft. Folk und Kollegen gehen in ihrer *contigent-capture*-Hypothese sogar so weit zu behaupten, dass ein räumlich nichtinformativer Cue-Stimulus in der Peripherie nur dann die Aufmerksamkeit auf sich zieht, wenn dessen Merkmalsbeschreibung (Onset, aber auch Farbe etc.) mit der im aktuellen attentionalen Kontroll-(Aufgaben-)Set spezifizierten Beschreibung übereinstimmt (vgl. auch Wu et al. 2014).

Ortsbasierte visuelle Aufmerksamkeit und sakkadische Augenbewegungen Obwohl die Aufmerksamkeitsausrichtung an einen bestimmten Ort verdeckt (*covert*), d. h. ohne eine offene (*overt*) Augenbewegung, die beobachtbar ist, erfolgen kann, besteht ein enger Zusammenhang zwischen verdeckter Orientierung der Aufmerksamkeit und bestimmten Typen von Augenbewegungen, den sogenannten sakkadischen (ruckartigen) Augenbewegungen. So ist die Richtung der Aufmerksamkeit an die Richtung einer Augenbewegung gekoppelt (Shepherd et al. 1986; Hoffman und Subramaniam 1995). Posner (1980) konnte zeigen, dass einer Augenbewegung an die Position eines peripheren Cues eine Aufmerksamkeitsbewegung vorausgeht. Dabei kann in einem Zeitfenster 50–100 ms vor einer Sakkade nur das Objekt am Sakkadenziel diskriminiert werden (Deubel und Schneider 1996). Dieser Befund stimmt mit einer Studie von Kowler et al. (1995) überein, der zufolge in einer kritischen (späten) Periode während einer Fixation die Aufmerksamkeit auf das nächste Sakkadenziel ausgerichtet werden muss, um ein Go-Signal zur Ausführung der Sakkade zu geben; Orientierung der Aufmerksamkeit auf das Sakkadenziel vor dieser kritischen Periode verkürzt die Sakkadenlatenz nicht und reduziert die Reizdiskrimination an anderen Positionen. Schließlich weisen Befunde mit dem Gap-Paradigma darauf hin, dass eine Aufmerksamkeitsablösung (*disengagement*) vom Fixationsstimulus der Verlagerung der Aufmerksamkeit auf einen neuen Stimulus in der Peripherie vorausgeht. Im Gap-Paradigma wird die Ablösung der Aufmerksamkeit dadurch beschleunigt, dass der Stimulus am Fixationsort vor dem Einsetzen des peripheren Sakkadenziels gelöscht wird (wodurch eine zeitliche Lücke zwischen dem fixierten und dem zu fixierenden Stimulus entsteht). Dies führt zur Generierung von *Expresssakkaden*, d. h. Sakkaden mit sehr kurzer Latenz (z. B. Fischer und Weber 1993).

Inhibition of Return (IOR): Hemmung der Rückorientierung der Aufmerksamkeit an einen vorher beachteten Ort Was passiert, nachdem Aufmerksamkeit (verdeckt oder offen) auf einen Ort gerichtet und dann von diesem wieder abgezogen wurde? Zur Beantwortung dieser Frage ist ein mittels des Posner'schen Cueing-Paradigmas demonstrierter Effekt relevant, der darin besteht, dass sich die Reaktionszeit auf einen Zielreiz an einer durch einen peripheren Cue indizierten Position (gegenüber der Reaktionszeit auf einen Zielreiz an einer nichtindizierten Position) verlangsamt, wenn die Zeitverzögerung (SOA) zwischen Hinweis- und Zielreiz länger als etwa 300 ms ist (Posner und Cohen 1984). Das heißt, der zeitlich frühe „Erleichterungseffekt" für die indizierte Position (SOAs < 300 ms) verkehrt sich in einen späten Inhibitionseffekt (SOAs > 300 ms), der als Ausdruck der Hemmung der Rückorientierung der Aufmerksamkeit an einen kurz vorher beachteten Ort interpretiert wird. Die Vorstellung dabei ist, dass das (unmittelbare) Ausbleiben des Zielreizes an der indizierten Position zunächst zu einer Verlagerung der Aufmerksamkeit von der indizierten auf eine andere Position (z. B. den Fixationsort) führt, sodass, wenn der Zielreiz schließlich an der indizierten Position erscheint, eine Rückorientierung der Aufmerksamkeit auf diese Position erforderlich ist. Die erschwerte Rückorientierung auf die indizierte (d. h. vorher beachtete) Position wird dann im Sinne einer inhibitorischen Markierung dieser Position für erneute Aufmerksamkeitsverlagerungen interpretiert. IOR kann somit als eine Tendenz (ein *Bias*) in der (gedächtnisbasierten) Steuerung der ortsbezogenen Aufmerksamkeit verstanden werden, der darauf hinwirkt, dass neue Orte im visuellen Feld abgesucht werden. Weitere Untersuchungen zum IOR-Effekt haben gezeigt, dass die Inhibition Orte bzw. Objekte in der Umwelt betrifft, deren Koordinaten unabhängig von Kopf- und Augenbewegungen sind (z. B. Maylor und Hockey 1985). Außerdem steht IOR in engem Zusammenhang mit sakkadischen Augenbewegungen (Rafal et al. 1989).

Sensitivitäts- vs. Kriteriumseffekte der ortsbezogenen visuellen Aufmerksamkeit Von der Frage, wie die ortsbezogene Aufmerksamkeit ausgerichtet wird, ist die Frage zu trennen, worin ihre Wirkung eigentlich besteht, sobald sie auf einen bestimmten Ort ausgerichtet ist. Bezogen auf Posners Cueing-Paradigma bedeutet diese Frage, ob das Auftreten von Reaktionszeitgewinnen auf eine beschleunigte Reaktion auf den Zielreiz an der indizierten Position infolge einer verbesserten Signalqualität oder infolge einer herabgesetzten Reaktionsschwelle zurückzuführen ist. Mit anderen Worten: Beeinflusst die ortsbezogene Aufmerksamkeit die visuelle Sensitivität oder nur das Entscheidungskriterium (d. h. das Ausmaß an Evidenz, dass für eine positive, d. h. eine Zielreiz-anwesend-Entscheidung, erforderlich ist)? In einer Reihe von Studien (z. B. Downing 1988; Müller und Humphreys 1991) wurde versucht, diese Frage zu beantworten, indem Signalentdeckungsmaße erhoben wurden, die eine unabhängige Messung von Sensitivitäts- und Kriteriumseffekten erlauben (▶ Kap. 2). Die Ergebnisse zeigten, dass die ortsbezogene Aufmerksamkeit sowohl die perzeptive Sensitivität beeinflusst (erhöhte Sensitivität am beachteten Ort) als auch das Entscheidungskriterium (herabgesetztes Kriterium am beachteten Ort). Weiterhin zeigte sich, dass die Sensitivitätseffekte von den Anforderungen der Aufgabe an die Zielreizverarbeitung abhängig sind: Bei komplexen Diskriminationsaufgaben waren die Effekte größer (d. h. die Gradienten steiler) als bei einfachen Entdeckungsaufgaben. Möglicherweise beruhen der Sensitivitäts- und der Bias-Effekt der ortsbezogenen Aufmerksamkeit auf den gleichen Mechanismen: der Voraktivierung von Detektormechanismen am beachteten Ort (z. B. Hawkins et al. 1988; aktueller Überblick über den Einfluss ortsbezogener Aufmerksamkeit auf die visuelle Wahrnehmung in Carrasco 2014).

▪ Objektbezogene visuelle Aufmerksamkeit

In einer zweiten Kategorie von Theorien der selektiven visuellen Aufmerksamkeit wird davon ausgegangen, dass die Aufmerksamkeit nicht auf einen abstrakten Ort im visuellen Feld gerichtet

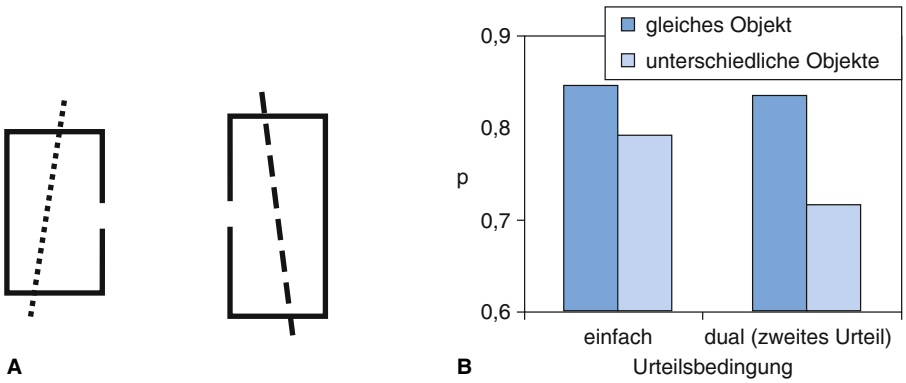


Abb. 5.5 Das Paradigma von Duncan (1984) zur experimentellen Darstellung objektbezogener Aufmerksamkeit. **A** Zwei von vier möglichen Stimuluskonfigurationen (Rechteck groß/klein mit Lücke links/rechts; Linie rechts-/linksgeneigt und gepunktet/gestrichelt). **B** Urteilsgenauigkeit (p = Wahrscheinlichkeit korrekt) für zwei Versuchspersonengruppen: Bei der ersten Gruppe bezogen sich Einzel- und duale Urteile auf die beiden Attribute ein und desselben Objekts (gleiches Objekt), bei der zweiten bezogen sie sich auf ein Attribut des einen und ein Attribut des anderen Objekts (unterschiedliches Objekt). Das abgebildete Maß für duale Urteile ist die Genauigkeit des als Zweites abgegebenen Urteils

wird, sondern auf ein bestimmtes Objekt an einem bestimmten Ort (**objektbezogene visuelle Aufmerksamkeit**). So werden z. B. in Posners Cueing-Paradigma die möglichen Zielreizorte durch Kästchen markiert, innerhalb derer ein Zielreiz erscheinen kann, sodass die Aufmerksamkeit auf das indizierte Kästchen ausgerichtet wird. Mit anderen Worten, die visuelle Selektion ist nicht orts-, sondern vielmehr objektbasiert.

Eine Demonstration objektbasierter Selektion, die in der Forschung großen Einfluss hatte, stammt von Duncan (1984; Abb. 5.5). Duncan bot den Probanden auf einem Bildschirm kurzzeitig zwei sich überlappende Objekte dar: Bei dem einem Objekt handelte es um ein vertikal orientiertes Rechteck, das entweder groß oder klein (d. h. vertikal mehr oder weniger lang) war und zusätzlich in der linken oder der rechten Seite eine kleine Lücke aufwies; bei dem anderen Objekt handelte es sich um eine (das Rechteck durchziehende) Linie, die entweder aus Punkten oder aus Strichen bestand und die entweder leicht nach links oder nach rechts geneigt war. Jedes der beiden Objekte war also durch zwei unabhängige Attribute gekennzeichnet: das Rechteck durch Größe und Lückenseite, die Linie durch Textur und Neigung. Die Probanden hatten die Aufgabe, entweder ein Attribut eines der Objekte zu beurteilen (z. B. die Größe des Rechtecks) oder duale Urteile zu fällen, die sich entweder nur auf ein Objekt (z. B. Größe und Lückenseite des Rechtecks) oder auf beide Objekte bezogen (z. B. Größe des Rechtecks und Textur der Linie).

Duncan (1984) fand, dass duale Urteile, die sich auf ein Objekt bezogen, ebenso genau ausfielen wie Einzelurteile bezüglich dieses Objekts. Dagegen war die Genauigkeit von dualen Urteilen, von denen sich ein Urteil auf das eine Objekt und das andere Urteil auf das andere Objekt bezog, reduziert, obwohl beide Objekte am selben Ort (überlappend) dargeboten wurden und kleiner als 1° Sehwinkel, (d. h. der nach Eriksen und Eriksen [1974] engsten Einstellung der Aufmerksamkeit) waren. Duncan (1984) schloss daraus, dass die entscheidende attentionale Limitation nicht durch einen ortsbezogenen Aufmerksamkeitsmechanismus erklärt wird, sondern vielmehr darin liegt, dass man die Aufmerksamkeit auf nur ein Objekt zu einem gegebenen Zeitpunkt richten kann. Die objektbezogene Aufmerksamkeit macht dann die Attribute (Farbe, Größe, Orientierung, etc.; Wolfe und Horowitz 2004) des attendierten Objekts der weiteren Verarbeitung zugänglich.

Eine weitere Demonstration objektbezogener Aufmerksamkeit stammt von Baylis und Driver (1993). Sie präsentierten ihren Probanden eine horizontale Reihe von drei ohne Lücke aneinander anschließenden Vielecken, wobei das mittlere Vieleck eine andere Farbe (z. B. Rot) hatte als die Flankiervielecke (z. B. Grün). Die Probanden waren instruiert, sich auf eine bestimmte Zielreizfarbe (z. B. Rot) einzustellen. Je nach ihrer Farbeinstellung segmentierten die Probanden diese Reihe dann entweder in *ein* zentrales (rotes) Objekt auf einem grünen seitlichen Hintergrund oder in *zwei* seitliche (rote) Objekte mit einem grünen Hintergrund im Zentrum. Die direkt aneinander anschließenden (seitlichen) Grenzkonturen des zentralen Vielecks und der Flankiervielecke hatten einen identischen Verlauf. Jede der beiden gemeinsamen Grenzkonturen war durch einen Knick gekennzeichnet, wobei die beiden Knickpunkte relativ zur Grundlinie der Vielecke unterschiedlich hoch waren. Die Probanden hatten die relative Höhe der Knickpunkte des bzw. der Objekte in der Zielreizfarbe so rasch wie möglich zu vergleichen (und durch einen Tastendruck auf der Seite des niedrigeren Knickpunktes anzuzeigen). Baylis und Driver (1993) fanden, dass das Vergleichsurteil dann schneller gefällt wurde, wenn die Knickpunkte ein und desselben (zentralen) Objekts zu vergleichen waren, relativ zu den Knickpunkten separater Objekte. Da aber die Positionen der vergleichenden Knickpunkte in beiden Fällen exakt gleich war, konnte dieser Befund nicht auf einen Faktor der ortsbezogenen (räumlichen) Aufmerksamkeit zurückgeführt werden. Baylis und Driver (1993) argumentierten, dass nur ein Objekt zu einer Zeit für perzeptive Urteilsprozesse repräsentiert werden könne. Mit anderen Worten muss in der Bedingung separater Objekte die Aufmerksamkeit unter Beanspruchung von Zeit zwischen Objekten verschoben werden.

Weitere Belege für die Objektbezogenheit der visuellen Aufmerksamkeit wurden von Tipper et al. (1994) erbracht. Sie untersuchten den IOR-Effekt in dynamischen Displays, in denen sich ein peripher indiziertes Objekt auf einer kreisförmigen Bahn um einen zentralen Fixationspunkt bewegte. Mit dieser Anordnung konnten sie zeigen, dass es sich zumindest bei einer Komponente von IOR um einen objektzentrierten Effekt handelt, der sich mit

dem peripher indizierten und dann inhibitorisch markierten Objekt mit bewegt. Ähnlich ist IOR in der seriellen visuellen Suche (► Zur Vertiefung 5.3) objekt-, nicht ortsbasiert (Müller und Von Mühlenen 2000).

Es gibt also eine Vielzahl von Befunden, die dafür sprechen, dass die visuelle Aufmerksamkeit objektbezogen ist. Eine wichtige Frage dabei ist, welche Art von Objektrepräsentation der objektzentrierten visuellen Selektion zugrunde liegt: eine Repräsentation im Sinne von Marrs (1982) Vorstellung einer vom Darbietungsort unabhängigen 3-D-Modell-Repräsentation oder eine *primal-sketch*-Repräsentation, die aus einer Struktur von gruppierten lokalen Elementen besteht und somit ortsabhängig ist (*grouped spatial array*). Diese Frage wurde von Kramer et al. (1997) untersucht, die zeigen konnten, dass die initiale Objektselektion auf einer Repräsentation im Sinne einer Struktur von gruppierten Elementen (*primal sketches*) basiert. Folglich ist die objektbasierte visuelle Selektion wesentlich ortsbezogen, d. h., sie findet in einem räumlichen Medium statt.

▪ Dimensionsbasierte visuelle Aufmerksamkeit

Einer weiteren Vorstellung zufolge ist die visuelle Aufmerksamkeit wesentlich merkmals- bzw. dimensionsbasiert, d. h., die Selektion ist durch die Art der geforderten Diskriminationen zwischen unterschiedlichen Stimulusattributen, genauer zwischen Dimensionen von Attributen (z. B. Form, Farbe, Bewegung), limitiert. Ein Modell, das merkmals- bzw. dimensionsbezogene selektive Aufmerksamkeit beschreibt, ist die *Analysatorentheorie* von Treisman (1969) und Allport (1971), der zufolge es bei dualen Diskriminationsleistungen, die die gleichen dimensionsspezifischen Analysatoren beanspruchen, zu wechselseitiger Interferenz kommt. Allerdings zeigt die Studie von Duncan (1984) (s. oben), dass die Evidenz für diesen Ansatz wenig überzeugend ist.

Eine alternative Modellvorstellung ist der von Müller et al. (1995) vorgeschlagene *Dimensionsgewichtungsansatz* (aktuelle Darstellung des Modells in Krummenacher und Müller 2012). Diesem Ansatz zufolge gibt es eine attentionale Gewichtung von dimensionalen Verarbeitungsmodulen, in denen Objektmerkmale wie Farbe, Orientierung und Größe getrennt voneinander verarbeitet werden. Dabei ist der Gesamtbetrag an Gewicht, das den Dimensionen zugewiesen werden kann, limitiert. Daraus folgt, dass, wenn z. B. die Farbdimension gewichtet ist, die Farbverarbeitung für alle Objekte erleichtert und (weil der Gesamtbetrag an Dimensionsgewicht limitiert ist) die Verarbeitung anderer Objektattribute (wie z. B. Form) beeinträchtigt wird. Müller und O'Grady (2000) konnten diese Vorhersage mittels einer von Duncan (1984) abgeleiteten Versuchsanordnung bestätigen. Die Probanden beurteilten entweder zwei Formattribute (Größe und Textur), zwei Farbattribute (Farbwert und -sättigung) oder ein Form- und ein Farbattribut (z. B. Größe und Farbwert). Diese dualen Urteile bezogen sich (ähnlich wie bei Duncan 1984) entweder auf ein Objekt oder auf zwei separate Objekte. Die Ergebnisse zeigten einen Dimensionseffekt, der unabhängig von einem Objekteffekt war: Die Genauigkeit dualer Urteile war größer, wenn sie sich auf Attribute innerhalb derselben Dimension bezogen, als wenn sie sich auf Attribute in unterschiedlichen Dimensionen bezogen – unabhängig davon, ob ein oder zwei Objekte zu beurteilen waren. Zusätzlich war die Genauigkeit dualer Urteile reduziert, wenn zwei Objekte statt nur ein Objekt zu beurteilen waren – unabhängig davon, ob sie sich auf Attribute in der gleichen Dimension oder in unterschiedlichen Dimensionen bezogen.

Dabei ist es wahrscheinlich, dass die dimensions- und objektbasierten Selektionsprozesse innerhalb desselben räumlichen Mediums wirksam werden. Es lässt sich also ein Primat der ortsbezogenen Aufmerksamkeit konstatieren. Dabei ist allerdings die Konzeption des Ortes komplexer, als sie in den ursprünglichen Ansätzen zur ortsbasierten Aufmerksamkeit antizipiert wurde (s. oben: Lichtkegel- und Gummilinsenmodelle). Vielmehr kann die Aufmerksamkeit auf komplexe Objektstrukturen gerichtet (bzw. diesen flexibel angepasst) werden, wobei dimensionsbasierte Prozesse mitbestimmen, welche Strukturen im räumlichen Selektionsmedium Salienz erreichen (z. B. Müller und O'Grady 2009). Schließlich legen die Befunde zur dimensionsbasierten Aufmerksamkeit nahe, dass Selektionsprozesse relativ früh in die Verarbeitung eingreifen können, noch bevor alle Attribute eines Objekts verfügbar sind.

Eine noch offene Frage ist, in welchem Zusammenhang die merkmals- und die dimensionsspezifische Aufmerksamkeit zueinander stehen. Während merkmalstheoretische Ansätze davon ausgehen, dass die Selektion auf der Basis spezifischer, im attentionalen Kontrollset definierter Merkmale (z. B. „rot") erfolgt, weisen dimensionstheoretische Ansätze der übergeordneten Merkmalsdimension (im Beispiel Farbe) Priorität zu. Konsistent mit der letzteren Position sind Befunde, dass man sich zwar zu einem gewissen Grad auf ein bestimmtes Merkmal (z. B. „rot") einstellen kann, dass dann aber andere Merkmale, die in der gleichen Dimension definiert sind (z. B. „blau"), immer noch bevorzugt verarbeitet werden gegenüber Merkmalen in einer anderen Dimension (Müller et al. 2003; vgl. auch Harris et al. 2015).

5.2.3 Visuelle Suche

▪ Parallele und serielle Suche

Ein weiteres Schlüsselparadigma in der Aufmerksamkeitsforschung, das sich als erfolgreiches „Testfeld" für konkurrierende Theorien der selektiven Aufmerksamkeit erwiesen hat, ist das **Paradigma der visuellen Suche** (*visual search paradigm*). Dabei wird der Probandin ein Suchdisplay dargeboten, das unter einer variablen Anzahl von irrelevanten Distraktorstimuli einen Zielreiz enthalten kann (► Zur Vertiefung 5.3). Die Aufgabe der Probanden liegt darin, so schnell wie möglich durch eine manuelle Reaktion zu indizieren, ob das Display einen Zielreiz enthält oder nicht. Aus den registrierten Reaktionszeiten kann unter Einbezug der Anzahl der Objekte (der Displaygröße), die das Display enthält, die Such-Reaktionszeit-Funktion abgeleitet werden. Ein wichtiger Kennwert solcher Suchfunktionen ist deren Steigung, die sogenannte Suchrate, die die Zeit repräsentiert, die für die Verarbeitung eines Objekts (Items) im Display benötigt wird.

▪ Theorien der visuellen Suche und Aufmerksamkeit

Die Merkmalsintegrationstheorie der visuellen Aufmerksamkeit Evidenz für parallele bzw. für serielle Suche ergab sich in Suchexperimenten, in denen sich der Zielreiz entweder durch ein einfaches Merkmal (*feature*) in einer gegebenen Merkmals-

5

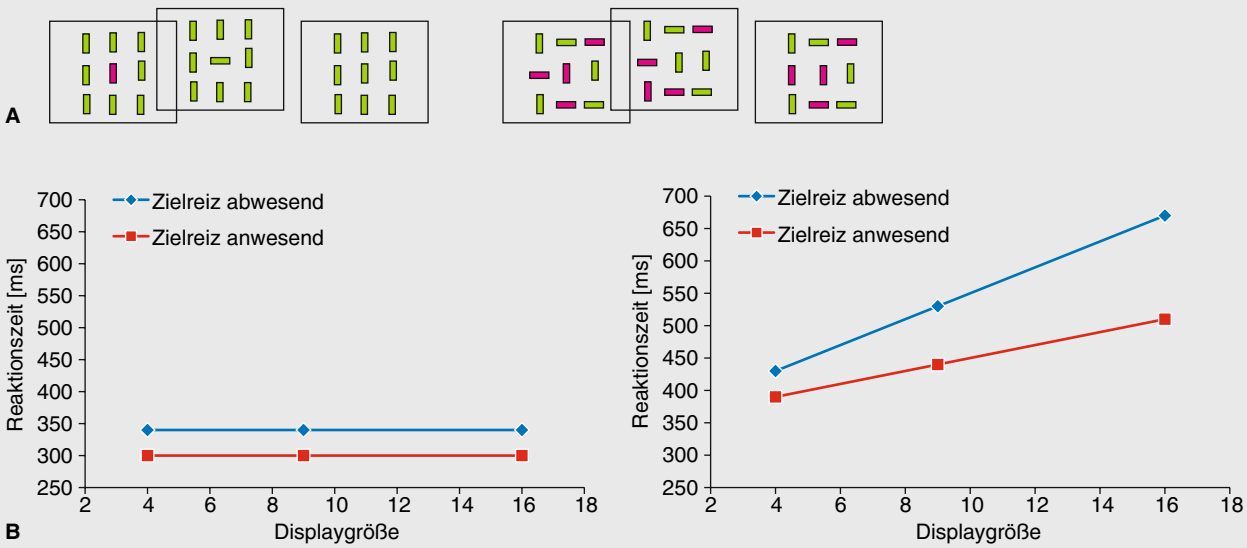
Zur Vertiefung 5.3

Das Paradigma der visuellen Suche

Im Paradigma der visuellen Suche (◘ Abb. 5.6) wird den Probanden ein Suchdisplay dargeboten, das neben einer variablen Anzahl von Distraktorstimuli einen Zielreiz enthalten kann, der zu entdecken ist. Die Gesamtzahl der Stimuli im Suchdisplay wird als Displaygröße (*display size*) bezeichnet. Der Zielreiz ist entweder anwesend oder abwesend, und die Aufgabe der Probanden besteht darin, möglichst rasch eine positive (Zielreiz-anwesend-) bzw. negative (Zielreiz-abwesend-)Entscheidung zu treffen. Die dafür benötigten (und in einer Vielzahl von Durchgängen gemessenen) Reaktionszeiten können als Funktion der Displaygröße *n* dargestellt werden und ergeben die Such-Reaktionszeit-Funktion. Die resultierenden Suchfunktionen lassen sich in der Regel durch folgende (lineare) Gleichung beschreiben: Reaktionszeit = $a + bn$, wobei a die Basisreaktionszeit, d. h. den y-Achsenabschnitt der Suchfunktion, repräsentiert, und b die Suchrate, d. h. die Steigung der Funktion (gemessen in Einheiten der Verarbeitungszeit pro Display-Item).

Aufgrund der in verschiedenen Suchexperimenten beobachteten Suchfunktionen hat man eine Unterscheidung zwischen zwei Modi der visuellen Suche vorgeschlagen (z. B. Treisman und Gelade 1980): **parallele** und **serielle Suche**. Steigt die Suchfunktion nur wenig mit zunehmender Displaygröße an ($b \leq 10$ ms/Item), so geht man davon aus, dass alle Items im Display simultan abgesucht werden, d. h., die Suche verläuft *parallel* (◘ Abb. 5.6B, *links*). Dagegen nimmt man bei linear ansteigenden Suchfunktionen ($b > 10$ ms/Item) an, dass die einzelnen Display-Items sukzessive abgesucht werden, d. h., die Suche verläuft *seriell* (◘ Abb. 5.6B, *rechts*). Die serielle Suche kann erschöpfend (*exhaustive*) sein, d. h., alle Display-Items werden abgesucht, oder sie kann selbstabbrechend sein, d. h., die Suche wird beendet, sobald der Zielreiz gefunden ist (*serial self-terminating search*). Um bei einem Zielreiz-*abwesend*-Display mit *n* Items zu entscheiden, dass kein Zielreiz im Display vorhanden ist, würde die exhaustive Suche *n* serielle Suchschritte erfordern – unter der Annahme, dass die Display-Items in zufälliger Folge abgesucht werden und dass ein einmal inspiziertes Item nicht erneut inspiziert wird. Dagegen würde die serielle, selbstabbrechende Suche bei einem Zielreiz-*anwesend*-Display mit *n* Items statistisch $n/2 + 1/2$ Suchschritte erfordern, um den Zielreiz zu entdecken (d. h., der Zielreiz wird im Durchschnitt nach Absuche von etwa der Hälfte der Display-Items gefunden). Folglich würde bei konstanter Dauer pro Suchschritt die negative (Zielreiz-abwesend-) Suchfunktion doppelt so steil ansteigen wie die positive (Zielreiz-anwesend-)Funktion, wobei die Steigung der negativen Funktion den besten Schätzwert für die Suchzeit pro Item darstellt. Aufgrund dieser Annahmen lässt sich aus einem Suchexperiment, das ein 2 : 1-Steigungsverhältnis zwischen der negativen und der positiven Suchfunktion produziert, schließen, dass der Suchprozess in negativen Durchgängen seriell erschöpfend und in positiven Durchgängen seriell selbstabbrechend verlief.

Damit ist allerdings noch nicht erklärt, warum manche Suchen parallel und manche seriell erfolgen. Um dies zu erklären, wurde eine Reihe von Theorien der visuellen Suche entwickelt, bei denen es sich eigentlich um allgemeine Theorien der selektiven visuellen Aufmerksamkeit handelt, z. B. die Merkmalsintegrationstheorie (*feature integration theory*) der Aufmerksamkeit von Treisman (z. B. Treisman und Gelade 1980).



◘ **Abb. 5.6** Das Paradigma der visuellen Suche. **A** Beispiele von Merkmalssuchen (*links*) und Merkmalskonjunktionssuchen (*rechts*). Die einander überlagerten Displays enthalten Zielreize, die isoliert stehenden enthalten keinen Zielreiz. Merkmalssuchen sind effizient, da der Zielreiz (Farbe: rot, Orientierung: horizontal) aus dem Display herauszuspringen scheint. Merkmalssuchen sind ineffizient, da jedes Item im Suchdisplay mit dem gespeicherten Suchbild des Zielreizes (roter, vertikaler Balken) abgeglichen werden muss. Gesucht wird jeweils ein Objekt (Zielreiz), das sich in einzigartiger Weise von allen anderen Objekten (Distraktoren) unterscheidet. **B** Die entsprechenden Suchreaktionszeiten als Funktionen der Anzahl der Objekte im Display (Variation in den Displays nicht gezeigt): flache Funktionen (*links*; parallele Suche) und linear ansteigende Funktionen (*rechts*; serielle Suche)

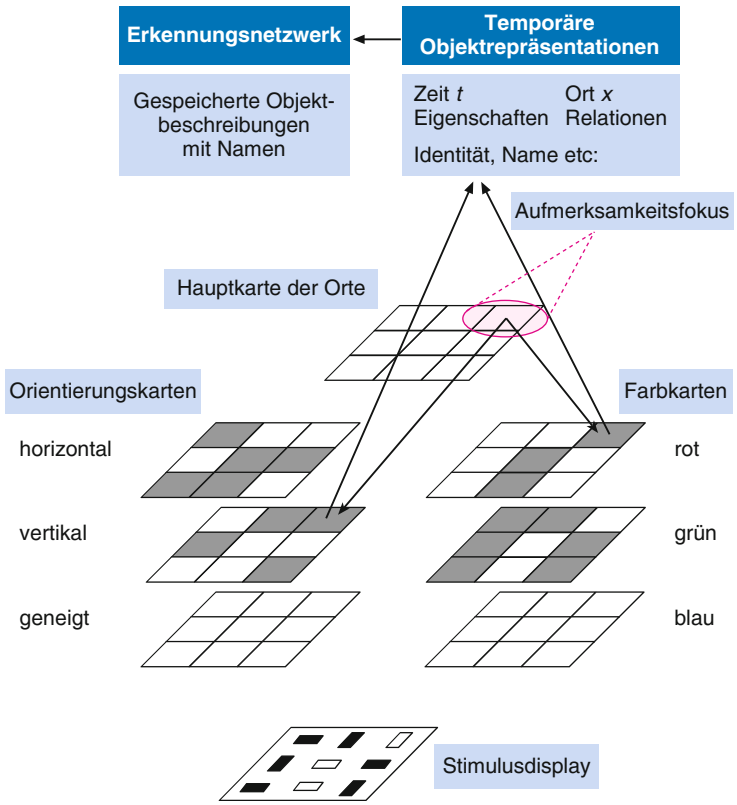


Abb. 5.7 Funktionale Architektur der Merkmalsintegrationstheorie der Aufmerksamkeit (nach Treisman und Gelade 1980). Dargestellt ist eine Merkmalskonjunktionssuche, mit einem Zielreiz in der rechts-oberen Position im Suchdisplay (Objekt *rechts oben* im Stimulusdisplay). Durch Fokussierung der Aufmerksamkeit auf die entsprechende Position in der Hauptkarte der (Stimulus-)Orte werden die separat codierten Merkmale des dort befindlichen Objekts an die höheren Objekterkennungs- und reaktionsvermittelnden Stadien weitergeleitet

dimension (*feature dimension*) von den Distraktoren unterschied (parallele Suche) oder durch eine Kombination oder Konjunktion von Merkmalen (serielle Suche). Ein Beispiel für eine parallele Verarbeitung wäre die Suche nach der Anwesenheit eines roten Apfels (Zielreiz) unter grünen Äpfeln (Distraktoren); serielle Verarbeitung ist notwendig, wenn nach einem kleinen roten Apfel unter großen roten und kleinen grünen Äpfeln gesucht wird. Die (neuroanatomisch und -physiologisch begründete; Livingstone und Hubel 1988) Annahme ist, dass sich jeder Stimulus als Kombination basaler Merkmale beschreiben lässt, wobei ähnliche Merkmale Dimensionen bilden; z. B. sind rot, grün und blau Merkmale der Dimension Farbe; andere Dimensionen sind Orientierung, Größe, Tiefe, Bewegung etc. (Wolfe und Horowitz 2004).

Man geht davon aus, dass Merkmalsdimensionen modulare Systeme sind, die aus spezialisierten, z. B. einen bestimmten Farbwert codierenden, Merkmalsdetektoren bestehen. Eine weitere Annahme ist, dass ähnliche Merkmalsdetektoren topografisch, in Merkmalskarten, organisiert sind. Dabei entsprechen bestimmte Orte in den Karten bestimmten Stimulusorten im visuellen Feld, sodass die Möglichkeit besteht, korrespondierende Orte in den verschiedenen Karten einander zuzuordnen. Diese stark vereinfachten Vorstellungen leiten sich aus der Neurophysiologie der visuellen Wahrnehmung her (z. B. Zeki 1993). Aus der Annahme einer modularen Verarbeitung ergibt sich direkt das sogenannte Bindungsproblem (*binding problem*): Wie werden die separat codierten Objektmerkmale später zu einer kohärenten Objektrepräsentation verbunden?

Die einflussreiche Merkmalsintegrationstheorie (MIT) der visuellen Aufmerksamkeit von Treisman (z. B. Treisman und Gelade 1980; Treisman und Sato 1990; Treisman 1988; Abb. 5.7) stellt einen wichtigen Ansatz dar, die Frage der Bindung zu beantworten. Die Hauptevidenz für die Theorie stammt aus visuellen Suchexperimenten, in denen sich der Zielreiz von den Distraktoren entweder durch ein einfaches Merkmal unterschied (*simple feature search*; z. B. Suche nach einem roten Zielreiz mit der Form eines X unter blauem Distraktor derselben Form X) oder durch eine Kombination von Merkmalen (*feature conjunction search*; z. B. Suche nach einem roten X unter mehreren blauen X und roten O; zur Illustration s. auch Abb. 5.6). Bei der einfachen Merkmalssuche waren die Suchfunktionen flach (der Zielreiz scheint aus dem Display herauszuspringen – man spricht deshalb auch von einer *Popout-Suche*), woraus Treisman schloss, dass die Zielreizentdeckung auf parallelen, *präattentiven* Suchprozessen beruht. Die Beschreibung der Suche als präattentiv bedeutet, dass die Entdeckung des Zielreizes durch Prozesse vermittelt wird, die aktiv sind, bevor die selektive Aufmerksamkeit ins Spiel kommt. Dagegen stiegen die Suchfunktionen bei der Merkmalskonjunktionssuche linear an (mit einem Steigungsverhältnis von 2 : 1 zwischen den negativen und den positiven Funktionen), was als Indiz für serielle, attentionale Suche gewertet wurde. Das heißt, bei der Konjunktionssuche müssen die einzelnen Display-Items sukzessive mit fokaler Aufmerksamkeit abgetastet werden. Durch die Ausrichtung des Aufmerksamkeitsfokus an einen bestimmten Ort werden die sich an diesem Ort befindenden, separat codierten Merkmale des inspizierten Items in eine kohärente Objektrepräsentation integriert. In der Folge kann diese temporäre Objektrepräsentation mit einer (im Objektgedächtnis gespeicherten) Beschreibung des Zielreizes abgeglichen werden. Dabei wird die Zuweisung von fokaler Aufmerksamkeit an ein Objekt als ortsbezogen konzipiert: Die Aufmerksamkeit wird auf einen Ort der Hauptkarte der Orte (*master map of locations*) gerichtet,

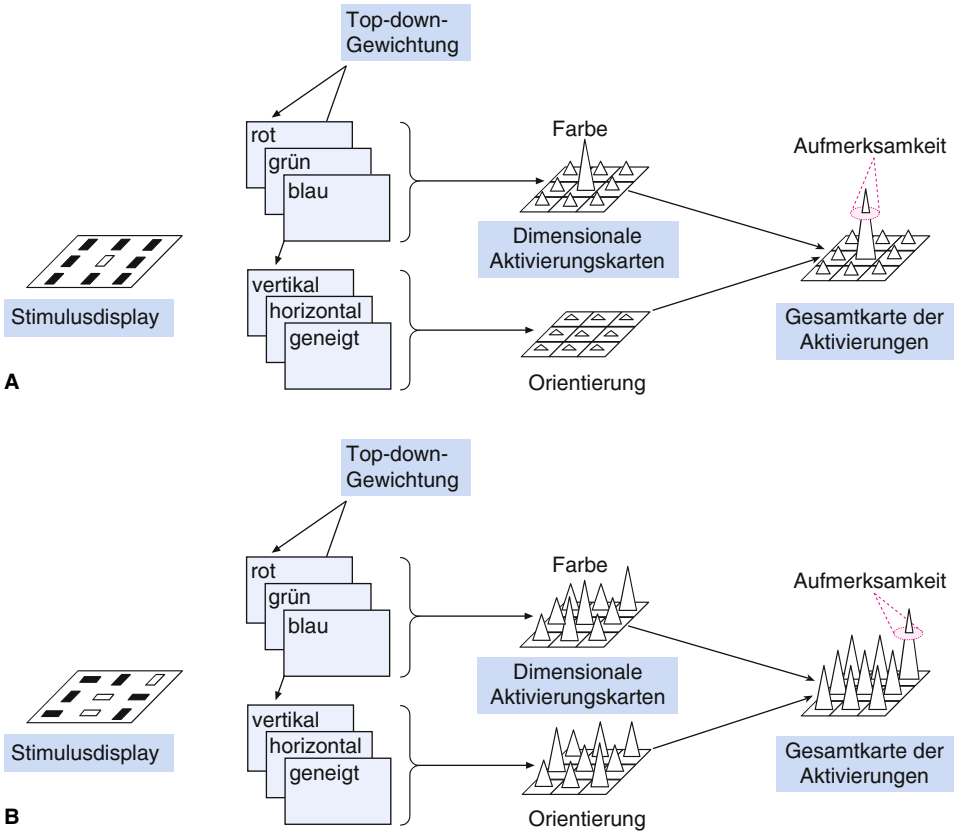


Abb. 5.8 Funktionale Architektur der Theorie der gesteuerten visuellen Suche (nach Cave und Wolfe 1990). **A** Einfache Merkmalssuche nach einem roten vertikalen Zielreiz, die im Wesentlichen bottom-up gesteuert erfolgt. **B** Merkmalskonjunktionssuche nach einem roten vertikalen Zielreiz, die top-down gesteuert verläuft

wodurch der Output der verschiedenen Merkmalsdetektoren an dem entsprechenden Ort verfügbar wird. Der MIT zufolge besteht der Engpass (*bottleneck*) also in einem seriell arbeitenden, d. h. Aufmerksamkeit erfordernden, Bindungsstadium: Bindung kann nur für ein Objekt zu einer gegebenen Zeit erfolgen. Als ein weiterer Beleg für diese Theorie werden „illusionäre Konjunktionen" (Treisman und Schmidt 1982) angeführt, d. h. der Befund, dass die Merkmale nichtbeachteter Objekte (bei kurzzeitiger Displaydarbietung) falsche Bindungen eingehen können; ein Beispiel wäre die Bindung der Form von Objekt A mit der Farbe von Objekt B (die Halluzination nicht vorhandener Merkmale ist dagegen selten). Mit anderen Worten: Nur die Zuweisung fokaler Aufmerksamkeit garantiert korrekte Merkmalsintegration.

Nach der ursprünglichen Formulierung der MIT wurde in visuellen Suchexperimenten eine Reihe von Befunden beobachtet, die sich nicht durch die von der MIT postulierten simplen Dichotomie von parallel-präattentiver und seriell-attentionaler Suche erklären ließen. Insbesondere zeigte sich, dass die Steigungen der Suchfunktionen von absolut flach bis sehr steil variieren konnten, wobei die Ähnlichkeit des Zielreizes zu den Distraktoren (sowie die Ähnlichkeit von Distraktoren untereinander) eine besondere Rolle spielt. Eine Reihe von alternativen Ansätzen wurde vorgeschlagen, um diese Befunde zu erklären; von spezieller Bedeutung ist dabei die Theorie der gesteuerten Suche von Wolfe und Kollegen (Wolfe et al. 1989; Wolfe 1994) sowie die Ähnlichkeitstheorie von Duncan und Humphreys (1989).

Die Theorie der gesteuerten Suche Auch die Theorie der gesteuerten Suche (*guided search theory,* GST) von Wolfe und Mitarbeitern (z. B. Cave und Wolfe 1990; Wolfe 1994, 2007; ◘ Abb. 5.8) nimmt die Existenz einer ortsbasierten Hauptkarte an, der Hauptkarte der Aktivierungen (*overall map of activations*), die die Allokation der fokalen Aufmerksamkeit steuert: Die Aufmerksamkeit wird jeweils auf den Ort mit der höchsten Hauptkartenaktivierung gerichtet. Ähnlich wie in der MIT vermittelt die fokale Aufmerksamkeit die Bindung der am höchstaktivierten Ort registrierten Objektmerkmale (bzw. deren Durchleitung an ein Objekterkennungssystem). Im Wesentlichen ist die GST eine Theorie der Berechnung der Hauptkartenaktivierungen. Diese Berechnung erfolgt durch zwei getrennte Mechanismen: einen Bottom-up- und einen Top-down-Mechanismus (detaillierte Diskussion der beiden Mechanismen in Fecteau und Munoz 2006). Der parallel arbeitende *Bottom-up-Mechanismus* berechnet Karten von Merkmalsdifferenzen bzw. -salienzen (*saliency*) gleichzeitig für jede Dimension. Je mehr sich ein Display-Item von den anderen Items in einer gegebenen Dimension unterscheidet, desto größer ist seine Salienz innerhalb dieser Dimension. So erreicht z. B. der Zielreiz in der einfachen Merkmalssuche eine hohe Salienz in der kritischen Dimension (z. B. der Farbdimension, wenn der Zielreiz ein rotes X und die Distraktoren blaue X sind), weil sich der Zielreiz von *allen* Distraktoren unterscheidet, während sich letztere *nur* vom Zielreiz unterscheiden. Die dimensionsspezifischen Salienzsignale werden dann von Einheiten der Hauptkarte über alle Dimensionen hinweg aufsummiert. Folglich erreicht bei der einfachen Merkmalssuche der Zielreiz eine höhere Aktivität als die Distraktoren, und die Aufmerksamkeit wird, nach einem parallelen Winner-take-all-Auswahlprozess, direkt auf die Position des Zielreizes gerichtet, wodurch der Zielreiz entdeckt wird.

Der *Top-down-Mechanismus* spielt eine entscheidende Rolle bei Konjunktionssuchen, bei denen die Bottom-up-Mechanis-

men der Salienzberechnung nicht in der Lage sind, zwischen dem Zielreiz und den Distraktoren zu unterscheiden. Der Top-down-Mechanismus involviert, im Beispiel der Suche nach einem roten X unter blauen X und roten O, eine wissensbasierte Aktivierung der bekannten Zielreizmerkmale „rot" im Farbsystem und „X" im Formsystem. Dadurch erreichen alle roten Items eine höhere Salienz im Farbsystem und alle X eine höhere Aktivierung im Formsystem, wobei der Zielreiz das einzige Item ist, das eine höhere Aktivierung in beiden Dimensionen erreicht. Wenn also die top-down modulierten Salienzkarten von Einheiten der Hauptkarte aufsummiert werden, so erreicht der Zielreiz insgesamt die höchste Gesamtaktivierung und müsste – wie in der einfachen Merkmalssuche – eigentlich immer zuerst die fokale Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Allerdings ist die Aktivierungsdifferenz des Zielreizes zu den Distraktoren auf der Hauptkarte in der Konjunktionssuche geringer als in der Merkmalssuche. Geht man von der (gut begründeten) Annahme aus, dass die Salienzberechnungsprozesse fehleranfällig sind (bzw. dass die Qualität des Signals durch Rauschen reduziert wird), so kann es passieren, dass ein oder mehrere Distraktoren eine höhere Aktivierung erreichen als der Zielreiz und somit vorher inspiziert und als Nichtzielreiz zurückgewiesen werden. Auf diese Weise kommt es zu einem seriellen Suchprozess, wobei sich die Suche aber auf wahrscheinliche Zielreizkandidaten beschränkt. (Die Display-Items werden nicht in zufälliger Folge abgesucht, und nur relativ wenige Distraktoren werden vor dem Zielreiz inspiziert.)

Mit geeigneten Annahmen bezüglich des Niveaus des Rauschens in der Berechnung der Gesamtsalienz war es möglich, eine Reihe von empirischen Suchfunktionen (d. h. deren Kontinuum) erfolgreich zu simulieren und Ähnlichkeitseffekte zu erklären. Je höher die Zielreiz-Distraktor-Ähnlichkeit ist, umso geringer sind die bottom-up (Merkmalssuche) und top-down (Konjunktionssuche) determinierten Salienzdifferenzen zwischen dem Zielreiz und den Distraktoren, und umso stärker wirkt sich das Rauschen auf die Berechnung der Gesamtaktivierung aus – mit dem Ergebnis, dass die Suchsteuerung störanfälliger wird, was die Anzahl der benötigten seriellen Suchschritte erhöht. Dabei ist es wichtig, dass GST zufolge Gruppierungsprozesse zwischen Display-Items keine Rolle für die Erklärung von Ähnlichkeitseffekten spielt. (Für eine mächtigere, mathematisch formulierte Version der GST, die neben den mittleren Suchreaktionszeiten auch deren Varianzen, sowohl für Zielreiz-anwesend- als auch Zeilreiz-abwesend-Durchgänge, erklären kann, vgl. das kompetitive GS-Modell von Moran et al. 2013.)

Die Ähnlichkeitstheorie der visuellen Suche Einen radikal anderen Ansatz stellt die Ähnlichkeitstheorie (ÄT, *similarity theory*) der visuellen Suche von Duncan und Humphreys (1989, 1992; ◘ Abb. 5.9) dar, der zufolge alle Suchen parallel ablaufen und die annimmt, dass Effekte der Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Distraktoren (sowie zwischen Distraktoren) auf Gruppierungsprozesse zurückzuführen sind. Nach der ÄT wird die Suchschwierigkeit, operationalisiert durch die Steigung der Suchfunktion, durch zwei unabhängige Faktoren determiniert: die Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Nichtzielreizen (Distraktoren) und die Ähnlichkeit zwischen den Nichtzielreizen untereinander. Die Suche ist leicht, wenn die Zielreiz-Nichtzielreiz-Ähnlichkeit gering und die Ähnlichkeit zwischen den Nichtzielreizen hoch ist; umgekehrt ist die Suche schwer, wenn die Zielreiz-Nichtzielreiz-Ähnlichkeit hoch und die Ähnlichkeit zwischen den Nichtzielreizen gering ist (d. h. wenn stark unterschiedliche Nichtzielreiz vorhanden sind).

Weiterhin nimmt die ÄT, im Unterschied zur MIT und zur GST, an, dass die Objektbindung, d. h. die Integration struktureller Objekteinheiten (*structural units*), parallel-präattentiv erfolgt. (MIT und GST gehen davon aus, dass die Bindung durch Aufmerksamkeit vermittelt wird.) Die kritische Kapazitätslimitation liegt also nicht im Bindungsstadium. Eine wichtige Komponente der ÄT ist ein visuelles Kurzzeitgedächtnis (vKZG; *visual short-term memory*): Nur im vKZG repräsentierte Objekte können bewusst und damit handlungsrelevant werden. Aufgrund der auf drei bis vier Items beschränkten Kapazität des vKZG müssen strukturelle Objekteinheiten um den Zugang zum vKZG konkurrieren. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine strukturelle Einheit *i* Zugang zum vKZG erhält, hängt von dem ihr zugeordneten Selektionsgewicht (*weight*, w_i) ab. Dabei ist das Selektionsgewicht insgesamt limitiert (die Summe $S\, w_i = 1$), sodass die Erhöhung des Gewichts für bestimmte Items mit einer Reduzierung des Gewichts für andere Items einhergeht. Selektionsgewicht wird allen strukturellen Objekteinheiten durch einen Top-down-Prozess zugewiesen, und zwar proportional zur Ähnlichkeit einer gegebenen strukturellen Einheit mit dem präspezifizierten Zielreiz (bzw. einem internal repräsentierten Suchbild [*template*] des zu findenden Zielreizes): Je größer die Ähnlichkeit ist, desto mehr Gewicht wird der strukturellen Einheit zugewiesen. Eine weitere wichtige Annahme der ÄT ist, dass die Selektionsgewichte einander ähnlicher struktureller Einheiten miteinander verbunden sind (*weight linkage*); die Verbindung der Selektionsgewichte wird durch ähnlichkeitsbasierte visuelle Gruppierung vermittelt. Die Zurückweisung eines Items *i* als Distraktor (d. h., das Item unterscheidet sich von Suchbild) bedeutet, dass sein Selektionsgewicht auf null reduziert wird ($w_i = 0$). Aufgrund der Gewichtsverbindung zwischen ähnlichen Distraktoren kommt es dadurch zur Ausbreitung der Gewichtsreduktion (*spreading suppression*) auf die gesamte Gruppe der mit Item *i* verbundenen Items; mit anderen Worten, alle Items einer Distraktorgruppen werden parallel unterdrückt. Die Konsequenz (aufgrund der Annahme, dass $Sw_i = 1$) ist eine Erhöhung des Selektionsgewichts für nicht unterdrückte Einheiten, unter denen sich der Zielreiz befinden kann.

Der ÄT zufolge wird also das Selektionsgewicht für die Zielreizeinheit durch das Ausmaß moduliert, in dem die Zielreizeinheit mit anderen, Nichtzielreizeinheiten verbunden ist, da sich die Gewichte von verbundenen Einheiten gemeinsam verändern. Folglich ist die Suche effizienter, wenn der Zielreiz und die Nichtzielreize keine gemeinsamen Attribute haben (d. h. wenn sie sich unähnlich bzw. wenn sie verschieden sind), weil die entsprechenden Einheiten dann nicht miteinander verbunden sind. Weiterhin wird die Sucheffizienz auch durch das Ausmaß verändert, in dem die Nichtzielreizeinheiten miteinander verbunden sind. Die Gewichtsverbindung zwischen ähnlichen Nichtzielreizeinheiten ist essenziell für die effiziente „En-masse-Zurückweisung" verbundener Nichtzielreizeinheiten durch den Prozess der sich ausbreitenden Unterdrückung. Die Effizienz ei-

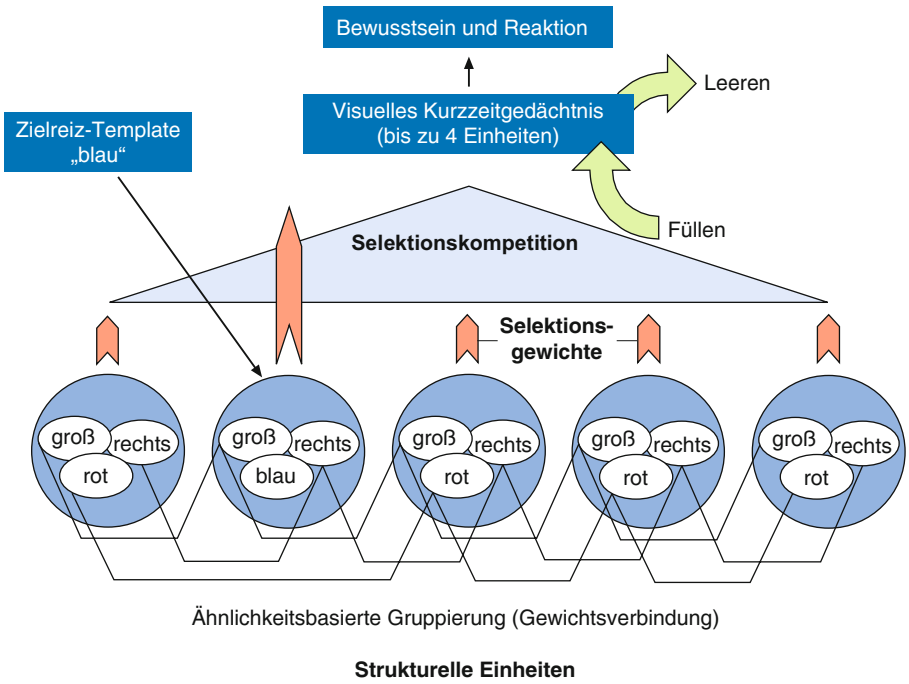


Abb. 5.9 Funktionale Architektur der Ähnlichkeitstheorie der visuellen Suche (Duncan und Humphreys 1989). Die basalen Sucheinheiten sind gebundene Mengen von Merkmalen, die zu demselben Objekt gehören (strukturelle Einheiten). Diese Einheiten konkurrieren um Zugang zum visuellen Kurzzeitgedächtnis. Die Wahrscheinlichkeit, mit der sie Zugang erhalten, entspricht ihrem Selektionsgewicht. Der Kompetitionsprozess wird von Interaktionen (Gewichtsverbindungen) zwischen strukturellen Einheiten moduliert, die eine ähnlichkeitsbasierte Gruppierung zwischen Einheiten mit ähnlichen Merkmalen realisieren. Durch Vorwissen des Zielreizes (im Beispiel ein „blaues“ Objekt) wird ein Such-*Template* aktiviert, das die Gewichte struktureller Einheiten, die Zielreizmerkmale aufweisen, top-down verstärkt

ner Merkmalssuche (roter Apfel unter grünen Äpfeln) wird also durch die ÄT dadurch erklärt, dass alle Distaktoren miteinander verbunden sind und als Gruppe zurückgewiesen werden und dass der Zielreiz keine Verbindung zu den Distraktoren aufweist. Insgesamt ist also festzustellen, dass in der ÄT – im Unterschied zur MIT und zur GST – Gruppierungsprozesse eine wesentliche Rolle spielen. Weiterhin gibt es keine Kapazitätslimitation in der Merkmalsbindung. Der Engpass (*bottleneck*) besteht vielmehr im Zugang zu einem kapazitätsbeschränkten Kurzzeitspeicher (wobei auch das Selektionsgewicht limitiert ist). Die ÄT stellt somit – im Unterschied zur MIT und zur GST – eine Theorie der späten Selektion dar.

Resümee und weitere Theorien der visuellen Suche Es wurden verschiedene alternative Ansätze zur MIT entwickelt, insbesondere die Theorie der gesteuerten Suche sowie die Ähnlichkeitstheorie. Kritische Fragen zur Unterscheidung zwischen diesen drei Ansätzen sind, welche Rolle Top-down- und Bottom-up-Prozesse sowie Prozesse der ähnlichkeitsbasierten visuellen Gruppierung bei der Steuerung des Suchprozesses spielen und ob die Aufmerksamkeit die Objektbindung beeinflusst oder aber die Selektion präattentiv gebundener Objekte.

Andere mit der ÄT konzeptionell verwandte bzw. aus ihr hervorgegangene Ansätze sind die Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (TVA; *theory of visual attention*) von Bundesen (1990, 1998; ▶ Zur Vertiefung 5.4) und Duncans (1996; Desimone und Duncan 1995) Ansatz der integrierten Kompetition (*integrated competition*). Die TVA zeichnet sich dadurch aus, dass es sich um eine computationale (d. h. in Form mathematischer Gleichungen formulierte) Theorie handelt, die ganz unterschiedliche Sätze von Verhaltensdaten (dabei auch solche aus Nichtsuchaufgaben) – sowie in einer erweiterten Version auch von Neurodaten (NTVA; Bundesen et al. 2005; ▶ Abschn. 5.2.6) – erfolgreich „erklären“ konnte.

5.2.4 Temporale Mechanismen der selektiven Aufmerksamkeit

Die bisher dargestellten Ansätze untersuchen fast ausschließlich Mechanismen der Aufmerksamkeitszuweisung, die prinzipiell als ortsbasiert bezeichnet werden können. Die selektierte Information kann einem definierten Teilbereich des visuellen Feldes zugeordnet werden, unabhängig davon, ob der Selektionsprozess orts-, objekt- oder merkmalsbasiert ist.

Visuelle Markierung (*visual marking*)

Empirische Untersuchungen zeigen jedoch, dass neben räumlichen Selektionsprozessen auch Prozesse existieren, die auf einer zeitlichen (temporalen) Grundlage operieren (**Selektion in der Zeit**). In vielen Situationen des täglichen Lebens besteht die visuelle Umgebung sowohl aus statischen als auch aus dynamischen Komponenten. Dabei bleiben bestimmte Objekte unverändert (z. B. die Häuser einer Straße), und andere tauchen neu auf oder verändern sich (z. B. Fußgänger oder Autos). Für die Effizienz eines Systems selektiver Informationsverarbeitung wäre es von Vorteil, wenn ein Mechanismus der zeitlichen Selektion existieren würde, der alte von neuer Information unterscheiden könnte und neue Information prioritär verarbeiten würde.

Ein solcher Selektionsmechanismus, der auf zeitlichen Charakteristika von Displayelementen beruht, wurde von Watson und Humphreys (1997) vorgeschlagen. Die Autoren verwendeten eine Konjunktionssuchaufgabe, die sie um ein neues Vorgehen erweiterten. Die Elemente des Suchdisplays waren in zwei Subgruppen aufgeteilt, die in zwei aufeinanderfolgenden Schritten (getrennt durch eine SOA von 1000 ms) dargeboten wurden. Der Zielreiz in den Anwesend-Durchgängen wurde immer innerhalb der zweiten Subgruppe dargeboten, wodurch es möglich war, die Auswirkung alter und neuer Elemente auf die Suchleistung zu unterscheiden.

Zur Vertiefung 5.4

Bundesens (1990, 1998) computationale Theorie der visuellen Aufmerksamkeit

Die grundlegende Idee der Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (TVA; *theory of visual attention*) ist, dass multiple Objekte im visuellen Feld in einen Wettlauf (*race*) um die Identifikation (und bewusste Repräsentation) eintreten. Die Identifikation – und damit gleichzeitig die Selektion – eines Objekts involviert der TVA zufolge eine Kategorisierung der Art „Objekt *x* besitzt Merkmal *i*" bzw. „Objekt *x* gehört zu Kategorie *i*". Eine visuelle Kategorisierung ist gleichbedeutend mit einer Encodierung in das kapazitätslimitierte visuelle Kurzzeitgedächtnis (vKZG; *visual short-term memory*); vorausgesetzt, im vKGZ ist noch Speicherplatz für die Kategorisierung vorhanden. Einmal im vKZG repräsentiert, steht die Kategorisierung bzw. das Objekt zum Bericht bzw. zur Kontrolle expliziten Verhaltens zur Verfügung. Die Kompetition zwischen den Objekten unterliegt einem Bias (einer beeinflussenden Tendenz), der die Verarbeitungsrate für ein jedes Objekt in dem Wettlauf moduliert. Die TVA postuliert vier Prinzipien, die das Ergebnis des Kompetitionsprozesses bestimmen: eine exponentielle Verarbeitungsdynamik, Beeinflussung der Kompetition durch Modulation der Verarbeitungsrate, einen Bias durch attentionale Gewichtung und schließlich eine Gewichtszuordnung entsprechend der Passung mit einer (reaktionsrelevanten) Zielreizkategorie:

1. *Exponentielle Verarbeitungsdynamik:* Befindet sich nur ein Objekt in einem sonst leeren visuellen Feld, so wächst die Wahrscheinlichkeit der Identifikation dieses Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt *t* in Abhängigkeit von der Darbietungszeit einer exponentiellen Funktion folgend.
2. *Kompetition durch Modulation der Verarbeitungsrate:* Befinden sich mehrere gleichzeitig zu identifizierende Objekte im visuellen Feld, so führt die entstehende Kompetition zwischen den Objekten zu einer reduzierten Verarbeitungsrate für die jeweiligen einzelnen Objekte. Ein Parameter der Exponentialfunktion, der Verarbeitungsratenparameter, indiziert, wie rasch die Identifikation erfolgt. Der TVA zufolge sinken diese Parameter ab, wenn multiple Objekte um Verarbeitung konkurrieren. Die TVA implementiert die Kompetition zwischen Objekten also im Sinne von einer parallelen Verarbeitung, die jedoch einer Kapazitätslimitierung unterliegt.
3. *Bias durch attentionale Gewichtung:* Nach der TVA wird jedem Objekt *i* ein Aufmerksamkeitsgewicht w_i zugeordnet. Für jedes Objekt *i* wird die Basisrate der Verarbeitung (d. h. die Rate, mit der das Objekt verarbeitet wird, wenn es alleine dargeboten wird) mit dem Verhältnis seines eigenen Gewichts (w_i) zur Summe der Gewichte (*Sw*) aller Objekte im Feld multipliziert. Dadurch wird die Verarbeitung von Objekten beschleunigt, die ein im Vergleich zu anderen Objekten hohes Gewicht haben. Zugleich produzieren sie starke Interferenz mit der Verarbeitung anderer Objekte (indem sie den Nenner der Gewichtsverhältnisse für jedes dieser Objekte erhöhen). Umgekehrt werden Objekte mit geringem Gewicht nur langsam verarbeitet, und sie produzieren nur schwache Interferenz (weil sie den Nenner der Gewichtsverhältnisse für die verschiedenen Objekte nur wenig erhöhen). Das Gewichtsverhältnis für ein Objekt moduliert die Verarbeitung aller Merkmale dieses Objekts. Das heißt, die TVA implementiert eine objektbasierte Kompetition: Der kritische Faktor ist die relative Gewichtung der verschiedenen Objekte im Feld, nicht welche Merkmale dieser Objekte zu verarbeiten sind.
4. *Gewichtszuordnung entsprechend der Passung mit einer Zielreizkategorie:* Die Aufmerksamkeitsgewichte für die jeweiligen Objekte werden in einer ersten Verarbeitungsphase berechnet, in der jedes Objekt mit einer Menge pertinenter, d. h. aufgabenkritischer, Zielreizkategorien abgeglichen wird. Der Pertinenzwert einer Kategorie ist also ein Maß für die aktuelle, durch die Aufgabe bestimmte Priorität (d. h. Bedeutsamkeit), die der Beachtung von Elementen dieser Kategorie zukommen soll. Sind z. B. Objekte in einer bestimmten Zeile eines Displays, Objekte einer bestimmten Farbe oder Objekte einer bestimmten alphanumerischen Kategorie zu berichten, so besitzt die entsprechende Kategorie (z. B. mittlere Zeile, rote Farbe, Ziffern) eine hohe Pertinenz. In dem Maße, in dem ein Objekt einer der Zielreizkategorien ähnlich ist, wird sein Aufmerksamkeitsgewicht erhöht. Formal ist das Gewicht eines Objekts *x* definiert als die Summe der Produkte der sensorischen Evidenz, dass Objekt *x* einer bestimmten Kategorie *j* angehört, und der Pertinenz dieser Kategorie. (Dabei wird über die Menge aller in der aktuellen Aufgabe relevanten visuellen Kategorien summiert.)

Die TVA gestattet also die Flexibilität der Selektionsregeln, indem die Pertinenzwerte aufgabenabhängig festgelegt werden können. Als Folge haben Objekte, die der Zielreizkategorie sehr unähnlich sind, nur geringes Gewicht, sodass sie nur wenig zur attentionalen Kompetition beitragen; dagegen erhalten Objekte, die dem Zielreiz ähnlich sind, hohes Gewicht und sind somit starke „Wettstreiter" im Selektionsprozess.

In der TVA wird unterschieden zwischen zwei Mechnaismen – bzw. Phasen – der Selektion: einem für die Selektion von Elementen (als *filtering* bezeichnet) und einem für die Selektion von Kategorien (als *pigeonholing* bezeichnet):

1. *Filtering-Mechanismus:* Er wird durch die Pertinenzwerte und die attentionalen Gewichte implementiert. Sind z. B. rote Elemente auszuwählen, so wird die Pertinenz von „rot" heraufgesetzt, und folglich erhalten rote Elemente hohes attentionales Gewicht. Dadurch wird die Verarbeitungsrate für rote Elemente – hinsichtlich aller Arten von Kategorisierungen – erhöht, sodass sie den Verarbeitungswettlauf wahrscheinlich gewinnen und in das vKGZ encodiert werden.
2. *Pigeonholing-Mechanismus:* Er wird durch einen perzeptiven Entscheidungsbias implementiert, wobei der Bias-Parameter bestimmt, wie die (im Filterprozess ausgewählten) Elemente kategorisiert werden. Sind z. B. in einer sogenannten Teilberichtsaufgabe die roten Elemente nach ihrer Form zu kategorisieren (soll also die Form von so vielen roten Elementen im Feld wie möglich berichtet werden), so wird der Bias-Parameter für die (Bericht-) Kategorieform hochgesetzt.

Als computationale Theorie gestattet die TVA genaue quantitative Anpassungen an Datensätze aus ganz unterschiedlichen Arten von Experimenten, einschließlich Daten aus Teilberichts-, visuellen Such- und vielen anderen Aufgaben. Obwohl die Theorie in ihrem Anwendungsbereich begrenzt ist (vgl. aber die CODE Theory of Visual Attention [CTVA] von Logan [1996], die die TVA mit der COntour-DEtector-Theorie der nähenbasierten perzeptiven Gruppierung von van Oeffelen und Vos [1983] verbindet und eine große Reihe räumlicher Effekte der visuellen Aufmerksamkeit erklärt), konnte sie doch eine beträchtliche Menge der vorliegenden behavioralen Daten zur selektiven Aufmerksamkeit passend und ökonomisch beschreiben (Bundesen 1990, 1998).

Diese mit Vorschau (*preview*) bezeichnete Bedingung wurde mit zwei anderen Bedingungen verglichen: zum einen mit einer klassischen Konjunktionssuche, in der alle Items (d. h. die beiden Subgruppen) gleichzeitig präsentiert wurden (Baseline-Bedingung), und zum anderen mit einer zweiten Vergleichsbedingung, in der ausschließlich die Elemente des zweiten Sets dargeboten wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Sucheffizienz in der Vorschaubedingung annähernd so hoch war wie in der zweiten Vergleichsbedingung, in der nur die zweite Item-Gruppe präsentiert worden war; im Vergleich zur Baseline-Bedingung hingegen war die Suche signifikant effizienter. Diese Verbesserung der Suchleistung wird als Vorschauvorteil (*preview benefit*) bezeichnet und ist ein Hauptcharakteristikum der *visuellen Markierung*.

Watson und Humphreys (1997) zeigten also, dass alte (d. h. zu einem gegebenen Zeitpunkt schon in einem visuellen Feld vorhandene) Objekte mit einer visuellen Markierung versehen werden, die es erlaubt, sie von neu erscheinenden Objekten (bzw. den Orten, an denen die Objekte erscheinen) zu unterscheiden. Die visuelle Markierung setzt die Wahrscheinlichkeit herab, dass die Selektion durch alte Objekte beeinflusst wird, und erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass sie durch die neu dargebotenen Objekte determiniert wird. Anders ausgedrückt wird die Verarbeitung neuer relativ zu alten Objekten priorisiert.

Diese Priorisierung kann prinzipiell in einer passiven oder einer aktiven Art und Weise erfolgen. Für die passive Priorisierung neuer Objekte sind hauptsächlich zwei Mechanismen verantwortlich: die IOR und die Aufmerksamkeitskaperung (AK; *attentional capture*). Mit *Aufmerksamkeitskaperung* wird das Phänomen bezeichnet, dass ein neues Objekt, das innerhalb einer Anordnung alter Objekte präsentiert wird, die Aufmerksamkeit selbst dann auf sich zieht, wenn bei den alten Objekten gleichzeitig mit dem Beginn der Darbietung des neuen Objekts eines der Attribute verändert wird. Für die Erklärung der Effekte der visuellen Markierung scheinen IOR und AK jedoch nicht geeignet, da diese passiven automatischen Mechanismen bestimmten Beschränkungen unterworfen sind: So erstreckt sich der IOR-Effekt auf maximal vier bis fünf der zuletzt fokal beachteten Objekte, und maximal vier Objekte können simultan für die prioritäre Aufmerksamkeitszuweisung gekennzeichnet werden. Watson und Humphreys (1997) zeigen jedoch, dass der Vorschauvorteil nicht einfach auf einer Differenz basaler Merkmale zwischen alten und neuen Items basiert. Er tritt sowohl bei stationären als auch bei sich bewegenden Stimuli auf und wird bei bis zu 30 alten und 15 neuen Stimuli beobachtet. Damit unterliegt der Vorschauvorteil nicht den Kapazitätsbegrenzungen von IOR und AK. Watson und Humphreys (1997) beschreiben also einen aktiven Priorisierungsprozess, der die Verarbeitung alter Objekte erschwert und die Verarbeitung neuer Objekte erleichtert.

Der Vorschauvorteil wird reduziert, wenn Beobachter während der Vorschauperiode eine (auditive oder visuelle) Zusatzaufgabe auszuführen haben (Humphreys et al. 2002). Können die alten Stimuli jedoch vor der Darbietung der Zusatzaufgabe encodiert werden, wirkt sich nur eine visuelle, nicht jedoch eine auditive, Zusatzaufgabe negativ aus. Um eine optimale Verarbeitung der neuen Stimuli zu erreichen, müssen also aktive Prozesse einsetzen, während die alten Stimuli (allein) präsentiert werden. Zusätzlich legen die unterschiedlichen Effekte auditiver und visueller Zusatzaufgaben separate Prozesse für die Encodierung und für die Aufrechterhaltung einer Repräsentation (der alten Stimuli) nahe.

Insgesamt beinhaltet die visuelle Markierung einen Prozess, der alte Items einer visuellen Umgebung als Gesamtheit von der weiteren Verarbeitung ausschließt, sobald neue Items im visuellen Feld auftauchen. Möglicherweise werden diese alten Items als Gruppe repräsentiert. Eine entsprechende Vorstellung wird gestützt durch Untersuchungen, in denen Beobachter in einer Vorschauaufgabe in einigen Versuchsdurchgängen das Auftauchen eines weißen Lichtpunktes (eines *probe*, d. h. eines Stimulus, der mit der eigentlichen Aufgabe nichts zu tun hatte) entdecken mussten, der zusammen mit den neuen Elementen dargeboten wurde. Wurde der *probe* am Ort eines der alten Objekte präsentiert, so war die Entdeckungslatenz im Vergleich zur Darbietung am Ort eines der neuen Objekte signifikant verlangsamt (Watson und Humphreys 2000).

5.2.5 Limitationen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit

Die Bedeutung von Selektionsprozessen (auch und insbesondere in Situationen des alltäglichen Lebens) zeigt sich eindrücklich in Limitationen der Verarbeitung, die dann beobachtet werden, wenn Mechanismen der räumlichen oder zeitlichen selektiven Aufmerksamkeit überlastet sind. Einige dieser Limitationen – durch Unaufmerksamkeit verursachte Blindheit oder kurz Unaufmerksamkeitsblindheit (*inattentional blindness*), Veränderungsblindheit (*change blindness*) und Aufmerksamkeitsblinzeln (*attentional blink*) – werden im Folgenden dargestellt.

▪ Unaufmerksamkeitsblindheit

Müssen Beobachter eine schwierige Diskriminationsaufgabe, für die räumliche Aufmerksamkeit erforderlich ist (z. B. Aussage darüber, welcher von zwei sich nur wenig unterscheidenden Linien eines Kreuzes der längere ist), unter hohem Zeitdruck ausführen, so sind sie nicht in der Lage, alle Merkmale eines unerwartet dargebotenen zusätzlichen Objekts (in einem Wiedererkennenstest) korrekt zu berichten. Da die Beobachter in dieser Bedingung das Auftauchen eines zusätzlichen Reizes nicht erwarten, wird von der *Unaufmerksamkeitsbedingung* gesprochen.

Wird die Präsentation eines zusätzlichen Objekts hingegen erwartet (*Bedingung geteilter Aufmerksamkeit*), bzw. liegt die primäre Aufgabe in der Verarbeitung eines plötzlich auftauchenden Objekts (*Bedingung voller Aufmerksamkeit*), so steigt die Wiedererkennensleistung an bzw. können die Merkmale korrekt berichtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass in dieser Bedingung die selektive räumliche Aufmerksamkeit (fast) ausschließlich auf das Objekt ausgerichtet wird, das den Gegenstand der Diskriminationsaufgabe bildet. Nicht erwartete Objekte (in der Unaufmerksamkeitsbedingung) können dieser Interpretation zufolge nur durch Prozesse verarbeitet werden, die keine Aufmerksamkeit erfordern. Aus dem genannten Grund wird auch von einer *inattentionalen Blindheit* für diese Objekte oder verkürzend von **Unaufmerksamkeitsblindheit** gesprochen (Mack und Rock 1998). Interessant ist hierbei auch, dass verschiedene

Objektmerkmale mit unterschiedlich hoher Wahrscheinlichkeit berichtet werden. Präsentationsort und Farbe eines unerwarteten Objekts werden sowohl in der inattentionalen als auch in der Bedingung mit geteilter Aufmerksamkeit mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit (> 70 %) korrekt berichtet; Anzahl und Form zusätzlicher Objekte dagegen werden in der geteilten Aufmerksamkeitsbedingung nur mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 50 % (jedoch deutlich über dem Rateniveau der jeweiligen experimentellen Bedingung) erkannt.

Veränderungsblindheit

Selbst ausgeprägte Veränderungen eines Objekts oder Objektmerkmals werden oft übersehen, wenn der Fokus der Aufmerksamkeit während der Veränderung nicht auf den sich verändernden Teil des visuellen Feldes ausgerichtet ist – ein Phänomen, das als **Veränderungsblindheit** (*change blindness*) bezeichnet wird. Die Voraussetzung für das Auftreten von Veränderungsblindheit ist insbesondere dann gegeben, wenn für die Entscheidung über eine mögliche Veränderung Blicksprünge (Sakkaden) zwischen zwei Bildern erforderlich sind, die an unterschiedlichen Orten gleichzeitig dargebotenen werden (Rensink et al. 1997). Veränderungen werden jedoch auch in zwei Bildern übersehen, die nacheinander an derselben Position dargeboten werden, wenn entweder zwischen den zwei Bildern kurzzeitig ein leeres Bild (z. B. eine graue Fläche) präsentiert oder wenn zusätzlich zur Veränderung plötzlich ein ablenkender Stimulus dargeboten wird (Rensink et al. 1997).

Aufmerksamkeitsblinzeln

Mit dem Begriff **Aufmerksamkeitsblinzeln** (*attentional blink*) wird ein transientes Defizit der zeitlichen selektiven visuellen Aufmerksamkeit im Sinne einer eingeschränkten Fähigkeit zur Verarbeitung von in schneller Abfolge sequenziell dargebotener Stimuli (*rapid serial visual presentation*, RSVP) bezeichnet. Zwei zu identifizierende visuelle Zielreize werden in einen Strom von zu ignorierenden Reizen eingebettet (z. B. zwei Buchstaben als Zielreize unter zehn Distraktorziffern), wobei die Stimuli immer an derselben Position und mit einer Frequenz von rund zehn Objekten pro Sekunde präsentiert werden. Werden dabei die beiden Zielreize nacheinander innerhalb von weniger als 300–500 ms dargeboten, so sind Beobachter oft nicht in der Lage, den zweiten der beiden Zielreize korrekt zu identifizieren, obwohl der erste Zielreiz fast immer identifiziert wird. Liegt die Präsentation der beiden Zielreize dagegen um mehr als 500 ms auseinander, so kann der zweite Zielreiz nahezu mit Sicherheit identifiziert werden.

Eine notwendige Voraussetzung für das Auftreten des Aufmerksamkeitsblinzelns ist neben dem Zeitabstand der Präsentation des zweiten relativ zum ersten Zielreiz (< 500 ms), dass die beiden Zielreize in einen Strom von Nichtzielreizen eingebettet sind. Das Aufmerksamkeitsblinzeln kann weder durch frühe sensorische Prozesse noch durch Limitationen des Arbeitsgedächtnisses erklärt werden (Raymond et al. 1992). Vielmehr wird davon ausgegangen, dass der beeinträchtigten Verarbeitung des zweiten Zielreizes eine Limitation der selektiven Aufmerksamkeit zugrunde liegt: Nach der Entdeckung des ersten Zielreizes ist eine attentionale Verarbeitung erforderlich, um den Zielreiz genau zu identifizieren. Während das kapazitätslimitierte attentionale System den ersten Zielreiz verarbeitet, kann Aufmerksamkeit nicht einem zweiten Zielreiz zugewiesen werden; die Folge ist, dass er übersehen wird. Interessanterweise tritt dieses Aufmerksamkeitsblinzeln nicht auf, wenn der zweite Zielreiz unmittelbar, also ohne Unterbrechung durch einen Nichtzielreiz, auf den ersten Zielreiz folgt; der zweite Zielreiz kann dann mit dem ersten attentional mitverarbeitet werden (dieser Effekt wird als *lag-one sparing* bezeichnet, d. h. Effekt der Verschonung von Zielreiz-Items mit Abstand eins).

Die Interpretation dieser Phänomene basiert darauf, dass Veränderungen in der visuellen Umwelt nur wahrgenommen werden können, wenn dem Ausschnitt, an dem eine Veränderung passiert, selektive Aufmerksamkeit zugewiesen wird (Rensink et al. 1997). Aufmerksamkeitszuweisung kann sich dabei auf Prozesse der Wahrnehmung oder des Gedächtnisses beziehen. Wahrnehmungsbezogene Erklärungen postulieren, dass es sich bei unserem introspektiven Eindruck einer vollständig und detailliert wahrgenommenen Umwelt tatsächlich um eine *Illusion* handelt. Entgegen unserem Eindruck werden nur die Bestandteile der visuellen Umwelt detailliert repräsentiert, also im eigentlichen Sinne „wahrgenommen", denen fokale Aufmerksamkeit zugewiesen wird. Teile außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus werden nicht bewusst repräsentiert, d. h., sie sind nicht verfügbar für weitergehende Verarbeitungsprozesse, die eine explizite Repräsentation erfordern. Solche Umweltbestandteile sind diesem Ansatz zufolge nur scheinbar detailliert in der Wahrnehmung vorhanden, weil immer dann Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Objekt gerichtet wird, wenn es auf sein explizites Vorhandensein und seine detaillierten Eigenschaften hin untersucht werden soll (O'Regan 1992; O'Regan et al. 2000).

In einem Ansatz mit einem etwas anderen Schwergewicht der Erklärung geht Wolfe (1999) von einer *Amnesie* bezüglich der Objekte und Veränderungen aus, denen keine Aufmerksamkeit zugewiesen wird (*inattentional amnesia*). Alle betroffenen Objekte werden zwar, wenn auch nur sehr kurzzeitig, im Verarbeitungssystem repräsentiert. Wird ein Stimulus aus dem visuellen Feld entfernt, so geht dessen Repräsentation unmittelbar verloren. Zugang zu bewusster Verarbeitung, z. B. für einen expliziten Bericht, findet aber nur die Information, die infolge der Zuweisung fokaler Aufmerksamkeit in eine länger verfügbare Gedächtnisrepräsentation überführt wird. Die beschriebenen Verarbeitungslimitationen sind folglich darauf zurückzuführen, dass bestimmte Objekte bzw. Veränderungen nicht berichtet werden können, weil ein expliziter Bericht die Ausbildung einer durch attentionale Prozesse konsolidierten Gedächtnisrepräsentation voraussetzt.

Kognitive Psychologie und Neurowissenschaften

Die bisher dargestellten experimentellen Ansätze und Theorien haben hauptsächlich zum Ziel, Verhaltensdaten zu erklären; die Theorien machen also keine Aussagen darüber, wie die implementierten Prinzipien attentionaler Selektion auf der neuronalen Ebene, im Gehirn, realisiert sind. Im Zuge einer immer stärkeren methodischen und theoretischen Integration von Psychologie und Neurowissenschaften werden seit einiger Zeit Theorien formuliert, deren Ziel darin liegt, die behaviorale und die neuronale

Erklärungsebene zu überbrücken. Einer der ersten Versuche einer solchen Rahmentheorie ist die Hypothese der integrierten Kompetition (*integrated competition hypothesis*). Dieser Ansatz wird in ▶ Abschn. 5.2.6 im Anschluss an einen Überblick über neurokognitive Mechanismen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit behandelt.

5.2.6 Neurokognitive Mechanismen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit

Vor etwa 25 bis 30 Jahren wurde damit begonnen, die neuronalen Grundlagen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit mit den Methoden der Einzelzellableitung am wachen Tier (in der Regel bei Affen), der nichtinvasiven Messung ereigniskorrelierter Potenziale (EKPs; *event-related potentials*, ERPs) des Elektroencephalogramms (EEG) an der Schädeloberfläche des Menschen sowie der Erfassung der Folgen von lokalen Hirnschädigungen zu untersuchen. Vor etwa zehn Jahren kam ein weiterer methodischer Ansatz hinzu, nämlich die Untersuchung von Aufmerksamkeitsprozessen mit bildgebenden Verfahren wie der funktionalen Kernspin- bzw. Magnetresonanztomografie (fMRI) und der Positronenemissionstomografie (PET; ▶ Kap. 2). Die Kombination dieser verschiedenen Methoden mit geeigneten experimentellen Paradigmen (▶ Abschn. 5.2.2 und 5.2.3) hat neue Einsichten in die neurokognitiven Mechanismen der visuellen Aufmerksamkeit vermittelt.

Der Versuch, Prozesse der visuellen Aufmerksamkeit auf der Ebene neurokognitiver Mechanismen zu verstehen, setzt eine Modellvorstellung von der funktionalen Architektur des visuellen Systems voraus, in dem diese Prozesse implementiert sind (Überblick in ▶ Kap. 2). In diesem Kontext sind zwei Charakteristika des visuellen Systems von besonderer Bedeutung: die Parallelität funktional spezialisierter Verarbeitungsmechanismen sowie deren quasihierarchische Organisation.

Studien zur selektiven Aktivität der Neurone im primären visuellen Cortex (V1), der ersten corticalen Stufe der visuellen Informationsverarbeitung, sowie in nachfolgenden extrastriären Arealen haben gezeigt, dass verschiedene Zellen darauf spezialisiert sind, bestimmte Aspekte visueller Information wie Farbe, Form, Bewegung usw. zu codieren (z. B. Livingstone und Hubel 1988).

Zusätzlich zur parallelen Verarbeitung elementarer visueller Information wurde eine weitere Unterteilung des visuellen Systems in einen **ventralen Pfad** (Was-Pfad) und einen **dorsalen Pfad** (Wo- bzw. Wie-Pfad; Mishkin et al. 1983; Milner und Goodale 1995) vorgeschlagen.

Neben der Parallelität der Verarbeitung besteht ein zweites Hauptcharakteristikum des (visuellen) Gehirns darin, dass visuelle Information in einer Reihe hierarchisch organisierter Stufen verarbeitet wird. Eine derartige Konzeption multipler Verarbeitungsschritte ist implizit in der Unterscheidung zwischen einer Eingangsstufe der Verarbeitung in den (funktionalen visuellen) Arealen V1/V2, in der elementare visuelle Merkmale berechnet werden, und nachfolgenden höheren Stufen, in denen im ventralen Pfad die visuelle Objekterkennung erfolgt und im dorsalen Pfad räumliche Information für Wahrnehmung und Handlung berechnet wird. *Hierarchisch* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass elementare visuelle Informationen die Grundlage für die Berechnung komplexerer Informationen auf höheren Stufen bilden. Zum Beispiel zeigt sich hinsichtlich der formbasierten Kategorisierung von Objekten im ventralen Pfad, dass in V1 zuerst lokale Kanten von Objekten berechnet werden, bevor dann in höheren Arealen (z. B. V4) komplexere Bestandteile einer Form (Form-Primitiva) gebildet werden und darauf aufbauend schließlich die eigentliche Objekterkennung im Sinne der Objektkategorieberechnung (im inferior-temporalen Cortex, ITC) erfolgt (z. B. Oram und Perrett 1994). Man kann also feststellen, dass mit zunehmender Ebene in der Hierarchie die Komplexität des repräsentierten Attributs zunimmt.

Genau genommen handelt es sich allerdings um eine quasihierarchische Verarbeitung, weil es neuronalen Aktivitätsfluss auch in absteigender Richtung, von höheren zu niedrigen Arealen, gibt und weil direkte Verbindungen von niedrigen zu höheren Stufen (z. B. von V1 direkt nach V4) bestehen (z. B. Felleman und Van Essen 1991). Des Weiteren gibt es kein Areal, in dem alle parallel-verteilt repräsentierte visuelle Information (Farbe, Form, Bewegung etc.) konvergiert. Die Bindung separat codierter Attribute in kohärente Objekte kann deshalb nicht durch simple Konvergenz der verteilten Information in einem anatomisch hochrangigen Areal zustande kommen.

Ein weiterer wichtiger Befund besteht darin, dass die Größe der **rezeptiven Felder** (RFs) mit zunehmender Hierarchieebene des visuellen Systems zunimmt. Das RF eines visuellen Neurons bezieht sich auf den Ausschnitt des visuellen Feldes bzw. der Retina, in dem ein Stimulus die Antwort des Neurons verändert. Zellen in V1 haben kleine RFs, während Zellen im IT-Cortex, der höchsten Stufe im ventralen Pfad, RFs mit einem ganzen visuellen Halbfeld aufweisen können (z. B. Oram und Perrett 1994).

Das visuelle Gehirn lässt sich also als ein parallel und verteilt arbeitendes System beschreiben, in dem visuelle Information in einer Reihe quasihierarchisch arrangierter Schritte berechnet wird, die von niedrigen zu höheren Ebenen fortschreiten und die durch eine zunehmende Größe der RFs der entsprechenden Neurone gekennzeichnet sind.

Im Folgenden wird eine Reihe von kognitiv-neurowissenschaftlichen Schlüsselstudien zur visuellen Aufmerksamkeit referiert. Die meisten Untersuchungen befassen sich mit ortsbezogener Aufmerksamkeit, einige mit objektbezogener und nur wenige mit dimensionsbasierter Aufmerksamkeit, und entsprechend nimmt die Darstellung der Studien zu ortsbezogener Aufmerksamkeit den größten Raum ein. Die Darstellung folgt einem methodischen Gliederungsprinzip, wobei zunächst Resultate aus Einzelzellableitungsstudien und EKP-Untersuchungen, dann Ergebnisse aus Studien mit bildgebenden Verfahren und schließlich Befunde aus neuropsychologischen Läsionsstudien referiert werden.

▪ Ortsbezogene Aufmerksamkeit

Einzelzellableitungsstudien Effekte ortsbezogener Aufmerksamkeit auf der Ebene einzelner Neurone konnten auf verschiedenen Stufen sowohl des ventralen als auch des dorsalen visuellen Pfades nachgewiesen werden. In einer klassischen Untersuchung von Moran und Desimone (1985) wurde der Einfluss räumli-

cher Aufmerksamkeitszuwendung auf das Antwortverhalten von Neuronen innerhalb des ventralen Systems untersucht. Zwei Klassen von visuellen Reizen wurden ausgewählt: effektive Reize, deren Präsentation zu einer deutlich messbaren Zellantwort (einer Veränderung der Feuerrate) führte, und ineffektive Reize, die die Zellantwort nicht veränderten. In jedem Versuchsdurchgang wurden zwei visuelle Reize, ein effektiver und ein ineffektiver, gleichzeitig dargeboten, wobei die Aktivität einzelner Zellen in V4 oder im inferior-temporalen Cortex (ITC) abgeleitet wurde. Das Antwortverhalten der abgeleiteten Neurone wurde vom Ort der Aufmerksamkeit beeinflusst: War die Aufmerksamkeit auf den effektiven Reiz gerichtet, ergab sich im Vergleich zur Orientierung auf den ineffektiven Reiz (d. h. bei Abwendung der Aufmerksamkeit vom effektiven Reiz) eine höhere Feuerrate. Moran und Desimone (1985) interpretierten diesen Befund im Sinne einer Unterdrückung der Antwort von Neuronen, die nichtbeachtete Reize repräsentieren. Dieser Aufmerksamkeitseffekt konnte sowohl in V4 als auch im ITC beobachtet werden, nicht jedoch in V1.

In einer weiteren Untersuchung (Luck et al. 1997) konnte eine Unterdrückung der neuronalen Reaktion auf einen nichtbeachteten Reiz nicht nur in V4, sondern auch in V2 nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigte diese Untersuchung, dass die ortsbezogene Aufmerksamkeit auch die Spontanaktivität eines Neurons beeinflussen kann: Richtete der Affe seine Aufmerksamkeit im Intervall zwischen der Präsentation eines ortsbezogenen Hinweisreizes und der Darbietung des Zielreizes auf eine Position innerhalb des RF der abgeleiteten V2- und V4-Neurone, so erhöhte sich deren Spontanaktivität um 30–40 %.

Mehrere Studien (z. B. Moran und Desimone 1985) hatten zunächst nahegelegt, dass die Aktivität von V1-Neuronen nicht durch Aufmerksamkeit moduliert werden könne. Ein vermuteter Grund dafür war, dass es wegen der kleinen RFs der V1-Neurone nicht möglich sei, zwei Reize innerhalb eines Feldes darzubieten. Inzwischen wurde jedoch gezeigt, dass die Aktivität einzelner Neurone in V1 durch ortsbezogene Aufmerksamkeit moduliert werden kann, selbst wenn beachteter und unbeachteter Reiz in unterschiedlichen RFs liegen (z. B. Roelfsema et al. 1998). Die Modulation zeigte sich aber erst etwa 235 ms nach Reizdarbietung, obwohl die Reaktionslatenz der V1-Neurone typischerweise bei nur etwa 30 ms liegt. Die attentionale Modulation der neuronalen Aktivität in V1 erfolgte also erst in späten Phasen der Reizverarbeitung.

Diese Modulierung wird durch sogenannte rekurrente Verbindungen geleistet. Während üblicherweise die Informationsverarbeitung in einer hierarchischen Weise betrachtet wird, in der neuronale Signale von den Sinnesorganen ausgehend zu höheren Arealen der sensorischen Verarbeitung, der Assoziation und schließlich der Planung und Durchführung von Reaktionen transferiert werden, integrieren einige aktuelle Modelle auch Rückprojektionen von höheren zu niedrigen Verarbeitungsstufen in ihre Erklärung selektiver Aufmerksamkeit. Dabei wird (beispielsweise) im Modell von Lamme und Roelfsema (2000) prinzipiell unterschieden zwischen einer *schnellen vorwärtsgerichteten Informationsweiterleitung* (*fast forward sweep of information*) und einer zurückfließenden bzw. *rekurrenten Informationsvermittlung* (*recurrent processing*). Entsprechende Rückprojektionen von höheren zu niedrigeren Verarbeitungsstufen können also diese späte Modulation der Aktivierung beispielsweise in V1 erklären.

Im dorsalen Pfad zeigten sich Aufmerksamkeitseffekte auf der Ebene einzelner Neurone u. a. im mediotemporalen Areal (MT), im medial-superior-temporalen Areal (MST) und im lateralen intraparietalen Areal (LIP). Neurone in MT und MST sind an der Verarbeitung von visueller Bewegungsinformation beteiligt. Sie sind in der Regel richtungsselektiv, d. h., sie antworten bevorzugt, wenn sich ein Reiz in eine bestimmte Richtung bewegt. Das Antwortverhalten von Neuronen in MT und MST kann in ähnlicher Weise durch Aufmerksamkeit moduliert werden wie das Antwortverhalten von Neuronen des ventralen visuellen Systems. In einer Untersuchung von Treue und Maunsell (1996) wurden zwei Reize, ein effektiver und ein ineffektiver, innerhalb des RF des abgeleiteten Neurons platziert. Sollte der Affe den ineffektiven Reiz beachten, wurde die Antwort des Neurons (auf den effektiven Reiz) deutlich reduziert.

Effekte ortsbezogener Aufmerksamkeit konnten auch bei Ableitung einzelner Neurone in LIP nachgewiesen werden (Colby und Goldberg 1999). Nahezu alle LIP-Neurone zeigen eine Aktivitätszunahme, wenn das Versuchstier einen bestimmten Punkt fixiert und ein visueller Reiz innerhalb des RF des jeweiligen Neurons erscheint. Die Feuerrate des Neurons ist aber noch weiter erhöht, wenn der Reiz verhaltensrelevant ist. Eine erhöhte Aktivität bei Erscheinen eines visuellen Reizes zeigt sich sowohl in Aufgaben mit als auch in solchen ohne Augenbewegungen. Schließlich zeigen LIP-Neurone auch eine erhöhte Spontanaktivität, wenn das Erscheinen eines verhaltensrelevanten Reizes innerhalb des RF antizipiert wird.

EKP-Studien Mangun et al. (1993) führten ein prototypisches Experiment durch, in dem zur Messung der Effekte ortsbezogener Aufmerksamkeit auf neuronaler Ebene die ereigniskorrelierten Potenziale (EKPs) des EEG ausgewertet wurden. Den Probanden wurden visuelle Reize in schneller und zufälliger Reihenfolge an vier Positionen im Gesichtsfeld dargeboten. Die Probanden hatten die Aufgabe, ihre Aufmerksamkeit während eines gesamten experimentellen Blocks auf eine der vier Positionen zu richten (ohne die Augen zu bewegen) und bei Erscheinen eines Zielreizes an dieser Position so schnell wie möglich in vorgegebener Weise zu reagieren. Es zeigte sich, dass Reize an beachteten Positionen stärkere frühe EKP-Komponenten (P1-Positivierung und N1-Negativierung) auslösen als Reize an nichtbeachteten Positionen. Die beachteten Reize weisen eine Gipfellatenz von 80–110 ms auf, die nichtbeachteten eine Latenz von 140–190 ms. Dabei treten die EKP-Effekte nicht nur bei aufgabenrelevanten Zielreizen auf, sondern auch bei irrelevanten (von den Zielreizen deutlich unterschiedlichen) Reizen, die an der beachteten Position erscheinen (Heinze et al. 1990).

In Studien, die die Ableitung von EKPs mit dem bildgebenden Verfahren der PET kombinierten (z. B. Heinze et al. 1994; Mangun et al. 1997), ließ sich die Modulation der P1-Komponente im posterioren Gyrus fusiformis des ventrolateralen extrastriären Cortex lokalisieren. Daraus wurde gefolgert, dass die ortsbezogene Aufmerksamkeit frühe Stufen der visuellen Verarbeitung im extrastriären Cortex modulieren kann. Da die N1-Komponente relativ weit über die posteriore wie auch die anteriore Schädel-

oberfläche verteilt ist, wird vermutet, dass die N1 auf der Aktivität mehrerer räumlich getrennter Generatoren beruht. Die N1-Komponente ist bei Wahlreaktionsaufgaben deutlich stärker ausgeprägt als bei einfachen Reaktionsaufgaben (Vogel und Luck 2000), was dafür spricht, dass die N1 einen Diskriminationsprozess widerspiegelt. Im Unterschied zu den P1- und N1-Komponenten wird die C1-Komponente nicht durch die Zuwendung räumlicher Aufmerksamkeit moduliert (z. B. Clark und Hillyard 1996). Die C1-Komponente hat eine Gipfellatenz von nur 50–55 ms und wird vermutlich in V1 generiert. Daraus wurde geschlossen, dass die frühe sensorische Verarbeitung im striären Cortex nicht durch ortsbezogene Aufmerksamkeit beeinflusst werden kann.

PET- und fMRI-Studien In Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren hatten die Probanden ihre Aufmerksamkeit entweder über eine längere Zeit auf eine bestimmte Position zu richten (z. B. Heinze et al. 1994; Vandenberghe et al. 1996), oder die zu beachtende Position wurde vor jedem Durchgang durch einen Hinweisreiz angezeigt (z. B. Corbetta et al. 1993; Gitelman et al. 1999). In diesen Studien fanden sich relativ konsistent Aktivierungen im posterioren parietalen Cortex (insbesondere im Sulcus intraparietalis), im superioren Frontalcortex sowie im ventralen extrastriären Cortex. Diese Aktivierungen wurden derart interpretiert, dass superior-frontale und posterior-parietale Areale der Kontrolle der ortsbezogenen Aufmerksamkeit zugrunde liegen und für die Modulation der Informationsverarbeitung im ventralen visuellen System verantwortlich sind (► Zur Vertiefung 5.5).

Da hämodynamische Reaktionen in den oben genannten Untersuchungen über mehrere Sekunden oder sogar Minuten gemittelt wurden, kann ein Zusammenhang zwischen der Aktivierung bestimmter Gehirnregionen und einzelnen Aufgabenkomponenten eigentlich nicht hergestellt werden. Die Herstellung dieses Zusammenhangs gelang aber in Studien, die ereigniskorrelierte fMRI verwendeten (Hopfinger et al. 2000; Corbetta et al. 2000). Hopfinger et al. (2000) untersuchten, welche Gehirnregionen der Ausrichtung der ortsbezogenen Aufmerksamkeit (attentionale Kontrolle) zugrunde liegen und in welchen Regionen die nachfolgende selektive Verarbeitung der Reize (attentionale Modulation) stattfindet. Hierzu wurden in einem Cueing-Paradigma die Veränderungen der Gehirnaktivität infolge der Darbietung eines ortsbezogenen Hinweisreizes bzw. infolge der Präsentation des Zielreizes bestimmt. Der Hinweisreiz zeigte in jedem Durchgang an, welcher von zwei Reizen beachtet werden sollte. Zu den Gehirnregionen, die durch die Darbietung des Hinweisreizes aktiviert wurden, zählen insbesondere der superiore Frontalcortex, der inferiore Parietalcortex sowie der superiore Temporalcortex. Diese Gehirnregionen scheinen folglich Teil eines Netzwerks zu sein, das an der Kontrolle der ortsbezogenen Aufmerksamkeit beteiligt ist. Zu den Gehirnregionen, die durch die Darbietung der Reize aktiviert wurden, zählen u. a. der Gyrus fusiformis und der Gyrus lingualis, der ventrolaterale präfrontale Cortex, der anteriore Gyrus cinguli und das supplementär-motorische Areal. Des Weiteren traten kontralaterale attentionale Aktivierungen (z. B. bei Aufmerksamkeitsausrichtung nach links vs. rechts) in den okzipitalen Arealen V2 bis V4 auf.

Corbetta et al. (2000) verwendeten ein experimentelles Paradigma, bei dem nicht nur die Gehirnaktivität infolge der Darbietung des ortsbezogenen Hinweisreizes bestimmt, sondern auch die Aktivität infolge der Darbietung beachteter Reize (valide Durchgänge) vs. nichtbeachteter Reize (invalide Durchgänge) differenziert werden konnte. Während die Darbietung des Hinweisreizes zu einer erhöhten Aktivität im Bereich des Sulcus intraparietalis führte, wurde die rechte temporoparietale Übergangsregion durch die nachfolgende Darbietung des Zielreizes aktiviert. Die Aktivierung der temporoparietalen Übergangsregion war bei invaliden Zielreizen deutlich stärker als bei validen Zielreizen. Dies spricht dafür, dass der Sulcus intraparietalis mit der top-down kontrollierten Zuwendung der Aufmerksamkeit an bestimmte Orte in Zusammenhang steht, während die rechte temporoparietale Übergangsregion an der Orientierung der Aufmerksamkeit auf Reize beteiligt ist, die an einem Ort auftauchen, der außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit liegt.

Lepsien und Pollmann (2002) fanden in einem ereigniskorrelierten fMRI-Experiment unter Verwendung eines Cueing-Paradigmas mit peripheren Hinweisreizen differenzielle Aktivierungsmuster für attentionale Reorientierung und IOR. Als *attentionale Reorientierung* wurden jene Prozesse definiert, die mit der verlängerten Reaktionszeit nach invaliden Cues bei kurzem Cue-Zielreiz-SOA (100 ms) einhergehen. Die Gehirnareale, die bei kurzem SOA nach invaliden Cues stärker aktiviert waren als nach validen Cues, befanden sich insbesondere im anterioren präfrontalen Cortex, genauer im linken frontopolaren Cortex (vgl. auch Nobre et al. 1999) und im rechten anterioren Gyrus frontalis medius. Davon ausgehend, dass IOR durch eine zeitversetzte Inhibition der durch den Cue indizierten Position bzw. Seite entsteht, suchten Lepsien und Pollmann (2002) weiter nach Hirnarealen, die einen signifikanten Haupteffekt des Faktors SOA aufwiesen, d. h. deren Aktivierung bei validen und invaliden Cues gleichermaßen mit dem SOA anstieg (IOR für die indizierte Position sollte sich im Gehirn unabhängig davon manifestieren, ob der Cue valide ist oder invalide, obwohl Kosten bei Reaktionszeiten nur für valide Cues gemessen werden können). Ein solches Muster fand sich in den frontalen Augenfeldern (*frontal eye fields*, FEFs) und supplementären Augenfeldern (*supplementary eye fields*, SEFs). Diese Befunde stehen in Übereinstimmung mit der Vorstellung, dass okulomotorische Prozesse bei der Entstehung von IOR von zentraler Bedeutung sind.

In Einklang mit Einzelzellableitungsuntersuchungen (z. B. Roelfsema et al. 1998) konnte in weiteren fMRI-Studien eine aufmerksamkeitsbedingte Modulation der Gehirnaktivität auch in V1 nachgewiesen werden. Die Untersuchung von Martinez et al. (1999), die die Ableitung von EKPs mit fMRI kombinierten, konnte den vermeintlichen Widerspruch zu den Ergebnissen von EKP-Untersuchungen lösen. Es zeigte sich, dass die ortsbezogene Orientierung der Aufmerksamkeit zwar zu einer erhöhten Aktivität in V1 führte, die C1-Komponente aber nicht beeinflusste. Eine plausible Erklärung dieser Befundlage könnte darin bestehen, dass die erhöhte Aktivität in V1 erst zu einem späteren Zeitpunkt durch Rückprojektionen von höheren extrastriären Arealen nach V1 hervorgerufen wird. Diese Interpretation ist u. a. mit dem Befund kompatibel, dass auch in Einzelzellableitungen eine Verstärkung der neuronalen Aktivität in V1 erst relativ spät nachgewiesen werden konnte (Roelfsema et al. 1998).

Neuropsychologische Läsionsstudien Zwei neuropsychologische Phänomene, die mit Defiziten der ortsbezogenen Aufmerksamkeit in Zusammenhang gebracht werden, sind der unilaterale Neglect sowie das verwandte Phänomen der Extinktion (Überblick in Driver und Mattingley 1998; Vallar 1998). Patienten mit *unilateralem Neglect* haben ein Problem, Reize auf der kontralateral zur Hirnschädigung liegenden Raumseite zu explorieren und zu berichten. Meist handelt es sich um eine Hirnschädigung im rechten inferioren posterioren parietalen Cortex (genauer dem temporo-parieto-okzipitalen Übergangsbereich um den Gyrus supramarginalis im unteren Parietalcortex; Leibovitch et al. 1998) bzw., wenn Patienten mit Gesichtsfeldausfällen systematisch ausgeschlossen werden, im rechten Gyrus temporalis superior (Karnath et al. 2001), die zu einer Vernachlässigung von Stimuli im linken visuellen Halbfeld führt. (Anatomisch liegt der Gyrus temporalis superior zwischen den beiden Hauptverarbeitungspfaden visueller Information, dem Wo-System im Parietallappen und dem Was-System im unteren Temporallappen, und erhält Input aus beiden Systemen. Man kann daher annehmen, dass hier sowohl orts- als auch objektbezogene Information verarbeitet wird.) Dagegen werden Stimuli im intakten (ipsilateralen) visuellen Feld weitgehend unbeeinträchtigt verarbeitet. Bei einer *Extinktion* liegt, wie beim Neglect, eine Vernachlässigung auf der kontralateralen Seite vor, die allerdings nur auftritt, wenn sich neben einem Objekt im vernachlässigten kontralateralen Feld ein weiteres Objekt im intakten ipsilateralen visuellen Feld befindet. Ein einzelnes Objekt im „schlechten" visuellen Feld wird also durchaus gesehen, aber es verschwindet aus dem Bewusstsein, wenn ein weiteres Objekt im „guten" Feld erscheint. Ob Extinktion und Neglect auf eine Störung der gleichen attentionalen Mechanismen zurückgehen oder ob es sich um zwei getrennte Störungen handelt, ist umstritten. Beide Phänomene lassen sich aber als attentionale Defizite interpretieren, die sich in der Vernachlässigung räumlicher Information manifestieren.

Diese attentionale Interpretation stützt sich vor allem darauf, dass bei reinen Neglect- sowie Extinktionspatienten primäre sensorische Strukturen (z. B. V1) bzw. motorische Strukturen (z. B. M1) intakt sind und somit keine sensorischen oder motorischen Defizite vorliegen. Es wird also Information im vernachlässigten Halbfeld in den Anfangs- und Endstufen des sensomotorischen Bogens verarbeitet, aber diese Verarbeitung ist nicht ausreichend, um einen bewussten Eindruck zu generieren, der intentionales Handeln ermöglichen würde. Schreibt man der Aufmerksamkeit eine zentrale Rolle bei der Erzeugung bewusster, handlungsfähiger Repräsentationen zu (z. B. James 1890; Bundesen 1998), so sind Neglect und Extinktion als attentionale Beeinträchtigungen einzuordnen.

Des Weiteren haben u. a. Untersuchungen, in denen Paradigmen des *spatial cueing* der Aufmerksamkeit verwendet wurden, zum Verständnis des attentionalen Defizits bei Neglectpatienten beigetragen. Posner et al. (1984) beispielsweise fanden, dass Patienten mit unilateralen Läsionen des parietalen Cortex besonders langsame Reaktionszeiten zeigten, wenn nach einem (invaliden) peripheren Cue im intakten Feld der einzelne Zielreiz im vernachlässigten Feld erschien. Sie interpretierten diesen Befund als Beleg für einen defizitären Ablöseprozess (*disengagement*) der Aufmerksamkeit durch Stimuli im „schlechten" Feld. In diesem Zusammenhang ist auch die Beobachtung interessant, dass sich die Neglectsymptomatik durch *spatial cueing* der Aufmerksamkeit für kurze Zeit ganz oder zumindest teilweise kompensieren lässt (z. B. Karnath 1988). So führt die Darbietung von zusätzlichen oder auffälligen Reizen auf der kontraläsionalen Seite (bottom-up) zu einer deutlichen Verbesserung der Wahrnehmung. Auch die eindringliche und anhaltende verbale Instruktion, sich der zuvor vernachlässigten Seite zuzuwenden, kann als neglectreduzierender (top-down) Hinweisreiz wirken.

Ein neuer einflussreicher Ansatz (z. B. Desimone und Duncan 1995; Duncan et al. 1999) interpretiert dagegen Vernachlässigung als Folge eines gestörten Wettbewerbs von Objekten im vernachlässigten Feld um Aufmerksamkeit.

▪ Objektbezogene Aufmerksamkeit

Einzelzellableitungsstudien Einige Ergebnisse der oben erwähnten Einzelzellableitungsstudie von Roelfsema et al. (1998) lassen sich auch im Sinne objektbezogener Aufmerksamkeit interpretieren. Die Autoren boten einem Affen in einem Versuchsdurchgang zwei Kreise und zwei Kurven dar. Einer der Kreise war durch eine Kurve mit dem Fixationspunkt verbunden (dagegen ging die mit dem anderen Kreis verbundene Kurve nicht vom Fixationspunkt aus). Die Aufmerksamkeit des Affen wurde auf die mit dem Fixationspunkt verbundene Kurve gelenkt, indem er instruiert wurde, eine Augenbewegung zu dem mit dieser Kurve verbundenen Kreis zu machen. Die abgeleiteten V1-Neurone zeigten eine verstärkte Reaktion, wenn Segmente der beachteten Kurve in ihrem RF lagen, selbst wenn sich die beiden Kurven kreuzten. Dies kann als Beleg für die Vorstellung gewertet werden, dass Aufmerksamkeit einer objektartigen Gruppierung von basalen visuellen Elementen zugewiesen wird (z. B. Duncan 1984). Konsistent mit dieser Annahme zeigte sich die Verstärkung der neuronalen Aktivität erst etwa 235 ms nach Reizdarbietung, was darauf hinweist, dass sie durch Rückprojektionen von höheren – Objekte repräsentierenden – visuellen Arealen innerhalb des ventralen visuellen Pfades vermittelt wird.

Tatsächlich konnten Effekte objektbezogene Aufmerksamkeit auf Einzelzellebene auch für diese höheren Stufen, insbesondere den ITC, nachgewiesen werden (z. B. Chelazzi et al. 1993). Chelazzi und Kollegen boten dem Affen zu Beginn eines Versuchsdurchgangs einen komplexen Reiz kurzzeitig als Suchvorlage, d. h. als nachher zu entdeckenden Zielreiz, dar. Nach einer Verzögerung im Sekundenbereich wurde das Suchdisplay präsentiert, das aus einem (der vorher gezeigten Suchvorlage entsprechenden) Zielreiz und einem Distraktorreiz bestand. Der Affe sollte eine Sakkade zu dem Zielreiz ausführen. Je nach Durchgang war entweder der Zielreiz oder der Distraktorreiz ein für die abgeleitete ITC-Zelle effektiver Reiz (d. h., die Feuerrate der Zelle wurde durch den Reiz moduliert). Im Intervall zwischen der Präsentation der Suchvorlage und der des Suchdisplays war die Spontanaktivität von Zellen erhöht, für die die Suchvorlage der effektive Reiz war. Unmittelbar nach der Präsentation des Suchdisplays zeigte sich zunächst ein genereller Anstieg der neuronalen Aktivität im ITC, sowohl für Zellen, für die der Zielreiz der effektive Reiz war, als auch für Zellen, für die der Distraktorreiz der effektive Reiz war. Nach etwa 175 ms, also 100–125 ms bevor die Augenbewegung erfolgte, wurde jedoch die Aktivität der Neurone reduziert, wenn

5

Zur Vertiefung 5.5

Ein frontoparietales neuronales Netzwerk der Aufmerksamkeitsorientierung

Corbetta und Shulman (2002) und Corbetta et al. (2008) integrierten die Ergebnisse einer Reihe zentraler neuronaler Untersuchungen in ein Modell, das die Verschiebung des räumlichen Aufmerksamkeitsfokus als Zusammenspiel frontaler und parietaler Areale konzipiert. Dem Modell von Corbetta und Shulman (2002) zufolge wird die Aufmerksamkeitsorientierung im menschlichen Gehirn durch zwei partiell segregierte Netzwerke vermittelt, die aus jeweils mehreren Arealen bestehen: Ein bilaterales *dorsales Netzwerk*, bestehend aus den Komponenten des intraparietalen Sulcus (IPS) und der frontalen Augenfelder (*frontal eye fields*, FEFs), realisiert primär willentliche bzw. intentionsgesteuerte Aufmerksamkeitsverlagerungen. Ein rechtshemisphärisch lateralisiertes *ventrales Netzwerk*, bestehend aus den Komponenten der temporoparietalen Übergangsregion (*temporo-parietal junction*, TPJ) und des ventralen frontalen Cortex (*ventral frontal cortex*, VFC), vermittelt insbesondere die Reorientierung der Aufmerksamkeit auf nichtbeachtete bzw. unerwartet auftauchende sensorische Reize.

Die Areale des bilateralen dorsalen Netzwerks reagieren mit erhöhter Aktivierung auf die Darbietung symbolischer Hinweisreize, die die Position eines Zielreizes indizieren (z. B. Nobre et al. 1997). Von den FEFs werden bilateral Kontrollsignale, die die zu beachtende Position codieren, an Bereiche um den IPS übertragen; die Neurone im Bereich des IPS wiederum beeinflussen die Verarbeitung im visuellen Cortex im Sinne einer Fokussierung auf die durch den Hinweisreiz indizierte Position. Da das dorsale Netzwerk auch bei anderen Aufgaben, die willentliche Aufmerksamkeit erfordern, aktiviert ist, wird davon ausgegangen, dass es rein der willentlichen Kontrolle dient.

Das ventrale Netzwerk ist stark auf die rechte Hemisphäre lateralisiert, und es ist aktiviert, nachdem das Auftauchen sensorischer Reize registriert wurde, die an nichtbeachteten Orten erschienen bzw. deren Erscheinen nicht erwartet wurde. Corbetta und Shulman (2002) nehmen an, dass der VFC die Neuheit von Reizen bewertet, während die TPJ mehr an der Bestimmung von deren Relevanz für die aktuell zu lösende Aufgabe beteiligt ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Modells von Corbetta und Shulman (2002) liegt in der Annahme, dass eine Funktion des ventralen Netzwerks darin besteht, als Schaltkreisunterbrecher (*circuit breaker*) für das (willentlich kontrollierte) dorsale Netzwerk zu dienen. Eine solche Unterbrechung der Arbeit des dorsalen Netzwerks kann man sich wie folgt vorstellen: Wenn das ventrale Netzwerk einen aufgabenrelevanten Stimulus außerhalb des aktuellen Aufmerksamkeitsfokus entdeckt, kann es die im dorsalen Netzwerk ablaufende Aktivität durch Übermittlung eines Signals – von der ventralen TPJ an den dorsalen IPS – unterbrechen. Dies ermöglicht es dann, dass die Aufmerksamkeit vom aktuellen Ort abgelöst und auf den neuen Reiz ausgerichtet wird. Eine weitere Eigenschaft des dorsalen Netzwerks liegt darin, dass es die Unterbrechersignale aus dem ventralen Netzwerk (die die Aufmerksamkeit reflexiv an sich ziehen) selektiv filtern kann; d. h., es kann diejenigen Stimuli auswählen, die zu beachten (bzw. zu ignorieren) sind.

Belege für eine Beteiligung des dorsalen parietalen Cortex an der intentionalen Steuerung der Aufmerksamkeit stammen u. a. aus einer fMRI-Studie von Yantis et al. (2002), in der sich eine Aktivierung des rechtshemisphärischen Lobulus parietalis superior (SPL) zeigte, wenn die Probanden in einer RSVP-Aufgabe (RSVP = *rapid serial visual presentation*) willentlich die Aufmerksamkeit zwischen einem beachteten Stimulusstrom auf einer Seite des Displays auf einen Strom auf der anderen Seite umzuschalten hatten.

Eine ähnliche Aktivierung zeigte sich auch für willentliche Aufmerksamkeitsverschiebungen zwischen Bewegung und Farbe (Liu et al. 2003) sowie zwischen sensorischen Modalitäten (Shomstein und Yantis 2004).

In einer umfassenden Revision des Modells (Corbetta et al. 2008) wurden wesentliche Aspekte des ursprünglichen Vorschlags (Corbetta und Shulman 2002) an den aktuellen Stand der Forschung angepasst. Die Unterscheidung zweier anatomisch und funktional getrennter Aufmerksamkeitsnetzwerke – eines dorsalen Netzwerks der Top-down-Kontrolle (willentliche bzw. intentionale Kontrolle) und eines ventralen Netzwerks der Bottom-up-Kontrolle (reizgetriebene Kontrolle) – bildet, wie im ursprünglichen Ansatz, die zentrale Annahme des aktuellen Modells; geändert haben sich in der revidierten Fassung die Interpretation der funktionalen Bedeutung spezifischer Komponenten sowie die Vorstellung darüber, in welcher Weise bzw. über welche Areale die Interaktionen der beiden Netzwerke erfolgen.

Abb. 5.10 zeigt die Komponenten des dorsalen und ventralen Netzwerks im Modell von Corbetta et al. (2008) sowie die Verbindungen zwischen den Netzwerken.

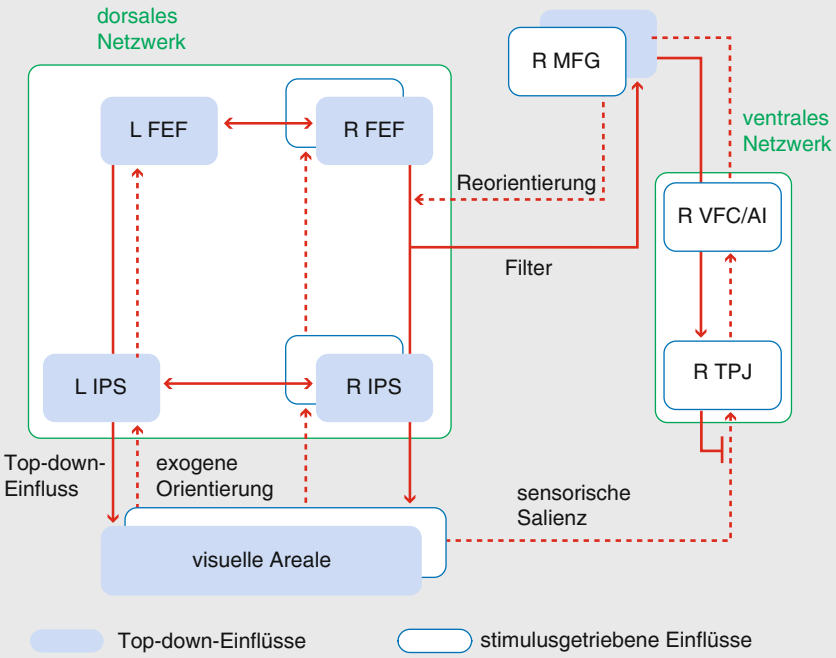


Abb. 5.10 Schematische Darstellung des frontoparietalen Aufmerksamkeitsnetzwerks von Corbetta et al. (2008). Das dorsale Netzwerk besteht aus den Komponenten intraparietaler Sulcus (IPS) und frontale Augenfelder (*frontal eye fields*, FEFs); das ventrale Netzwerk umfasst die temporoparietale Übergangsregion (*temporo-parietal junction*, TPJ) und den ventralen frontalen Cortex (*ventral frontal cortex*, VFC) sowie die anteriore Insularegion (AI). Die Region des rechtshemisphärischen mittleren frontalen Gyrus (MFG) spielt eine zentrale Rolle bei der Integration und Übertragung von Signalen der beiden Aufmerksamkeitsnetzwerke. Blaue Felder repräsentieren Top-down-Einflüsse, weiße Felder reizbasierte Einflüsse. *L* = linkshemisphärisch, *R* = rechtshemisphärisch

Zur Vertiefung 5.5 (*Fortsetzung*)

Das dorsale frontoparietale Netzwerk mit den Komponenten IPS und FEFs vermittelt die top-down-kontrollierte Selektion von sensorischen Stimuli, die aktuellen Verhaltenszielen oder Erwartungen entsprechen; weiter vermittelt das dorsale Netzwerk die Assoziierung zwischen sensorischen Stimuli und motorischen Reaktionen, die mit den vorliegenden Zielen korrespondierenden. Die vom dorsalen Netzwerk ausgehende endogene Aktivierung priorisiert (im Sinne der Hypothese der integierten Kompetition; s. unten) die Verarbeitung relevanter Stimulusmerkmale und -orte in den visuellen corticalen Arealen.

Eine für die Interaktion zwischen dorsalem und ventralem Netzwerk zentrale Rolle kommt dem rechtshemisphärischen mittleren frontalen Gyrus (MFG) zu. Über diese Region werden Signale aus dem dorsalen ans ventrale Netzwerk übermittelt, die (bei fokussierter Aufmerksamkeit) dazu führen, dass das ventrale Netz nur sensorische Stimuli mit solchen Merkmalen verarbeitet, die für das aktuelle Verhalten relevant sind. Das ventrale Netzwerk verrichtet also eine Filterfunktion, durch die verhindert wird, dass die aktuelle Verarbeitung durch zwar auffällige, aber nicht verhaltensrelevante Stimuli gestört wird. Vom ventralen Netzwerk ausgehende Aktivität wird ebenfalls über den MFG ans dorsale Netzwerk übermittelt; bei Entdeckung eines verhaltensrelevanten sensorischen Stimulus wird ein Signal an das dorsale Netzwerk geschickt, das die Orientierung auf den Stimulus vermittelt, indem die im dorsalen Wo-Netzwerk repräsentierten Koordinaten für die räumliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit aktiviert werden.

Das ventrale Netzwerk hat in der revidierten Fassung des Modells (Corbetta et al. 2008) nicht mehr die Funktion eines Schaltkreis- oder Prozessunterbrechers (*circuit breaker*), der die laufende Verarbeitung des dorsalen Netzwerks unterbricht, sobald ein auffälliger oder unerwarteter Reiz erscheint. Dem revidierten Modell zufolge kann das ventrale Netzwerk durch Signale des dorsalen Netzwerks so konfiguriert werden, dass es irrelevante sensorische Reize blockiert und dadurch das dorsale Netz bei fokussierter Aufmerksamkeit vor Distraktion schützt. Beide Netzwerke, sowohl das ventrale als auch das dorsale, sind an der Orientierung der Aufmerksamkeit auf verhaltensrelevante sensorische Reize beteiligt. Die Art und Weise der Interaktion der beiden Netzwerke nach dem Modell der integrierten Kompetition (s. unten) und nicht, wie in der ursprünglichen Fassung des Modells, nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip, stellt eine weitere wesentliche Anpassung des Modells an die Ergebnisse von empirischen Untersuchungen dar.

für sie der Distraktorreiz der ineffektive Reiz war (d. h. wenn der für sie effektive Reiz nicht das Sakkadenziel war). War hingegen der Zielreiz der effektive Reiz, stieg die Feuerrate weiter an. Dieses Muster kann so gedeutet werden, dass zumindest dann, wenn die Zielreizposition nicht von vornherein bekannt ist, komplexe neuronale Repräsentationen sowohl für Zielreiz- als auch für Distraktorreizobjekte parallel aktiviert werden und um attentionale Selektion (d. h. Zugang zum visuellen Arbeitsgedächtnis) konkurrieren. Aufgrund eines Template-basierten *Top-down-Bias* (der in der erhöhten Spontanaktivität der auf die Suchvorlage ansprechenden Neurone zum Ausdruck kommt) gewinnen diejenigen Neurone die Konkurrenz, für die der Zielreiz der effektive Reiz ist (z. B. Duncan und Humphreys 1989; Bundesen 1990).

Bildgebende Verfahren In einer fMRI-Untersuchung von O'Craven et al. (1999) wurde die Hypothese überprüft, dass die attentionale Selektion eines bestimmten Merkmals eines Objekts automatisch zur Selektion der anderen Objektmerkmale führt. Die Probanden betrachteten Reize, die aus sich überlagernden, transparenten Bildern eines Gesichts und eines Hauses bestanden, wobei sich entweder das Haus oder das Gesicht bewegte. Die Probanden sollten ihre Aufmerksamkeit entweder auf das Haus, das Gesicht oder auf die Bewegung richten. Mittels fMRI wurden Veränderungen der Aktivität in drei Gehirnregionen bestimmt:

1. In einer Region des Gyrus fusiformis, die bevorzugt auf die Darbietung von Gesichtern reagiert (*fusiform face area*).
2. In einer Region des Gyrus parahippocampalis, die bevorzugt auf die Darbietung von Häusern reagiert (*parahippocampal place area*).
3. In MT/MST, einer Region, die bevorzugt auf Bewegung reagiert.

Es zeigte sich, dass die Zuwendung der Aufmerksamkeit zu einem bestimmten Merkmal nicht nur zur Aktivierung der neuronalen Repräsentation des entsprechenden Merkmals führt, sondern zugleich auch zur Aktivierung der neuronalen Repräsentation des anderen Merkmals des gleichen Objekts. Sollten die Probanden z. B. auf die Bewegung achten und bewegte sich das Gesicht, so zeigte sich eine erhöhte Aktivität sowohl in MT/MST als auch im Bereich des Gyrus fusiformis. Bewegte sich hingegen das Haus, so führte die Beachtung der Bewegung nicht nur zu einer erhöhten Aktivierung in MT/MST, sondern auch zu einer Aktivitätserhöhung im Bereich des Gyrus parahippocampalis. Die Untersuchung von O'Craven et al. (1999) unterstützt somit die Annahme, dass Objekte als *Gesamtheit* selektiert werden, selbst wenn nur ein einzelnes Merkmal des Objekts aufgabenrelevant ist.

Neuropsychologische Läsionsstudien Während Befunde von Cueing-Experimenten zu der Vorstellung führten, dass Neglect einen gestörten Abzugsprozess der ortsbezogenen Aufmerksamkeit durch Stimuli im vernachlässigten Feld reflektiert (Posner et al. 1984), wird der Befund neuerdings eher als Folge eines gestörten Wettbewerbs von Objekten im vernachlässigten Feld um Aufmerksamkeit interpretiert (Duncan 1996; Duncan et al. 1999). Diese Interpretation stützt sich vor allem auf Studien zur visuellen Suche (z. B. Eglin et al. 1989). Wurden die Suchdisplays entweder im intakten oder im vernachlässigten Halbfeld dargeboten, so lagen die Suchleistungen auf ähnlichem Niveau. Wurde jedoch ein Suchdisplay dargeboten, das sich über das intakte und vernachlässigte visuelle Halbfeld erstreckte, so wurden Zielreize im vernachlässigten Feld deutlich langsamer entdeckt als Zielreize im intakten Feld. Dieser Befund spricht dafür, dass Objekte im vernachlässigten Feld im Wettbewerb um die Zuwendung von Aufmerksamkeit gegenüber Objekten im intakten Feld benachteiligt sind.

In einer Studie von Duncan et al. (1999) erhielten Patienten mit Läsionen im IPC die Aufgabe, entweder alle Buchstaben in einem kurzzeitig dargebotenen Display zu berichten (Ganzbericht) oder nur Buchstaben einer bestimmten Farbe zu berichten und Buchstaben in einer anderen Farbe zu ignorieren (Teilbericht). Die Ergebnisse wurden im Rahmen von Bundesens (1990)

TVA (▶ Zur Vertiefung 5.4) analysiert. Für die Patienten zeigten sich eine bilaterale Verschlechterung der Verarbeitungsrate, eine Reduktion der attentionalen Gewichte für Objekte im vernachlässigten Feld sowie – überraschenderweise – keine Beeinträchtigung der Top-down-Kontrolle attentionaler Prozesse, d. h. kein Unterschied in der Fähigkeit, Zielreize im Vergleich zu Distraktoren priorisiert zu verarbeiten.

Mit einer objektbasierten Konzeption von Neglect sind auch die Ergebnisse experimenteller Studien konsistent, die nahelegen, dass Stimuli im vernachlässigten Feld nicht nur bis zur frühen sensorischen Ebene verarbeitet werden, sondern sogar bis zur semantischen (Objekt-)Klassifikation, wobei allerdings die semantische Verarbeitung nicht zur einer bewussten Repräsentation führt (Driver und Mattingley 1998). McGlinchey-Berroth et al. (1993) boten Neglectpatienten zu Beginn eines Durchgangs kurzzeitig zwei Umrisszeichnungen als Bahnungsreiz (*prime*) dar: die Zeichnung eines sinnvollen Objekts (z. B. eines Apfels oder Schlüssels) im vernachlässigten linken Feld und die eines bedeutungslosen Linienmusters gleicher Größe im rechten Feld. Die Patienten hatten zu entscheiden, ob eine kurz danach zentral dargebotene Zeichenkette ein Wort (z. B. „farm“) war oder nicht (z. B. „frell“); es musste also eine lexikalische Entscheidung getroffen werden. Gemessen wurde die Reaktionszeit in der lexikalischen Entscheidungsaufgabe in Abhängigkeit der semantischen Beziehung zur Prime-Zeichnung im vernachlässigten Feld. Es zeigte sich ein klarer semantischer Priming-Effekt der im „schlechten“ Feld dargebotenen Zeichnung; d. h., bei Primes, die einen semantischen Bezug zum Wort hatten, war die Reaktionszeit schneller als bei Primes, die keinen Bezug zum Wort hatten. (Der entscheidende Vergleich bezog sich also nur auf die realen Wörter.) In einem Kontrollexperiment wurde weiterhin gezeigt, dass die Zeichnungen im vernachlässigten Feld nicht berichtet werden konnten, d. h. dass sie nicht bewusst repräsentiert waren.

Schließlich spricht für eine objektbezogene Konzeption von Neglect, dass sich die Störung auch in objektzentrierter Form äußern kann. Das heißt, neben der Vernachlässigung von Objekten im kontraläsionalen Feld findet man auch eine auf das einzelne Objekt bezogene Störung (z. B. Behrmann und Tipper 1999; Driver 1999). Konzentriert sich ein Neglectpatient auf ein bestimmtes Objekt, nachdem er es irgendwo in seinem intakten Feld gefunden hat, kann es zu einer Vernachlässigung der kontralateralen Seite (relativ zur Hauptachse) dieses Objekts kommen, obwohl sich diese kontralaterale Objektseite in dem von Patienten eigentlich beachteten Teil des Feldes befindet. Eine empirische Untersuchung von Driver und Halligan (1991) ist gut geeignet, objektbezogenen Neglect zu verdeutlichen. Die Autoren präsentierten Neglectpatienten vertikal orientierte rechteckige Objekte, die aus kleineren quadratischen Flächen zusammengesetzt waren, sodass diese ein unregelmäßiges Muster ergaben. Zwei dieser Objekt wurden mittig in der oberen und unteren Hälfte eines Monitors dargeboten, sodass in einer Bedingung die linke Objekthälfte im linken und die rechte im rechten visuellen Halbfeld lag. Die Aufgabe bestand darin zu entscheiden, ob die beiden Objekt gleich waren oder nicht. Von Interesse waren Unterschiede auf der linken Objektseite, die von den Patienten nicht erkannt wurden. Da sich dieser Befund sowohl als orts- als auch als objektbezogen interpretieren lassen kann, wurden in einer zweiten Bedingung die Objekte um 45° beispielsweise nach rechts rotiert, sodass sich nun die obere Hälfte Objekte im „guten“ (d. h. rechten) Halbfeld befand. Unterschiede auf der linken Seite der oberen Objekthälfte wurden nach wie vor nicht entdeckt, was einen starken Hinweis für objektbasierten Neglect darstellt.

Bei der objekt- und der raumzentrierten Vernachlässigung handelt es sich nicht um zwei unterschiedliche Störungen. Je nachdem, ob sich ein Neglectpatient gerade auf den ihn umgebenden Raum oder auf ein einzelnes, dort lokalisiertes Objekt konzentriert, manifestiert sich die kontralaterale Vernachlässigung entweder als raum- oder als objektzentriert (Karnath und Niemeier 2002).

Merkmals- und dimensionsbezogene Aufmerksamkeit

Einzelzellableitungsstudien Wie bereits dargestellt, konnten Treue und Maunsell (1996) zeigen, dass das Antwortverhalten von bewegungsrichtungssensitiven Neuronen in den Arealen MT und MST durch ortsbezogene Aufmerksamkeit moduliert werden kann: Bewegte sich ein Reiz im RF einer abgeleiteten Zelle in deren Vorzugsrichtung und ein zweiter Reiz in die Gegenrichtung, so war die Antwort des Neurons auf den effektiven Reiz reduziert, wenn das Versuchstier den ineffektiven Reiz beachtete. Interessanterweise zeigte sich ein – wenn auch weniger stark ausgeprägter – attentionaler Modulationseffekt in der Neuronenantwort selbst dann, wenn der zu beachtende Reiz außerhalb des RF der gemessenen Zelle dargeboten wurde. Ähnliche Befunde wurden auch für farben- und luminanzsensitive Neurone in V4 berichtet (Motter 1994a, b). Diese Befunde weisen auf die Möglichkeit hin, dass die attentionale Einstellung auf einen Merkmalswert innerhalb einer Dimension parallel (über das ganze Feld) zu einer reduzierten Sensitivität für nichtbeachtete Merkmalswerte innerhalb der gleichen Dimension führen kann (s. auch ▶ Zur Vertiefung 5.6).

EKP-Studien Eine attentionale Modulation früher EKP-Komponenten findet sich in Untersuchungen der ortsbezogenen Aufmerksamkeit (s. oben), nicht jedoch in Untersuchungen, in denen die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf nichträumliche Attribute von Reizen wie z. B. deren Farbe richten sollen (wobei die Reize an der gleichen Position dargeboten werden). Bei solchen Aufgaben zeigen sich typischerweise späte Aufmerksamkeitseffekte: Visuelle Reize, die aufgrund nichträumlicher Attribute beachtet werden, lösen eine stärkere Negativierung aus, die etwa nach 140–190 ms beginnt und bis etwa 300 ms nach Beginn der Reizdarbietung anhält (z. B. Harter und Previc 1978; Previc und Harter 1982; Wijers et al. 1989). Diese Negativierung unterscheidet sich deutlich von der phasischen P1- und N1-Modulation, die durch die Zuwendung der ortsbezogenen Aufmerksamkeit hervorgerufen wird. Es wurde gefolgert, dass die Selektion visueller Reize aufgrund ihrer räumlichen Position im Vergleich zur Selektion aufgrund von nichträumlichen Merkmalen auf qualitativ unterschiedlichen neuronalen Mechanismen beruht (z. B. Hillyard et al. 1996; Hillyard und Anllo-Vento 1998).

Bildgebende Verfahren Auch Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren haben gezeigt, dass die Aktivität umschriebener Regionen des visuellen Systems nicht nur durch ortsbezogene,

sondern auch durch nichträumliche – dimensionsbasierte – Einstellung der Aufmerksamkeit moduliert werden kann. Zum Beispiel hatten die Probanden in einer PET-Studie von Corbetta et al. (1991) in einem Suchdisplay einen Popout-Zielreiz unter zwei Suchbedingungen zu finden: *ungeteilte Aufmerksamkeit* und *geteilte Aufmerksamkeit*. Die Autoren fanden, dass, wenn die Probanden ihre Aufmerksamkeit konsistent einer einzelnen Dimension (z. B. Bewegung) zuweisen konnten, der Blutfluss zu den aufgabenrelevanten corticalen Arealen (z. B. V5 im Falle von Bewegung) im Vergleich zur Bedingung geteilter Aufmerksamkeit erhöht war. Interessanterweise involvierte letztere Bedingung auch erhöhte dorsolateral-frontale Aktivierung, verbunden mit Aktivierung des anterioren Cingulums.

Pollmann et al. (2000) konnten diese Ergebnisse in einer fMRI-Studie bestätigen und erweitern. Sie analysierten ereigniskorrelierte Veränderungen der BOLD-Aktivierung (BOLD = *blood oxygenation level dependent*), die mit Wechseln in der zielreizdefinierenden Dimension, insbesondere von Farbe nach Bewegung und umgekehrt, zwischen aufeinanderfolgenden Versuchsdurchgängen einhergingen. Wechsel in der Zielreizdimension (nicht aber des Zielreizmerkmals innerhalb einer Dimension, z. B. von „rot“ nach „blau“) führten zu erhöhter Aktivierung in einem frontoposterioren Netzwerk, bestehend aus dem linken frontopolaren Cortex, den Gyri frontales inferiores, höheren visuellen Arealen im Parietal- und Temporalcortex, sowie dorsalen okzipitalen Arealen. Wenn attentionales Gewicht auf eine neue Dimension verlagert wurde, erhöhte sich die Aktivierung in denjenigen visuellen Arealen, die an der Verarbeitung von Merkmalen dieser Dimension beteiligt sind (vgl. auch Corbetta et al. 1991). Pollmann et al. (2000) schlugen vor, dass der frontopolare Cortex an der Kontrolle attentionaler Gewichtsverlagerungen beteiligt ist und dass die Gyri frontales inferiores sowie höhere parietale und temporale Areale die attentionale Gewichtung durch Modulation von extrastriären visuellen Arealen realisieren, die Merkmale der neuen Zielreizdimension verarbeiten. Es existiert also eine Trennung zwischen Arealen, in denen die Aufmerksamkeitsprozesse kontrolliert, und Arealen, in denen sie implementiert werden.

Eine weitere frontale Struktur, die in Suchblöcken mit Dimensionswechseln erhöhte Aktivierung aufwies, fand sich in der frontomedianen Wand des anterioren cingulären Cortex. Allerdings zeigte der anteriore cinguläre Cortex eine tonisch erhöhte Aktivierung während des gesamten experimentellen Blockes, unabhängig davon, ob sich in einem Durchgang ein Dimensionswechsel ereignete oder nicht. Dagegen war die frontopolare Aktivierung bei einem Dimensionswechsel phasisch erhöht. Pollmann et al. (2000) interpretierten dieses Aktivierungsmuster so, dass sie zwei distinkte Kontrollmechanismen annahmen: Die Aktivierung im anterioren cingulären Cortex stellt dabei einen überdauernden *enabling-set* dar, also einen Zustand, der es ermöglicht, attentionales Gewicht zwischen relevanten Merkmalsdimensionen zu verschieben, wohingegen der frontopolare Cortex die eigentliche Verlagerung von Aufmerksamkeitsgewicht steuert.

Weidner et al. (2002) konnten in einer weiteren Studie zeigen, dass dann, wenn die Gewichtsverlagerung bewusste Top-down-Kontrolle erfordert (d. h. in einer Konjunktionssuche), mediale Gebiete des rechten Gyrus frontalis superior sowie bilaterale Regionen im prägenualen anterioren cingulären Cortex phasisch, d. h. dimensionswechselbezogen, aktiviert werden. Die Autoren schlugen vor, dass der laterale frontopolare Cortex ein schnelles, durch sensorische Reize ausgelöstes Umschalten zwischen den bereits spezifizierten dimensionalen Alternativeinstellungen übernimmt, während der mediale präfrontale Cortex für die Top-down-Spezifikation der Alternativeinstellungen verantwortlich ist.

Duncans (1996) Hypothese der integrierten Kompetition (*integrated competition hypothesis*)

Während es eine Fülle von Befunden zu neuronalen Mechanismen der visuellen Aufmerksamkeit gibt, sind wir noch weit davon entfernt, eine detaillierte Korrespondenz zwischen den in behavioralen Studien gefundenen Prinzipien und den neuronalen Mechanismen herstellen zu können. In seiner Theorie der integrierten Kompetition schlägt Duncan (1996; Desimone und Duncan 1995) vor, den Versuch der theoretischen, neurokognitiven Integration durch ein Rahmenschema objektbasierter attentionaler Kompetition im Sinne von Bundesens (1990) TVA leiten zu lassen. Dieses Schema beruht auf drei Grundannahmen:

1. Die Verarbeitung erfolgt in vielen, vielleicht sogar den meisten, der verteilten visuellen Gehirnsysteme in kompetitiver Weise. Eine erhöhte neuronale Reaktion auf ein Objekt geht mit einer verminderten Antwort auf andere Objekte einher (vermutlich weil die Reaktionen auf unterschiedliche Objekte wechselseitiger Inhibition unterliegen). Eine derartige Kompetition ist das neuronale Äquivalent attentionaler Kompetition auf der behavioralen Ebene.
2. Verhaltensrelevanten Objekten wird durch Voraktivierung bzw. Bahnung (*priming*) relevanter neuronaler Populationen ein kompetitiver Vorteil verschafft. Erfordert die Aufgabe z. B. die Beachtung roter Items, so werden auf „rot“ ansprechende Neurone in farbselektiven Teilen des Netzwerks gebahnt. Diese Bahnung implementiert das Biasing attentionaler Kompetition im behavioralen Kontext.
3. Die Kompetition verläuft in integrierter Weise zwischen dem einen und dem anderen Gehirnsystem. Gewinnt ein Objekt Dominanz in irgendeinem Teil des (visuellen) Netzwerks, so tendiert es dazu, die Kontrolle über das restliche Netzwerk zu übernehmen. Insgesamt tendiert das Netzwerk dazu, sich hin zu einem Zustand zu verändern, in dem ein und dasselbe Objekt überall dominant ist, wodurch die verschiedenen Objektmerkmale gleichzeitig der Verhaltenssteuerung verfügbar gemacht werden.

Diese *Hypothese der integrierten Kompetition* ist direkt durch die aus der TVA übernommenen Vorstellung einer sich zeitlich erstreckenden, objektbasierten Kompetition und des Erfordernisses eines flexiblen, kontextsensitiven Selektionsbias motiviert. Die gute quantitative Beschreibung von verhaltensbasierten Daten durch die TVA legt nahe, nach einem neuronalen Erklärungsansatz zu suchen, der ähnliche Basisgleichungen generiert: exponentielle Verarbeitungsdynamik, Kompetition durch Modulation der Verarbeitungsrate und aufgabenabhängige Gewichtszuordnung. Grundsätzlich besteht dem Ansatz der integrierten Kompetition zufolge der Zusammenhang zwischen der behavioralen und der neuronalen Ebene nicht in einem lokalisierten Ge-

Zur Vertiefung 5.6

Neurophysiologische Wirkmechanismen der Aufmerksamkeit

Eine wichtige Frage ist, wie die ortsspezifische und die merkmalsspezifische Einstellung der Aufmerksamkeit auf der Ebene neuronaler Verarbeitung überhaupt funktionieren (aktuelle Übersichten über relevante Befunde in Carrasco 2011).

Im Zusammenhang mit ortsspezifischer Einstellung (*spatial tuning*) sind zwei Mechanismen zu nennen: räumliche Verschiebungen (*shifts*) im Profil der RFs von merkmalscodierenden Zellen, d. h. Verschiebung des RF-Zentrums auf einen attendierten Stimulus hin, sowie die Kontraktion (*shrinkage*) der RF auf den Fokus der Aufmerksamkeit. Räumliche Verschiebungen im RF-Profil von Zellen – d. h. Verschiebung des RF-Zentrums auf einen attendierten Stimulus hin – wurden sowohl im ventralen als auch im dorsalen Verarbeitungspfad beobachtet (V4: z. B. Connor et al. 1997; MT: Womelsdorf et al. 2006; LIP: Hamed et al. 2002), wobei sich die Größenordnung dieser Verschiebungen im Bereich von ca. 10–25 % des RF-Durchmessers (1–3° Sehwinkel) bewegten. Der Verschiebungseffekt nimmt mit zunehmender Distanz zwischen dem attendierten Stimulus und der RF-Position ab, ist aber selbst dann noch messbar, wenn der attentionale Fokus und das RF in unterschiedlichen visuellen Halbfeldern liegen. Solche Verschiebungen des RF-Zentrums können auch mit einer Expansion (anstatt einer Kontraktion) des RF gegenüber einer Neutralbedingung einhergehen, und zwar dann, wenn Aufmerksamkeit auf einen Stimulus in der Nähe anstatt auf einen Stimulus innerhalb des RF gerichtet wird (z. B. Womelsdorf et al. 2006). Während solche Verschiebungen die behaviorale Leistung generell steigern würden, würde die Kontraktion von RFs die Leistung in bestimmten, hohe räumliche Auflösung erfordernden Aufgaben zusätzlich erhöhen, und zwar durch eine Reduktion der Filtergröße und somit der Größe des (Informations-) Integrationsbereichs. Es ist anzunehmen, dass die Größe des Integrationsbereichs beispielsweise kritisch ist für die Leistung in visuellen Such- und sogenannten Crowding-Aufgaben (z. B. Yeshurun und Rashal 2010; Pelli 2008), für die es essenziell ist, einen Zielreiz unter nahe gelegenen (also eine dichte Menge [*crowd*] bildenden) Distraktoren zu isolieren. Zusammengenommen führt also die Kombination von Shifts mit dem Schrumpfen von RFs dazu, dass erstens mehr und zweitens kleinere RFs den Fokus der Aufmerksamkeit repräsentieren, was das räumliche Auflösungsvermögen erhöht.

Während es also gute neurophysiologische Evidenz dafür gibt, dass die Zuweisung (*ortsbezogener*) Aufmerksamkeit an einen Ort im visuellen Feld die Profile von RFs im Sinne eines räumlichen Tunings beeinflusst, gibt es keine Evidenz dafür, dass ortsbezogene Aufmerksamkeit an sich auch zu einer Änderung der *Tuningkurven* für Stimulusmerkmale wie Orientierung und Ortsfrequenz oder Bewegungsrichtung führt (Treue und Maunsell 1999; McAdams und Maunsell 1999). Im Gegensatz dazu führt Ausrichtung der (*merkmalsbezogenen*) Aufmerksamkeit (McAdams und Maunsell 1999; Martinez-Trujillo und Treue 2004; Treue und Martinez-Trujillo 1999) auf ein bestimmtes Stimulusmerkmal zu einer Attraktion, d. h. Schärfung, der Tuningkurven auf das attendierte Merkmal hin (z. B. David et al. 2008).

Unter einer *Tuningkurve* versteht man die Aktivität einer Population neuronaler Merkmalsdetektoren mit örtlich koinzidenten RFs (z. B. Bewegungsdetektoren, die für unterschiedliche Richtungen am selben Ort im Feld sensitiv sind) in Abhängigkeit des Merkmalswertes, den ein sich in ihren RFs befindlicher Stimulus (z. B. ein sich nach rechts bewegender Stimulus) einnimmt. Dieser Stimulus spricht passende Detektoren (d. h. Detektoren für Bewegung nach rechts) maximal an, während weniger passende Detektoren (z. B. solche für Bewegung nach rechts oben oder rechts unten) mit zunehmender Distanz vom optimalen Merkmalswert (rechts) immer weniger aktiviert werden. Von einer *Schärfung* der Tuningkurve spricht man dann, wenn diese Aktivitätsfunktion auf das passende Merkmal zusammenschrumpft. In dem gewählten Beispiel würde Aufmerksamkeit auf Bewegung nach rechts also die Aktivität der entsprechenden Detektorpopulation derart schärfen, dass diese weniger stark auf von direkt „nach rechts" abweichende Richtungen, wie Bewegung nach rechts oben oder rechts unten, reagiert (d. h., die Aktivität unpassender Detektoren wird unterdrückt). Eine Schärfung der Tuningkurve kann auch mit einer erhöhten Reaktion auf Bewegung in die optimale Richtung gekoppelt sein. Das heißt, durch einen multiplikativen Gain-Kontrollmechanismus wird die Populationsreaktion der Detektoren (zusätzlich) um einen konstanten Faktor verstärkt, wodurch die Aktivität spezifischer Detektoren umso mehr ansteigt, je sensitiver sie für das attendierte Stimulusmerkmal sind. Auf diese Weise würde merkmalsbezogene Aufmerksamkeit also das Auflösungsvermögen im Merkmalsraum erhöhen.

Psychophysische Befunde – basierend auf Paradigmen, die die Sensitivität für ein in Rauschen eingebettetes Signal als Funktion der Stärke des Rauschens messen (Baldassi und Verghese 2005; Ling et al. 2009) – sind mit der Einzelzellevidenz konsistent: Ortsbezogene (endogene) Aufmerksamkeit beeinflusst die Gesamtreaktion der Detektorpopulation in der Art eines Gain-Mechanismus, der die Aktivität über alle Detektoren multiplikativ verstärkt. Merkmalsbezogene Aufmerksamkeit wird dagegen durch einen Tuning-Mechanismus auf Populationsniveau vermittelt (evtl. gekoppelt einem Gain-Mechanismus; Ling et al. 2009).

Insgesamt ist festzuhalten, dass RFs Adaptationen – Kontraktion um eine attendierte Position innerhalb, Expansion auf eine attendierte Position außerhalb des RF – die Repräsentation visueller Information dadurch beeinflussen können, dass sie den attendierten Stimulus in den exzitatorischen Teil des RF bringen und somit dessen Einfluss auf die neuronale Aktivität erhöhen. Auf diese Weise verbessert Aufmerksamkeit die Repräsentation attendierter Stimuli auf Kosten von Stimuli außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus. Davon ausgehend, dass diese Effekte mit aufsteigender Ebene in der visuellen Hierarchie größer werden, würde sich die Repräsentation visueller Information zunehmend von einer relativ „ungebiasten" Abbildung der visuellen Welt in eine solche ändern, die vorwiegend attendierte Information repräsentiert (z. B. Treue 2003).

hirnsystem, das für visuelle Aufmerksamkeit verantwortlich ist. Vielmehr wird Aufmerksamkeit als ein *Zustand* des Netzwerks als Ganzes konzipiert: Ein Objekt wird beachtet, wenn verteilte Gehirnsysteme auf die Verarbeitung seiner multiplen Eigenschaften und Verhaltensimplikationen hin konvergieren.

Die Neuronale Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (NTVA)

Eine aktuelle Theorie zur Integration von behavioralen Daten und assoziierten kognitiven Prozessen der selektiven visuellen Verarbeitung mit den funktionalen Gehirnmechanismen, die diesen Prozessen zugrunde liegen, ist die Erweiterung von Bundesens (1990) Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (TVA) um eine neuronale Variante: die NTVA (Bundesen et al. 2005). Hier werden die Annahmen der TVA auf das Verhalten von Neuronen bzw. Neuronengruppen (*neural assemblies*) angewandt. Die NTVA ist als abstrakte Informationsverarbeitungstheorie konzipiert und beruht auf zwei Grundannahmen, die sich auf die Beziehung zwischen kognitiven Mechanismen und der Funktion von Neuronen beziehen:

1. Neurone im visuellen System sind darauf spezialisiert, einzelne Merkmale zu repräsentieren.

2. Neurone reagieren nur auf die Eigenschaften eines einzigen Objekts, selbst wenn sich mehrere Objekte in ihrem rezeptiven Feld befinden.

Gegeben diese Annahmen, postuliert die NTVA zwei Mechanismen (► Zur Vertiefung 5.4): *filtering* (Selektion von Elementen) und *pigeonholing* (Selektion von Kategorien). Auf der neuronalen Analyseebene wird *filtering* durch die Anzahl der Neurone reflektiert, die ein Objekt repräsentieren (formalisiert in der sogenannten Gewichtsgleichung), und *pigeonholing* durch die Feuerrate der Neurone, die bestimmte Merkmale codieren (formalisiert in der sogenannten Verarbeitungsratengleichung).

Das *attentionale Gewicht* (die Verarbeitungskapazität), das mit einem gegebenen Objekt *x* assoziiert ist, bestimmt die Anzahl der Neurone, die selektiv auf Objekt *x* reagieren. Anders formuliert: Wenn im Rahmen der TVA einem Objekt Aufmerksamkeit zugewiesen ist, wird ihm mehr Gewicht zugeteilt; auf der neuronalen Ebene, im Rahmen der NTVA, entspricht eine Erhöhung des attentionalen Gewichts einer erhöhten Anzahl von feuernden Zellen. Die Selektion von Kategorien wird, aufbauend auf Annahmen des Ansatzes der integrierten Kompetition von Duncan (1996; vgl. auch Desimone und Duncan 1995), mit einer Verringerung der Feuerraten von Zellen erklärt, die Distraktorobjekte repräsentieren (z. B. Moran und Desimone 1985).

Das eigentliche Einstellen (*tuning*) eines Neurons auf ein bestimmtes Objekt wird durch eine dynamische Neuzuordnung (*remapping*) des RF der Zelle erreicht. Das relative attentionale Gewicht, das mit einem (Zielreiz-)Objekt *x* assoziiert ist, bestimmt die Wahrscheinlichkeit, mit der das RF eines Neurons diesem Objekt *x* neu zugeordnet wird. Das Ergebnis dieser dynamischen Adaptation kann im Sinne einer Reduktion (*shrinking*) des RF um das (Zielreiz-)Objekt herum verstanden werden (Desimone und Ungerleider 1989).

Der zeitliche Ablauf attentionaler Selektion in der NTVA umfasst zwei Zyklen oder Wellen. In der ersten Welle einer unselektiven Verarbeitung, in der die Verarbeitungskapazität zufällig über das visuelle Feld verteilt ist, werden attentionale Gewichte für jedes Objekt berechnet, die als Aktivierungsausprägungen (-niveaus) in einer Salienzkarte repräsentiert werden (*filtering*, Gewichtsgleichung). Die folgende zweite Verarbeitungswelle ist selektiver Natur. Durch sie wird einem Objekt corticale Verarbeitungskapazität zugewiesen, die dem relativen attentionalen Gewicht des Objekts entspricht (*pigeonholing*, Verarbeitungsratengleichung).

5.2.7 Resümee

Eine der Hauptfunktionen der Aufmerksamkeit besteht in der Selektion von perzeptiver Information zur Verhaltenssteuerung. Zur Untersuchung der auditiven Aufmerksamkeit wurde insbesondere das Paradigma des dichotischen Hörens eingesetzt, und zur Erforschung der visuellen Aufmerksamkeit wurden das Cueing-Paradigma sowie das Paradigma der visuellen Suche angewandt.

Die Befunde zur auditiven Aufmerksamkeit führten zu Modellvorstellungen, denen zufolge man nur eine Nachricht zu einer Zeit verarbeiten kann, wobei die verarbeitete Information mittels eines auf einer frühen Stufe arbeitenden Filtermechanismus (auf der Basis physikalischer Merkmale) ausgewählt wird; andere Nachrichten werden mehr oder weniger effektiv abgeblockt. Einer alternativen Erklärung zufolge werden alle Nachrichten gleichermaßen verarbeitet, und die Auswahl erfolgt erst spät, basierend auf der Relevanz der Nachrichten für die Verhaltenssteuerung. Aktuelle empirische Befunde zeigen, dass der Ort der Selektion flexibel und abhängig von spezifischen Aufgabenfaktoren ist.

Die Befunde zur visuellen Aufmerksamkeit führten zu alternativen Ansätzen, die die Selektion als orts-, als objekt- bzw. als dimensionsbezogen konzipieren. Nach ortsbezogenen Theorien fungiert die Aufmerksamkeit als eine Art *Spotlight*, das nur eine Stelle im Feld „beleuchten" und damit die Informationsverarbeitung an diesem Ort fördern kann. Dagegen wird nach objektbezogenen Ansätzen die Aufmerksamkeit auf Objekte (nicht auf Orte) ausgerichtet, und nur ein Objekt kann zu einer gegebenen Zeit verarbeitet werden. Der Merkmalsintegrationstheorie zufolge können zwar die einzelnen Merkmale von Objekten im visuellen Feld präattentiv registriert werden, ihre Bindung in kohärente Objektrepräsentationen erfordert aber die Allokation von Aufmerksamkeit. Alternativen Theorien zufolge erfolgt die Objektbindung präattentiv, und der Engpass (*bottleneck*) besteht im Zugang von gebundenen Objekteinheiten zu einem kapazitätsbeschränkten visuellen Kurzzeitspeicher.

Die Kombination von neurowissenschaftlichen Verfahren (Einzelzell- und EKP-Ableitungen, bildgebenden Verfahren, neuropsychologischen Untersuchung von Läsionsfolgen) mit geeigneten experimentellen Paradigmen führte zu wichtigen Einsichten in die neurokognitiven Mechanismen der orts-, objekt- und dimensionsbezogenen Aufmerksamkeit. Die Zuweisung ortsbezogener Aufmerksamkeit kann sowohl die Spontanaktivität als auch die reizabhängige Antwort retinotoper Neurone schon auf relativ früher corticaler Stufe im visuellen System (mindestens bereits in V2) modulieren. Zu den Regionen, die an der Kontrolle der ortsbezogenen Aufmerksamkeit beteiligt sind, gehören insbesondere der inferiore Parietalcortex sowie der superiore Temporalcortex. Rechtshemisphärische Läsionen dieser Kontrollstrukturen führen zu Neglect kontralateral gelegener Orte im Sehfeld.

Effekte objektbezogener Aufmerksamkeit lassen sich auch bereits auf einer frühen Stufe im visuellen System (in V1) nachweisen, werden aber vermutlich durch Rückprojektionen von höheren objektberechnenden Arealen vermittelt. Komplexe neuronale Repräsentationen von Objekten können parallel aktiviert werden und um attentionale Selektion konkurrieren. Die Selektion eines Zielobjekts kann top-down, von einem Suchbild (*template*) gesteuert erfolgen und involviert die Unterdrückung von Distraktorrepräsentationen. Des Weiteren führt die Selektion eines aufgabenrelevanten Merkmals eines Objekts dazu, dass auch seine anderen (nicht aufgabenrelevanten) Merkmale ausgewählt werden. Schließlich kann sich kontralateraler Neglect auch in objektzentrierter Form manifestieren. Modulationen neuronaler Aktivität, die dimensionsbezogene Aufmerksamkeit reflektieren, manifestieren sich ebenfalls in merkmalscodierenden extrastriären Arealen des visuellen Systems (selbst an Orten, an denen sich keine Objekte befinden). Diese Modulationen werden über ein Netzwerk von Kontrollstrukturen im Frontalhirn sowie in höheren parietalen und temporalen Arealen vermittelt.

5.3 Aufmerksamkeit und Performanz

Der eingangs erörterte Vorschlag, Aufmerksamkeit nicht einfach als wichtig für Prozesse der Wahrnehmung, sondern als zentral für die Vermittlung zielgerichteter Handlungen zu begreifen (Ansatz der *selection for action*; Allport 1987; Neumann 1987; Van der Heijden 1992), weist auf ein mit diesem Ansatz eng verbundenes Problem hin, das als einfache Frage formuliert werden kann: Wie gut kann man eigentlich zwei oder mehr Aufgaben gleichzeitig ausführen? Mit anderen Worten: Wie gut kann man die Aufmerksamkeit zwischen zwei oder mehr parallel auszuführenden Tätigkeiten teilen? Dieser Fragenkomplex wird in ▶ Abschn. 5.3.1 zur Aufgabenkombination (*dual/multiple task performance*) und **geteilten Aufmerksamkeit** (*divided attention*) erörtert. Dabei werden sowohl die kritischen Faktoren diskutiert, die die Zwei- bzw. Mehrfachaufgabenperformanz bestimmen, als auch die theoretischen Ansätze, die zur Erklärung der entsprechenden Befunde entwickelt wurden. Eng verbunden mit dem Problem der Mehrfachaufgabenperformanz ist die Frage nach der Automatisierung von (Teil-)Tätigkeiten, die eine von Aufmerksamkeitsprozessen (weitgehend) unabhängige Performanz gestattet. Die Frage, was eigentlich automatische Verarbeitung konstituiert, wird ▶ Abschn. 5.3.2 erörtert.

5.3.1 Aufgabenkombination und geteilte Aufmerksamkeit

Wie gut kann man zwei oder mehr Aufgaben, wie z. B. Autofahren und Führen einer Unterhaltung (am Mobiltelefon) gleichzeitig ausführen? Eine Antwort ist:

> „anything which minimises interference between processes, or keeps them ‚further apart' will allow them to be dealt with more readily either selectively or together." (Hampson 1989, S. 267)

Über die offensichtliche Bedeutung der Frage für unser tägliches Leben hinaus sind Interferenz und Leistungseinbrüche bei der Ausführung multipler Aufgaben von großem theoretischem Interesse, weil sie Rückschlüsse auf die Limitationen des menschlichen Informationsverarbeitungssystems erlauben. Es gibt zwei alternative Erklärungsansätze für die Mehrfachaufgabenperformanz: *zentrale Kapazität* vs. *Modularität*. Während Theorien der zentralen Kapazität von einem einzigen zentralen *Allzweckprozessor* mit limitierter Kapazität (*general-purpose limited-capacity central processor*, GPLCP) ausgehen, nehmen modulare Theorien multiple spezifische, d. h. modulare Verarbeitungssysteme (bzw. Verarbeitungsressourcen) an (▶ Abschn. 5.3.1).

Den theoretischen Vorstellungen liegen unterschiedliche metaphorische Auffassungen von mentaler Verarbeitung (*metaphors of mind*) zugrunde, die schon in den Ansätzen von Broadbent (1958) bzw. von Deutsch und Deutsch (1963) enthalten sind. Broadbent vertrat die Vorstellung eines kapazitätslimitierten Systems mit einem zentralen Engpass (*bottleneck*) in der Informationsverarbeitung (▶ Abschn. 5.2.1). Diese Vorstellung basiert auf einer bis weit über die Mitte des 20. Jahrhunderts vorherrschenden Metapher des Computers im Sinne eines seriellen Von-Neumann-Rechners mit einer zentralen Verarbeitungseinheit, die an allen auszuführenden Rechenoperationen beteiligt ist (von Neumann 1945). Dagegen nahmen Deutsch und Deutsch einen parallel-multiplen Vergleichsprozess zur Bestimmung der aktivsten (der aufgabenrelevantesten) Signale an, d. h. einen neurokognitiven Mechanismus der selektiven Aufmerksamkeit, der mit allen Systemen der Reizdiskrimination und -perzeption wechselseitig verbunden ist. Diese Vorstellung antizipiert den Ansatz der parallel verteilten Verarbeitung (*parallel distributed processing*, PDP; z. B. Rumelhart et al. 1986), dem zufolge das Gehirn als ein massiv paralleles, hochverknüpftes und interaktives Rechensystem angesehen werden kann, das aus differenzierten (modularen) Subsystemen besteht, die selektiv auf bestimmte perzeptive Ereignisse ansprechen bzw. spezialisierte Informationsverarbeitungsfunktionen erfüllen.

▪ Determinanten der Mehrfachaufgabenperformanz

Die Mehrfach- bzw. Doppelaufgabenperformanz wird von drei Faktoren determiniert: der Aufgabenähnlichkeit (z. B. Allport et al. 1972), der Übung (z. B. Spelke et al. 1976) und der Aufgabenschwierigkeit (z. B. Kahneman 1973). Die Einflüsse dieser Faktoren werden im Folgenden eingehender betrachtet.

Aufgabenähnlichkeit Die Bedeutung der Aufgabenähnlichkeit für die Doppelaufgabenperformanz wurde u. a. von Allport et al. (1972) mit einer Reihe kombinierter Aufgaben demonstriert. Die Probanden hatten z. B. eine auditiv dargebotene Nachricht zu beschatten, wobei ihnen gleichzeitig entweder Wörter auditiv oder Bilder visuell präsentiert wurden, die sie später zu erinnern hatten. Im Ergebnis zeigte sich eine sehr geringe Gedächtnisleistung (Zufallsniveau) bei auditiver Wortpräsentation, dagegen eine hohe Leistung (90 %) bei visueller Bildpräsentation. Dieser Befund weist auf eine kritische Rolle der Aufgabenähnlichkeit im Sinne der in beiden Aufgaben verwendeten Informationseingangsmechanismen hin. In einem anderen Experiment hatten kompetente Klavierspieler ihnen vorher nicht bekannte Prüfungsstücke vom Blatt zu spielen und gleichzeitig mit einer Geschwindigkeit von 150 Wörtern pro Minute (auditiv) dargebotene Prosatexte zu beschatten. Nach kurzer Übung konnten die Probanden beide Aufgaben zusammen mit derselben Geschwindigkeit und Genauigkeit wie einzeln ausführen. Diese Leistung kann auf die (geringe) Aufgabenähnlichkeit im Sinne sowohl der beteiligten Informationseingangs- als auch der Reaktionsausgabemechanismen zurückgeführt werden.

McLeod (1977) kombinierte eine manuelle Tracking-Aufgabe mit einer Tonidentifikationsaufgabe, die entweder eine vokale oder eine manuelle Reaktion (mit der nicht mit der Tracking-Aufgabe beschäftigten Hand) erforderte. Während sich die Tonidentifikationsaufgabe als kaum fehleranfällig erwies, war die Tracking-Leistung bei manueller Reaktion auf die Töne geringer als bei einer vokalen Reaktion. Auch dieses Ergebnis weist auf die Bedeutung der Aufgabenähnlichkeit im Sinne der Reaktionsausgabemechanismen hin.

Wickens (1984) versuchte, diese und ähnliche Befunde in seiner *Theorie multipler Ressourcen* (*multiple resource theory*) zu erklären. Dieser Theorie zufolge führt die gleichzeitige Ausfüh-

rung von zwei Aufgaben in dem Maße zu Interferenz, in dem die Aufgaben die gleiche Stimulusmodalität involvieren (visuelle vs. auditive Encodierung), die gleichen Verarbeitungsstadien beanspruchen (frühe vs. späte Prozesse: Eingang, zentrale Verarbeitung, Ausgabe) und auf die gleichen Gedächtnisrepräsentationen (räumlich vs. verbal) zugreifen.

Einige zusätzliche Befunde zur Rolle der Aufgabenähnlichkeit sind theoretisch interessant. So kombinierten Posner und Boies (1971) eine visuell dargebotene Buchstabenvergleichsaufgabe (Darbietung von zwei Buchstaben, die hinsichtlich ihrer physikalischen Identität, z. B. a – a, oder ihrer Namensidentität, z. B. a – A, zu vergleichen waren), die eine rechtshändige Gleich-/Unterschiedlich-Reaktion erforderte, mit einer Tonentdeckungsaufgabe, die eine einfache linkshändige Reaktion verlangte. Die beiden zu vergleichenden Buchstaben (B1 und B2) wurden sukzessive dargeboten, und die Präsentation des Tons erfolgte zu variablen Zeitpunkten bezüglich der Darbietung der Buchstabenstimuli (vor B1, zwischen B1 und B2, nach B2). Die Tonentdeckungsreaktion erfolgte verlangsamt, wenn der Ton während des Intervalls zwischen B1 und B2 dargeboten wurde, und sie war am langsamsten, wenn der Ton um den Zeitpunkt des Erscheinens von B2 dargeboten wurde, an dem die Probanden maximal mit dem Vergleich von B1 und B2 beschäftigt waren. Dieser Befund könnte auf den ersten Blick als Anzeichen für eine generelle Aufmerksamkeitslimitation interpretiert werden.

Dass dies aber nicht zutrifft, zeigte McLeod (1977). Ähnlich wie Posner und Boies (1971) kombinierte er die visuelle Buchstabenvergleichsaufgabe mit einer auditiven Tonentdeckungsaufgabe, wobei aber eine vokale Reaktion auf den Ton (Stimulus „beep“ → Reaktion „beep“) – anstelle einer manuellen Reaktion – abzugeben war. Bei dieser Aufgabenkombination blieb die Interferenz zwischen Vergleichs- und Entdeckungsaufgabe aus. Demnach weist der von Posner und Boies (1971) gefundene Interferenzeffekt nicht auf eine generelle Limitation hin, sondern auf eine Begrenzung in der gleichzeitigen Ausführung ähnlicher Reaktionen (d. h. einer rechts- und einer linkshändigen manuellen Reaktion) auf zwei unterschiedliche Aufgaben.

Dass aber nicht allein die Reaktionsähnlichkeit von Bedeutung ist, sondern auch die Kompatibilität der Reiz-Reaktions-Zuordnung, geht aus einer weiterführenden Untersuchung von McLeod und Posner (1984) hervor. Diese Autoren verwendeten ebenfalls die visuelle Buchstabenvergleichsaufgabe sowie eine auditive Aufgabe, in der die Stimuli „up“ vs. „down“ bzw. „high“ vs. 400-Hz-Ton verwendet wurden. Es gab verschiedene Versuchsgruppen:

- Für die Probanden der Gruppe 1 (*shadowing group*) erforderte der Buchstabenvergleich eine manuelle Gleich-/Unterschiedlich-Reaktion (Hebelbewegung links/rechts) und die auditive Aufgabe eine vokale Beschattungsreaktion (Stimulus „up“ → Reaktion „up“, Stimulus „down“ → Reaktion „down“).
- Für die Probanden der Gruppe 2 (*semantic auditory group*) erforderte der Buchstabenvergleich gleichfalls eine manuelle Reaktion, aber die auditive Aufgabe eine vokale Reaktion mit einem semantisch assoziierten Wort (Stimulus „up“ → Reaktion „high“; Stimulus „down“ → Reaktion „low“).
- Für die Probanden der Gruppe 3 (*mixed word-tone group*) erforderte der Buchstabenvergleich eine manuelle Reaktion und die auditive Aufgabe eine vokale Reaktion (Stimulus „high“ → Reaktion „up“; Stimulus 400-Hz-Ton → Reaktion „low“).
- Für die Probanden der Gruppe 4 (*modality cross-over group*) erforderte der Buchstabenvergleich eine vokale Gleich-/Unterschiedlich-Reaktion und die auditive Aufgabe eine manuelle Reaktion (Stimulus „up“ → Reaktion Hebel nach oben; Stimulus „down“ → Reaktion Hebel nach unten).

Die Doppelaufgabeninterferenz erwies sich am geringsten für Gruppe 1 und am größten für Gruppe 4, wobei der Effekt kurz nach Darbietung des ersten Buchstabens besonders groß war. Gruppe 3 zeigte mehr Interferenz bei der Reaktion auf den Ton als bei der auf das Wort. Dieses Ergebnismuster lässt sich so erklären, dass bei Gruppe 1 die Beschattungsaufgabe ideomotorisch kompatibel ist, d. h., die Reaktion ist dem Stimulus ähnlich und wird durch eine *privilegierte Schleife* vermittelt, die beim Hören eines Wortes das für das Aussprechen dieses Wortes erforderliche artikulatorische Programm (automatisch) aktiviert (vgl. dazu das Konzept der phonologischen Schleife im Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley [z. B. Baddeley 1986]). Dagegen stellen sich die Probanden in Gruppe 4 auf eine vokale (Gleich-/Unterschiedlich-)Reaktion auf den ersten visuellen (Buchstaben-)Stimulus ein; wird der auditive (Wort-)Stimulus währenddessen dargeboten, so wird die artikulatorische Reaktion auf das Wort über die privilegierte Schleife aktiviert. Aufgrund der automatischen Verknüpfung zwischen dem auditiven Input und der vokalen Reaktion kommt es in der Folge zu erhöhter Interferenz.

Solche privilegierten Mechanismen der Stimulus-Reaktions-Übersetzung können auch die Doppelaufgabenbefunde in einer Untersuchung von Shaffer (1975) erklären, in der geübte Schreibmaschinenschreiberinnen eine Copy-Typing-Aufgabe (Abschreiben vom Blatt) mit einer Beschattungsaufgabe bzw. eine Audio-Typing-Aufgabe (Schreiben nach Diktiergerät) mit einer Vorleseaufgabe (lautes Lesen vom Blatt) zu kombinieren hatten. Copy-Typing und Beschatten konnten ohne Interferenz ausgeführt werden, aber nicht Audio-Typing und Vorlesen. Die Erklärung ist, dass Copy-Typing visuelle Informationsaufnahme und eine manuelle Reaktion beinhaltet, wohingegen Beschattung auditive Informationsaufnahme und eine vokale (direkt über die privilegierte Schleife vermittelte) Reaktion involviert. Beim Audio-Typing sind zwar im Vergleich zum Vorlesen unterschiedliche Eingangsmechanismen beteiligt, aber es kommt zur Interferenz, weil das Hören der auditiven Wortinformation (vom Diktiergerät) die motorischen Programme zur Aussprache der Wörter aktiviert und somit das laute Lesen stört.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Aufgabenähnlichkeit, im Sinne der an der Aufgabenausführung beteiligten Teilprozesse, die Doppelaufgabenperformanz beeinträchtigt. Theoretisch sprechen solche Befunde für modulare Theorien mentaler Verarbeitung, die von der Existenz multipler spezifischer Verarbeitungssysteme bzw. -ressourcen ausgehen.

Übung Ein weiterer Faktor, der die Doppelaufgabenperformanz beeinflusst, ist die Übung, wobei, wie das Sprichwort sagt, „die

Übung den Meister macht". So sind z. B. das Autofahren und das Führen von Gesprächen (mit Beifahrern) bei erfahrenen Lenkern (zumindest in Routineverkehrssituationen) gut zu vereinbaren, bei Fahrschülern aber nur schwer möglich.

Ein Experiment, das den Effekt ausgedehnter Übung für die Minimierung der Doppelaufgabeninterferenz eindrücklich belegt, wurde von Spelke et al. (1976) durchgeführt. Zwei studentische Probanden (Diane und John) erhielten über eine Periode von mehr als vier Monaten fünf Trainingsstunden pro Woche im Lesen von Kurzgeschichten zu ihrem eigenen Verständnis bei gleichzeitigem Niederschreiben von Wörtern nach Diktat. Am Anfang litten ihre Lesegeschwindigkeit, ihre Verständnisleistung und ihre Handschrift beträchtlich; sie konnten nur wenige der niedergeschriebenen Wörter korrekt erinnern, und sie bemerkten nicht, wenn eine (aufeinanderfolgende) Reihe von Wörtern einem Satz oder derselben semantischen Kategorie angehörten. Nach ausgedehntem Training waren sie in der Lage, beim Diktat von Wörtern die Kurzgeschichten (fast) so schnell zu lesen und so gut zu verstehen wie beim alleinigen Lesen; ihre Handschrift verbesserte sich, und sie konnten die Kategorien der niedergeschriebenen Wörter berichten. Spelke et al. (1976) zogen folgenden Schluss aus ihren Befunden:

> „People's ability to develop skills in specialised situations is so great that it may never be possible to define general limits on cognitive capacity." (Spelke et al. 1976, S. 229)

Es existieren allerdings alternative Erklärungen für dieses erstaunliche Niveau der Doppelaufgabenperformanz. Die Ausführung einer Aufgabe (z. B. Diktat) könnte *automatisiert* worden sein, sodass sie nur noch wenige Anforderungen an die (limitierte) kognitive Kapazität stellte. (Gegen diese Erklärung spricht, dass die Probanden semantisches Verständnis des niedergeschriebenen Materials zeigten; Hirst et al. 1980.) Eine weitere Alternativerklärung ist, dass die Probanden eine Strategie des raschen Alternierens der Aufmerksamkeit zwischen den beiden Aufgaben erlernten. (Gegen diese Erklärung spricht, dass die Zweifachaufgabenperformanz keinen Einbruch erlitt, wenn das Lesematerial wenig redundant war; Hirst et al. 1980).

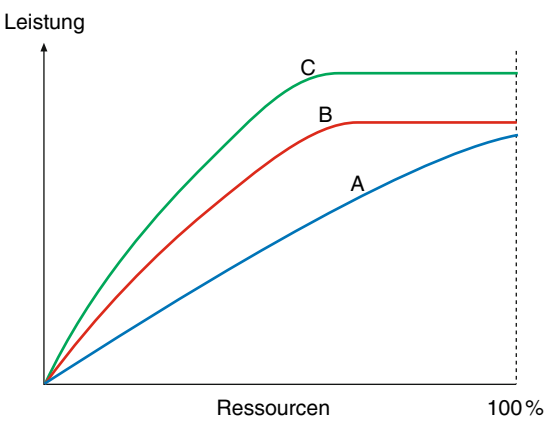
Broadbent (1982) argumentierte, dass sich in der Regel Anzeichen von Interferenz zeigen, wenn man die Doppelaufgabenperformanz nur genau genug inspiziert. Zum Beispiel war bei einem geübten Probanden von Hirst et al. (1980) die Rechtschreibleistung (im Sinne der Anzahl der Fehler) in einer Bedingung ohne gleichzeitiges Lesen doppelt so hoch wie mit Lesen. Das heißt, zumindest bei komplexen Aufgaben minimiert Übung lediglich die Doppelaufgabeninterferenz, anstatt sie jedoch vollständig zu eliminieren.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass Übung die Doppelaufgabenperformanz (selbst bei anscheinend inkompatiblen Aufgaben) fördert, wofür es aber mehrere mögliche Gründe gibt (z. B. Eysenck und Keane 1995): Die Probanden entwickeln neue Strategien zur Ausführung jeder der Aufgaben, um die Aufgabeninterferenz zu minimieren; die Aufgabenanforderungen an Aufmerksamkeits- oder andere zentrale Ressourcen werden im Verlauf der Übung reduziert; und/oder obwohl eine Aufgabe anfänglich mehrere spezifische Verarbeitungsressourcen beansprucht, ermöglicht Übung eine ökonomischere Funktionsweise, die mit weniger Ressourcen auskommt.

Aufgabenschwierigkeit Weiterhin hängt die gleichzeitige Ausführung von zwei Aufgaben von deren Schwierigkeit ab. Ein Ansatz, dem zufolge die Doppelaufgabenperformanz wesentlich durch die Aufgabenschwierigkeit determiniert wird, ist Kahnemans (1973) Theorie von *attention and effort* (Aufmerksamkeit und Anstrengung). Dieser Ansatz geht von der Vorstellung der Aufmerksamkeit als einer limitierten, flexibel einsetzbaren, energetisierenden (Allzweck-)Ressource aus. Die Aufmerksamkeit kann auf eine Tätigkeit konzentriert oder zwischen mehreren Tätigkeiten aufgeteilt werden, wobei schwierigere Aufgaben einen erhöhten Einsatz von Aufmerksamkeit erfordern.

Die verfügbare Gesamtkapazität an Aufmerksamkeit hängt vom generellen Erregungsniveau (*arousal*) ab, d. h., sie steigt mit zunehmender Erregung an (bis das Maximum erreicht ist). Problematisch für diese Annahme allerdings ist das *Yerkes-Dodson-Gesetz* (Yerkes und Dodson 1908), dem zufolge eine Zunahme im Erregungsniveau die Leistung bis zu einem bestimmten Punkt verbessert; eine weitere Erhöhung der Erregung dagegen verschlechtert die Leistung. Allport (1980) weist darauf hin, dass dieser Ansatz auch an einem Zirkularitätsproblem leidet: Nach Kahneman (1973) lässt sich die Aufgabenschwierigkeit durch das Maß an Interferenz mit einer Zweitaufgabe bestimmen. Aber wenn Schwierigkeit durch Interferenz bestimmt wird und Interferenz ein Indikator der Schwierigkeit ist, dann gibt es kein unabhängiges Maß der Aufgabenschwierigkeit.

Ein weiterer Ansatz, dem zufolge die Doppelaufgabenperformanz (u. a.) auch von der Aufgabenschwierigkeit abhängt, ist Normans und Bobrows (1975) Ressourcentheorie der Aufmerksamkeit. Ein wichtiges Werkzeug zur Aufgabenanalyse in dieser Theorie ist die **Performance-Resource-Funktion** (PRF), d. h. die Abbildung der Leistung als Funktion der eingesetzten Ressourcen (◘ Abb. 5.11). Die Betrachtung solcher Funktionen



◘ **Abb. 5.11** Performance-Resource-Funktionen. Illustriert sind die Funktionen der Leistung in Abhängigkeit von den eingesetzten Ressourcen für drei ressourcenlimitierte Aufgaben A, B und C. Die Aufgabenschwierigkeit nimmt von A nach C hin ab. Aufgabe B und C sind datenlimitiert, d. h., es gibt einen Punkt, bei dem zusätzlicher Einsatz von (noch verfügbaren) Ressourcen zu keiner Leistungssteigerung führt. Bei Aufgabe B könnte es sich um Aufgabe A nach erfolgreicher Übung handeln, d. h., die maximale Leistung kann mit etwa 60 % der verfügbaren Ressourcen erreicht werden

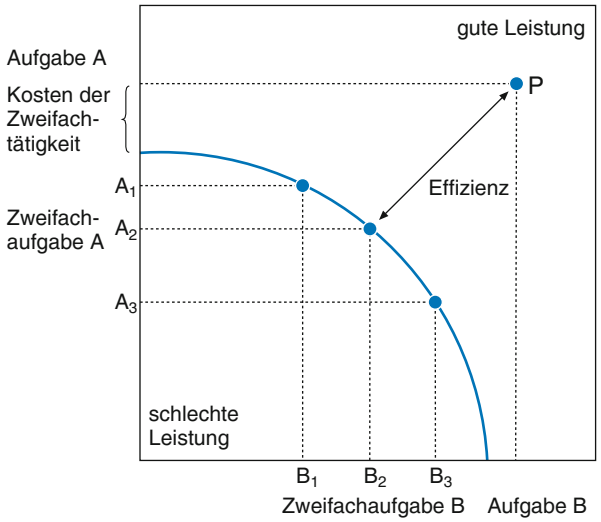


Abb. 5.12 Performance-Operating-Characteristic-Kurve (nach Wickens 1992). Gezeigt sind zwei ressourcenlimitierte Aufgaben A und B sowie drei Strategien der Ressourcenteilung zwischen den beiden Aufgaben (A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3) bei deren gleichzeitiger Ausführung. Die bei Zweifachtätigkeit erreichbare Maximalleistung liegt unter der Leistung, die bei alleiniger Ausführung von Aufgabe A bzw. B erreicht werden kann (*cost of concurrence*)

hat zu einer wichtigen theoretischen Unterscheidung geführt: der Unterscheidung zwischen daten- und ressourcenlimitierter Verarbeitung. Von Datenlimitation spricht man, wenn es für eine bestimmte Aufgabe einen Punkt gibt, ab dem ein weiterer Einsatz von (noch verfügbaren) Ressourcen nicht zu einer Leistungserhöhung führt; ab diesem Punkt ist die Verarbeitung *datenlimitiert* (z. B. wenn man einer Konversation unter extrem verrauschten Bedingungen zuhört). Dagegen ist die Verarbeitung in dem Bereich der PRF, in dem sich die Leistung durch eine Erhöhung bzw. Verminderung der eingesetzten Ressourcen verändert, *ressourcenlimitiert*.

Ein weiteres aufgabendiagnostisches Werkzeug ist die **Performance-Operating-Characteristic-Kurve** (POC-Kurve), d. h. die Abbildung der Leistung (bzw. der dafür eingesetzten Ressourcen) in einer Aufgabe als Funktion der Leistung (bzw. der dafür investierten Ressourcen) in der anderen Aufgabe (Abb. 5.12). Sind die beiden Aufgaben ressourcenlimitiert, so ergibt sich eine Ausgleichsbeziehung zwischen ihnen derart, dass eine Leistungserhöhung in der einen Aufgabe zu einer Leistungsminderung in der anderen Aufgabe führt.

Verändert sich die Leistung in einer Aufgabe A dagegen nicht in Abhängigkeit von der Leistung in der anderen Aufgabe B, so ist A datenlimitiert. Im Extremfall kann die Leistung in beiden Aufgaben bei gleichzeitiger Ausführung so hoch sein, wie wenn nur die eine oder die andere Aufgabe ausgeführt wird. Für solche Fälle würde man annehmen, dass die beiden Aufgaben auf separate Ressourcen zurückgreifen. Die zugrunde liegende Annahme ist also, dass es separate Ressourcen bzw. Ressourcenpools gibt, wie z. B. „processing effort, the various forms of memory, and communication channels" (Norman und Bobrow 1975, S. 45).

Ein zusätzlicher, im Zusammenhang mit dem Ansatz von Norman und Bobrow (1975) interessanter Befund ist, dass die Ressourcenanforderungen von zwei Aufgaben, wenn sie gleichzeitig auszuführen sind, häufig nicht genau der Summe ihrer Anforderungen entsprechen, wenn sie einzeln ausgeführt werden (Additivitätsannahme). Vielmehr bringt Mehrfachtätigkeit häufig zusätzliche Anforderungen der Koordination und der Vermeidung von Interferenz mit sich. Man spricht in diesem Zusammenhang von *cost of concurrence* (Kosten der gleichzeitigen Ausführung von Aufgaben), die darauf zurückzuführen sind, dass der Akt der *Aufgabenteilung* selbst Ressourcen von den beiden Aufgaben abzieht (Gopher und Navon 1980). Ein Beispiel ergibt sich aus einer Untersuchung von Duncan (1979), in der die Probanden rasche Reaktionen auf in schneller Folge präsentierte Stimuli auszuführen hatten, die entweder eine rechtshändige oder eine linkshändige Reaktion erforderten. Dabei konnte die Beziehung zwischen Stimulus (S) und Reaktion (R) entweder kompatibel („korrespondierend") oder inkompatibel („überkreuzt") sein; z. B. konnte der am weitesten rechts platzierte Stimulus eine Reaktion mit dem extrem rechten oder dem extrem linken Finger der rechten Hand erfordern. Die Leistung erwies sich als am geringsten, wenn die S-R-Zuordnung für den einen Stimulus kompatibel und die für den anderen Stimulus inkompatibel war. Insgesamt war die Leistung bei zwei inkompatiblen S-R-Beziehungen besser als bei einer kompatiblen und einer inkompatiblen Beziehung. Im letzteren Falle häuften sich Verwechslungsfehler, d. h. die Auswahl der falschen S-R-Zuordnung.

Trotz der theoretischen Erweiterungen, die der Ansatz von Norman und Bobrow (1975) mit sich bringt, leidet auch er an einem Zirkularitätsproblem (Allport 1980): Es gibt keine unabhängige Weise, die Ressourcenanforderungen einer Aufgabe zu messen bzw. zu bestimmen, ob die beanspruchten Ressourcen aus dem gleichen Pool oder aus unterschiedlichen Pools stammen. Führt die Ausführung von zwei Aufgaben zu Interferenz, so schließt man daraus, dass sie um dieselben Ressourcen konkurrieren; ergibt sich keine Interferenz, so schließt man daraus, dass sie entweder unterschiedliche Ressourcen beanspruchen oder datenlimitiert sind.

Theoretische Ansätze

Im Folgenden sollen die aufmerksamkeitstheoretischen Ansätze, die in den oben betrachteten Determinanten der Doppelaufgabenperformanz impliziert sind, eingehender erörtert: **Ein-Kanal-Theorien**, **Theorien zentraler Kapazität** und **modulare Theorien**.

Ein-Kanal-Theorien Zu den Ein-Kanal-(*single-channel*-) oder Engpass-(*bottleneck*-)Theorien zählen der Ansatz von Broadbent (1958) sowie die Ansätze von Welford (1952) und, in seiner Folge, von Pashler (1990, 1993). Broadbents (1958) ursprünglicher Filtertheorie zufolge gibt es nur einen zentralen Verarbeitungskanal. Somit kann Aufgabenkombination nur dadurch erreicht werden, dass der Filter rasch hin- und hergeschaltet wird (man spricht in diesem Zusammenhang von *Multiplexing* bzw. *Time-Sharing*). Als einen Beleg gegen diese Auffassung könnte man etwa die oben genannten Befunde von Allport et al. (1972) zitieren, dass z. B. Klavierspielen vom Blatt und gleichzeitige Prosatextbeschattung ohne Interferenz möglich sind. Allerdings können solche (scheinbar) interferenzfreien Doppeltätigkeiten im Rahmen des Ansatzes von Broadbent dadurch erklärt werden, dass die Probanden Redundanzen im zu spielenden Stück bzw.

im zu beschattenden Text ausnutzen, um auf die jeweils andere Aufgabe umzuschalten.

Nach Welford (1952) und Pashler (1990, 1993) weist die Psychologische Refraktärperiode (PRP) auf die Existenz eines strukturellen Engpasses in der Informationsverarbeitung hin. Für diese Vorstellung ergeben sich im Zusammenhang mit den oben erörterten Determinanten der Doppelaufgabenperformanz, insbesondere der Übung und der Aufgabenähnlichkeit, die folgenden zwei kritischen Fragen:

1. Ist der PRP-Effekt nicht vielmehr nur darauf zurückzuführen, dass die Probanden nicht ausreichend darin geübt sind, auf zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Stimuli so rasch wie möglich zu reagieren?
2. Hängt das Auftreten des PRP-Effekts kritisch von der Ähnlichkeit der dargebotenen Stimuli bzw. der Ähnlichkeit der erforderten Reaktionen ab?

Die erste Frage wurde von Pashler (1993) untersucht. Er fand, dass der PRP-Effekt selbst nach mehr als 10.000 Übungsdurchgängen noch beobachtbar war. Zwei weiteren Untersuchungen (Hazeltine et al. 2000; Schumacher et al. 1999) zufolge reduziert sich der PRP-Effekt nach extensiver Übung allerdings auf ein statistisch nicht signifikantes Niveau.

Pashler (1990) ging der zweiten Frage nach. Gemäß den Ein-Kanal-Theorien (nicht aber gemäß ähnlichkeitsbasierten Ansätzen) sollte der PRP-Effekt selbst bei maximaler Unähnlichkeit zwischen Stimuli und zugeordneten Reaktionen auftreten. Um diese Hypothese zu untersuchen, präsentierte er zwei höchst unterschiedliche Stimuli, denen zwei höchst unterschiedliche Reaktionen zugeordnet waren: Ein Tonsignal erforderte eine vokale Reaktion und ein visuell dargebotener Buchstabe eine manuelle Reaktion (wobei die Stimulusreihenfolge entweder bekannt oder unbekannt war). Pashler (1990) fand, dass der PRP-Effekt trotz der fehlenden Stimulus- bzw. Reaktionsähnlichkeit auftrat. (Dabei war der Effekt bei bekannter Reihenfolge größer als bei unbekannter Folge; in letzterem Fall erfolgte die Reaktion auf den ersten Stimulus verlangsamt, d. h., die Probanden waren nicht in der Lage, sich im Voraus auf beide Stimuli vorzubereiten.) Diesen Befunden zufolge reflektiert der PRP-Effekt also einen echten strukturellen Engpass (vgl. aber Hazeltine et al. 2000; Schumacher et al. 1999).

Folglich sollten Verarbeitungsengpässe eigentlich auch in anderen Untersuchungen zur Doppelaufgabenperformanz zu finden sein. Nach Pashler (1993) haben PRP-Studien jedoch den Vorzug, dass sie eine präzise Messung der Reaktionszeit auf jeden Stimulus gestatten. Dagegen sind die grobkörnigen Maße, die in Studien wie denen von Spelke et al. (1976) erhoben werden, zu wenig sensitiv, um die Entdeckung von strukturellen Engpässen zu erlauben. Eine weitere, im Zusammenhang mit objektbezogener Aufmerksamkeit interessante Frage ist, ob der Engpass objektbasiert ist. Diese Frage wurde von Fagot und Pashler (1992) untersucht, indem sie in einer Bedingung zwei unterschiedliche Reaktionen auf zwei separate Attribute eines Objekts verlangten (z. B. Nennen eines Buchstabens, manuelle Reaktion auf Buchstabenfarbe) und in der anderen Bedingung zwei unterschiedliche Reaktionen auf ein und dasselbe Attribut eines Objekts (z. B. Nennen der Buchstabenfarbe, manuelle Reaktion auf Buchstabenfarbe). Evidenz für einen Engpass in der Reaktionsselektion ergab sich nur in der ersten Bedingung, nicht aber in der zweiten. Dies spricht dafür, dass bei zwei Reaktionen auf ein Attribut eines Objekts nur ein Reaktionsselektionsvorgang erforderlich ist.

Tatsächlich hat man in der Zwischenzeit eine Reihe von Engpässen identifizieren können, sowohl in der Reaktionsauswahl und -initiierung als auch in der Selektion, der Encodierung und dem Abruf von Information in das bzw. aus dem Kurzzeitgedächtnis (Übersicht in Jolicœur et al. 2002; ▶ Kap. 18).

Theorien zentraler Kapazität Theorien zentraler Kapazität (GPLCP; z. B. Moray 1967; Kahneman 1973; Johnston und Heinz 1978) gehen von der Vorstellung einer strikt limitierten zentralen Verarbeitungskapazität aus, die flexibel unterschiedlichen Tätigkeiten zugeordnet werden kann. Bei der Ausführung von Zweifachaufgaben hängt die Leistung von den Ressourcenanforderungen ab, die beide Aufgaben stellen. Übersteigen die kombinierten Anforderungen der beiden Aufgaben die Gesamtressourcen der zentralen Kapazität, so ergibt sich Aufgabeninterferenz. Demzufolge ist die kritische Determinante der Zweifachaufgabenperformanz die Aufgabenschwierigkeit, wobei Schwierigkeit im Sinne der Ressourcenanforderungen definiert ist.

Für diese Ansätze stellen sich zwei Probleme: Erstens ergibt sich daraus, dass Aufgabenschwierigkeit nicht unabhängig (von der Zweifachaufgabenperformanz) messbar ist – das bereits von Allport (1980) konstatierte Zirkularitätsproblem (s. oben). Ein zweites Problem besteht in der Erklärung von Effekten der Aufgabenähnlichkeit, wie z. B. des folgenden Befunds von Segal und Fusella (1970), die eine visuelle Vorstellungsaufgabe mit einer visuellen oder einen auditiven Signalentdeckungsaufgabe und eine auditive Vorstellungsaufgabe mit einer auditiven oder einer visuellen Entdeckungsaufgabe kombinierten. Dabei zeigte sich, dass die perzeptuelle Sensitivität (die Signalentdeckungsleistung) reduziert war, wenn sich die Vorstellungsaufgabe auf die gleiche Modalität wie die Entdeckungsaufgabe bezog (z. B. visuelle Signalentdeckung und visuelle Vorstellung) – im Vergleich zu der Situation, in der sich die beiden Aufgaben auf getrennte Modalitäten bezogen (z. B. visuelle Signalentdeckung und auditive Vorstellung). Nach Allport (1989, S. 647) weisen derartige (Interaktions-)Effekte auf „a multiplicity of attentional functions, dependent on a multiplicity of specialised subsystems. No one of these subsystems appears uniquely central“ hin.

Modulare Theorien Modulare Theorien (z. B. Norman und Bobrow 1975; Wickens 1984; Allport 1989) vertreten die Vorstellung von multiplen spezialisierten Ressourcen oder multiplen spezialisierten (modularen) Verarbeitungssubsystemen. Die kritische Determinante der Zweifachaufgabenperformanz ist die Aufgabenähnlichkeit. Bei Interferenz zweier Aufgaben schließt man darauf, dass beide Aufgaben dieselben Ressourcen bzw. Subsysteme beanspruchen.

Für diese Ansätze stellen sich drei Probleme. Erstens, ein Zirkularitätsproblem, das daraus resultiert, dass es keine unabhängige Weise gibt, zu bestimmen, ob die beanspruchten Subsysteme gleich oder unterschiedlich sind. Zweitens ein Problem der Falsifizierbarkeit: Da die Charakteristika und die Anzahl der spezialisierten Subsysteme nicht unabhängig bestimmt werden

können, können modulare Theorien kaum falsifiziert werden (geeignete Subsysteme können ad hoc postuliert werden). Als Drittes ergibt sich ein Koordinationsproblem: Bei einer großen Zahl von parallel arbeitenden Subsystemen bedarf es der Koordination ihres Outputs, um kohärentes Handeln zu ermöglichen.

Synthesetheorien Synthesetheorien (z. B. Norman und Shallice 1986; Baddeley 1986) vertreten die Vorstellung eines hierarchischen Systems mit einem zentralen Prozessor, d. h. einem exekutiven Aufmerksamkeitssystem (*central executive*) an der Spitze der Hierarchie, das die fortlaufenden Handlungen koordiniert und kontrolliert. Auf der untergeordneten Stufe existieren spezifische Verarbeitungsmechanismen, die relativ unabhängig voneinander funktionieren.

5.3.2 Automatische Verarbeitung

Eine Erklärung für die erstaunlichen Übungseffekte in Zweifachaufgabenparadigmen besteht darin, dass einige Verarbeitungsvorgänge im Verlauf der Übung aufhören, Anforderungen an die zentrale Kapazität (d. h. an die Aufmerksamkeit) zu stellen, d. h., sie werden *automatisiert* (s. auch ► Zur Vertiefung 5.7). Was aber bedeutet Automatisierung von Verarbeitungsprozessen? Und wogegen sind automatische Prozesse abzugrenzen?

Kennzeichen automatischer Prozesse sind:

- Sie laufen rasch ab.
- Sie reduzieren die zur Erledigung anderer Aufgaben verfügbare Kapazität nicht, d. h., sie beanspruchen keine Aufmerksamkeit (dies wird als Belastungs- oder Load-Kriterium bezeichnet).
- Sie sind unvermeidbar, d. h., sie werden immer ausgelöst, wenn ein geeigneter Stimulus erscheint, selbst wenn dieser Stimulus außerhalb des Bereichs der Aufmerksamkeit liegt (das Unvermeidbarkeits- bzw. Intentionalitätskriterium).
- Sie sind dem Bewusstsein nicht zugänglich.

Allerdings ist im Zusammenhang mit diesen Charakteristika die Aussage von Hampson (1989, S. 264) durchaus zutreffend: „Criteria for automaticity are easy to find, but hard to satisfy empirically." Dies gilt insbesondere für das Belastungs- und das Unvermeidbarkeitskriterium.

Die meisten Ansätze zur Erklärung von Automatizität sind im Wesentlichen Zwei-Prozess-Theorien, in denen automatische Prozesse (bewusst) kontrollierten Prozessen gegenübergestellt werden. Bereits Atkinson und Shiffrin (1968) nahmen aktive *Kontrollprozesse* der Informationsverarbeitung im Kurzzeit- bzw. Arbeitsgedächtnis an, z. B. Selektion, Wiederholung (*rehearsal*) und Recodierung, und stellten diese „inhärenten" bzw. (schon) erlernten Vorgängen gegenüber.

In den folgenden Abschnitten werden die einflussreichsten dieser Theorien eingehender dargestellt und diskutiert, insbesondere die Ansätze von Posner und Snyder (1975), Shiffrin und Schneider (1977), Norman und Shallice (1986) und Logan (1988). Sodann wird eine von Neumann (1984) vorgebrachte Kritik an diesen Ansätzen sowie seine alternative Konzeption von Automatizität erörtert.

Automatische Bahnung und kontrollierte Hemmung Posner und Snyder (1975) schlugen eine Unterscheidung vor zwischen automatischen Aktivierungsprozessen, die allein das Ergebnis vergangenen Lernens sind, und Prozessen, die unter aktueller bewusster Kontrolle stehen:

> » „Automatische Aktivierungsprozesse sind Vorgänge, die ohne Intention, ohne Bewusstsein und ohne Interferenz mit anderen mentalen Aktivitäten ablaufen können. Sie sind zu unterscheiden von Operationen, die vom bewussten Verarbeitungssystem ausgeführt werden, denn das letztere System ist von beschränkter Kapazität, und somit vermindert sein Einsatz bei einer Operation seine Verfügbarkeit zur Ausführung anderer Operationen." (Posner und Snyder 1975, S. 81 f.)

(Wichtig ist hier der Hinweis, dass in der zitierten Aussagen die implizite Annahme gemacht wird, dass das bewusste Verarbeitungssystem ein GPLCP ist.)

Posner und Snyder (1975) belegten diese Unterscheidung in einer Untersuchung, in der die Probanden ein Buchstabenpaar zu vergleichen hatten. Dabei ging dem Zielreizdisplay mit den zwei zu vergleichenden Buchstaben ein Prime-Display voraus, das entweder aus einem Buchstaben oder einem neutralen Warnsignal (Pluszeichen) bestand. Mit dieser Priming-Aufgabe versuchten die Autoren, folgende, aus der obigen Unterscheidung abgeleitete Hypothesen, zu testen: Ein Buchstaben-Prime aktiviert automatisch seine Repräsentation im Gedächtnis. Ist der Buchstaben-Prime (z. B. A) mit den Buchstaben des zu vergleichenden Paares (z. B. AA) identisch, so bahnt die Prime-induzierte Aktivierung der Repräsentation „A" die Reaktion auf AA. Dagegen resultiert aus der automatischen Aktivierung der Prime-Repräsentation keine Hemmung der Reaktion, wenn der Buchstaben-Prime nicht identisch mit den Buchstaben des zu vergleichenden Paares ist. In diesem Fall ergibt sich nur dann (sich ausbreitende) Hemmung anderer Signale, zusätzlich zu dem automatischen Bahnungseffekt durch den Prime, wenn die Probanden ihre bewusste Aufmerksamkeit in die Verarbeitung des Primes investieren.

Um die Probanden (in einer der Versuchsbedingungen) genau dazu zu veranlassen, variierten Posner und Snyder (1975) die Validität des Buchstaben-Primes (d. h. die Wahrscheinlichkeit, mit der das nachfolgende Buchstabenpaar identisch mit dem Prime war) systematisch. In einer Gewinn-Kosten-Analyse der Reaktionszeiten wurde die Auswirkung valider und invalider Buchstaben-Primes mit der Neutralbedingung (Warnsignal) verglichen. Die Ergebnisse entsprachen den Hypothesen: War der Prime ein unzuverlässiger Prädiktor der Zielbuchstaben, so ergaben sich Gewinne für valide Primes – ohne Kosten für invalide Primes. War der Prime dagegen hochvalide, so ergaben sich Gewinne und Kosten, wobei die Gewinne rascher generiert wurden als die Kosten. Der unterschiedliche Zeitverlauf der Entstehung von Gewinnen und Kosten wurde damit erklärt, dass die Zuordnung bewusster Aufmerksamkeit mehr Zeit in Anspruch nimmt als automatische Aktivierungsvorgänge.

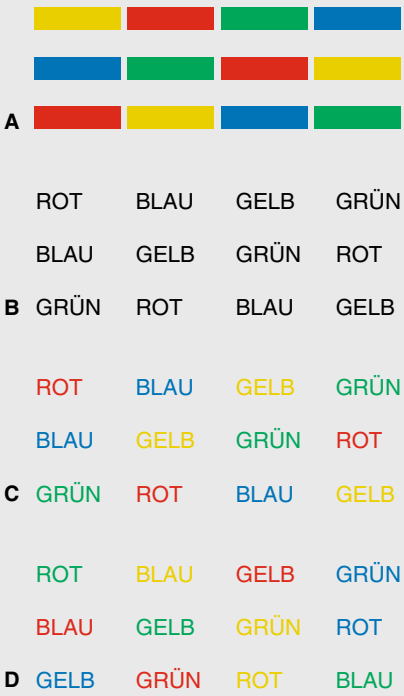
In der aktuellen Forschung spielt die Vorstellung von getrennten automatischen Bahnungs- und kontrollierten Inhibitionsprozessen vor allem in Theorien zur Erklärung von semati-

Zur Vertiefung 5.7

Der Stroop-Effekt

Ein häufig zitiertes Beispiel für einen automatischen Prozess ist der **Stroop-Effekt** (Stroop 1935). Bei der klassischen Stroop-Aufgabe hat die Probandin möglichst schnell die Farbe eines Farbwortes, z. B. des Wortes „blau", zu nennen, das in einer bunten Schrift (mit einer bunten Tinte) gedruckt ist (◘ Abb. 5.13). Dabei gibt es eine inkongruente Bedingung, in der z. B. das Farbwort „blau" in roter Schrift gedruckt ist – die richtige Antwort wäre also „rot". Der Stroop-Effekt besteht nun darin, dass in der inkongruenten Bedingung das Nennen der Farbe („rot") verzögert erfolgt (und als mühsam erlebt wird), während das Lesen des Wortes selbst („blau") unproblematisch ist. Dabei ist das Nennen von Farben nicht an sich langsamer als das Lesen von Farbwörtern (beispielsweise erfolgt das Nennen der Farbe eines Farbfleckes schneller als das Nennen der Farbe eines inkongruenten Stroop-Stimulus). Es ergibt sich also eine asymmetrische Interferenz derart, dass die Fähigkeit zur selektiven Reaktion auf einen Aspekt des Stroop-Stimulus (die Farbe) gestört wird durch den anderen Aspekt (die Wortinformation), der nicht völlig ignoriert werden kann.

Eine gängige Erklärung für diese Interferenz besteht darin, dass das Wort seine Aussprechreaktion automatisch aktiviert (zumindest ist die Farbe weniger stark mit der Nennreaktion verbunden als das Wort mit seiner Aussprechreaktion); obwohl der offene Ausdruck der Aussprechreaktion unterdrückt werden kann, ergibt sich eine Zeitverzögerung, während der die intendierte Farbnennreaktion die Kontrolle über die offene Reaktion gewinnt. Posner und Snyder (1975) gehen dabei von automatischer, paralleler Verarbeitung der beiden Aspekte bis kurz vor die offene Reaktion aus. Ein anderes Beispiel ist der *Zahlen-Stroop-Effekt*, bei dem eine Reihe identischer Ziffern, z. B. 777, vorgegeben wird und die Probanden mit der Anzahl der Ziffern, nicht aber mit deren Wert, antworten müssen (die richtige Antwort im Beispiel wäre also „3"; Überblick über ein halbes Jahrhundert Forschung zum Stroop-Effekt in MacLeod 1991).



◘ **Abb. 5.13** Das Stroop-Paradigma. Dargestellt sind eine Bedingung mit Farbflecken (**A**), eine neutrale Bedingung (**B**), eine kompatible Bedingung (**C**) und eine inkompatible Bedingung (die Stroop-Bedingung, **D**). Beim Benennen der Druckfarbe in den inkompatiblen Bedingungen zeigt sich starke Interferenz durch den Text

schem Priming eine zentrale Rolle (z. B. Moll et al. 2002). Aber auch in der Forschung zur ortsbezogenen Aufmerksamkeit gibt es Befunde, die separate Bahnungs- (indizierte Positionen) und Hemmungsprozesse (nichtindizierte Positionen) nahelegen (z. B. Lambert und Duddy 2002; Lambert et al. 1987).

Automatische und kontrollierte Verarbeitung Im Anschluss an die Arbeiten von Posner und Snyder (1975) elaborierten Schneider und Shiffrin (1977) bzw. Shiffrin und Schneider (1977) die Unterscheidung zwischen automatischen und kontrollierten Prozessen in zwei bis heute äußerst einflussreichen Arbeiten: *Kontrollierte Prozesse* sind von limitierter Kapazität, erfordern Aufmerksamkeit und können in sich verändernden Situationen flexibel eingesetzt werden; *automatische Prozesse* dagegen sind nicht kapazitätslimitiert, erfordern keine Aufmerksamkeit und lassen sich nur schwer modifizieren, wenn sie einmal erworben sind.

Schneider und Shiffrin (1977) untersuchten diesen Vorschlag mittels eines visuellen Suchparadigmas mit variabler Anzahl von Elementen in einer Gedächtnismenge (d. h. Zielreizmenge; *memory set*) und in der Displaymenge (*display set*). Zu Beginn eines Durchgangs hatten sich die Probanden ein, zwei, drei oder vier potenzielle Zielbuchstaben zu merken (*memory set size*); dann wurde ihnen ein Display mit ein, zwei, drei oder vier Buchstaben präsentiert (*display set size*), und sie hatten so schnell wie möglich zu entscheiden, ob einer der Buchstaben, die sie sich gemerkt hatten, als Zielreiz im Display vorhanden war oder nicht (Anwesend-/Abwesend-Reaktion). Die kritische Variable war die Art der Zuordnung der Zielreiz- bzw. Distrak-

Zur Vertiefung 5.8

Modifizierbarkeit und Unterdrückbarkeit automatischer Prozesse

Die Modifizierbarkeit (erworbener) automatischer Prozesse untersuchten Shiffrin und Schneider (1977) in einem Übungsexperiment, in dem die Probanden eine Suchaufgabe zunächst unter Bedingungen konsistenter Zuordnung übten und in dem dann die Zuordnung umgekehrt wurde. In der Übungsphase bildeten die Konsonanten zwischen B und L im Alphabet die Zielreizmenge und die Konsonanten zwischen Q und Z die Distraktormenge. Die Zielreizmenge in einem Durchgang umfasste vier Buchstaben, und die (nur kurzeitig dargebotenen) Suchdisplays enthielten zwei Items. Die Probanden übten diese Aufgabe in 2100 Versuchsdurchgängen. Im Verlauf der Übung kam es zu einer wesentlichen Verbesserung der Entdeckungsleistung (sowohl in der Genauigkeit als auch in der Geschwindigkeit), was als Anzeichen für die Entwicklung automatischer Entdeckungsprozesse gewertet wurde.

Nach 2100 Durchgängen wurde die vorher gültige Zuordnung umgekehrt, und es folgten weitere 2400 Durchgänge mit der umgekehrten Zuordnung. Nach der Umkehrung verschlechterte sich die Suchleistung zunächst markant (die Reaktionszeiten waren verlangsamt und abhängig von der Größe der Gedächtnis- und der Displaymenge, und es kam gehäuft zu Reaktionen mit falschen Alarmen). Die Probanden benötigten fast 1000 Durchgänge, nur um wieder das Leistungsniveau zu erreichen, das sie zu Beginn des Experiments hatten. Shiffrin und Schneider (1977) zogen den Schluss, dass automatische Prozesse durch mangelnde Flexibilität gekennzeichnet sind. Das heißt, die Leistung bricht ein, wenn sich die Aufgabenbedingungen ändern. Im Gegensatz zur Übung unter konsistenten Zuordnungsbedingungen hatte eine Änderung der Aufgabensituation nach Übung unter variablen Bedingungen kaum Auswirkungen. Somit sind kontrollierte Prozesse viel leichter modifizierbar.

Dass automatische Entdeckungsprozesse auch auf (gelernte) Stimuli außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit ansprechen, versuchten Shiffrin und Schneider (1977) in einem weiteren Experiment zu belegen. In einer initialen Übungsphase hatten die Probanden die Aufgabe, einen Zielbuchstaben an jedem möglichen Ort im Display zu entdecken (2 × 2 sich diagonal gegenüberliegende Orte, angeordnet um einen zentralen Fixationspunkt). Danach wurde die Instruktion derart geändert, dass sie nur noch auf Zielreize in bestimmten Teilbereichen des Displays (den Orten auf der validen Diagonalen) mit einer Entdeckungsreaktion zu antworten hatten, während mögliche Zielreize in anderen Bereichen zu ignorieren waren.

Es zeigte sich, dass die Probanden nach anfänglicher Suche unter einer konsistenten Zuordnungsbedingung später zwar geringfügig, aber signifikant in ihrer Fähigkeit beeinträchtigt waren, Teilbereiche des Displays zu ignorieren. Insbesondere ergab sich eine verminderte Trefferrate, wenn ein zu ignorierender Zielreiz auf der invaliden Diagonalen im selben Display mit einem identischen zu entdeckenden Zielreiz auf der validen Diagonalen dargeboten wurde. (Dagegen gab es keine ähnliche Beeinträchtigung nach initialer Suche unter einer variablen Zuordnungsbedingung.) Interessanterweise zeigte sich eine massive Beeinträchtigung, wenn die Probanden anfangs bestimmte Zielreize unter einer konsistenten Zuordnungsbedingung zu entdecken lernten, ein solcher konsistenter Reiz aber in der nachfolgenden (kritischen) Versuchsphase, die Suche unter variablen Zuordnungsbedingungen erforderte, an einem zu ignorierenden Ort (d. h. als Distraktor) dargeboten wurde.

Shiffrin und Schneider (1977) erklärten dieses Befundmuster damit, dass die Entwicklung automatischer Prozesse die spätere Leistung aufgrund von automatischen (Entdeckungs-) Reaktionen auf zu ignorierende Stimuli außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit stört. Falls zu ignorierende Stimuli dagegen keine automatische Entdeckungsreaktion hervorrufen, können kontrollierte Prozesse die Verarbeitung solcher nichtrelevanter Stimuli außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit effektiv verhindern.

torreize zur (positiven) Reaktion: konsistent oder variabel. Bei *konsistenter Zuordnung* (*consistent mapping*) enthielt die Menge der Gedächtniselemente (d. h. der potenziellen Zielbuchstaben) z. B. nur Konsonanten und die Menge der Distraktoren nur Ziffern (oder umgekehrt). Dagegen wurden bei *variabler Zuordnung* (*variable mapping*) die Menge der Gedächtniselemente aus einer Mischung von Konsonanten und Ziffern sowie die Menge der Distraktoren gebildet (d. h., ein Element konnte in einem Durchgang ein Zielreiz sein, in einem anderen aber ein Distraktor). Im Ergebnis zeigte sich, dass bei konsistenter Zuordnung die Suchreaktionszeiten relativ unabhängig von der Größe der Gedächtnismenge und der Größe der Displaymenge waren. Dagegen nahmen bei variabler Zuordnung die Reaktionszeiten sowohl mit der Größe der Gedächtnis- als auch mit der Größe der Displaymenge zu.

Schneider und Shiffrin (1977) erklärten dieses Befundmuster damit, dass bei variabler Zuordnung die Suche einen kontrollierten Prozess serieller Vergleiche zwischen jedem Element der Gedächtnismenge und jedem Element der Displaymenge involviert, so lange, bis ein Zielreiz gefunden wurde oder alle möglichen Vergleiche durchgeführt wurden. Dagegen involviert die Suche bei konsistenter Zuordnung einen automatischen Entdeckungsprozess, der parallel über das ganze Display abläuft (d. h. ein vorhandener Zielreiz springt ins Auge – ähnlich wie beim Popout-Phänomen; ► Zur Vertiefung 5.3). Dieser automatische Entdeckungsprozess hat sich als Ergebnis einer jahrelangen Übung im Unterscheiden von Buchstaben und Ziffern entwickelt.

In weiteren Experimenten konnten Shiffrin und Schneider (1977) Belege dafür finden, dass einmal erworbene automatische Entdeckungsreaktionen auch auf (erlernte) Stimuli außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit ansprechen, also nicht unterdrückbar sind, und dass sie nur durch ausgedehnte Übung wieder „verlernt“ werden können (► Zur Vertiefung 5.8).

Schneider und Shiffrin (1977) bzw. Shiffrin und Schneider (1977) arbeiteten also wesentliche Kennzeichen **automatischer** und **kontrollierter Verarbeitung** heraus. Zur kritischen Bewertung ihrer Zwei-Prozess-Dichotomie ist allerdings anzumerken, dass sich als automatisch angenommene Prozesse bei genauer Betrachtung nicht als strikt automatisch erweisen. Beispielsweise sind die Such-Reaktionszeit-Funktionen unter konsistenten Zuordnungsbedingungen nicht völlig unabhängig von der Größe der Gedächtnis- und der Displaymenge, was darauf hinweist, dass der Suchprozess nicht strikt parallel verläuft und Kapazität beansprucht. Weiterhin sagt der Vorschlag, dass bestimmte Prozesse durch Übung automatisiert werden, wenig darüber aus, was sich eigentlich im Verlauf der Übung verändert: Führt Übung einfach zu einem schnelleren Ablauf der an der Ausführung einer Aufgabe beteiligten Prozesse, oder bewirkt sie eine Veränderung in der Charakteristika (d. h. eine Restrukturierung) der beteilig-

ten Prozesse selbst (Cheng 1985; Schneider und Shiffrin 1985)? Der Vorschlag ist folglich mehr deskriptiv als erklärend.

Automatizität und supervidierende Aufmerksamkeit (*supervisory attention*) Einen weiteren einflussreichen Ansatz stellt die Theorie von Norman und Shallice (1986) dar, die drei, durch ein zunehmendes Niveau an Bewusstsein gekennzeichnete Stufen kognitiver Verarbeitung unterscheidet (anstelle einer Dichotomie zwischen automatischen und kontrollierten Prozessen):

1. *Vollautomatische Verarbeitung*, die von Handlungsschemata kontrolliert wird, die durch ihre entsprechenden auslösenden Stimuli im Umfeld aktiviert werden.
2. *Teilautomatische Verarbeitung*, die einen Prozess der Konfliktregulierung (*contention scheduling*) involviert, der außerhalb willentlicher und bewusster Kontrolle abläuft und der einem der verfügbaren Handlungsschemata auf der Basis von Umfeldinformation sowie aktueller (Handlungs-)Prioritäten den Vorrang verschafft.
3. *Willentlich-intentionale Kontrolle* durch ein supervidierendes Aufmerksamkeitssystem (*supervisory attention system*, SAS), das auf einer übergeordneten Ebene funktioniert und Konflikte handhabt, die nicht durch die halbautomatische Konfliktregulation aufgelöst werden können (also z. B. bei Handlungsfehlern zum Einsatz kommt) sowie flexibles Reagieren in neuen Situationen gestattet.

Automatizität als Gedächtnis-Retrieval Logan (1988) schlug vor, Automatizität im Sinne von Gedächtniszugriff (*memory retrieval*) zu begreifen, und versuchte, Übungseffekte durch folgende Annahmen zu erklären: Jedes Mal, wenn man einem bestimmten Stimulus begegnet und ihn verarbeitet, werden separate Gedächtnisspuren angelegt. Übung mit demselben Stimulus führt also zur Speicherung von mehr und mehr Information über diesen Stimulus sowie darüber, wie man mit ihm zu verfahren hat. Die übungsbedingte Zunahme im Wissensbestand (*knowledge base*) gestattet einen raschen Zugriff (*retrieval*) auf relevante Information, wenn der entsprechende Stimulus dargeboten wird. Folglich, so die Annahme:

> „Automaticity is memory retrieval: Performance is automatic when it is based on a single-step direct-access retrieval of past solutions from [long-term] memory." (Logan 1988, S. 493)

Ohne Übung erfordert das Reagieren auf einen Stimulus bewusste Kontrolle und die Anwendung von Regeln. Die Performanz eines (ungeübten) Novizen ist also eher durch einen Mangel an Wissen als durch einen Mangel an Ressourcen limitiert, und nur der Wissensbestand verändert sich mit der Übung.

Automatizität und Spezifikation von Handlungsparametern Den Ausgangspunkt von Neumanns (1984) Kritik an den Zwei-Prozess-Theorien bilden die gängigen Kennzeichen für Automatizität (s. oben), wobei Neumann zwischen primären und sekundären Kriterien unterscheidet. Primäre Kriterien sind dabei:

1. *Die Art der Funktion:* Automatische Prozesse erfordern keine Kapazität, und weder erleiden sie noch verursachen sie Interferenz.
2. *Die Art der Kontrolle:* Automatische Prozesse stehen unter der Kontrolle der Stimulation, nicht unter der Kontrolle von Intentionen (Strategien, Erwartungen, Pläne).
3. *Die Art der Repräsentation:* Automatische Prozesse führen nicht notwendig zu bewusstem Gewahrsein.

Dazu kommen als sekundäre Kriterien, dass automatische Prozesse „fest verdrahtet" (*wired in*) bzw. durch Übung erlernt und dass sie einfach, schnell und inflexibel (d. h. nur durch ausgedehnte Übung modifizierbar) sind.

- Zu Kriterium 1 (*kapazitätsunabhängige Funktion*) bemerkt Neumann (1984, S. 269), dass sich nur schwer nachweisen lässt, dass eine Aufgabe, die scheinbar automatisch erledigt wird, keine Kapazität beansprucht. Übung führt zur Entwicklung einer Fertigkeit, die „includes a sensory and, at least during practice, a motor response. After practice the response may remain covert, but is still […] an attentional response connected to the particular target stimulus." Aber selbst wohlgeübte Aufgaben produzieren Interferenz, wenn die Reaktionen ähnlich sind.
- Zu Kriterium 2 (*stimulusabhängige Kontrolle*) führt Neumann (1984) an, dass sich selbst beim Stroop-Effekt die Interferenz reduzieren lässt, wenn das Wort und die inkongruente Farbe räumlich getrennt voneinander dargeboten werden (Kahneman und Henik 1971), d. h., der Effekt ist nicht rein reizgesteuert. Also generieren Distraktoren Interferenz nicht einfach durch ihre Anwesenheit im Umfeld, sondern dadurch, dass sie mit der intendierten Handlung verbunden sind. Beispielsweise sind beim Stroop-Effekt sowohl das Wort als auch die Farbe mit dem gegenwärtig aktiven Aufgabenset verbunden. Das heißt, es ist die strategische, kontrollierte Einstellung (*set*) des kognitiven Systems, „auf Farben zu reagieren", die zu der Interferenz führt. Folglich ist automatische Verarbeitung keine „invariant consequence of stimulation, independent of a subject's intention" (Neumann 1984, S. 270).
- Im Zusammenhang mit Kriterium 3 (*Kontrolle unterhalb des Niveaus bewusster Repräsentation*) stellt Neumann (1984) die Frage, ob es mit der Ausführung einer Aufgabe zusammenhängende intentionale Prozesse gibt, die aber dem Bewusstsein nicht zugänglich sind. Die Antwort ist ja. Dies kommt z. B. beim Tip-of-the-Tongue-Phänomen zum Ausdruck, bei dem ein gesuchtes Wort „auf der Zunge liegt", wenn einem, nachdem man die Gedächtnissuche aufgegeben hat, die gesuchte Antwort plötzlich einfällt. Derartige Prozesse ereignen sich im Kontext einer (latent) fortlaufenden Tätigkeit und müssen somit zu einem bestimmten Grad von Intentionen abhängen, obwohl sie mit wenig oder keinerlei Bewusstsein ablaufen.

Nach Neumanns (1984) alternativer Konzeption liegt der Unterschied zwischen automatischer und kontrollierter Verarbeitung im Niveau der erforderlichen Kontrolle. Eine Handlung kann nur ausgeführt werden, wenn alle Parameter für die Handlung spezifiziert sind. Einige Parameterspezifikationen sind im Langzeitgedächtnis als Fertigkeiten (*skills*) gespeichert. Andere stammen vom Stimulus selbst. Die übrigen müssen von einem Aufmerk-

samkeitsmechanismus bereitgestellt werden, dessen Funktion darin besteht, die Spezifikationen bereitzustellen, die nicht aus der Verbindung zwischen Eingangsinformation und Fertigkeiten ableitbar sind:

> „A process is automatic if its parameters are specified by a skill in conjunction with input information. If this is not possible, one or several attentional mechanisms for parameter specification must come into play. They are responsible for interference and give rise to conscious awareness." (Neumann 1984, S. 282).

Belege für seine Konzeption konnte Neumann u. a. in seinen Arbeiten zum Reaktions-Priming durch metakontrastmaskierte (d. h. unter der Schwelle der bewussten Wahrnehmung dargebotene) Stimuli erbringen, die die Parameter für eine intendierte Handlung auf einen überschwelligen imperativen Stimulus direkt spezifizieren (und diese Handlung dadurch bahnen) können (z. B. Neumann und Klotz 1994).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die meisten für automatisch gehaltenen Prozesse bestenfalls partiell automatisch sind und dass automatische Verarbeitung in einem engeren (komplexen) Zusammenhang zu bewusst-intentionalen Prozessen stehen als ursprünglich, im Rahmen von strengen Zwei-Prozess-Theorien, angenommen.

5.3.3 Aufmerksamkeit und Umschalten zwischen Aufgaben

Neben den Fragen der Mehrfachaufgabenperformanz sowie der Automatisierung von Tätigkeiten betrifft ein weiterer wichtiger Fragenkomplex im Kontext von „Aufmerksamkeit und Performanz" die Rolle der Aufmerksamkeit bei der aufgabenadäquaten Einstellung oder „Konfiguration" des Verarbeitungssystems sowie seiner *Rekonfiguration* beim fortlaufenden Umschalten von einer Aufgabe auf eine andere (*task switching*; z. B. Allport et al. 1994; Rogers und Monsell 1995). Die handlungsbezogenen Aufmerksamkeitsmechanismen, die in ▶ Abschn. 5.3.1 und 5.3.2 erörtert wurden, sind direkt für diese Frage relevant. Eine detaillierte Erörterung dieser Thematik erfolgt in ▶ Kap. 9 und 18.

5.3.4 Resümee

Aufmerksamkeit wird nicht ausschließlich als wichtig für Prozesse der Wahrnehmung begriffen, sondern vielmehr als zentral für die Vermittlung zielgerichteter Handlungen (*selection for action*). Im Rahmen entsprechender Ansätze stellt sich die Frage, wie gut man die Aufmerksamkeit zwischen zwei (oder mehr) gleichzeitig auszuführenden Tätigkeiten teilen kann.

Die Befunde zu Doppel- bzw. Mehrfachaufgabenperformanz zeigen, dass die Leistung im Wesentlichen von drei Faktoren abhängt: der Aufgabenähnlichkeit, der Aufgabenschwierigkeit sowie der Übung. Die Performanz wird generell beeinträchtigt, wenn die parallel zu erledigenden Aufgaben gleiche spezialisierte Mechanismen oder Ressourcen der Informationsverarbeitung – von der Wahrnehmung bis zur Reaktion – beanspruchen. Weiterhin wird die Doppelaufgabenperformanz durch die zunehmende Schwierigkeit der auszuführenden Aufgaben beeinträchtigt, wobei schwierigere Aufgaben größere Anforderungen an eine zentrale Informationsverarbeitungsinstanz wie z. B. ein supervidierendes Aufmerksamkeitssystem stellen, das für die Koordination der Teiltätigkeiten bzw. der verschiedenen einzusetzenden Verarbeitungsmechanismen verantwortlich ist. Übung fördert die Doppelaufgabenperformanz (manchmal in erstaunlichem Maße), was insbesondere auf die Automatisierung von Teiltätigkeiten zurückgeführt wird.

Automatische Verarbeitungsprozesse sind dadurch gekennzeichnet, dass sie rasch ablaufen; dass sie nicht die zur Erledigung anderer Aufgaben verfügbare Kapazität reduzieren, d. h. dass sie keine Aufmerksamkeit beanspruchen; dass sie unvermeidbar sind, d. h. dass sie immer aktiviert werden, wenn ein passender Auslösestimulus erscheint; und dass sie dem Bewusstsein nicht zugänglich sind. Allerdings gibt es wohl keine Tätigkeiten, die diese Kriterien in einem strengen Sinne erfüllen. Zudem sind automatische Prozesse nicht unabhängig von der strategischen Einstellung des kognitiven Systems, d. h., sie stellen keine von der Handlungsintention unabhängige Konsequenz der Stimulation dar.

5.4 Anwendungsbeispiele

Das vorliegende Kapitel beginnt mit einer Beschreibung des Cocktailparty-Phänomens, in dem in einer alltäglichen Situation eine ganze Reihe von Erscheinungsformen selektiver Aufmerksamkeit zum Ausdruck kommt. In Analogie zur Cocktailparty lässt sich eine beliebige Menge von Beispielen anführen, die den Einsatz der in der Folge diskutierten Prinzipien der selektiven Aufmerksamkeit reflektieren. So kann der Großbahnhof einer Metropole mit Hinweisen zu Bahnsteigen, Schaltern und Informationsständen, mit Geschäften, Restaurants und Reklame als visuelles Äquivalent zum Cocktailparty-Phänomen angesehen werden. Wieder ist es entscheidend, relevante Information zu selektieren, etwa um 3 min vor der planmäßigen Abfahrt noch den richtigen Zug zu erwischen. Verkehrszeichen, als weiteres Beispiel, sind so gestaltet, dass wir sie in einer sich ständig verändernden Umgebung schnell und korrekt erkennen können. Insgesamt spielt Aufmerksamkeit in einer ganzen Reihe von angewandten Kontexten eine entscheidende Rolle, darunter der Ergonomie (insbesondere bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen und Displayeinheiten) und den Sportwissenschaften (bei fast allen Sportarten ist Informationsselektion essenziell für den Erfolg); aber auch in Feldern wie der Pädagogik (Gestaltung von Unterrichtsmaterial bzw. -einheiten) und der Klinischen Psychologie spielt Wissen über die Funktionsmechanismen der Aufmerksamkeit eine entscheidende Rolle. (Erinnert sei beispielswiese an die Depressionstheorie von Beck et al. [1992], in der angenommen wird, dass Personen mit Depression negative Umweltinformation bevorzugen.)

Aus der großen Zahl von empirischen Studien, in denen angewandte Fragestellung zur Aufmerksamkeit untersucht wurden, sollen im Folgenden exemplarisch zwei Ansätze ausführlicher dar-

gestellt werden: Die Wirkung sozialer Hinweisreize und die Auswirkungen der Nutzung von Mobiltelefonen beim Autorfahren.

Aufmerksamkeitssteuerung durch soziale Hinweisreize

Seit einiger Zeit hat sich ein Interesse an der Frage herausgebildet, ob und in welcher Weise soziale Hinweisreize zur Steuerung ortsbasierter Aufmerksamkeit beitragen können. In den Arbeiten wurden insbesondere Cueing-Effekte untersucht, die mithilfe der schematischen Darstellung eines Gesichts ausgelöst wurden, das in der Mitte eines Bildschirms (d. h. an einer zentralen Position) dargeboten wurde und dessen Augen (im Sinne eines symbolischen Hinweisreizes) entweder nach links oder nach rechts blickten. Die Ergebnisse zeigen, dass Zielreize, die auf der Seite erschienen, in die die Augen gerichtet waren, rascher und genauer verarbeitet wurden als Zielreize an anderen Orten (z. B. Friesen und Kingstone 1998; Downing et al. 2004). Interessanterweise war dies der Fall, obwohl diese symbolischen Blickcues räumlich gar nicht prädiktiv waren, wobei die hohe Vertrautheit dieser überlernten Hinweisreize eine Erklärung für diesen Effekt darstellen könnte (z. B. Eimer 1997).

Obwohl diese Befunde den Schluss zulassen, dass Blickcues die Aufmerksamkeit so rasch und reflexiv ausrichten wie periphere Cues (▶ Zur Vertiefung 5.2), so gibt es dennoch Unterschiede zwischen Blickcues und direkten Cues: So bleibt im Vergleich zu direkten Cues bei Blickcues der Effekt länger erhalten (bis 500 ms), und sie zeigen keinen IOR-Effekt (Friesen und Kingstone 1998, 2003). Zudem unterliegt der Effekt von Blickcues kognitiver Beeinflussung: Er tritt nur dann auf, wenn die Probanden davon ausgehen, dass es sich beim Cue um ein Gesicht handelt, dessen Augen in eine bestimmte Richtung blicken – nicht aber, wenn sie glauben, dass es sich z. B. um ein Auto handelt (Ristic und Kingstone 2005). Gegen die Annahme, dass Blickcues analog zu peripheren Cues verarbeitet werden, spricht auch der Befund, dass Patienten mit Frontallappenläsionen normale Effekte auf periphere Cues zeigen, während ihre Aufmerksamkeit auf symbolische Cues (z. B. Koski et al. 1998) und auf Blickcues hin beeinträchtigt ist (Vecera und Rizzo 2004, 2006).

Neuere Arbeiten zu Blickcues haben vorgeschlagen, dass zwei Komponenten ihrer Wirkung zugrunde liegen: zum einen eine relativ rasche, globale Ausrichtung der Aufmerksamkeit nach rechts oder links (in die Richtung, d. h. das Halbfeld, der beobachteten Blickbewegung) und zum anderen eine etwas langsamere Fokussierung auf eine spezifische Position bzw. ein spezifisches Objekt (Wiese et al. 2013). Die letztere Komponente kommt aber nur dann ins Spiel, wenn visuelle Kontextinformation (im Sinne von Objektstrukturen, auf die die Blickbewegung verweist) vorhanden oder wenn die Validität der Blickcues hoch ist (Wiese et al. 2013).

Auch die subjektive Einschätzung der Zuverlässigkeit des Cue-Gebers spielt eine Rolle (Wiese et al. 2014). Zudem ist kritisch, dass man dem Cue-Geber gegenüber den sogenannten intentionalen Standpunkt (*intentional stance*; Dennet 2003) einnimmt, ihn also als ein menschliches Wesen mit mentalen Zuständen, insbesondere mit Zielen, Absichten, Bedürfnissen etc., konzipiert. Ist dies nicht der Fall, wie z. B. dann, wenn es sich beim Cue-Geber um einen humanoiden Roboter, d. h. ein „Maschinenwesen", handelt, so sind die Cueing-Effekte reduziert, und zwar sowohl die Verhaltenseffekte (Wiese et al. 2012) als auch die elektrophysiologischen Indikatoren für eine bevorzugte Verarbeitung der indizierten Reize auf früher visueller Stufe (Wykowska et al. 2014; im Zusammenhang mit Arbeiten zu Blickcues vgl. auch Teufel et al. 2010).

Doppelaufgabenperformanz beim Autofahren und Telefonieren

Beim Lenken eines Autos und der gleichzeitigen Kommunikation mit dem Beifahrer muss die Aufmerksamkeit auf zwei Handlungen aufgeteilt werden. Die eigene Erfahrung zeigt, dass bei schwierigen Verkehrssituationen wie etwa beim Wechsel zwischen zwei stark befahrenen Fahrbahnen die Kommunikation ins Stocken kommt, wobei beispielweise ein Satz nicht zu Ende gesprochen wird. Mit anderen Worten kommt es bei der einen Handlung zu Leistungseinbußen, die sich als Fehler bei der Ausführung manifestieren können oder die einen erhöhten Zeitbedarf bei der Ausführung nach sich ziehen. Auch die Annahme, dass das Lenken eines Autos durch das Führen von Telefongesprächen beeinträchtigt wird, ist empirisch gut fundiert.

In einer Studie von Strayer und Johnston (2001) saßen die Probanden in einem Fahrsimulator; sie waren in Analogie zu einer normalen Fahrsituation instruiert, bei Aufleuchten eines roten Ampellichtes so schnell wie möglich das Bremspedal zu betätigen. Zwei Reaktionsbedingungen wurden verglichen: das Betätigen der Bremse als Einfachaufgabe (Baseline mit Aufmerksamkeit ausschließlich auf Ampelwechsel) und als Doppelaufgabe, während die Probanden gleichzeitig über ein Mobiltelefon mit einer anderen Person sprachen (Experimentalbedingung). Die Ergebnisse zeigten im Vergleich zur Einzelaufgabe eine signifikante Reduktion der Leistung in der Doppelaufgabe: Das rote Licht wurde mehr als doppelt so häufig übersehen, nämlich in 7 % der Durchgänge im Vergleich zu 3 %. Die Auswertung der Reaktionszeit beim Drücken des Bremspedals zeigte, dass dies in der Bedingung der Doppelaufgabe 50 ms länger dauerte als in der Bedingung der Einzelaufgabe. Anders ausgedrückt verlängert sich der Bremsweg in einer Weise, die zwischen einem erfolgreichen Bremsmanöver und einer Kollision unterscheiden kann.

5.5 Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Aufmerksamkeitsforschung in den letzten Jahrzehnten immense Fortschritte gemacht hat. In der Experimentellen Psychologie wurde eine Vielzahl von Paradigmen zur Darstellung von Aufmerksamkeitsfunktionen konzipiert und auf der Grundlage der empirischen Befunde konnten (zum Teil computational ausformulierte) Prozessmodelle dieser Funktionen entwickelt werden. Den neurowissenschaftlich geprägten Ansätzen gelang es, die neuronalen Mechanismen für eine Reihe der in diesen Modellen spezifizierten Aufmerksamkeitsfunktionen aufzuzeigen. In den letzten Jahren sind die einzelnen Disziplinen innerhalb der Kognitiven Neurowissenschaft der Aufmerksamkeit zu einer echten interdisziplinären Wissenschaft zusammengewachsen, und aktuelle Untersuchungen sind geprägt vom Bestreben, sowohl verhaltensbasierte als auch neurowissenschaftliche Fragen in *einen* theoretischen Rahmen einzuordnen.

Bisher haben sich Integrationsversuche im Wesentlichen getrennt auf die Fragenbereiche der *selektiven perzeptiven Aufmerksamkeit* und der *Aufmerksamkeit und Performanz* konzentriert. Zudem liegen solche integrativen Theorien bestenfalls auf computationaler Ebene vor, und es bleibt bisher weitgehend unklar, wie sie Verhaltensdaten mit neurophysiologischen Daten in Beziehung setzen. Ein Beispiel für eine generelle, computationale Theorie der perzeptiven Aufmerksamkeit ist Bundesens (1990) Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (TVA), die in ihrer „neuronalen" Implementierung (Bundesen et al. 2005) den Brückenschlag zu den neurowissenschaftlichen Ansätzen versucht. Nach Duncan (2000) erfordert der Brückenschlag allerdings neuronale Netzwerkmodelle, die auf der einen Seite direkt mit den neurophysiologischen Daten in Verbindung gebracht werden und auf der anderen Seite quantitative, von einer computationalen Theorie „beschriebene" Verhaltensdaten simulieren können.

Auch was die Frage von Aufmerksamkeit und Performanz betrifft, ist mit einem beschleunigt ansteigenden Erkenntnisgewinn und zunehmender theoretischer Integration zu rechnen. Ein Indikator dafür ist der Aufstieg der psychologischen und neurowissenschaftlichen Forschung zu den exekutiven Funktionen im vergangenen Jahrzehnt. Zunehmend wird es gelingen, einheitliche theoretische Ansätze zu entwickeln, die die Brücke zur selektiven perzeptiven Aufmerksamkeit schlagen. Einer der ersten solchen Versuche wurde von Logan und Gordon (2001) unternommen, die Logans (1996) CTVA zu einer computationalen Theorie der exekutiven Kontrolle (ECTVA, *executive control of TVA*) in Zweifachaufgabensituationen – zur Erklärung von Aufgabeninterferenz, Aufgabenset-Wechselkosten etc. – erweitert haben. Die ECTVA (Logan und Gordan 2001) nimmt dabei an, dass exekutive Prozesse die untergeordneten Prozesse durch „Manipulation" von deren Parametern steuern. Die TVA dient als Theorie der untergeordneten Prozesse, d. h. ein Aufgabenset wird als Menge von TVA-Parametern definiert, die ausreicht, um einen TVA-Prozess zur Aufgabenausführung zu konfigurieren. Ein Wechsel des Aufgabensets wird als eine Änderung in einem oder mehreren dieser Parameter verstanden, wobei angenommen wird, dass die für den Wechsel erforderliche Zeit von der Anzahl der zu ändernden Parameter abhängt.

Solche umfassenden Theorien müssen auch den Zusammenhang von Aufmerksamkeit und Gedächtnis (z. B. Cowan 1997) mit einbeziehen. Die Vereinigung von bereichsspezifischen Ansätzen wird in der Zukunft zu einer echten generellen *Theorie der Aufmerksamkeit* führen.

5.6 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Eine wesentliche Funktion von Aufmerksamkeit liegt in der Auswahl oder Selektion von bestimmten Inhalten oder Informationen, die notwendigerweise mit einer Deselektion von anderen Informationen einhergeht. Ziel der Selektion ist es, bestimmte Informationen dem Bewusstsein bzw. der Steuerung von Denken und Handeln zugänglich zu machen (selektive Aufmerksamkeit).
- Das eigentliche durch die selektive Aufmerksamkeit zu lösende Problem liegt darin, dass die richtige Information zur richtigen Zeit ein bestimmtes Verhalten steuert. Selektive Aufmerksamkeit dient demzufolge wesentlich der Handlungssteuerung (*selection for action*).
- Es gibt eine seit Langem andauernde Kontroverse darüber, ob Selektion früh oder spät erfolgt. Aktuell geht man davon aus, dass der Ort der Aufmerksamkeitsselektion flexibel ist und von spezifischen Aufgabenfaktoren abhängig sein kann (*early* vs. *late selection*).
- Die Frage der Selektion in der visuellen Umwelt hat im Wesentlichen zu drei Ansätzen geführt; diese begreifen selektive visuelle Aufmerksamkeit entweder als ortsbasiert, objektbasiert oder dimensionsbasiert.
- Wichtige Paradigmen zur Untersuchung von Prozessen selektiver visueller Aufmerksamkeit sind das Cueing-Paradigma (Posner), das Flankierreizparadigma (Eriksen) sowie die visuelle Suche.
- Einflussreiche Theorien der visuellen Suche und der selektiven Aufmerksamkeit sind die Merkmalsintegrationstheorie (MIT), die Theorie der gesteuerten Suche (GST) und die Ähnlichkeitstheorie (ÄT).
- Im Kontext des Verstehens von Prozessen der visuellen Aufmerksamkeit auf der Ebene neurokognitiver Mechanismen sind zwei Charakteristika des visuellen Systems von besonderer Bedeutung: die Parallelität funktional spezialisierter Verarbeitungsmechanismen sowie deren quasihierarchische Organisation.
- Das visuelle Gehirn lässt sich als ein parallel und verteilt arbeitendes System beschreiben, in dem visuelle Information in einer Reihe quasihierarchisch arrangierter Schritte berechnet wird, die von niedrigen zu höheren Ebenen fortschreiten und die durch eine zunehmende rezeptive Feldgröße der entsprechenden Neurone gekennzeichnet sind.
- Die Mehrfach- bzw. Doppelaufgabenperformanz wird von drei Faktoren determiniert: der Aufgabenähnlichkeit, der Übung und der Aufgabenschwierigkeit.
- Aufmerksamkeitstheoretische Ansätze zur Erklärung der Determinanten der Doppelaufgabenperformanz lassen sich zusammenfassen in Ein-Kanal-Theorien, Theorien zentraler Kapazität und modulare Theorien.
- Eine Erklärung für Übungseffekte in Zweifachaufgabenparadigmen besteht darin, dass einige Verarbeitungsvorgänge im Verlauf der Übung aufhören, Anforderungen an die zentrale Kapazität (Aufmerksamkeit) zu stellen: Sie werden automatisiert (automatische Verarbeitung).
- Kontrollierte Prozesse sind von limitierter Kapazität, erfordern Aufmerksamkeit und können in sich verändernden Situationen flexibel eingesetzt werden. Automatische Prozesse dagegen sind nicht kapazitätslimitiert, erfordern keine Aufmerksamkeit und lassen sich nur schwer modifizieren.

Schlüsselbegriffe

Attenuationstheorie der Aufmerksamkeit (*attenuation theory of attention*) Diese Theorie lässt eine abgeschwächte Weiterleitung und Verarbeitung nichtbeachteter Information zu. Weiterhin ist

der Ort der Selektion flexibel, wenn auch relativ früh, auf einer perzeptiven Stufe, angesetzt, wobei das erreichte Analyseniveau von der verfügbaren Verarbeitungskapazität abhängt.

Aufmerksamkeitsblinzeln (*attentional blink*) Einschränkung der Fähigkeit zur Verarbeitung sequenziell dargebotener Stimuli. Erklärungen gehen davon aus, dass dem Ausschnitt des visuellen Feldes, in dem eine Veränderung erfolgt, selektive Aufmerksamkeit zugewiesen werden muss, damit die Veränderung wahrgenommen bzw. in eine Gedächtnisrepräsentation überführt werden kann.

Automatische Verarbeitung (*automatic processing*) Automatische Prozesse sind im Gegensatz zu kontrollierten Prozessen nicht kapazitätslimitiert und erfordern keine Aufmerksamkeit; sie lassen sich allerdings nur schwer modifizieren (s. auch kontrollierte Verarbeitung).

Dorsaler Pfad der neuronalen visuellen Verarbeitung (*dorsal cortical pathway*) Dieser Pfad, auch Wo- bzw. Wie-Pfad genannt, berechnet räumliche Information für die Wahrnehmung und/oder für motorische Handlungen wie Greifen oder Augenbewegungen (s. auch ventraler Pfad der neuronalen visuellen Verarbeitung).

Filtertheorie der Aufmerksamkeit (*filter theory of attention*) Nach dieser Theorie kann nur einer von zwei sich gleichzeitig in einem sensorischen (z. B. im auditiven) Speicher befindlichen Reizen aufgrund seiner physikalischen Merkmale einen selektiven Filter passieren, um in einem kapazitätslimitierten, strikt seriellen System vollständig, d. h. semantisch, verarbeitet zu werden.

Geteilte Aufmerksamkeit (*divided attention*) Situationen bzw. experimentelle Bedingungen, in denen mehrere Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden müssen. Geteilte Aufmerksamkeit ist theoretisch von großem Interesse, da Interferenz und Leistungseinbrüche beim Ausführen multipler Tätigkeiten Rückschlüsse auf die Limitationen des menschlichen Informationsverarbeitungssystems erlauben.

Handlungssteuernde Selektion (*selection for action*) Die handlungssteuernde Funktion der Aufmerksamkeit stellt das Verarbeitungssystem mit allen seinen Komponenten – von der Wahrnehmung bis zur motorischen Reaktion – so ein, dass die in der jeweils zu erledigenden Aufgabe spezifizierten Handlungsziele möglichst effizient (koordiniert) erreicht werden können.

Kontrollierte Verarbeitung (*controlled processing*) Kontrollierte Prozesse sind von limitierter Kapazität, erfordern Aufmerksamkeit und können in sich verändernden Situationen flexibel eingesetzt werden (s. auch automatische Verarbeitung).

Lichtkegelmetapher der Aufmerksamkeit (*spotlight metaphor of attention*) Vorstellung, dass Aufmerksamkeit wie ein Lichtkegel funktioniert, der einen bestimmten Ort beleuchtet, der prioritär verarbeitet wird; d. h., Stimuli an solchen Orten werden rascher und gründlicher verarbeitet als Stimuli an anderen Orten. Zwei kontroverse Annahmen konzipieren den Lichtkegel entweder mit einer festen Größe oder aber in Analogie zu einer Gummilinse (*zoom lens*) mit einer variablen Größe und einer von der Größe abhängigen Auflösung.

Modulare Theorien (*modular theories*) Diese Theorien gehen – im Gegensatz zu Theorien zentraler Kapazität – von der Annahme multipler spezifischer, d. h. modularer Verarbeitungssysteme (oder -ressourcen) aus. Bezüglich der Informationsselektion nehmen modulare Theorien einen parallel-multiplen Vergleichsprozess zur Bestimmung der aktivsten (der aufgabenrelevantesten) Signale an (s. auch Theorien zentraler Kapazität).

Paradigma der visuellen Suche (*visual search paradigm*) ein in der Aufmerksamkeitsforschung weit verbreiteter experimenteller Ansatz, in dem einer Versuchsperson visuelle Reize dargeboten werden, unter denen sich neben einer (variablen) Anzahl von Ablenk- oder Distraktorreizen ein Zielreiz befindet (typischerweise in der Hälfte der Durchgänge). Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, so schnell wie möglich eine Zielreiz-anwesend- bzw. -abwesend-Entscheidung zu treffen.

Paradigma des dichotischen Hörens (*dichotic listening paradigm*; auch *shadowing paradigm*) Experimentelles Vorgehen, bei dem dem linken und dem rechten Ohr einer Versuchsperson gleichzeitig je eine „Nachricht" dargeboten wird, wobei sich die Nachrichten hinsichtlich verschiedener Charakteristika (von physikalischen bis semantischen) unterscheiden können. Eine der Nachrichten ist zu beschatten, d. h. laut nachzusprechen. Erhoben wird, inwieweit die Versuchsperson der nichtbeachteten Nachricht „gewahr" wird, was oft im Sinne der Häufigkeit der Entdeckung von prädefinierten Zielreizwörtern in dieser Nachricht operationalisiert wird; weiterhin kann gemessen werden, inwieweit die nichtbeachtete Nachricht auch unbewusst verarbeitet wird.

Parallele Suche (*parallel search*) Die Suchzeit in Relation zur Anzahl der Reize im Suchdisplay wird als ein Hinweis auf die beteiligten Suchmechanismen interpretiert. Suchzeiten ≤ 10 ms/Item werden dabei als Indikator dafür angesehen, dass alle Items im Display simultan, d. h. parallel, abgesucht werden (s. auch serielle Suche).

Performance-Operating-Characteristic-Kurve (POC-Kurve) Ein aufgabendiagnostisches Werkzeug zur Leistungsanalyse in Doppelperformanzaufgaben, wobei die Abbildung der Leistung (bzw. der dafür eingesetzten Ressourcen) in einer Aufgabe als Funktion der Leistung (bzw. der dafür investierten Ressourcen) in der anderen Aufgabe erfolgt.

Performance-Resource-Funktionen (PRF; *performance resource function*) Wichtiges Werkzeug zur Leistungsanalyse in Doppelperformanzaufgaben, wobei die Abbildung der Leistung als Funktion der eingesetzten Ressourcen erfolgt.

Perzeptive Selektion (*perceptual selection*) Die Funktion der Auswahl bestimmter Information auf der Stufe der Wahrnehmung mit dem Ziel, diese Information dem Bewusstsein bzw. der Steuerung von Denken und Handeln zugänglich zu machen.

Psychologische Refraktärperiode (PRP; *psychological refractory period*) Empirische Beobachtung, dass die Reaktionszeit auf den zweiten Reiz von zwei aufeinanderfolgenden Reizen von der Zeitverzögerung zwischen dem Darbietungsbeginn des ersten Reizes und dem des zweiten Reizes abhängt, und Interpretation im Sinne eines zentralen Engpasses (*bottleneck*) in der menschlichen Informationsverarbeitungskapazität.

Rezeptives Feld (RF; *receptive field*) Das rezeptive Feld eines visuellen Neurons bezieht sich auf den Ausschnitt des visuellen Feldes bzw. der Retina, in dem ein Stimulus die Antwort der Zelle verändert, wobei die Größe des rezeptiven Feldes mit zunehmender Hierarchieebene des visuellen Systems zunimmt.

Selektion in der Zeit (*temporal selection*) Prozesse der temporalen Selektion umfassen sowohl passive als auch aktive Effekte. Der passive Mechanismus der Aufmerksamkeitskaperung orientiert die Aufmerksamkeit auf ein neu dargebotenes Objekt, selbst wenn sich ein Merkmal schon im Display vorhandener Objekte gleichzeitig mit dem Beginn der Darbietung des neuen Objekts verändert. Aktive Priorisierung findet sich in der Vorschaubedingung bei Konjunktionssuchen, bei denen alte (schon im Display vorhandene) Items visuell markiert und von der Verarbeitung ausgeschlossen werden, wenn neue Items in einem Suchdisplay auftauchen.

Selektive Aufmerksamkeit (*selective attention*) Bezeichnung für alle kognitiven und neuronalen Mechansimen der Auswahl einer definierten, zur effizienten und störungsfreien Handlungssteuerung erforderlichen Informationsmenge aus einer großen Menge visueller, auditiver, taktiler, olfaktorischer etc. Reize.

Serielle Suche (*serial search*) Die Suchzeit in Relation zur Anzahl der Reize im Suchdisplay wird als ein Hinweis auf die beteiligten Suchmechanismen interpretiert. Bei linear ansteigenden Suchfunktionen (Suchrate > 10 ms/Item) nimmt man an, dass die einzelnen Display-Items sukzessive, d. h. seriell, abgesucht werden (s. auch paralle Suche).

Spatial-Cueing-Paradigma (*spatial cueing paradigm*) Experimentelles Vorgehen, bei dem vor der Darbietung eines Stimulus ein Hinweisreiz (*cue*) mit einer bestimmten Validität auf ausgewählte Charakteristika des eigentlichen Reizes hinweist. Wichtig ist die Unterscheidung in symbolische und direkte Hinweisreize. Aus invaliden bzw. validen Hinweisreizen resultieren Leistungskosten bzw. -gewinne.

Stroop-Effekt (*Stroop effect*) Bezeichnung (nach J. R. Stroop 1935) für die asymmetrische Interferenz beim Benennen der Farbe eines bunt gedruckten Farbwortes, wenn die Wortinformation mit der Farbe nicht kompatibel ist.

Theorien dimensionsbasierter visueller Aufmerksamkeit (*dimension-based theories of visual attention*) Theorien der selektiven Aufmerksamkeit, die postulieren, dass Selektion aufgrund bestimmter, in eine endliche Anzahl von basalen Dimensionen organisierten Objekteigenschaften (z. B. Farbe, Helligkeit, Orientierung, Bewegung) erfolgt, bzw. dass Aufmerksamkeit zu einer gegebenen Zeit nur auf eine begrenzte Zahl von Dimensionen gerichtet werden kann.

Theorien früher Selektion (*early selection theories*) Diese theoretischen Ansätze gehen davon aus, dass Information zu einem frühen Zeitpunkt in der Verarbeitung aufgrund physikalischer Eigenschaften selektiert wird (s. auch späte Selektion).

Theorien objektbezogener visueller Aufmerksamkeit (*object-based theories of visual attention*) Theorien der selektiven Aufmerksamkeit, die annehmen, dass Aufmerksamkeit nicht auf einen (abstrakten) Ort, sondern auf ein bestimmtes Objekt an einem bestimmten Ort ausgerichtet wird, bzw. dass Aufmerksamkeit nur auf ein oder einige wenige Objekte zu einer gegebenen Zeit gerichtet werden kann. Objektbezogene Ansätze postulieren, dass alle Eigenschaften der beachteten Objekte gleichzeitig selektiert werden.

Theorien ortsbasierter visueller Aufmerksamkeit (*space-based theories of visual attention*) Theorien der selektiven Aufmerksamkeit, die davon ausgehen, dass Aufmerksamkeit zu einer gegebenen Zeit nur auf einen oder einige wenige Orte im visuellen Feld gerichtet werden kann. Jede visuelle Information, die sich an diesen Orten befindet, wird selektiert.

Theorien später Selektion (*late selection theories*) Diese theoretischen Ansätze nehmen an, dass Information aufgrund semantischer Kriterien ausgewählt wird (s. auch frühe Selektion).

Theorien zentraler Kapazität (*central capacity theories*) Diese Theorien gehen von einem einzigen zentralen Allzweckprozessor mit limitierter Kapazität (GPLCP = *general-purpose limited-capacity central processor*) aus.

Unaufmerksamkeitsblindheit (*inattentional blindness*) Die Identifikation eines zusätzlich dargebotenen Objekts gelingt nicht, wenn eine schwierige Diskriminationsaufgabe gelöst werden muss. Erklärungen gehen davon aus, dass dem Ausschnitt des visuellen Feldes, in dem eine Veränderung erfolgt, selektive Aufmerksamkeit zugewiesen werden muss, damit die Veränderung wahrgenommen bzw. in eine Gedächtnisrepräsentation überführt werden kann.

Ventraler Pfad der neuronalen visuellen Verarbeitung (*ventral cortical pathway*) Dieser Pfad, auch als Was-Pfad bezeichnet, umfasst hauptsächlich Funktionen der Berechnung lokaler visueller Attribute wie Farbe, Form und Textur und in höheren Stufen die form- und farbbasierte Erkennung bzw. Kategorisierung ganzer Objekte (s. auch dorsaler Pfad).

Veränderungsblindheit (*change blindness*) Ausgeprägte Veränderungen eines Objekts oder Objektmerkmals werden oft übersehen werden, wenn sie nicht im Aufmerksamkeitsfokus stehen. Erklärungen gehen davon aus, dass dem Ausschnitt des visuellen Feldes, in dem eine Veränderung erfolgt, selektive Aufmerksamkeit zugewiesen werden muss, damit die Veränderung wahrge-

nommen bzw. in eine Gedächtnisrepräsentation überführt werden kann.

Weiterführende Literatur

Buchserie *Attention and Performance*. (Proceedings der einflussreichen Symposien der Society for the Study of Attention and Performance.)

Gazzaniga, M. S. (Ed.) (2004). *The cognitive neurosciences III* (third edition) – *Attention (Section V)*. Cambridge, MA: MIT Press. (Umfassende Sammlung von grundlagenorientierten Artikeln zur aktuellen Forschung im Bereich der Kognitiven Neurowissenschaften.)

Neumann, O. & Sanders, A. F. (Eds.) (1996). *Aufmerksamkeit* (*Enzyklopädie der Psychologie, Bd. 2*). Göttingen: Hogrefe. (Überblick über alle wichtigen Bereiche der Aufmerksamkeitsforschung unter Einbezug experimentalpsychologischer und psychophysiologischer Befunde.)

Neumann, O. & Sanders, A. F. (Eds.) (1996). *Handbook of perception and action (Vol. 3): Attention.* London: Academic Press. (Umfassende Darstellung attentionaler Selektions- und Kontrollmechanismen unter Einbezug elektrophysiologischer Ansätze.)

Pashler, H. E. (1998). *Attention*. Hove, UK: Psychology Press. (Sammlung hervorragender tutorialartiger Überblicksartikel von führenden Aufmerksamkeitsforschern.)

Pashler, H. E. (1998). *The psychology of attention*. Cambridge, MA: MIT Press. (Jon Duncan: „[Pashler's] book can serve as a definitive statement of what has been done, and the basis this will provide for the investigations of the future.")

Schneider, W. X. & Mojzisch, A. (2002). Visuelle Aufmerksamkeit und kognitive Neurowissenschaft: Befunde und Mechanismen. In M. Eimer & T. Goschke (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaft* (*Enzyklopädie der Psychologie, Serie „Kognition", Bd. 5*). Göttingen: Hogrefe (im Druck). (Exzellenter Überblicksartikel über die kognitive Neurowissenschaft der visuellen Aufmerksamkeit.)

Styles, E. A. (1997). *The psychology of attention*. Hove, UK: Psychology Press. (Alan Allport: „[This book] covers a vast area of research that is notoriously difficult for students to tackle, and it does so in a delightfully clear, friendly, and accessible style. […] I shall give it to all my intermediate and advanced students including graduate students.")

Van der Heijden, A. H. C. (1992). *Selective attention in vision*. London: Routledge. (Synthese experimentalpsychologischer Ansätze, die seiner Zeit voraus war.)

Wright, R. D. & Ward, L. M. (2008). *Orienting of Attention*. New York: Oxford University Press. Michael I. Posner: „*Orienting of Attention* is a very good book. It represents an impressive, nearly encyclopedic survey of attention shifts, their relation to the underlying brain anatomy and to the eye movement system. […]")

Literatur

Allport, D. A. (1971). Parallel encoding within and between elementary stimulus dimensions. *Perception & Psychophysics*, *10*, 104–108.

Allport, D. A. (1980). Attention and performance. In G. Claxton (Hrsg.), *Cognitive psychology. New directions* (S. 112–153). London: Routledge & Kegan Paul.

Allport, D. A. (1987). Selection for action: Some behavioural and neurophysiological considerations of attention and action. In H. Heuer, & A. F. Sanders (Hrsg.), *Perspectives on perception and action* (S. 395–419). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Allport, D. A. (1989). Visual attention. In M. A. Posner (Hrsg.), *Foundations of cognitive science* (S. 631–682). Cambridge, MA: MIT Press.

Allport, D. A., Antonis, B., & Reynolds, P. (1972). On the division of attention: A disproof of the single channel hypothesis. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *24*, 225–235.

Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umiltà, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and Performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 421–452). Cambridge, MA: MIT Press.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence, & J. T. Spence (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (S. 89–185). New York: Academic Press.

Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Baldassi, S., & Verghese, P. (2005). Attention to locations and features: Different top-down modulation of detector weights. *Journal of Vision*, *56*, 556–570.

Baylis, G. C., & Driver, J. (1993). Visual attention and objects: Evidence for hierarchical coding of location. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *19*, 451–470.

Beck, A. T., Rush, A. J., Shaw, B. F., & Emery, G. (1992). *Kognitive Therapie der Depression*. München: Psychologie Verlags Union.

Behrmann, M., & Tipper, S. P. (1999). Attention accesses multiple reference frames: Evidence from visual neglect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 83–101.

Broadbent, D. (1954). The role of auditory localization in attention and memory span. *Journal of Experimental Psychology*, *47*, 191–196.

Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. London: Pergamon Press.

Broadbent, D. E. (1982). Task combination and selective intake of information. *Acta Psychologica*, *50*, 253–290.

Bundesen, C., Habekost, T., & Kyllingsbæk, S. (2005). A neural theory of visual attention. Bridging cognition and neurophysiology. *Psychological Review*, *112*, 291–328.

Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, *97*, 523–547.

Bundesen, C. (1998). Visual selective attention: Outlines of a choice model, a race model, and a computational theory. *Visual Cognition*, *5*, 287–309.

Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, *51*, 1484–1525.

Carrasco, M. (2014). Spatial Attention: Perceptual modulation. In S. Kastner, & A. C. Nobre (Hrsg.), *The Oxford Handbook of Attention* (S. 183–230). Oxford, UK: Oxford University Press.

Cave, K. R., & Wolfe, J. M. (1990). Modeling the role of parallel processing in visual search. *Cognitive Psychology*, *22*, 225–271.

Cheal, M., Lyon, D. R., & Gottlob, L. R. (1994). A framework for understanding the allocation of attention in location-precued discrimination. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *47A*, 699–739.

Chelazzi, L., Duncan, J., Miller, E., & Desimone, R. (1993). A neural basis for visual search in inferior temporal Cortex. *Nature*, *363*, 345–347.

Cheng, P. W. (1985). Restructuring versus automaticity: Alternative accounts of skill acquisition. *Psychological Review*, *92*, 414–423.

Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech with one and two ears. *Journal of the Acoustical Society of America*, *25*, 975–979.

Clark, V. P., & Hillyard, S. A. (1996). Spatial selective attention affects early extrastriate but not striate components of the visual evoked potential. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*, 387–402.

Clemens, B., Zvyagintsev, M., Sack, A. T., Heinecke, A., Willmes, K., & Sturm, W. (2013). Comparison of fMRI activation patterns for test and training proce-

dures of alertness and focused attention. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *31*, 311–336.
Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1999). Space and attention in parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, *22*, 319–349.
Connor, C. E., Preddie, D. C., Gallant, J. L., & Van Essen, D. C. (1997). Spatial attention effects in macaque area V4. *Journal of Neuroscience*, *17*, 3201–3214.
Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 201–215.
Corbetta, M., Miezin, F. M., Dobmeyer, G., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1991). Selective and divided attention during visual discrimination of shape, color and speed: Functional anatomy of positron emission tomography. *Journal of Neuroscience*, *11*, 2383–2402.
Corbetta, M., Miezin, F. M., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1993). A PET-study of visuospatial attention. *Journal of Neuroscience*, *13*, 1202–1226.
Corbetta, M., Kincade, J. M., Ollinger, J. M., McAvoy, M. P., & Shulman, G. L. (2000). Voluntary orienting is dissociated from target detection in human posterior parietal cortex. *Nature Neuroscience*, *3*, 292–297.
Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, *58*, 306–324.
Coull, J. T., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. J., & Grasby, P. M. (1996). A fronto-parietal network for rapid visual information processing: a PET study of sustained attention and working memory. *Neuropsychologia*, *34*, 1085–1095.
Cowan, N. (1997). *Attention and memory*. Oxford, UK: Oxford University Press.
David, S. V., Hayden, B. Y., Mazer, J. A., & Gallant, J. L. (2008). Attention to stimulus features shifts spectral tuning of V4 neurons during natural vision. *Neuron*, *59*, 509–521.
DeGutis, J. M., & Van Vleet, T. M. (2010). Tonic and phasic alertness training: a novel behavioral therapy to improve spatial and non-spatial attention in patients with hemispatial neglect. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 1–17.
Dennett, D. C. (2003). True believers: the intentional strategy and why it works. In T. O'Connor, & D. Robb (Hrsg.), *Philosophy of Mind: Contemporary Readings* (S. 370–390). London, UK: Routledge.
Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*, 193–222.
Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1989). Neural mechanisms of visual processing in monkeys. In F. Boller, & J. Grafman (Hrsg.), *Handbook of Neurophysiology* (Bd. 2, S. 267–299). Amsterdam: Elsevier.. chapter 14
Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, *36*, 1827–1837.
Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, *70*, 80–90.
Deutsch, J. A., & Deutsch, D. (1967). Comments on „Selective attention: Perception or response?". *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *19*, 362–363.
Diamond, S. J. (1979). Performance by split-brain humans on lateralized vigilance tasks. *Cortex*, *15*, 43–50.
Downing, C. J. (1988). Expectancy and visual-spatial attention: Effects on perceptual quality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*, 188–202.
Downing, P. E., Dodds, C. M., & Bray, D. (2004). Why does the gaze of others direct attention. *Visual Cognition*, *11*, 71–79.
Driver, J. (1999). Egocentric and object-based visual neglect. In N. Burgess, K. J. Jeffery, & J. O. O'Keefe (Hrsg.), *The hippocampal and parietal foundations of spatial cognition* (S. 67–89). Oxford, UK: Oxford University Press.
Driver, J., & Halligan, P. W. (1991). Can visual neglect operate in object centred co-ordinates? An affirmative case study. *Cognitive Neuropsychology*, *8*, 475–496.
Driver, J., & Mattingley, J. B. (1998). Parietal neglect and visual awareness. *Nature Neuroscience*, *1*, 17–22.
Duncan, J. (1979). Divided attention: The whole is more than the sum of its parts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *5*, 216–228.
Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, *114*, 501–517.
Duncan, J. (1996). Cooperating brain systems in selective perception and action. In T. Inui, & J. L. McClelland (Hrsg.), *Attention and performance XVI Information integration in perception and communication* (S. 549–578). Cambridge, MA: MIT Press.
Duncan, J. (2000). Visual attention in mind and brain. In J. J. Bolhuis (Hrsg.), *Brain Mechanisms of Perception, Learning and Memory*. Oxford: Oxford University Press.
Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, *96*, 433–458.
Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1992). Beyond the search surface: Visual search and attentional engagement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 578–588.
Duncan, J., Bundesen, C., Olson, A., Humphreys, G., Chavda, S., & Shibuya, H. (1999). Systematic analysis of deficits in visual attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*, 450–478.
Eglin, M., Robertson, L. C., & Knight, R. T. (1989). Visual search performance in neglect syndrome. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *1*, 372–385.
Eimer, M. (1997). Uninformative symbolic cues may bias visual-spatial attention: Behavioral and electrophysiological evidence. *Biological Psychology*, *46*, 67–71.
Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, *16*, 143–149.
Eriksen, C. W., & James, S. J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, *40*, 225–240.
Eriksen, C. W., & Yeh, Y.-Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *11*, 583–587.
Eysenck, M. W., & Keane, M. T. (1995). *Cognitive psychology: A student's handbook*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
Fagot, C., & Pashler, H. (1992). Making two responses to a single object: Exploring the central bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 1058–1079.. s. Errata, gleiches Journal, *19*, 443
Fecteau, J. H., & Munoz, D. P. (2006). Salience, relevance, and firing: a priority map for target selection. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 382–390.
Felleman, & Van Essen, D. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, *1*, 1–47.
Fernandez-Duque, D., & Posner, M. I. (2001). Brain imaging of attentional networks in normal and pathological states. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *23*, 74–93.
Fischer, B., & Weber, H. (1993). Express saccades and visual attention. *Behavioral and Brain Sciences*, *16*, 553–567.
Folk, C. L., Remington, R. W., & Johnston, J. C. (1992). Involuntary covert orienting is dependent on attentional control settings. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 1030–1044.
Friesen, C. K., & Kingstone, A. (1998). He eyes have it! Reflexive orienting is triggered by nonpredictive gaze. *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*, 490–495.
Friesen, C. K., & Kingstone, A. (2003). Abrupt onsets and gaze direction cues trigger independent reflexive attention effects. *Cognition*, *87*, B1–B10.
Gitelman, D. R., Nobre, A. C., Parrish, T. B., LaBar, K. S., Kim, Y.-H., Meyer, J. R., & Mesulam, M.-M. (1999). A large-scale distributed network for covert spatial attention. *Brain*, *122*, 1093–1106.
Gopher, D., & Navon, D. (1980). How is performance limited? Testing the notion of central capacity. *Acta Psychologica*, *46*, 161–180.
Hamed, B. S., Duhamel, J. R., Bremmer, F., & Graf, W. (2002). Visual receptive field modulation in the lateral intraparietal area during attentive fixation and free gaze. *Cerebral Cortex*, *12*, 234–245.
Hampson, P. J. (1989). Aspects of attention and cognitive science. *The Irish Journal of Psychology*, *10*, 261–275.
Harris, A., Becker, S., & Remington, R. (2015). Capture by color: Evidence for dimension-specific singleton capture. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 77, 2305–2321.
Harter, M. R., & Previc, F. H. (1978). Size-specific information channels and selective attention: Visual evoked potential and behavioral measures. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *45*, 628–640.
Hawkins, H. L., Shafto, M. G., & Richardson, K. (1988). Effects of target luminance and cue-validity on the latency of visual detection. *Perception & Psychophysics*, *44*, 484–492.
Hazeltine, E., Teague, D., & Ivry, R. (2000). *Dual-task Performance During Simultaneous Execution: Evidence for Concurrent Response Selection Processes*.

Poster at the Annual Meeting of the Society of Cognitive Neuroscience, San Francisco, 8.4.–11.4.2000.

Heinze, H. J., Luck, S. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays: I Evidence for early selection. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *75*, 511–527.

Heinze, H. J., Mangun, G. R., Burchert, W., Hinrichs, H., Scholz, M., Muente, T. F., Goes, A., Scherg, M., Johannes, S., Hundeshagen, H., Gazzaniga, M. S., & Hillyard, S. A. (1994). Combined spatial and temporal imaging of brain activity during visual selective attention in humans. *Nature*, *372*, 543–546.

Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, *95*, 781–787.

Hillyard, S. A., Anllo-Vento, L., Clark, V. P., Heinze, H. J., Luck, S. J., & Mangun, G. R. (1996). Neuroimaging approaches to the study of visual attention: A tutorial. In A. F. Kramer, M. G. H. Coles, & G. D. Logan (Hrsg.), *Converging operations in the study of visual selective attention* (S. 107–138). Washington, DC: American Psychological Association.

Hirst, W., Spelke, E. S., Reeves, C., Caharack, G., & Neisser, U. (1980). Dividing attention without alternation or automaticity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 98–117.

Hoffman, J. E., & Subramaniam, B. (1995). Saccadic eye movements and visual selective attention. *Perception & Psychophysics*, *57*, 787–795.

Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H., & Mangun, G. R. (2000). The neual mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, *3*, 284–291.

Humphreys, G. W., Watson, D. G., & Jolicœur, P. (2002). Fractionating the preview benefit in search: Dual-task decomposition of visual marking by timing and modality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 640–660.

Husain, M., & Rorden, C. (2003). Non-spatially lateralized mechanisms in hemispatial neglect. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*, 26–36.

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. New York: Holt.

Johnston, W. A., & Heinz, S. P. (1978). Flexibility and capacity demands of attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, *107*, 420–435.

Johnston, W. A., & Heinz, S. P. (1979). Depth of nontarget processing in an attention task. *Journal of Experimental Psychology*, *5*, 168–175.

Johnston, W. A., & Wilson, J. (1980). Perceptual processing of non-targets in an attention task. *Memory & Cognition*, *8*, 372–377.

Jolicœur, P., Tombu, M., Oriet, C., & Stevanovski, B. (2002). From perception to action: Making the connection. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Common mechanisms in perception and action: Attention & performance XIX* (S. 558–586). Oxford: Oxford University Press.

Jonides, J. (1980). Voluntary versus automatic control over the mind's eye's movement. In J. B. Long, & A. D. Baddeley (Hrsg.), *Attention & Performance IX* (S. 187–203). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Jonides, J., & Yantis, S. (1988). Uniqueness of abrupt visual onset in capturing attention. *Perception & Psychophysics*, *43*, 346–354.

Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. New York: Prentice Hall.

Kahneman, D., & Henik, A. (1981). Perceptual organization and attention. In M. Kubovy, & J. R. Pomerantz (Hrsg.), *Perceptual organization* (S. 181–211). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Karnath, H.-O. (1988). Deficits of attention in acute and recovered visual hemineglect. *Neuropsychologia*, *26*, 27–43.

Karnath, H.-O., & Niemeier, M. (2002). Task-dependent differences in the exploratory behaviour of patients with spatial neglect. *Neuropsychologia*, *40*, 1577–1585.

Karnath, H.-O., Ferber, S., & Himmelbach, M. (2001). Spatial awareness is a function of the temporal not the posterior parietal lobe. *Nature*, *411*, 950–953.

Koski, L. M., Paus, T., & Petrides, M. (1998). Directed attention after unilateral frontal excisions in humans. *Neuropsychologia*, *36*, 1363–1371.

Kowler, E., Anderson, E., Dosher, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, *35*, 1897–1916.

Kramer, A. F., Weber, T. A., & Watson, S. E. (1997). Object-based attentional selection – Grouped arrays or spatially invariant representations?: Comment on Vecera and Farah (1994). *Journal of Experimental Psychology: General*, *50*, 267–284.

Krummenacher, J., & Müller, H. J. (2012). Dynamic weighting of feature dimensions in visual search: behavioral and psychophysiological evidence. *Frontiers in Psychology*, *3*(221), 1–12.

LaBerge, D., & Brown, V. (1989). Theory of attentional operations in shape identification. *Psychological Review*, *96*, 101–124.

Lambert, A., & Duddy, M. (2002). Visual orienting with central and peripheral precues: Deconfounding the contributions of cue eccentricity, cue discrimination and spatial correspondence. *Visual Cognition*, *9*, 303–336.

Lambert, A., Spencer, E., & Mohindra, N. (1987). Automaticity and the capture of attention by a peripheral display change. *Current Psychological Research and Reviews*, *6*, 136–147.

Lamme, V. A. F., & Roelfsema, P. R. (2000). The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing. *Trends in Neurosciences*, *23*, 571–579.

Langner, R., & Eickhoff, S. B. (2013). Sustaining attention to simple tasks: A meta-analytic review of the neural mechanisms of vigilant attention. *Psychological Bulletin*, *139*, 870.

Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. Journal of Experimental Psychology. *Human Perception and Performance*, *21*, 451–468.

Lavie, N., Beck, D. M., & Konstantinou, N. (2014). Blinded by the load: attention, awareness and the role of perceptual load. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*, 1–10.

Leibovitch, F. S., Black, S. E., Caldwell, C. B., Ebert, P. L., Ehrlich, L. E., & Szalai, J. P. (1998). Brain-behavior correlations in hemispatial neglect using CT and SPECT The Sunnybrook stroke study. *Neurology*, *50*, 901–908.

Lepsien, J., & Pollmann, S. (2002). Covert reorient-ing and inhibition of return: An event-related fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 127–144.

Ling, S., Liu, T., & Carrasco, M. (2009). How spatial and feature-based attention affect the gain and tuning of population responses. *Vision Research*, *49*, 1194–1204.

Liu, T., Slotnick, S. D., Serences, J. T., & Yantis, S. (2003). Cortical mechanisms of feature-based attentional control. *Cerebral Cortex*, *13*, 1334–1343.

Livingstone, M., & Hubel, D. (1988). Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception. *Science*, *240*, 740–749.

Logan, G. D. (1988). Towards an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492–527.

Logan, G. D. (1996). The CODE theory of visual attention: An integration of space-based and object-based attention. *Psychological Review*, *103*, 603–649.

Logan, G. D., & Gordon, R. D. (2001). Executive control of visual attention in dual-task situations. *Psychological Review*, *108*, 393–434.

Luck, S. J., Chelazzi, L., Hillyard, S. A., & Desimone, R. (1997). Neural mechanisms of spatial selective attention in areas V1, V2, and V4 of macaque visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, *77*, 24–42.

Mack, A., & Rock, I. (1998). *Inattentional blindness*. Cambridge, MA: MIT Press.

Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance durning prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *1*, 6–21.

MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, *109*, 163–203.

Malhotra, P., Coulthard, E. J., & Husain, M. (2009). Role of right posterior parietal cortex in maintaining attention to spatial locations over time. *Brain*, *132*, 645–660.

Mangun, G. R., Hillyard, S. A., & Luck, S. J. (1993). Electrocortical substrates of visual selective attention. In D. Meyer, & S. Kornblum (Hrsg.), *Attention and Performance XIV* (S. 219–243). Cambridge (MA): MIT Press.

Mangun, G. R., Hopfinger, J. B., Kussmaul, C. L., Fletcher, E. M., & Heinze, H. J. (1997). Covariations in ERP and PET measures of spatial selective attention in human extrastriate visual cortex. *Human Brain Mapping*, *5*, 273–279.

Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco, CA: Freeman.

Martinez-Trujillo, J. C., & Treue, S. (2004). Feature-based attention increases the selectivity of population responses in primate visual cortex. *Current Biology*, *14*, 744–751.

Martinez, A., Anllo-Vento, L., Sereno, M. I., Frank, L. R., Buxton, R. B., Dubowitz, D. J., Wong, E. C., Hinrichs, H., Heinze, H. J., & Hillyard, S. A. (1999). Involvement of striate and extrastriate visual cortical areas in spatial attention. *Nature Neuroscience*, *4*, 364–369.

Matthias, E., Bublak, P., Müller, H. J., Schneider, W. X., Krummenacher, J., & Finke, K. (2010). The influence of alertness on spatial and nonspatial components of visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*, 38–56.

Maylor, E. A., & Hockey, R. (1985). Inhibitory component of externally controlled covert orienting in visual space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *11*, 777–787.

McAdams, C. J., & Maunsell, J. H. (1999). Effects of attention on orientation-tuning functions of single neurons in macaque cortical area V4. *Journal of Neuroscience*, *19*, 431–441.

McGlinchey-Berroth, R., Milberg, W. P., Verfaellie, M., Alexander, M., & Kilduff, P. T. (1993). Semantic processing in the neglected visual field: Evidence from a lexical decision task. *Cognitive Neuropsychology*, *10*, 79–108.

McLeod, P. D. (1977). A dual task response modality effect: Support for multiprocessor models of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *29*, 651–667.

McLeod, P. D., & Posner, M. I. (1984). Priviledged loops from percept to act. In H. Bouma, & D. G. Bouwhuis (Hrsg.), *Attention and Performance X Control of language processes* (S. 55–66). Hove: Lawrence Erlbaum Associates.

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. New York: Oxford University Press.

Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414–417.

Moll, K., Cardillo, E., & Utman, J. A. (2002). *Effects of Competing Speech on Sentence-Word Priming: Semantic, Perceptual, and Attentional Factors*. Unpublished manuscript, Department of Experimental Psychology, University of Oxford, UK

Moran, J., & Desimone, R. (1985). Selective attention gates visual processing in the extrastriate cortex. *Science*, *229*, 782–784.

Moran, R., Zehetleitner, M., Müller, H. J., & Usher, M. (2013). Competitive guided search: Meeting the challenge of benchmark RT distributions. *Journal of Vision*, *13*(8), 1–31.. 24

Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *11*, 56–60.

Moray, N. (1967). Where is capacity limited? A survey and a model. *Acta Psychologica*, *27*, 84–92.

Motter, B. C. (1994a). Neural correlates of attentive selection for color or luminance in extrastriate area V4. *Journal of Neuroscience*, *14*, 2178–2189.

Motter, B. C. (1994b). Neural correlates of feature selective memory and pop-out in extrastriate area V4. *Journal of Neuroscience*, *14*, 2190–2199.

Müller, H. J., & Humphreys, G. W. (1991). Luminance increment detection: Capacity-limited or not? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *17*, 107–124.

Müller, H. J., & O'Grady, R. (2000). Dimension-based visual attention modulates dual-judgment accuracy in Duncan's (1984) one-versus two-object judgment paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 1332–1351.

Müller, H. J., & O'Grady, R. B. (2009). Object-based selection operating on a spatial representation made salient by dimensional segmentation mechanisms: A re-investigation of Egly and Homa (1984). *Psychological Research*, *73*, 271–286.

Müller, H. J., & Rabbitt, P. M. A. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention: Time course of activation and resistance to interruption. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 315–330.

Müller, H. J., & Von Mühlenen, A. (2000). Probing distractor inhibition in visual search: Inhibition of return (IOR). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 1591–1605.

Müller, H. J., Heller, D., & Ziegler, J. (1995). Visual search for singleton feature targets within and across feature discriminations. *Perception & Psychophysics*, *57*, 1–17.

Müller, H. J., Reimann, B., & Krummenacher, J. (2003). Visual search for singleton feature tar- gets across dimensions: stimulus- and expectancy-driven effects in dimensional weighting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *29*, 1021–1035.

Neumann, J. von (1945). *Theory and Techniques for Design of Electronic Digital Computers* (Draft of a Report on the EDVAC, Contract No. W-670-ORD-492, Moore School of Electrical Engineering, Univ. of Penn., Philadelphia). Reprinted (in part) in B. Randell (Ed.) (1982). *Origins of Digital Computers: Selected Papers* (pp. 383–392). Berlin: Springer-Verlag.

Neumann, O. (1984). Automatic processing: A review of recent findings and a plea for an old theory. In W. Prinz, & A. F. Sanders (Hrsg.), *Cognition and motor processes* (S. 255–293). Berlin: Springer.

Neumann, O. (1987). Beyond capacity: A functional view of attention. In H. Heuer, & A. Sanders (Hrsg.), *Perspectives on perception and action* (S. 361–394). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Neumann, O., & Klotz, W. (1994). Motor responses to nonreportable, masked stimuli: Where is the limit of direct parameter specification? In C. Umiltà, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and Performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 123–150). Cambridge, MA: MIT Press.

Nobre, A. C., Coul, J. T., Frith, C. D., & Mesulam, M. M. (1999). Orbitofrontal cortex is activated during breaches of expectation in tasks of visual attention. *Nature Neuroscience*, *2*, 11–12.

Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processing. *Cognitive Psychology*, *7*, 44–64.

Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Hrsg.), *Consciousness and self-regulation. Advances in research and theory* (S. 1–18). New York: Plenum Press.

O'Regan, J. K. (1992). Solving the„real" mysteries of visual perception: the world as an outside memory. *Canadian Journal of Psycholgy*, *46*, 461–488.

O'Regan, J. K., Deubel, H., Clark, J. J., & Rensink, R. A. (2000). Picture changes during blinks: Looking without seeing and seeing without looking. *Visual Cognition*, *7*, 191–212.

O'Craven, K. M., Downing, P. E., & Kanwisher, N. (1999). fMRI evidence for objects as the units of attentional selection. *Nature*, *401*, 584–587.

Oeffelen, M. P. van, & Vos, P. G. (1983). An algorithm for pattern description on the level of relative proximity. *Pattern Recognition*, *16*, 341–348.

Oram, M. W., & Perrett, D. I. (1994). Modeling visual recognition from neurobiological constraints. *Neural Networks*, *7*, 945–972.

Parasuraman, R. (1986). Vigilance, monitoring, and search. In K. Boff, L. Kaufmann, & J. Thomas (Hrsg.), *Cognitive Processes and Performance* Handbook of Perception and Performance, (Bd. 2, S. 43–39). New York: Wiley.

Parasuraman, R., Warm, J. S., & See, J. E. (1998). Brain systems of vigilance. In R. Parasuraman (Hrsg.), *The Attentive Brain* (S. 221–256). Cambridge: MIT Press.

Pashler, H. (1990). Do response modality effects support multi-processor models of divided attention? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 826–842.

Pashler, H. (1993). Dual-task interferenc and elementary mental mechanisms. In D. E. Meyer, & S. M. Kornblum (Hrsg.), *Attention and Performance XIV Synergies in experimental psychology, artificial intelligence, and cognitive neuroscience* (S. 245–264). Cambridge, MA: MIT Press.

Paus, T., Zatorre, R., Hofle, N., Caramanos, Z., Gotman, J., Petrides, M., & Evans, A. (1997). Time-related changes in neural systems underlying attention and arousal during the performance of an auditory vigilance task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*, 392–408.

Pelli, D. G. (2008). Crowding: a cortical constraint on object recognition. *Current Opinion in Neurobiology*, *18*, 445–451.

Pollmann, S., Weidner, R., Müller, H. J., & Cramon, D. Y. von (2000). A fronto-posterior network involved in visual dimension changes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 480–494.

Posner, M. I. (1978). *Chronometric explorations of Mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*, 3–25.

Posner, M. I. (1988). Structures and functions of selective attention. In T. Boll, & B. Bryant (Hrsg.), *Master lectures in clinical neuropsychology and brain function: research, measurement, and practice* (S. 173–202). Washington, DC: American Psychological Association.

Posner, M. I. (2008). Annals of the New York Academy of Sciences. *Measuring alertness*, *1129*, 193–199.

Posner, M. I., & Boies, S. J. (1971). Components of attention. *Psychological Review*, *78*, 391–408.

Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma, & D. G. Bouwhuis (Hrsg.), *Attention and Performance X* (S. 531–556). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Reviews in Neuroscience*, *13*, 25–42.
Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Hrsg.), *Information processing and cognition. The Loyola Symposium* (S. 55–85). Hillsdale, NJ: Lawrenc Erlbaum Associates.
Posner, M. I., Snyder, C. R. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 160–174.
Posner, M. I., Walker, J. A., Friedrich, F. J., & Rafal, R. D. (1984). Effects of parietal injury on covert orienting of attention. *Journal of Neuroscience*, *4*, 1863–1874.
Posner, M. I., Peterson, S. E., Fox, P. T., & Raichle, M. E. (1988). Localization of cognitive operations in the human brain. *Science*, *240*, 1627–1631.
Previc, F. H., & Harter, M. R. (1982). Electrophysiological and behavioral indicants of selective attention to multifeature gratings. *Perception & Psychophysics*, *32*, 465–472.
Rafal, R. D., Calabresi, P. A., Brennan, C. W., & Sciolto, T. K. (1989). Saccade preparation inhibits reorienting to recently attended locations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 673–685.
Raymond, J., Shapiro, K., & Arnell, K. (1992). Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 849–860.
Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, *8*, 368–373.
Ristic, J., & Kingstone, A. (2005). Taking control of reflexive social attention. *Cognition*, *94*, B55–B65.
Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops!': performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, *35*, 747–758.
Robertson, I. H., Tegnér, R., Tham, K., Lo, A., & Nimmo-Smith, I. (1995). Sustained attention training for unilateral neglect: theoretical and rehabilitation implications. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *17*, 416–430.
Roelfsema, P. R., Lamme, V. A. F., & Spekreijse, H. (1998). Object-based attention in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nature*, *395*, 376–381.
Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*, 207–231.
Rosvold, H. E., Mirsky, A. F., Sarason, I., Bransome Jr, E. D., & Beck, L. H. (1956). A continuous performance test of brain damage. *Journal of Consulting Psychology*, *20*, 343.
Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., & The PDP Research Group (1986). *Parallel Distributed Processing: Foundations*. Cambridge, MA: MIT Press.
Sadaghiani, S., & D'Esposito, M. (2014). Functional characterization of the cingulo-opercular network in the maintenance of tonic alertness. *Cerebral Cortex*, April 25, 1–11.
Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic information processing: I Detection, search, and attention. *Psychological Review*, *84*, 1–66.
Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1985). Categorization (restructuring) and automatization: Two separable processes. *Psychological Review*, *92*, 424–428.
Schuhfried, G. (1992). Wiener Testsystem. *Vienna Reaction Unit, Basic Program. Development and production of scientific equipment. Molding, Austria*.
Schumacher, E. H., Lauber, E. J., Glass, J. M. B., Zurbriggen, E. L., Gmeindl, L., Kieras, D. E., & Meyer, D. E. (1999). Concurrent response selection processes in dual-task performance: Evidence for adaptive executive control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 791–814.
Segal, S. J., & Fusella, V. (1970). Influence of imaged pictures and sounds on detection of visual and auditory signals. *Journal of Experimental Psychology*, *83*, 458–464.
Shaffer, L. H. (1975). Multiple attention in continuous verbal tasks. In P. M. A. Rabbitt, & S. Dornic (Hrsg.), *Attention and Performance V* (S. 157–167). New York: Academic Press.
Shepherd, M., Findlay, J. M., & Hockey, R. J. (1986). The relationship between eye movements and spatial attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *38A*, 475–491.
Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic information processing: II Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, *84*, 127–190.
Shomstein, & Yantis, S. (2004). Control of attention shifts between vision and audition in human cortex. *Journal of Neuroscience*, *24*, 10702–10706.
Spelke, E., Hirst, W., & Neisser, U. (1976). Skills of divided attention. *Cognition*, *4*, 215–230.
Strayer, D. L., & Johnston, W. A. (2001). Driven to distraction: dual-task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone. *Psychological Science*, *12*, 462–466.
Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 643–662.
Sturm, W. (2005). *Aufmerksamkeitsstörungen*. Göttingen: Hogrefe.
Sturm, W., & Willmes, K. (2001). On the functional neuroanatomy of intrinsic and phasic alertness. *Neuroimage*, *14*, 76–84.
Sturm, W., Willmes, K., Orgass, B., & Hartje, W. (1997). Do specific attention deficits need specific training? *Neuropsychological Rehabilitation*, *7*, 81–103.
Sturm, W., Simone, A. de, Krause, B. J., Specht, K., Hesselmann, V., Radermacher, I., Herzog, H., Tellmann, L., Müller-Gärtner, H. W., & Willmes, K. (1999). Functional anatomy of intrinsic alertness: evidence for a fronto-parietal-thalamic-brainstem network in the right hemisphere. *Neuropsychologia*, *37*, 797–805.
Sturm, W., Thimm, M., Küst, J., Karbe, H., & Fink, G. R. (2006). Alertness-training in neglect: behavioral and imaging results. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *24*, 371–384.
Styles, E. A. (1997). *The Psychology of Attention*. Hove: Psychology Press.
Teufel, C., Fletcher, P. C., & Davis, G. (2010). Seeing other minds: attributed mental states influence perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*, 376–382.
Thiel, C. M., Zilles, K., & Fink, G. R. (2004). Cerebral correlates of alerting, orienting and reorienting of visuospatial attention: an event-related fMRI study. *Neuroimage*, *21*, 318–328.
Tipper, S. P., Weaver, B., Jerreat, L. M., & Burak, A. L. (1994). Object-based and environment-based inhibition of return of visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 478–499.
Treisman, A. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 242–248.
Treisman, A. (1964). Selective attention in man. *British Medical Bulletin*, *20*, 12–16.
Treisman, A. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, *76*, 282–299.
Treisman, A. (1988). Features and objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *40A*, 201–237.
Treisman, A., & Geffen, G. (1967). Selective attention: Perception or response? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *19*, 1–18.
Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97–126.
Treisman, A., & Riley, J. (1969). Is selective attention selective perception or selective response? A further test. *Journal of Experimental Psychology*, *79*, 27–34.
Treisman, A., & Sato, S. (1990). Conjunction search revisited. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 459–478.
Treisman, A., & Schmidt, H. (1982). Illusory conjunction in the perception of objects. *Cognitive Psychology*, *14*, 107–141.
Treue, S. (2003). Climbing the cortical ladder from sensation to perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*, 469–471.
Treue, S., & Martinez-Trujillo, J. C. (1999). Feature-based attention influences motion processing gain in macaque visual cortex. *Nature*, *399*, 575–579.
Treue, S., & Maunsell, J. H. R. (1996). Attentional modulation of visual motion processing in cortical areas MT und MST. *Nature*, *382*, 539–541.
Treue, S., & Maunsell, J. H. R. (1999). Effects of attention on the processing of motion in macaque middle temporal and medial superior temporal visual cortical areas. *Journal of Neuroscience*, *19*, 7591–7602.
Underwood, G. (1974). Moray vs. the rest: The effects of extended shadowing practice. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *26*, 368–372.
Vallar, G. (1998). Spatial hemineglect in humans. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 87–97.
Van der Heijden, A. H. C. (1992). *Selective Attention in Vision*. London: Routledge.
Van Zomeren, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). *Clinical Neuropsychology of Attention*. Oxford: Oxford University Press.
Vandenberghe, R., Dupont, P., De Bruyn, B., Bormans, G., Michiels, J., Mortelmans, L., & Orban, G. A. (1996). The influence of stimulus location on the

brain activation pattern in detection and orientation discrimination. A PET study of visual attention. *Brain*, *119*, 1263–1276.

Vecera, S. P., & Rizzo, M. (2004). What are you looking at? Impaired 'social attention' following frontal-lobe damage. *Neuropsychologia*, *42*, 1657–1665.

Vecera, S. P., & Rizzo, M. (2006). Eye gaze does not produce reflex ive shifts of attenton: Evidence from frontal-lobe damage. *Neuropsychologia*, *44*, 150–159.

Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, *37*, 190–203.

Von Wright, J. M., Anderson, K., & Stenman, U. (1975). Generalisation of conditioned GSR's in dichotic listening. In P. M. A. Rabbitt, & S. Dornic (Hrsg.), *Attention and Performance V* (S. 194–204). London: Academic Press.

Warm, J. S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*, 433–441.

Watson, D. G., & Humphreys, G. W. (1997). Visual marking: Prioitizing selection for new objects by top-down attentional inhibition of old objects. *Psychological Review*, *104*, 90–122.

Watson, D. G., & Humphreys, G. W. (2000). Visual marking: Evidence for inhibition using a probe-dot paradigm. *Perception & Psychophysics*, *62*, 471–481.

Weidner, R., Pollmann, S., Müller, H. J., & Cramon, D. Y. von (2002). Top-down controlled visual dimension weighting: An event-related fMRI study. *Cerebral Cortex*, *12*, 318–328.

Welford, A. T. (1952). The „psychological refractory period" and the timing of high speed performance – A review and a theory. *British Journal of Psychology*, *43*, 2–19.

Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention, dual task performance, and work load assessment. In R. Parasuraman, & D. R. Davies (Hrsg.), *Varieties of Attention* (S. 63–102). New York: Academic Press.

Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (2. Aufl.). New York, NY: Harper Collins.

Wiese, E., Wykowska, A., Zwickel, J., & Müller, H. J. (2012). I see what you mean: How attentional selection is shaped by ascribing intentions to others. *PLoS ONE*, *7*(9), e45391.

Wiese, E., Zwickel, J., & Müller, H. J. (2013). The importance of context information for the spatial specificity of gaze cueing. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *75*, 967–982.

Wiese, E., Wykowska, A., & Müller, H. J. (2014). What we observe is biased by what other people tell us: Beliefs about the reliability of gaze behavior modulate attentional orienting to gaze cues. *PLoS One*, *9*(4), e94529.

Wijers, A. A., Lamain, W., Slopsema, J. S., & Mulder, G. (1989). An electrophysiological investigation of the spatial distribution of attention to colored stimuli in focused and divided attention conditions. *Biological Psychology*, *29*, 213–245.

Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0: A revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin and Review*, *1*, 202–238.

Wolfe, J. M. (1999). Inattentional amnesia. In V. Coltheart (Hrsg.), *Fleeting memories* (S. 71–94). Cambridge, MA: MIT Press.

Wolfe, J. M. (2007). Guided Search 4.0: Current progress with a model of visual search. In W. Gray (Hrsg.), *Integrated Models of Cognitive Systems* (S. 99–119). New York: Oxford.

Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, *5*, 1–7.

Wolfe, J. M., Cave, K. R., & Franzel, S. L. (1989). Guided Search: an alternative to the Feature Integration Model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, *15*, 419–433.

Womelsdorf, T., Anton-Erxleben, K., Pieper, F., & Treue, S. (2006). Dynamic shifts of visual receptive fields in cortical area MT by spatial attention. *Nature Neuroscience*, *9*, 1156–1160.

Wu, S.-C., Remington, R. W., & Folk, C. L. (2014). Onsets do not override top-down goals, but they are responded to more quickly. *Attention Perception & Psychophysics*, *76*, 649–654.

Wykowska, A., Wiese, E., Prosser, A., & Müller, H. J. (2014). Social perception is tuned to beliefs about the minds of others: an EEG study. *PLoS One*, *9*(4), e94529.

Yantis, S., & Jonides, J. (1990). Abrupt visual onsets and selective attention: Voluntary versus automatic allocation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*, 121–134.

Yantis, S., Schwarzbach, J., Serences, J. T., Carlson, R. L., Steinmetz, M. A., Pekar, J. J., & Courtney, S. M. (2002). Transient neural activity in human parietal cortex during spatial attention shifts. *Nature Neuroscience*, *5*, 995–1002.

Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative and Neurological Psychology*, *18*, 459–482.

Yeshurun, Y., & Rashal, E. (2010). Precueing attention to the target location diminishes crowding and reduces the critical distance. *Journal of Vision*, *10*(10), 1–12.. 16

Zeki, S. M. (1993). *A Vision of the Brain*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Zimmermann, P., & Fimm, B. (2009). *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung – Version 2.2*. Herzogenrath: Psytest.

Bewusstsein

Markus Kiefer

6.1 Einleitung – 154

6.2 Bewusstsein – ein heterogener Begriff – 155

6.3 Theoretische Ansätze zur Erklärung des Bewusstseins – 157
6.3.1 Klassische psychologische Ansätze – 157
6.3.2 Evolutionäre Ansätze – 159
6.3.3 Neurowissenschaftliche Ansätze – 160
6.3.4 Philosophische Ansätze – 162

6.4 Empirische Bewusstseinsforschung – 164
6.4.1 Bewusste und unbewusste Wahrnehmung – 164
6.4.2 Störungen des visuellen Bewusstseins bei hirnverletzten Patienten – 169
6.4.3 Das neuronale Korrelat des visuellen Bewusstseins – 172
6.4.4 Bewusstsein und höhere kognitive Funktionen – 174

6.5 Synopse der empirischen und theoretischen Bewusstseinsforschung: Grundlegende Mechanismen – 176

6.6 Anwendungsbeispiele – 177

6.7 Ausblick – 178

6.8 Weiterführende Informationen – 179

Literatur – 181

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_6

Im Blickfang

Unbewusste Botschaften

Immer wieder wird die Öffentlichkeit durch Meldungen aufgeschreckt, wonach angeblich in Film und Fernsehen das Kauf- oder Wahlverhalten der Menschen mit nicht bewusst wahrnehmbaren Werbebotschaften beeinflusst wird. Die darauf einsetzende hitzige Debatte über die ethische Vertretbarkeit einer solchen unbewussten Manipulation kann zuweilen sogar bis in höchste politische Kreise reichen, wie es beispielsweise im Jahr 2000 während des US-amerikanischen Präsidentschaftswahlkampfes geschah. In einer Nachrichtensendung wurde ein Bericht über eine Wahlkampfveranstaltung von Al Gore, dem Bewerber der Demokratischen Partei, gesendet. Während der Schriftzug der Demokratischen Partei *Democrats* eingeblendet war, ist angeblich kurz das Wort *rats*, also Ratten, aufgeblitzt, um bei den Fernsehzuschauern eine negative Einstellung zur Demokratischen Partei und ihrem Kandidaten zu erzeugen. Aus verständlichen Gründen protestierte die Demokratische Partei massiv gegen die befürchtete „unbewusste" Verleumdungskampagne durch Mitarbeiter des Fernsehsenders, die für die gegnerische Republikanische Partei sympathisierten. Es blieb unklar, ob dieser Vorfall so stimmte oder nicht.

Großes Aufsehen erregte auch eine vom amerikanischen Werbefachmann James Vicary im Jahre 1957 angeblich durchgeführte Studie, in der während einer Filmvorführung alle 5 s die Wörter *Drink Coca-Cola* oder *Hungry? Eat Popcorn* kurz auf der Leinwand aufblitzten. Vicary behauptete, dass sich in Abhängigkeit der gezeigten unbewussten Werbebotschaft der Umsatz der jeweiligen Produkte massiv steigerte, gab aber später zu, dass die Studie nie stattgefunden hatte. Neuere Untersuchungen belegten aber tatsächlich eine Wirkung unbewusst wahrgenommener Stimuli, allerdings war diese nur für wenige Hundert Millisekunden nachweisbar. Unbewusste Werbebotschaften scheinen daher – zum Glück nur kurzfristig – die Einstellungen zu Produkten oder politischen Parteien zu beeinflussen.

6.1 Einleitung

Es gibt sicher kaum psychische Phänomene, die subjektiv für jeden Einzelnen von uns von so zentraler Bedeutung sind wie das Bewusstsein. In der Alltagssprache ist Bewusstsein eng mit dem individuellen Erleben der Außen- und Innenwelt und auf diese Weise mit der eigenen Identität verknüpft. Die besondere Bedeutung von Bewusstseinsphänomenen spiegelt sich auch in der Behauptung wider, dass Bewusstsein in einer hochentwickelten Form nur dem Menschen und nicht (anderen) Tieren oder künstlichen intelligenten Systemen zu eigen sei. Damit wird Bewusstsein zum Kriterium für das Menschsein erhoben, was unter Umständen mit weitreichenden ethischen Konsequenzen verbunden ist (man denke nur an die Debatte über aktive oder passive Sterbehilfe). Dabei wird allerdings übersehen, dass es sich bei „Bewusstsein" um einen heterogenen Begriff handelt, der sowohl im alltäglichen als auch im wissenschaftlichen Diskurs eine Vielzahl von Bedeutungsschattierungen aufweist. Der Begriff „Bewusstsein" verweist auf recht unterschiedliche psychische Phänomene: Grade der Wachheit (Vigilanz, Schlaf, Koma etc.), Erlebnisqualität der Sinnesempfindungen interner oder externer Reize, Gewahrsein der eigenen Person (Selbst-Bewusstsein), Kontrollierbarkeit von Gedanken und Handlungen, eine moralische oder politische Einstellung („richtiges" oder „falsches" Bewusstsein). Aufgrund der skizzierten Vielschichtigkeit des Bewusstseinsbegriffs und der privaten Natur von Bewusstseinszuständen ist es nicht verwunderlich, dass es in der Allgemeinen Psychologie kaum ein Forschungsgebiet gibt, das umstrittener war bzw. zum Teil noch ist (► Zur Vertiefung 6.1).

Im Verlauf der seit mehreren Jahrhunderten andauernden philosophischen Reflexion galt lange Zeit das Vorliegen des menschlichen Bewusstseins als Argument dafür, dass es einen vom Körper bzw. vom Gehirn zumindest teilweise unabhängigen Geist geben müsse. Man konnte sich nicht vorstellen (und manche Wissenschaftler können es heute noch nicht), Bewusstsein durch psychologische und/oder neurobiologische Prozesse zu erklären. Wie kann überhaupt ein psychisches Phänomen, das einen solch privaten Charakter aufweist und daher eigentlich nur durch Introspektion zugänglich ist, Gegenstand empirisch wissenschaftlicher Untersuchungen werden? Wo sollte denn auch der Ort in einer funktionalen kognitiven Architektur oder in dem neuronalen Netzwerk des Gehirns sein, an dem alle unsere Gedanken und Wahrnehmungen zusammengeführt und – wie auf der Bühne eines Theaters – einem inneren Beobachter vorgespielt werden?

Trotz der dargestellten Probleme ist das Thema „Bewusstsein" fester Bestandteil der empirischen Kognitionsforschung geworden. Seit Mitte der 1990er Jahre ist das wissenschaftliche Interesse an diesem Forschungsgebiet wieder stark gewachsen, und zwar nicht nur innerhalb der Philosophie, sondern auch der Psychologie und der kognitiven Neurowissenschaften. Interessanterweise setzte sich die psychologische Forschung zum Ende des 19. Jahrhunderts, als sich die Psychologie als eigene wissenschaftliche Disziplin konstituierte, zunächst intensiv mit der Bewusstseinsthematik auseinander (Beispiele hierfür sind die Arbeiten von Wilhelm Wundt oder William James). Mit der Dominanz des behavioristischen Forschungsparadigmas in den 1930er bis 1950er Jahren galt jedoch die Untersuchung nicht direkt beobachtbarer mentaler Vorgänge generell als unwissenschaftlich.

Bewusstsein ist mittlerweile Gegenstand eines Forschungsansatzes, an dem Wissenschaftler aus verschiedenen Fachbereichen mit ihren jeweils spezifischen theoretischen Perspektiven und Methoden beteiligt sind, die sich ergänzen und dieses Phänomen aus unterschiedlichen Blickwinkeln darstellen. Allerdings stehen die unterschiedlichen Ansätze zurzeit eher unverbunden nebeneinander und ergeben (noch) kein kohärentes Bild.

Auch wenn Bewusstsein als wissenschaftlich zu untersuchender Gegenstand in der Allgemeinen Psychologie inzwischen weitgehend akzeptiert ist, bleibt bei der Theoriebildung ein Problem bestehen. Theorien für menschliches Verhalten bzw. Verhaltensleistungen werden in der Allgemeinen Psychologie häufig im Rahmen des Informationsverarbeitungsansatzes formuliert. Der Mensch wird als informationsverarbeitendes System verstanden, das Information aus der Umwelt aufnimmt, in irgendeiner Form verarbeitet, eventuell zwischenspeichert

Zur Vertiefung 6.1

Seit 1719 gibt es „Bewusstsein"

Im heutigen Gebrauch der deutschen Sprache ist das Wort „Bewusstsein" selbstverständlich und nicht mehr wegzudenken. Die Verwendung des Bewusstseinsbegriffs als Substantiv ist im Deutschen aber relativ jung und wurde erst 1719 von Christian Wolff als Übersetzung des lateinischen Wortes *conscientia* eingeführt (zur Verwendungsgeschichte des Bewusstseinsbegriffs in verschiedenen Sprachen vgl. Metzinger und Schuhmacher 1999; Wilkes 1988). Dagegen ist die Verwendung des Infinitivs „sich etwas bewusst sein" als lateinische Übersetzung von *sibi conscium esse* schon zu einem früheren Zeitpunkt dokumentiert. Auch im Englischen ist der Gebrauch des Wortes *consciousness* in seiner heutigen Bedeutung erst seit 1678 nachgewiesen. *Consciousness*, *conscientia* wie auch das altgriechische Wort *syneidesis* bezeichneten ursprünglich das moralische Gewissen oder ein gemeinsames Wissen mehrerer Personen zumeist über moralische Sachverhalte. In der römischen Antike und in der scholastischen Philosophie des Mittelalters hatte *conscientia* jedoch eine zweite Bedeutung und wurde auch als Bezeichnung für „inneres Wissen" verwendet, das geistige Operationen begleitet. Neben *conscientia* gibt es im Lateinischen auch *cogitatio*, *apperceptio* und *sensus internus* mit einer ähnlichen Bedeutung.

Die moderne Bedeutung von *conscientia* im Sinne der Kenntnis der mentalen Zustände wurde wesentlich von dem französischen Philosophen René Descartes im Jahre 1641 geprägt. Erst Descartes löste den Bewusstseinsbegriff vom moralischen Gewissen und machte ihn zum zentralen Merkmal des Menschen. Interessanterweise fehlt in manchen Sprachen, z. B. im Chinesischen, ein Wort mit einem äquivalenten Bedeutungsspektrum. Vermutlich gab es nicht in allen Sprachgemeinschaften bzw. Kulturen eine Veranlassung, ein einheitliches Wort für die Bezeichnung dieser Klasse von Phänomenen zu verwenden. Die späte Prägung des modernen Bewusstseinsbegriffs im europäischen Sprachraum und das Fehlen eines Wortes mit einem äquivalenten Bedeutungsspektrum in manchen Sprachen deuten darauf hin, dass unser jetziges alltägliches Verständnis von Bewusstsein möglicherweise sehr stark von der kulturellen Entwicklung abhängig ist. Vielleicht würden wir heute anders über die psychischen Phänomene denken, die wir mit dem Wort „Bewusstsein" bezeichnen, wenn wir nicht in Anlehnung an die cartesische Konzeption ein einheitliches Wort dafür verwenden würden – vielleicht wäre dann auch unser Bewusstsein ein anderes.

und in Form von Verhalten wieder an die Umwelt abgibt. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Dritte-Person-Perspektive, da mentale Vorgänge losgelöst von einem Subjekt aus einer Außensicht betrachtet und damit in einem gewissen Sinne objektiviert werden. Bewusstseinsphänomene wie z. B. das Erleben von Wahrnehmungsinhalten (die „Röte" des Rots oder das „Stechen" des Schmerzes) sind dagegen nur aus der Erste-Person-Perspektive erfahrbar, da sie an das individuelle Erleben eines Subjekts bzw. eines mentalen Ich geknüpft sind. Ob und wie diese beiden Perspektiven ineinander überführbar sind, ist ein wissenschaftstheoretisches Kernproblem der Bewusstseinsforschung, dessen Klärung noch aussteht (Metzinger 1996).

Einige Forschungsthemen der heutigen empirischen Bewusstseinsforschung werden im Rahmen der Allgemeinen Psychologie schon seit Jahren untersucht, ohne dass aus den oben genannten theoretischen Gründen direkt auf das Thema „Bewusstsein" Bezug genommen wurde. Dies ist der Fall, wenn z. B. die Bewusstheit mentaler Zustände oder kognitiver Prozesse Bestandteil von Begriffsdefinitionen (z. B. implizites = unbewusstes vs. explizites = bewusstes Gedächtnis) bzw. von Operationalisierungen (z. B. Berichtbarkeit = Bewusstheit von Gedächtnisinhalten) ist. Zur Förderung einer interdisziplinären Kommunikation über Bewusstseinsphänomene mit anderen Fachrichtungen innerhalb und außerhalb der Psychologie (z. B. Neuropsychologie, Philosophie, Neurowissenschaften) ist es angebracht, den Bezug zum Thema „Bewusstsein" zu verdeutlichen. Allgemeinpsychologische Theorien und Befunde leisten, wie im Verlauf des Kapitels belegt wird, einen wichtigen Beitrag zur Bewusstseinsforschung.

Das Spektrum der Phänomene, die gemeinhin mit der Bewusstseinsthematik in Verbindung gebracht werden, ist sehr breit und reicht von einfachen Wahrnehmungsprozessen bis zu aufsehenerregenden Gebieten wie Träume oder veränderte Bewusstseinszustände unter halluzinogenen Drogen. Die Auswahl der in diesem Kapitel dargestellten Phänomene und Theorien erfolgte im Wesentlichen danach, inwieweit diese eine unmittelbare Bedeutung für die Allgemeine Psychologie haben, also in irgendeiner Form etwas mit Wahrnehmen, Gedächtnis, Denken, Entscheiden, Affekt etc. zu tun haben. Phänomene wie veränderte Bewusstseinszustände werden aus den genannten Gründen nicht behandelt. Wir werden uns entsprechend mit relativ eng umgrenzten und überschaubaren Phänomenen beschäftigen, die nichtsdestoweniger – oder gerade deswegen – interessante Einblicke in die kognitiven und neuronalen Prozesse erlauben, die Bewusstseinsphänomenen zugrunde liegen.

6.2 Bewusstsein – ein heterogener Begriff

Mit dem Wort „Bewusstsein" werden – wie bereits angedeutet – ganz unterschiedliche Phänomene bezeichnet. Es mag vielleicht etwas paradox erscheinen, dass gerade „Bewusstsein" verschiedene Bedeutungen aufweist, da unser Bewusstsein subjektiv für uns einheitlich ist. Man spricht auch vom „synthetisierenden Charakter" des Bewusstseins und meint damit, dass Bewusstsein verschiedene Sinnesempfindungen, Gedanken etc. integriert.

Die Heterogenität des Bewusstseinsbegriffs wird deutlich, wenn man in der Literatur beschriebene Kriterien betrachtet, die ein natürliches oder künstliches kognitives System erfüllen muss, damit ihm Bewusstsein zugeschrieben wird (Delacour 1995). Die genannten Kriterien sind willkürlich, da sie weder aus einer Definition noch aus einer Theorie des Bewusstseins abgeleitet wurden. Sie umfassen verschiedenartigste Verhaltensleistungen (objektive Kriterien) und nur der Introspektion zugängliche Zustände (subjektive Kriterien), die unmöglich in ein einheitliches Konzept zu integrieren sind (◘ Tab. 6.1).

Es ist an dieser Stelle nicht möglich, eine erschöpfende theoretische Analyse des Bewusstseinsbegriffs, wie sie beispielsweise in der Philosophie betrieben wird, in allen Details darzustellen. Eine, wenn auch vorläufige, terminologische Klärung des Begriffs hilft aber zu beurteilen, zu welchem Aspekt von Bewusstsein eine

Tab. 6.1 Kriterien für das Vorhandensein von Bewusstsein

Objektive Kriterien (messbar als Verhaltensleistung)	Subjektive Kriterien (nur der Introspektion zugänglich)
Integrierter, kohärenter und kontrollierter Charakter des Verhaltens	Herausbildung eines stabilen Ich, das sich über verschiedene Situationen hinweg als identisch wahrnimmt
Identifizierung von und Anpassung an neuartige Situationen	Intentionalität mentaler Zustände (Gedanken, Wahrnehmungen etc.). Ein mentaler Zustand wird als intentional bezeichnet, wenn er auf etwas verweist. Intentionale Zustände können durch Sätze wie „Ich sehe, dass" etc. beschrieben werden
Zielgerichtetes Verhalten, Flexibilität bei der Erledigung einer Aufgabe oder eines Planes	Unterschiedliche Wachheits- bzw. Aufmerksamkeitszustände
Gebrauch von Sprache	Reflexivität: Das Individuum repräsentiert sich selbst und seine mentalen Zustände
Mentale Repräsentationen hinterlassen Spuren im episodischen Gedächtnis	
Wissen über die eigenen kognitiven Prozesse (Metakognition)	

Tab. 6.2 Aspekte des Bewusstseinsbegriffs

Bezug	Art des Bewusstseins	Beschreibung
Globaler Systemzustand	Wachheitszustände	Unterschiedliche Wachheitszustände in Abhängigkeit des Erregungsniveaus (Koma, Schlaf, Traum, entspannter Wachzustand, Vigilanz)
Eigenschaft von Repräsentationen	Phänomenales Bewusstsein	Erlebniseigenschaften von Repräsentationen
	Zugriffsbewusstsein	Repräsentationen sind Gegenstand übergeordneter koordinierter Prozesse, bilden Grundlage von Entscheidungen und Handlungen
	Monitoring-Bewusstsein	Wissen über interne Zustände
	Selbst-Bewusstsein	Wissen über die eigene Person, Vorliegen eines stabilen mentalen Ich

Theorie oder eine empirische Untersuchung einen Beitrag leistet. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt unterschiedliche Aspekte des Bewusstseinsbegriffs systematisch beschrieben (Metzinger 1996; Metzinger und Schuhmacher 1999). Eine Übersicht hierzu findet sich in Tab. 6.2.

Bewusstsein kann man als *Wachheits-* bzw. *Erregungszustand* eines kognitiven Systems auffassen. Es lassen sich dabei Ebenen von Bewusstseinszuständen in Abhängigkeit der Wachheit bzw. des globalen Erregungsniveaus (*arousal*) unterscheiden.

Es gibt Belege dafür, dass neuronale Aktivität in einem Netzwerk von subcorticalen Hirnstrukturen, das die Formatio reticularis und den Thalamus umfasst, große Populationen von corticalen Neuronen beeinflusst und so das globale Aktivierungsniveau des Gehirns bestimmt (Paré und Llinás 1995). Die Aktivität in diesen subcorticalen Arealen korreliert mit verschiedenen Wachheitszuständen, und eine Blockade dieser Aktivität durch pharmakologische Substanzen führt zu Bewusstlosigkeit. Die dem Schlaf-Wach-Zyklus bzw. der Regulation des globalen Erregungsniveaus zugrunde liegenden neurobiologischen Mechanismen sind bereits gut verstanden, und die Betrachtungsweise des Bewusstseins als **Wachheitszustand** eines Systems stellt kein besonders problembehaftetes Thema der Bewusstseinsforschung dar. Die Phänomene im Zusammenhang mit Wachheit treten auch bei Tieren auf. Zumindest das Bewusstsein in diesem Sinne ist keine spezifische Eigenschaft des Menschen. Da dieser Aspekt der Bewusstseinsthematik auch keinen starken Bezug zu den für die Allgemeine Psychologie relevanten Fragestellungen (z. B. Wahrnehmung oder Denken) aufweist, wird er im vorliegenden Kapitel nicht weiter behandelt.

Für die Allgemeine Psychologie interessanter, aber zugleich auch umstrittener ist die Verwendung des Bewusstseinsbegriffs als *Eigenschaft mentaler Repräsentationen*. Dies setzt natürlich voraus, dass das kognitive System ein globales Erregungsniveau aufweist, das mit einem wachen Zustand einhergeht. Für die Bewertung theoretischer und experimenteller Ansätze hat sich die (philosophische) Systematisierung nach Block (1995; 1996) als fruchtbar erwiesen und wird daher in diesem Kapitel übernommen. Block unterscheidet vier Arten von Bewusstsein: phänomenales Bewusstsein, Zugriffsbewusstsein, Monitoring- und Selbst-Bewusstsein. Phänomenales und Zugriffsbewusstsein sind für die Bewusstseinsforschung in der Allgemeinen Psychologie von großer Bedeutung und werden daher ausführlich behandelt. Monitoring- und Selbst-Bewusstsein sind von untergeordneter Bedeutung und werden der Vollständigkeit halber erwähnt, jedoch nur kurz umrissen.

Das **phänomenale Bewusstsein** ist definiert als das individuelle Erleben von Sinneswahrnehmungen oder Gedanken – mentaler Repräsentationen – wie die bereits erwähnte Wahrnehmung „der Röte des Rots" oder das Fühlen „des Stechens des Schmerzes". Solche Erlebniseigenschaften mentaler Repräsentationen werden in der Philosophie auch als **Qualia** (Singular: Quale) bezeichnet. Das phänomenale Bewusstsein ist notwendigerweise an eine Erste-Person-Perspektive gebunden (ein Ich fühlt bzw. erlebt etwas) und damit nicht vollständig aus einer Außen- oder Dritte-Person-Perspektive fassbar, was die wissenschaftliche Erklärung erschwert. Diese gilt deshalb auch als äußerst problematisch und wird daher in der Bewusstseinsforschung als „Kernproblem" (*the hard problem*) bezeichnet (Chalmers 1995). Auf diese Diskussion wird bei der Darstellung philosophischer Bewusstseinstheorien in ▶ Abschn. 6.3.4 ausführlich eingegangen.

Zugriffsbewusstsein liegt dann vor, wenn eine Repräsentation Gegenstand übergeordneter, koordinierter und kontrol-

lierter Verarbeitungsprozesse werden kann. Zugriffsbewusste Repräsentationen bilden die Grundlage von Entscheidungen, Urteilen oder Handlungen (z. B. verbalen Äußerungen oder motorischen Reaktionen) einer Person. Das Zugriffsbewusstsein lässt sich auch aus einer Dritte-Person-Perspektive beschreiben, seine wissenschaftliche Erforschung gilt daher nicht als problematisch. Die Erklärung des Zugriffsbewusstseins zählt deshalb auch zu den leichteren Problemen (*the soft problems*) der Bewusstseinsforschung. So weist das Konzept des Zugriffsbewusstseins beispielsweise eine deutliche theoretische Verwandtschaft zum psychologischen Konzept der Kontrolliertheit kognitiver Prozesse bzw. dem der exekutiven Kontrolle auf. Im Gegensatz zum phänomenalen Bewusstsein lässt sich Zugriffsbewusstsein somit ohne Weiteres in die psychologische Theorienlandschaft einordnen.

Monitoring-Bewusstsein ist das Wissen über die eigenen Wahrnehmungen oder Gedanken, betrifft also den reflexiven Charakter des Bewusstseins. Parallelen zur psychologischen Theoriebildung finden sich im Konzept der Metakognition, dem Wissen über die eigenen kognitiven Prozesse. **Selbst-Bewusstsein** bezieht sich schließlich auf die Gedanken über sich selbst und ist am besten mit dem psychologischen Konstrukt des Selbstkonzepts, dem Wissen von und der Einstellung gegenüber der eigenen Person, vereinbar. Bestandteil des Selbst-Bewusstseins ist die Repräsentation eines situationsunabhängig stabilen mentalen Ich (vgl. auch Metzinger 1993).

Vor allem die Unterscheidung zwischen phänomenalem Bewusstsein und Zugriffsbewusstsein ist für die Bewusstseinsforschung von großer Bedeutung: Anhand dieser begrifflichen Unterscheidung kann verdeutlicht werden, inwieweit sich eine Arbeit mit dem Kernproblem der Bewusstseinsthematik, dem phänomenalen Bewusstsein oder mit dem weniger problematischen Zugriffsbewusstsein befasst. Leider wird in wissenschaftlichen Arbeiten nur selten deutlich gemacht, in welchem Sinne der Bewusstseinsbegriff verwendet wurde.

6.3 Theoretische Ansätze zur Erklärung des Bewusstseins

In diesem Abschnitt werden Theorien aus unterschiedlichen Forschungsrichtungen vorgestellt, die den Anspruch haben, Bewusstsein durch Angabe von mentalen und/oder neuronalen Prozessen zu erklären. Im Einzelnen werden psychologische (▶ Abschn. 6.3.1), evolutionäre (▶ Abschn. 6.3.2), neurowissenschaftliche (▶ Abschn. 6.3.3) und philosophische Ansätze (▶ Abschn. 6.3.4) dargestellt. In ▶ Abschn. 6.2 wurde ausgeführt, dass unterschiedliche Aspekte von Bewusstsein voneinander unterschieden werden müssen, wobei vor allem die Differenzierung zwischen Zugriffsbewusstsein und phänomenalem Bewusstsein von Bedeutung ist. Bei der Darstellung der Ansätze in diesem Abschnitt wird daher darauf hingewiesen, für welchen dieser beiden Aspekte eine Theorie einen Erklärungsversuch anbietet.

6.3.1 Klassische psychologische Ansätze

(Allgemein-)psychologische Ansätze konzeptualisieren Bewusstsein in der Regel im Rahmen des Informationsverarbeitungsansatzes und identifizieren Bewusstsein entweder mit einem bestimmten Informationsverarbeitungsmodul oder mit einem bestimmten Verarbeitungsmechanismus. Obwohl ursprünglich nicht als Bewusstseinstheorie konzipiert, wird das *Arbeitsgedächtnismodell* von Baddely (1986) häufig zur Erklärung von Bewusstseinsphänomenen herangezogen. Das Modell besteht aus Kurzzeitspeichern für verbale bzw. visuell-räumliche Information und einem übergeordneten Kontrollsystem. Die in den Kurzzeitspeichern befindliche Information muss aktiv aufrechterhalten werden, damit sie nicht innerhalb weniger Sekunden zerfällt. Das Kontrollsystem, auch *zentrale Exekutive* genannt, ist für die Manipulation der kurzfristig gespeicherten Information zuständig (ausführliche Darstellung der Gedächtnismodelle, insbesondere auch des Arbeitsgedächtnisses in ▶ Kap. 12). Es wird die Hypothese vertreten, dass phänomenales Bewusstsein identisch mit dem Inhalt des verbalen bzw. visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses ist und Zugriffsbewusstsein als Funktion der zentralen Exekutive verstanden werden kann (zu exekutiven Funktionen s. ▶ Kap. 9 und 18).

Die Gleichsetzung des Inhalts des phänomenalen Bewusstseins mit dem Inhalt des Arbeitsgedächtnisses birgt ein Problem: Während im Arbeitsgedächtnis zu einem Zeitpunkt in der Regel ungefähr sieben Elemente (z. B. Zahlen, Wörter oder Objekte) aufrechterhalten werden können, sind deutlich weniger Elemente (in der Regel ein bis drei) phänomenal bewusst (Gadenne 1997). Eine Lösung dieses Problems könnten Aufmerksamkeitsprozesse bieten (Baars 1997): Zu einem bestimmten Zeitpunkt werden nur diejenigen Elemente des Arbeitsgedächtnisses phänomenal bewusst, die im Fokus der Aufmerksamkeit stehen. *Selektive Aufmerksamkeit* (▶ Kap. 5) gilt generell als eine wichtige Voraussetzung dafür, dass eine Repräsentation phänomenal bewusst wird. Zuweilen wird sogar behauptet, das phänomenale Bewusstsein als Begriff aus dem Beschreibungssystem der Erste-Person-Perspektive sei identisch mit dem Begriff der selektiven Aufmerksamkeit aus dem Beschreibungssystem der Dritte-Person-Perspektive (Merikle und Joordens 1997; Velmans 1991). Diese Gleichsetzung ist allerdings aus zwei Gründen nicht zutreffend: Zum einen werden nicht alle Reize, auf welche die Aufmerksamkeit gerichtet ist, auch bewusst wahrgenommen. So werden beispielsweise Reize, die nur kurz präsentiert werden und auf die außerdem nach kurzer Zeit ein weiterer Reiz folgt, auch dann nicht bewusst wahrgenommen, wenn die Aufmerksamkeit auf sie gerichtet ist. Man spricht hier von *Maskierung* (▶ Abschn. 6.4.1). Aufmerksamkeit ist also keine hinreichende Bedingung für die Entstehung von phänomenalem Bewusstsein. Außerdem zeigen neuere Befunde, dass im Widerspruch zu der weiter unten skizzierten klassischen Ansicht von Posner und Snyder (1975) auch unbewusste *automatische Verarbeitungsprozesse* durch Aufmerksamkeit moduliert werden: Automatische Prozesse, die durch unbewusste wahrgenommene maskierte Reize ausgelöst wurden, laufen nur dann ab, wenn die Aufmerksamkeit auf diesen Reiz (Kiefer und Brendel 2006) oder auf die relevante Reizdimension (z. B. Form, Farbe, Bedeutung) gerichtet ist (Kiefer und Martens

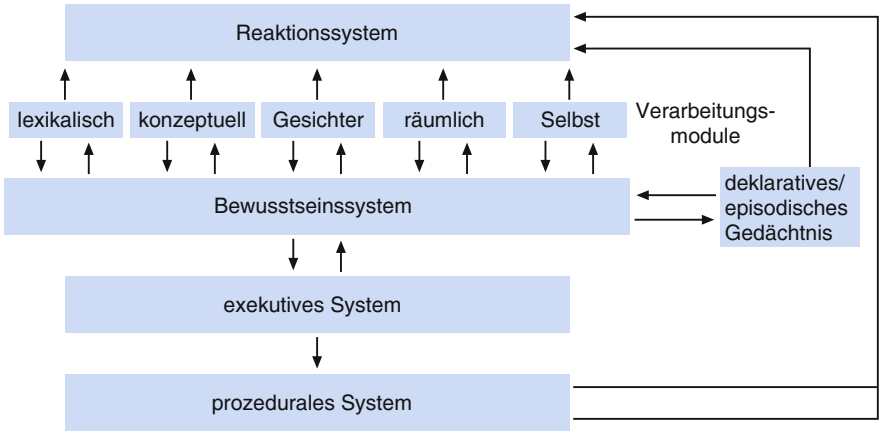


Abb. 6.1 DICE-Modell von Schacter (1989). Das Modell bettet phänomenales Bewusstsein in eine funktionale kognitive Architektur ein. Eine Aktivierung des Bewusstseinsmoduls ist eine notwendige Voraussetzung für den Zugriff des exekutiven Systems auf Repräsentationen der Verarbeitungsmodule. (Nach Schacter 1989)

2010). Es steht außer Frage, dass Aufmerksamkeit eine große Rolle für die Bewusstwerdung von Reizen spielt. Aufmerksamkeit ist aber nicht mit Bewusstsein gleichzusetzen.

Vor allem auf das Zugriffsbewusstsein bezieht sich dagegen das Konzept der Kontrolliertheit kognitiver Prozesse. Posner und Snyder (1975) charakterisieren *kontrollierte Prozesse* als langsam, in der Kapazität beschränkt sowie intentional und bewusst. Sie beinhalten auch die Inhibition konkurrierender Repräsentationen. Automatische Prozesse sind dagegen nach der überholten Ansicht von Posner und Snyder unbewusst, schnell, interferieren nicht mit anderen Prozessen und sind nicht intentional steuerbar. Nach dieser Vorstellung liegt Zugriffsbewusstsein genau dann vor, wenn ein kognitiver Prozess kontrolliert abläuft. Da auch unbewusste automatische Prozesse, wie oben dargelegt, durch Aufmerksamkeit und andere kognitive Kontrollmechanismen moduliert werden, scheint es keine einfache Dichotomie zwischen unbewusst automatischer und bewusst kontrollierter Verarbeitung zu geben (Ansorge et al. 2014). Auch unbewusste typischerweise als automatisch klassifizierte Prozesse unterliegen der kognitiven Kontrolle. Allerdings scheint die kognitive Kontrolle unbewusster automatischer Verarbeitung weniger flexibel zu sein, da sie nur präemptiv wirkt, d. h. vor Beginn des unbewussten Prozesses aktiv sein muss (Kiefer und Martens 2010). Nur bewusste typischerweise als „kontrolliert" klassifizierte Prozesse erlauben dagegen eine reaktive Kontrolle, welche die andauernde Stimulusverarbeitung modifizieren kann.

Das DICE-Modell (DICE = *dissociable interactions and conscious experience*) von Schacter (1989) bettet phänomenales Bewusstsein und Zugriffsbewusstsein in eine gemeinsame funktionale kognitive Architektur ein und eröffnet einen Zugang zum Verständnis der Dissoziation zwischen dem bewussten Erleben mentaler Repräsentationen einerseits und ihrer Verhaltenswirksamkeit andererseits (Abb. 6.1). Dies gilt insbesondere für *implizite Gedächtnisphänomene*, die dann vorliegen, wenn Gedächtnisinhalte das Verhalten beeinflussen, ohne dass eine phänomenal bewusste Erinnerung (ein explizites Gedächtnis) vorliegt.

Schacter (1989) geht davon aus, dass bewusste Erfahrungen des Erinnerns, Wahrnehmens und Wissens ein spezifisches System involvieren, das er *conscious awareness system* (CAS) nennt. Phänomenal bewusstes Erleben entsteht durch die Interaktion des CAS mit spezifischen Verarbeitungs- oder Gedächtnismodulen (z. B. Objekt- oder Gesichtererkennung, *episodisches Gedächtnis*; ▶ Kap. 12). Ein in diesen Modulen aktivierter Wahrnehmungs- oder Gedächtnisinhalt wird nur dann bewusst erlebt, wenn der Ausgang dieser Module das CAS aktiviert. Durch die direkte Verbindung der Verarbeitungsmodule zu Systemen, die für die Vorbereitung von Reaktionen (motorisch oder verbal) zuständig sind, können mentale Repräsentationen unabhängig von einem bewussten Erleben das Verhalten beeinflussen, was sich beispielsweise in impliziten Gedächtnisleistungen äußern kann. Das CAS erfüllt drei Funktionen:

1. Es produziert das phänomenale Erleben.
2. Es integriert die Ausgänge der unterschiedlichen Verarbeitungsmodule und kann so als „globale Datenbasis" betrachtet werden.
3. Es sendet seinen Ausgang an das exekutive System, das für die Regulation der Aufmerksamkeit und für die Initiierung von willentlichen Aktivitäten, z. B. Gedächtnissuche, Planen oder Problemlösen, verantwortlich ist.

Exekutive Prozesse sind an das CAS gekoppelt: Nur wenn Repräsentationen in den Verarbeitungsmodulen das CAS aktiviert haben, können sie zum Gegenstand exekutiver Prozesse werden – für Schacter (1989) ist damit das Vorliegen von phänomenalem Bewusstsein eine notwendige Voraussetzung für das Vorliegen von Zugriffsbewusstsein. Hingegen weist das prozedurale System, das für das Erlernen von motorischen und perzeptuellen Fertigkeiten (▶ Kap. 5) verantwortlich ist, keine Verbindung zum CAS auf; seine Inhalte werden nicht phänomenal bewusst. Wenn aber das exekutive System in die Auswahl von Schemata im prozeduralen System eingreift, können Inhalte des prozeduralen Systems zumindest zugriffsbewusst sein.

Das DICE-Modell lässt wesentliche Fragen – nach den Mechanismen, die die Aktivierung des CAS bewirken, und nach den Prozessen innerhalb des CAS, die zu bewusstem Erleben führen – unbeantwortet und berücksichtigt Aufmerksamkeitsprozesse nur unzureichend. Indem es sich auf das Postulat eines bewusstseinsproduzierenden Systems beschränkt, weicht das Modell der eigentlichen Bewusstseinsproblematik aus. Diese Kritik betrifft jedoch nicht allein das DICE-Modell, sondern alle Ansätze, die phänomenales Bewusstsein allein mit dem Vorliegen einer Repräsentation in einem bestimmten System (z. B. im Arbeitsge-

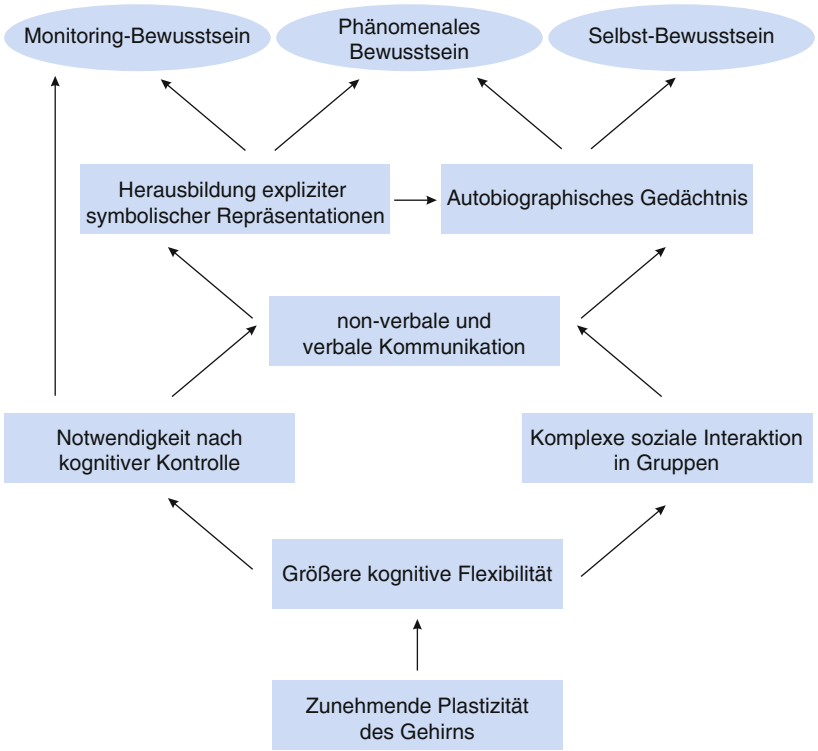


Abb. 6.2 Darstellung der Faktoren, die nach Donald (1995) während der Evolution der Hominiden zur Entstehung des menschlichen Bewusstseins beigetragen haben

dächtnis) gleichsetzen. Erforderlich sind Theorien, die erklären, warum und wie mentale Repräsentationen mit bewusstem Erleben einhergehen (▶ Abschn. 6.3.3).

6.3.2 Evolutionäre Ansätze

Evolutionäre Ansätze erklären die Herausbildung menschlichen Bewusstseins sowohl vor dem Hintergrund der biologischen Entwicklungsgeschichte der Hominiden, der Phylogenese, als auch vor dem Hintergrund der menschlichen Kulturgeschichte (▶ Zur Vertiefung 6.1). Es wird angenommen, dass das spezifisch menschliche Bewusstsein das Ergebnis einer Wechselwirkung zwischen der Entwicklung eines immer komplexer werdenden Gehirns und der kulturellen Entwicklung darstellt. Während Bewusstsein im Sinne von Wachheit bei vielen Tierarten vorkommt, werden phänomenales Bewusstsein, Zugriffsbewusstsein, Monitoring- und Selbst-Bewusstsein allein dem Menschen oder allenfalls auch manchen Menschenaffenarten zugesprochen. Gleichzeitig zeichnet eine hochentwickelte Sprache den Menschen vor anderen Tieren aus, sodass evolutionäre Theorien Zusammenhänge zwischen der phylogenetischen Entwicklung von Bewusstsein und Sprache annehmen.

Der Ansatz von Donald (1995) sieht die Herausbildung von phänomenalem Bewusstsein als das Ergebnis eines evolutionären Anpassungsprozesses, der die Integration multimodaler expliziter Repräsentationen erforderte. Der Ansatz ist spekulativ und in weiten Teilen empirisch nicht überprüfbar, da detaillierte Daten über die Entwicklung des Sozial- und Kommunikationsverhaltens bei den Hominiden nicht vorhanden sind bzw. nicht gewonnen werden können, jedoch lenkt er den Blick auf einen Aspekt der Bewusstseinsproblematik, der in kognitiven Theorien häufig vernachlässigt wird: die mögliche kulturelle Bedingtheit des Bewusstseins.

Für Donald (1995) ist die Entstehung des Bewusstseins eng an die Gehirnentwicklung gekoppelt (Abb. 6.2). Seiner Ansicht nach ist die Evolution der Hominiden durch eine zunehmende Plastizität des Gehirns charakterisiert. Das relative Gewicht des Gehirns im Verhältnis zum Körpergewicht, der Encephalisationsquotient, hat in der menschlichen Entwicklungsgeschichte vom *Australopithecus* über den *Homo erectus* zum modernen *Homo sapiens* stark zugenommen und liegt deutlich höher als beim modernen Schimpansen. Dabei ist vor allem der Anteil tertiärer Cortexareale gestiegen, Areale, die nicht direkt in die Verarbeitung sensorischer Eingänge bzw. in die Produktion motorischer Ausgänge involviert sind. Diese tertiären Areale weisen eine im Vergleich zu sensorischen oder motorischen Arealen höhere Plastizität auf, d. h., ihre Spezialisierung für bestimmte Funktionen bzw. ihre Präferenzen für bestimmte Stimuli sind vergleichsweise leicht durch Lernerfahrung veränderbar. Plastizität stellt damit eine Grundlage für die flexible und dynamische Anpassung an unterschiedliche Umweltbedingungen dar.

Bewusstsein entwickelte sich aufgrund der immer größeren Komplexität des kognitiven Apparats und einer daraus abgeleiteten Notwendigkeit nach kognitiver Kontrolle einerseits und aufgrund einer immer komplexer werdenden sozialen Kommunikation und Interaktion andererseits. Insbesondere die Herausbildung des phänomenalen Bewusstseins im Sinne eines Gedächtnisabrufs symbolischer Repräsentationen ist nach Donald (1995) eng mit Kommunikation verknüpft. Bereits nichtverbale Kommunikation erfordert eine Koordination von Bewegungen, die präzise ausgeführt und daher vermutlich auch planvoll wiederholt und geübt werden muss. Die Intention, eine Handlung zu wiederholen, könnte die Grundlage von Selbst-Reflexion und

damit eines Monitoring-Bewusstseins sein. *Sprachliche Kommunikation* erhöhte den Nutzen von Repräsentationssystemen weiter: Sprache erleichtert den willentlichen Gedächtnisabruf durch Bereitstellung von Abrufreizen. Außerdem werden Gedächtnisinhalte durch sprachliche Kommunikation stabilisiert und expliziert, indem abstrakte, symbolische Schemata herausgebildet werden. Des Weiteren fördert sprachliche Kommunikation die Herausbildung eines autobiografischen Gedächtnisses als Grundlage für eine zeitlich überdauernde Repräsentation des Selbst: das Selbst-Bewusstsein.

In ähnlicher Weise sind auch für Prinz (1996) Bewusstseinsphänomene nur unter Einbeziehung einer kulturhistorischen Perspektive erklärbar. Zentraler Bestandteil für die Entwicklung des menschlichen Bewusstseins ist die Konstitution eines mentalen Ich, das erst in der Auseinandersetzung eines Individuums mit seiner soziokulturellen Umwelt entsteht. Ausgangspunkt seiner Überlegungen ist das folgende „psychohistorische Szenario": Zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Stammesgeschichte existiere ein Lebewesen mit dem kognitiven Organisationsniveau eines Primaten. Dieses Lebewesen sei in der Lage, Handlungsentscheidungen aufgrund der aktuellen Reizsituation anhand erlernter Bewertungsalgorithmen zu treffen und umzusetzen. Verhaltensregulation ist insofern vollständig an die Repräsentation der aktuellen Situation gebunden, da die Vergegenwärtigung vergangener Ereignisse bzw. die Planung zukünftiger Ereignisse für die Handlungsentscheidung keine unmittelbare Rolle spielt. Prinz (1996) nimmt an, dass sich Ich-bezogene Repräsentationsmodi aus diesem Ausgangszustand entwickeln, wenn die folgenden beiden Voraussetzungen erfüllt sind:

- *Duale Repräsentation:* Dies ist die Fähigkeit eines Systems, wahrgenommene und vergegenwärtigte Information (d. h. aus dem Gedächtnis abgerufene Inhalte) getrennt zu verarbeiten. Dadurch kann jederzeit zwischen Vergegenwärtigtem und Wahrgenommenem unterschieden werden, wobei die Handlungskontrolle unter dem Einfluss der aktuell wahrgenommenen Reize bleibt. Eine solche Fähigkeit ist besonders dann wichtig, wenn Lebewesen eine symbolische (sprachliche oder nichtsprachliche) Kommunikation entwickeln, denn symbolische Kommunikation kann beim Rezipienten eine Vergegenwärtigung bestimmter Sachverhalte aus vergangenen Situationen hervorrufen. Handlungen sollten zweckmäßigerweise auf die momentane Situation bezogen sein, was voraussetzt, dass das Vergegenwärtigte nicht mit dem aktuellen Wahrnehmungsinhalt interferiert und die Handlungskontrolle aufgrund der aktuellen Wahrnehmung erfolgt.
- *Gedankenattribution:* Vergegenwärtigungen können nicht nur von außen aufgrund symbolischer Kommunikation entstehen, sondern auch systemintern erzeugt werden. Die Frage nach dem Ursprung bzw. der erzeugenden Instanz dieser Gedanken wird *Attributionsproblem* genannt. Als Lösung dieses Attributionsproblems wird eine eigenständige personale Instanz, die an den Körper des Akteurs gebunden ist, konstituiert, das *Ich*.

Das Ich-Konzept ist die Voraussetzung dafür, dass ein Individuum sich und andere als eine zeitlich überdauernde personale Instanz begreift, die in jeder Wahrnehmungssituation anwesend ist und über verschiedene Zeiten und Situationen hinweg mit sich selbst identisch bleibt. Eine vergleichbare Rolle spielt das so konstituierte Ich bei der Suche nach dem Urheber systemintern ausgelöster Handlungen. Handlungen werden dann als selbstverursacht erlebt, wenn das Individuum diese dem Ich und nicht externen personalen Instanzen als Urheber zuschreibt. Die Anwesenheit des Ich ist nach Prinz (1996) Grundlage für die Bewusstheit mentaler Repräsentationen. Selbst-Bewusstsein wäre damit eine Voraussetzung für phänomenales Bewusstsein (vgl. auch Metzinger 1993).

Die Konstitution des Ich zur Lösung des Attributionsproblems wird durch soziale Austauschprozesse erzeugt und ist daher sozial vermittelt. Wenn in einer Gemeinschaft Interaktion und Kommunikation so geregelt sind, dass jeder Einzelne sich selbst und dem anderen eine Ich-förmige Struktur zuschreibt, dann werden auch neu hinzugekommene Mitglieder schnell eine Ich-förmige Rolle einnehmen. Wenn umgekehrt eine Gemeinschaft keine expliziten Angebote für die Ausbildung einer Ich-förmigen Struktur macht, können auch ihre Mitglieder nicht selbst-bewusst werden.

Die evolutionären Ansätze von Donald (1995) und Prinz (1996) sind notwendigerweise spekulativ, da die empirische Basis zur Entwicklungsgeschichte des Menschen im Wesentlichen aus Knochen- und Werkzeugfunden besteht, aus denen nur sehr vage Schlüsse hinsichtlich der kognitiven und soziokulturellen Entwicklung gezogen werden können. Die Bedeutung dieser Ansätze liegt vor allem darin, dass sie auf eine mögliche soziale und kulturelle Bedingtheit von Bewusstsein hinweisen – ein Aspekt, der in kognitiv orientierten Theorien (▶ Abschn. 6.3.1 und 6.3.3) vernachlässigt wird.

6.3.3 Neurowissenschaftliche Ansätze

Neurowissenschaftliche Ansätze erklären Bewusstseinsphänomene durch die Angabe neuronaler Verarbeitungsmechanismen. Im Vordergrund steht die Suche nach dem *neuronalen Korrelat des Bewusstseins*, also nach denjenigen Gehirnprozessen bzw. Strukturen, die in spezifischer Weise zum Entstehen von bewusstem Erleben beitragen.

Die Theorie von Crick und Koch (1990; 1995) zielt auf die Erklärung des phänomenalen Bewusstseins bei der visuellen Wahrnehmung ab. Sie geht davon aus, dass eine solche Wahrnehmung dann phänomenal bewusst wird, wenn Neurone im visuellen Cortex phasensynchron feuern – ein Mechanismus, der ursprünglich zur Lösung des *Bindungsproblems* vorgeschlagen wurde (▶ Kap. 2 und 18): Unterschiedliche Merkmale (z. B. Farbe und Form) von Objekten einer visuellen Szene werden – losgelöst von ihren jeweiligen Objekten – in unterschiedlichen Gehirnarealen repräsentiert. Für die Erkennung der Objekte müssen die einzelnen Merkmale wieder so gruppiert werden, dass alle Merkmale eines Objekts zu einer Gruppe gehören, d. h., es muss eindeutig angegeben werden, welches Merkmal an welches Objekt zu binden ist (◘ Abb. 6.3). Die bei der **Phasensynchronisation** auftretenden charakteristischen Aktivitätsmuster stellen nach Crick und Koch (1990; 1995) die neuronale Grundlage des

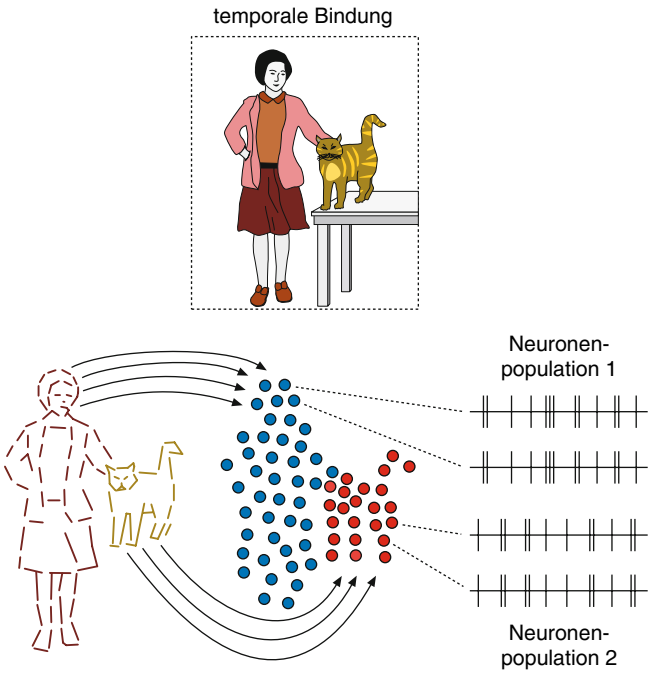


Abb. 6.3 Phasensynchronisation als Mechanismus zur Lösung des Bindungsproblems und als neuronales Korrelat des Bewusstseins. Fällt das Bild einer visuellen Szene, die in diesem Fall aus einer Frau und einer Katze besteht, auf die Retina, dann werden in den visuellen Arealen Neuronenpopulationen aktiviert, die, in diesem Beispiel stark vereinfacht, die Frau bzw. die Katze codieren. Dies geschieht dadurch, dass die Neurone, die auf einen Stimulus ansprechen, in Phase feuern und so temporär zu einer Neuronenpopulation zusammentreten. Neuronen, die sowohl Merkmale der Frau als auch der Katze codieren, gehören beiden Neuronenpopulationen an, indem sie mit jeweils der entsprechende Phase synchronisiert sind. (Nach Engel et al. 1999)

Bewusstseins dar. Eine Weiterentwicklung dieser Theorie und insbesondere stützende empirische Befunde für die These der Phasensynchronisation im Frequenzbereich von 40 Hz als Korrelat des visuellen Bewusstseins stammen aus der Arbeitsgruppe von Wolf Singer (Übersicht in Engel et al. 1999; Singer 2000). Synchronisation ist dabei eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung: Im primären visuellen Cortex wird Synchronisation beobachtet, hingegen werden die in diesem Areal extrahierten einfachen visuellen Merkmale, Kanten, als solche nicht bewusst. Diesen Fall behandelt eine Zusatzannahme: Nur wenn ein visuelles Areal direkt mit dem Frontalhirn verbunden ist, in dem das Arbeitsgedächtnis lokalisiert wird, kann die in diesem Areal repräsentierte Information zum Bestandteil der bewussten Wahrnehmung werden. Eine solche Verbindung besteht nur für höhere visuelle Areale, nicht aber für den primären visuellen Cortex. Das im Frontalhirn lokalisierte Arbeitsgedächtnis wäre damit die bewusst-machende Instanz.

In anderen Ansätzen, für die mittlerweile substanzielle Evidenz vorliegt (▶ Abschn. 6.4.3) wird vorgeschlagen, dass oszillierende, schleifenförmige Aktivierungen innerhalb eines temporären funktionalen Netzwerks von Hirnarealen das neuronale Korrelat des Bewusstseins darstellen. Allerdings wird kontrovers diskutiert, welche Areale in diese schleifenförmigen Aktivierungen einbezogen sind. Die Theorie der rekurrenten Verarbeitung von Lamme (2006) wurde vor allem für die Domäne der bewussten visuellen Wahrnehmung entwickelt. Er schlägt vor, dass eine vorwärtsgerichtete Aktivierung von primären zu höheren sensorischen und weiter zu motorischen Arealen (*feedforward sweep*) zwar eine unbewusste Reizverarbeitung bis hin zur Abgabe einer motorischen Reaktion ermöglicht, aber nicht mit einem bewussten Wahrnehmungserlebnis einhergeht. Bewusstes Erleben erfordert eine **rekurrente Verarbeitung**, die als rückwärtsgerichtete Aktivierung von höheren zu niederen sensorischen Arealen und eine damit einhergehende interaktive Interaktion zwischen sensorischen Arealen definiert ist. Rekurrente Verarbeitung innerhalb des sensorischen Systems sei hinreichend und notwendig für bewusstes Erleben. Eine Einbeziehung des Frontalhirns in die rekurrente Verarbeitung ist nach Lamme (2006) nur eine Voraussetzung für die verbale Berichtbarkeit von Reizen, nicht aber für das bewusste Wahrnehmungserlebnis an sich.

In einem von Ansatz von Llinás und Kollegen (Llinás und Ribary 1993; Paré und Llinás 1995) wird eine schleifenförmige Aktivierung innerhalb eines Netzwerks aus sensorischen corticalen Arealen und dem Thalamus als Korrelat des Bewusstseins angesehen. Sensorische corticale Areale erhalten ihren Input von den Sinnesorganen im Wesentlichen über Schaltstellen in den Neuronenkernen des Thalamus. Über Rückprojektionen vom Cortex zum Thalamus entsteht ein geschlossener neuronaler Schaltkreis. Wird dieser Schaltkreis durch neuronale Aktivität angeregt, die von den Sinnesorganen ausgeht, beginnt aufgrund der speziellen Verbindungsstruktur ein Erregungsmuster in einer corticothalamischen Schleife zu oszillieren. Kontrolle über die oszillierende Aktivität in den verschiedenen corticothalamischen Schleifen wird durch Schaltstellen im Thalamus ausgeübt, die wiederum Signale vom Cortex empfangen. Es wird angenommen, dass nur diejenigen sensorischen Repräsentationen, die oszillierende neuronale Aktivität auslösen, für andere Hirnprozesse global verfügbar sind. Es wird auch davon gesprochen, dass diese Repräsentationen damit Bestandteil eines Global Workspace, d. h. eines globalen Arbeitsbereichs, werden (Baars 1989; 1997). Repräsentationen, die Bestandteil des Global Workspace sind, würden den Inhalt des phänomenalen Bewusstseins und gleichzeitig den Inhalt des Zugriffsbewusstseins darstellen. Allerdings wird mittlerweile vermutet, dass die corticothalamischen Schleifen vor allem mit der Wachheit bzw. der globalen Erregbarkeit verknüpft sind und weniger mit dem phänomenalem Bewusstsein an sich.

In einer Erweiterung des Global-Workspace-Konzepts auf nichtsensorische Repräsentationen schlagen Dehaene und Naccache (2001) vor, dass der Global Workspace aus Hirnarealen bestehen muss, die eine ausgeprägte wechselseitige Verknüpfung auch über eine große räumliche Distanz hinweg aufweisen. Dies würde insbesondere für den *präfrontalen* und den *anterioren cingulären Cortex* zutreffen. Nur durch solche wechselseitigen, über weite Distanzen reichenden Verbindungen könnten unterschiedliche Hirnareale funktional miteinander gekoppelt und so Information koordiniert verarbeitet werden. Eine solche Verknüpfungsstruktur könnte zudem hinreichend sein für das Entstehen einer zeitlich stabilen, kohärenten und selbstverstärkenden neuronalen Aktivität, die wiederum mit einem bewussten Erleben einhergeht. Hirnareale, die nicht durch wechselseitige Verbindungen über lange Distanzen hinweg verknüpft sind, stellen ihre Repräsentationen nicht global zur Verfügung, deren

Inhalte seien somit auch nicht der Introspektion zugänglich, z. B. die Blutdruckregulation im Hirnstamm oder die Regelung der Blickkontrolle im Colliculus superior (▶ Kap. 2).

Die sensorischen, motorischen und kognitiven Systeme können dabei situationsabhängig zum Global Workspace beitragen; insbesondere aufmerksamkeitsgesteuerte Top-down-Verstärkung könnte Prozesse in den Teilsystemen temporär mobilisieren und so zum Bestandteil des Global Workspace werden lassen. Aufgrund dieser *dynamischen Mobilisierung* kann ein gegebener Prozess in Abhängigkeit der Situation bewusst oder unbewusst sein. Nach Dehaene et al. (2006) können unbewusste Prozesse bzw. Stimuli zwei unterscheidbare Zustände einnehmen: Ein Prozess wird als *subliminal* bezeichnet, wenn die Aktivierung in den sensorischen Arealen, beispielsweise durch einen Stimulus, schwach oder durch nachfolgende Stimuli unterbrochen ist (z. B. bei Reizmaskierung; ▶ Abschn. 6.4.1). Als *vorbewusst* wird ein Prozess bezeichnet, der eigentlich eine hinreichende Aktivierungsstärke und lokal in den sensorischen Arealen eine kohärente schleifenförmige Aktivität auslöst. Allein aufgrund fehlender Aufmerksamkeitszuwendung findet keine dynamische Mobilisierung statt, sodass der Prozess nicht präfrontale Areale und damit den Global Workspace einbezieht (z. B. durch Abzug von Aufmerksamkeit beim Aufmerksamkeitsblinzeln; ▶ Abschn. 6.4.1). Dynamische Mobilisierung muss nicht notwendig einen Homunculus implizieren, der entscheidet, welcher Prozess bewusst oder unbewusst ablaufen soll, sie wird vielmehr als ein dynamisches Phänomen verstanden, das ohne Supervision auf der Ebene von Neuronenverbänden entsteht.

Bewusste und unbewusste Modi involvieren ein identisches, für diesen Prozess spezialisiertes (z. B. sensorisches) System, unterscheiden sich aber darin, inwieweit dessen Repräsentationen dem Global Workspace zur Verfügung gestellt werden. Im unbewussten Modus wird Information nur zwischen Systemen ausgetauscht, die so stark gekoppelt sind, dass ein Informationsaustausch ohne externe Verstärkung über weitere Workspace-Areale stattfinden kann. Im bewussten Modus sind Repräsentationen global verfügbar; Information kann dadurch zwischen beliebigen, am Workspace beteiligten Systemen ausgetauscht werden.

Ein Vergleich der hier skizzierten neurowissenschaftlichen Bewusstseinsmodelle verdeutlicht, dass keine Einigkeit über die dem Bewusstsein zugrunde liegenden neuronalen Mechanismen und Strukturen besteht. Ein Konsens besteht allenfalls darin, dass Bewusstsein nicht in einer bestimmten Hirnstruktur, dem „Bewusstseinsareal", entsteht, in dem die gesamte Information zusammenläuft, sondern durch schleifenförmige neuronale Aktivität in einem Netzwerk von funktionell verschiedenen Hirnarealen. Damit werden wir mit der paradoxen und kontraintuitiven Vorstellung konfrontiert, dass die subjektive Einheit bewusster Empfindungen durch verteilte neuronale Prozesse in einem modular aufgebauten System erklärt wird.

6.3.4 Philosophische Ansätze

Philosophische Reflexionen stellen wissenschaftsgeschichtlich den Ausgangspunkt der Bewusstseinsforschung dar. Es war der Philosoph René Descartes, der den modernen Bewusstseinsbegriff einführte und prägte. Ursprünglich im philosophischen Diskurs etabliert, diffundierte der Bewusstseinsbegriff mit der Zeit in andere Wissenschaftsdisziplinen und in die Alltagssprache bzw. -psychologie (zumindest in manchen Sprachgemeinschaften; ▶ Zur Vertiefung 6.1). In diesem Sinne ist Bewusstsein eine „Erfindung" der Philosophie und ein Beispiel dafür, wie ein von Wissenschaftlern ausgedachtes Konstrukt das Denken der Menschen ändern kann.

Die Kernfrage der aktuellen, nicht nur der philosophischen Diskussion über Bewusstsein ist die Frage, ob sich Bewusstsein allein bzw. überhaupt auf psychologische und/oder neuronale Prozesse zurückführen lässt. Die Bewusstseinsproblematik ist damit auch ein zentraler Aspekt in der Debatte über das *Leib-Seele-* bzw. *Gehirn-Geist-Problem*.

Die Bewusstseinskonzeption von Descartes veranschaulicht eine sehr extreme Position zum Verhältnis von Geist, Denken, Bewusstsein und Gehirn, die sich in abgeschwächter Form nicht nur im alltagspsychologischen Denken, sondern auch in manchen neueren (populär-)wissenschaftlichen Arbeiten wiederfindet (z. B. Popper und Eccles 1994). Mit seinem berühmten Satz *Cogito ergo sum* setzte Descartes Bewusstsein mit Denken gleich. Denken sei das Wesen des Geistes, womit alles, was sich im Geist befindet, auch unweigerlich bewusst sei. Descartes nimmt eine strikte Trennung zwischen Geist und Körper inklusive Gehirn vor – Geist, und damit auch Bewusstsein, stellt eine von der materiellen Substanz des Körpers abzugrenzende immaterielle Substanz dar. Der Geist bediene sich jedoch des Körpers, um mit der Umwelt zu interagieren. Descartes stellte sich dabei vor, dass der Körper wie ein Automat mechanisch funktioniert (◘ Abb. 6.4). Für Descartes haben Tiere keinen Geist und damit kein Bewusstsein, sondern sind nur Automaten. Descartes ist somit der prominenteste Vertreter eines **Dualismus** zum Verhältnis von Geist und Gehirn. Dualistische Ansätze sind generell mit dem Problem konfrontiert zu erklären, wie ein immaterieller Geist auf einen materiellen Körper kausal einwirken soll.

Eine hierzu gegensätzliche Position zum Verhältnis zwischen Bewusstsein und Gehirn nehmen Vertreter des **eliminativen Materialismus** ein, die Bewusstseinsphänomene mit Gehirnprozessen gleichsetzen. Unabhängig vom Gehirn existierende Geister oder Seelen werden als Aberglauben abgelehnt. Vertreter dieses auch als Physikalismus bezeichneten Ansatzes fordern eine *reduktionistische Strategie* bei der Erforschung des Bewusstseins (Churchland 1988; 1996): Phänomene auf der Mikroebene (Eigenschaften neuronaler Netzwerke und assoziierter Mechanismen) seien geeignet, Phänomene der Makroebene (psychische Phänomene) zu erklären. Psychologische Begriffe, die zur Erklärung von Verhalten herangezogen werden, könnten durch die Entdeckung der zugrunde liegenden neurobiologischen Mechanismen revidiert und möglicherweise ersetzt werden.

Die Erforschung von Bewusstseinsprozessen muss parallel auf der Mikro- und der Makroebene stattfinden, damit Hypothesen miteinander koevoluieren können, indem sie sich gegenseitig korrigieren und befruchten. Aussagen zu Bewusstsein dürfen nie transzendentale Absoluta oder introspektive Gewissheiten sein, sondern müssen stets als (revidierbare) Hypothesen betrachtet werden. Sie erhalten damit empirischen Charakter und sind keine Frage einer begrifflichen Analyse oder des religiösen Glaubens.

Abb. 6.4 Reflexbogen nach Descartes. Descartes fasste den menschlichen Körper als eine Maschine auf, die nach hydraulischen Prinzipien funktioniert. Der Kopf enthält seiner Meinung nach lediglich ein Flüssigkeitsreservoir. Die Flüssigkeit kann nach Öffnen eines Ventils durch Schläuche in die Gliedmaßen fließen und dort eine Bewegung auslösen. Der menschliche Geist, und damit auch das Bewusstsein, ist immaterieller Natur und bedient sich lediglich des Körpers, um mit der Umwelt zu interagieren. (Nach Descartes 1664, aus Kolb und Whishaw 1996)

Churchland vergleicht den reduktionistischen Ansatz bei der Erklärung psychischer Phänomene mit erfolgreichen reduktionistischen Erklärungen in der Physik. In der kalorischen Thermodynamik wurde das Konzept eines Wärmestoffs (Phlogiston) durch die allgemeinere und mit anderen Theorien kompatible Erklärung von Wärme als mittlere kinetische Energie der Teilchen ersetzt. Wärme wird dabei nicht durch die mittlere kinetische Energie von Teilchen verursacht, sondern ist identisch damit. Entsprechend sollte Bewusstsein nicht durch (noch herauszufindende) Gehirnprozesse verursacht werden, sondern mit diesen identisch sein (*Identitätstheorie*).

Gegen eine direkte Identifizierung von Bewusstsein mit materiellen Prozessen wenden sich Vertreter eines **funktionalistischen Ansatzes**. So versteht Dennett (1991) das Gehirn als Hardware, auf dem als Software das „Bewusstseinsprogramm" läuft. Eine parallele Maschine, bestehend aus den neuronalen Netzwerken des Gehirns, simuliere eine serielle, bewusste virtuelle Maschine. Damit erübrige sich die Erforschung der neurobiologischen Mechanismen des Bewusstseins und es reiche aus, Bewusstsein anhand von Verhaltensleistungen mithilfe der Methoden der experimentellen Psychologie zu untersuchen.

Die virtuelle Bewusstseinsmaschine entsteht nach Dennett (1991) dadurch, dass Menschen Sprache erwerben und lernen, lautlos zu sich selbst zu reden. Bewusstsein ist für ihn eine phylogenetisch und ontogenetisch spät aufgetretene Neuerung, die in der angeborenen Maschinerie nicht installiert ist. Bewusstsein sei weitgehend ein Produkt der kulturellen Evolution, das dem Gehirn im frühen Training vermittelt wurde, womit die Idee verknüpft ist, dass man Bewusstsein nicht haben kann, ohne auch den Begriff von Bewusstsein zu haben.

Dennett (Dennett und Kinsbourne 1992) wendet sich gegen die Annahme eines cartesischen Theaters, in dem Repräsentationen zusammengeführt, re-repräsentiert und so einem bewussten Betrachter quasi vorgespielt werden. Repräsentationen würden zu keinem Zeitpunkt und an keinem Ort im Gehirn phänomenal bewusst. Er leugnet letztendlich die Existenz eines phänomenalen Bewusstseins bzw. weist ihm allenfalls den Status eines Epiphänomens zu, das durch Sprache bzw. Kultur vermittelt sei.

Mit der Leugnung der Existenz eines phänomenalen Bewusstseins besteht für Dennett (Dennett und Kinsbourne 1992) auch nicht das Problem der **Erklärungslücke** (*explanatory gap*), das in der philosophischen Diskussion über Bewusstsein eine große Rolle spielt (Levine 1983). Einige Philosophen behaupten, dass es unmöglich sei, phänomenales Bewusstsein durch Angabe von psychologischen oder neurobiologischen Mechanismen zu erklären. Es könne keine befriedigende Theorie darüber geben, wie bestimmte mentale Operationen bzw. Informationsverarbeitungsprozesse oder neuronale Aktivitätsmuster (beides Beschreibungen aus der Dritte-Person-Perspektive) zu den subjektiven Empfindungen, den Qualia, aus der Erste-Person-Perspektive, führen sollen. Empirische Untersuchungen mögen die Mechanismen der Farb- oder Schmerzwahrnehmung bis ins letzte Detail aufklären. Es können Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wann und wie Farb- oder Schmerzreize zur Handlungskontrolle beitragen oder sprachlich verbalisiert werden können. Dieses Wissen trage allenfalls zur Erklärung des Zugriffsbewusstseins bei. Das phänomenale Bewusstsein entzöge sich aber grundsätzlich einem empirisch wissenschaftlichen Zugang.

An der Annahme einer Erklärungslücke für das phänomenale Bewusstsein wird insbesondere von den Vertretern des eliminativen Materialismus heftige Kritik geübt. Es wird argumentiert, dass das Postulat einer Erklärungslücke auf Behauptungen der folgenden Art beruht (Churchland 1996): „Ich kann mir nicht vorstellen, dass …", „Es verstößt gegen meine Intuition, dass …". Persönliche oder gesellschaftliche Vorstellungen bzw. Intuitionen über bestimmte Sachverhalte können aber nicht als Bewertungsgrundlage dafür dienen, ob eine bestimmte Theorie zutrifft oder nicht. Wissenschaftliche Theorien haben immer wieder kontraintuitive oder überraschende Erklärungen angeboten (kopernikanisches Weltbild, Evolutionstheorie), die den Denkgewohnheiten der zeitgenössischen Menschen widersprachen (z. B. dem ptolemäischen Weltbild mit der Erde als Mittelpunkt des Kosmos oder Lebewesen als Schöpfung Gottes) und daher zunächst als unsinnig galten, aber nun weitgehend akzeptiert werden. Das Zutreffen einer Theorie ist letztlich eine empirische und keine Glaubensfrage.

Die philosophische Debatte darüber, wie eine adäquate Erklärung von Bewusstsein aussehen könnte, hält weiter an, und ihr Ausgang ist gegenwärtig nicht absehbar. Unabhängig von einer möglichen Klärung trägt sie zur einer präzisieren theoretischen Bestimmung des Bewusstseinsbegriffs und zu einer kritischen Analyse vorliegender Theorien und Befunde aus den empirischen Wissenschaften bei.

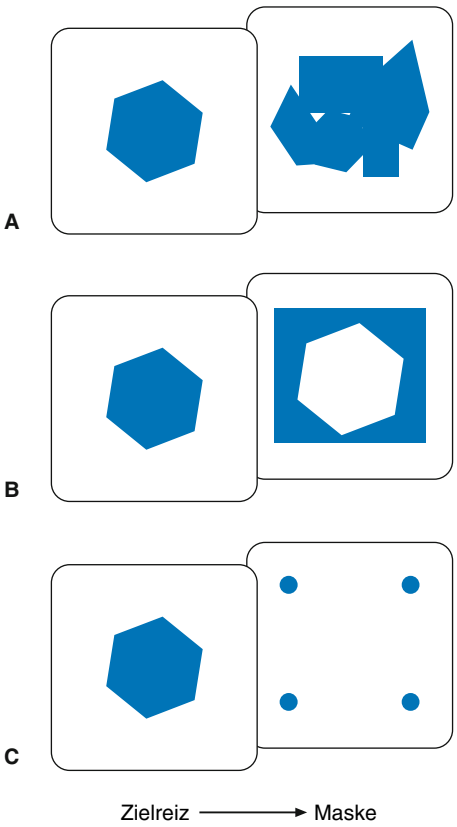
6.4 Empirische Bewusstseinsforschung

Empirische Arbeiten zum Bewusstsein wie die meisten der hier vorgestellten Befunde aus Allgemeiner Psychologie, Neuropsychologie und Neurobiologie sind selten unmittelbar durch Bewusstseinstheorien motiviert oder stellen explizit einen Bezug zu ihnen her. Häufig entstanden die Befunde vor dem Hintergrund anderer, mit der Bewusstseinsthematik jedoch verwandter Fragestellungen, wie visuelle Wahrnehmung, selektive Aufmerksamkeit oder Automatizität der Informationsverarbeitung. Ein Grund dafür liegt sicher darin, dass die derzeitig vorhandenen Theorien zum Bewusstsein in der Regel zu allgemein formuliert sind, als dass im Experiment testbare Hypothesen abgeleitet werden könnten. Im Gegensatz dazu liegen relativ elaborierte Modelle aus benachbarten Forschungsgebieten vor. Wie in ▶ Abschn. 6.5 dargelegt wird, sprechen die Befunde dafür, dass phänomenales und Zugriffsbewusstsein durch bestimmte Verarbeitungsprozesse zustande kommen und nicht durch die Aktivität eines kognitiven Moduls bedingt sind. Bei den empirischen Arbeiten zu Bewusstsein kommen vielfältige experimentelle Zugänge zum Einsatz. Bewusstseinsphänomene werden an gesunden Probanden, an neuropsychologischen Patienten mit spezifischen Störungen sowie an Tieren untersucht. Dabei werden sowohl Verhaltensleistungen wie Reaktionszeiten und Fehlerraten als auch neurophysiologische Maße für die Gehirnaktivität erfasst. Die Fülle der Arbeiten aus den verschiedensten Themenbereichen erfordert es, eine Auswahl zu treffen und wichtige experimentelle Zugangsweisen und Befunde exemplarisch vorzustellen.

6.4.1 Bewusste und unbewusste Wahrnehmung

Reize, die im Fokus der Aufmerksamkeit stehen, nehmen wir im Allgemeinen bewusst wahr, d. h., es bildet sich ein Perzept aus, das mit einem phänomenalen Erleben verbunden ist. Wir können über dieses Erleben verbal berichten und uns unter Umständen später an den Reiz erinnern. Durch geschickte experimentelle Manipulationen ist es jedoch möglich, das phänomenale Bewusstsein über Reize auszuschalten. In der Regel werden Maskierungstechniken angewandt, bei denen vor und/oder nach einem sehr kurz dargebotenen Zielreiz (Darbietungszeit zwischen 10 und 50 ms) ein anderer Stimulus, die *Maske*, präsentiert wird. Wenn allein präsentiert, wird der Reiz den Versuchspersonen bewusst, zusammen mit der Maske hingegen bleibt er unbewusst (▶ Zur Vertiefung 6.2). Diese Technik erlaubt es, den Einfluss von bewusst und unbewusst wahrgenommenen Reizen auf kognitive Prozesse bzw. Verhaltensleistungen zu bestimmen, und kann so die Rolle des phänomenalen Bewusstseins bei der Informationsverarbeitung klären helfen.

Maskierungstechniken wurden zur Untersuchung der unbewussten Wahrnehmung vor allem in der visuellen Modalität eingesetzt (◘ Abb. 6.5). Als Maske dienen visuelle Muster (*pattern masks*), meist Buchstabenfolgen oder geometrische Figuren, die den zu maskierenden Reiz räumlich überlagern. Bei der Metakontrastmaskierung umschließt der Umriss des Maskierungsreizes die Kontur des zu maskierenden Reizes, berührt ihn jedoch nicht. Sogar eine Vierpunktmaske – ein quadratisches Muster aus vier Punkten – reicht zur Maskierung aus. Je nachdem, ob die Maske vor oder nach dem eigentlichen Zielreiz auftritt, spricht man von einer Vorwärts- oder einer Rückwärtsmaske.



◘ **Abb. 6.5** Maskierungstechniken. **A** Mustermaske. **B** Metakontrastmaske. **C** Vierpunktmaske

Zuweilen wird im Zusammenhang mit unbewusster Wahrnehmung synonym auch der Terminus der **subliminalen** (unterschwelligen) **Wahrnehmung** verwendet. Dieser Begriff wird inzwischen vermieden, denn er impliziert die Existenz einer (Wahrnehmungs-)Schwelle im Sinne einer Mindeststärke, die ein Reiz überschreiten muss, um überhaupt verarbeitet zu werden. Die Annahme einer Wahrnehmungsschwelle im Sinne eines solchen Alles-oder-nichts-Prinzips ist mit großer Wahrscheinlichkeit falsch, da sie nicht erklären kann, warum „unterschwellige" Reize Informationsverarbeitungsprozesse auslösen können. Plausibler erscheint, dass Informationsverarbeitung bei jeder beliebigen Reizstärke einsetzt, dass jedoch z. B. unter Maskierungsbedingungen eine gegebene Reizstärke nicht ausreicht, den Reiz oder seine Merkmale zu erkennen – es existiert also eher eine Erkennensschwelle im Sinne bewusster Wahrnehmung.

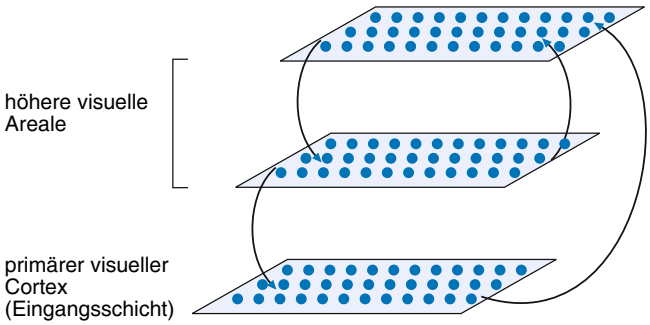
In ihrem Modell zur **visuellen Maskierung** nehmen Enns und Di Lollo (2000) an, dass für die Herausbildung eines bewussten visuellen Perzepts eine Konsolidierung der Repräsentation im visuellen System stattfinden muss (◘ Abb. 6.6): Ein Reiz aktiviert zunächst den primären visuellen Cortex, der wiederum höhere visuelle Areale aktiviert (zur Neuroanatomie des visuellen Systems s. ▶ Kap. 2). Von den höheren visuellen Arealen existieren Rückprojektionen zum primären visuellen Cortex, wodurch eine

Verarbeitungsschleife entsteht. In dieser Schleife muss ein durch einen Reiz ausgelöstes Aktivitätsmuster über mehrere Verarbeitungszyklen hinweg kreisen, bis ein stabiler Zustand entsteht, der die Grundlage für das bewusste Perzept darstellt (s. auch das Global-Workspace-Modell von Dehaene und Naccache [2001] in ▶ Abschn. 6.3.3).

Enns und Di Lollo (2000) schlagen vor, dass durch Masken ausgelöste Verarbeitungsprozesse mit diesen Konsolidierungsprozessen, die für den Aufbau eines stabilen, bewussten Perzepts des Zielreizes nötig sind, interferieren. Zentral für das Entstehen von Maskierungseffekten ist die Annahme, dass das von einem Reiz ausgelöste Aktivierungsmuster in den höheren visuellen Arealen langsamer zerfällt als im primären visuellen Cortex. Ändert sich – wie in Maskierungsexperimenten – die periphere visuelle Stimulation sehr rasch, dann entsteht im primären visuellen Cortex eine Interferenz zwischen dem durch die Maske ausgelösten aktuellen und dem von höheren Arealen rückprojizierten Aktivitätsmuster des Zielreizes. Maskierungseffekte entstehen also dadurch, dass bei genügend langer Präsentationsdauer des Maskierungsreizes das Aktivitätsmuster des Zielreizes immer mehr zerfällt, sodass das Aktivitätsmuster des Maskierungsreizes das Perzept dominieren kann. Enns und Di Lollo (2000) sprechen daher auch von Maskierung durch Objektsubstitution.

Viele Experimente zeigen, dass maskierte und nicht bewusst wahrgenommene visuelle Reize Verarbeitungsprozesse nachfolgend dargebotener Stimuli beeinflussen können (Übersicht in Merikle und Daneman 1998). Zur Demonstration der Effekte unbewusst wahrgenommener Reize wurden dabei häufig Bahnungsparadigmata verwendet. Ganz allgemein wird als **Bahnung** (*priming*) die Erleichterung einer Reaktion auf einen Zielreiz (*target*) aufgrund der vorherigen Darbietung eines Bahnungsreizes (*prime*) bezeichnet. Wird der Bahnungsreiz maskiert und ist damit nicht bewusst wahrnehmbar, spricht man von subliminaler (d. h. unterschwelliger) Bahnung. Anhand der inhaltlichen Beziehung zwischen dem Bahnungs- und dem Zielreiz, die als Grundlage für die Bahnungseffekte angesehen wird, werden unterschiedliche Formen der Bahnung unterschieden. Für die vorliegende Arbeit sind zwei Formen von besonderer Bedeutung: Reaktionsbahnung und semantische Bahnung.

Unter *Reaktionsbahnung* (*response priming*) versteht man die Beschleunigung einer geforderten Reaktion auf einen Zielreiz, wenn zuvor ein Bahnungsreiz gezeigt wird, der mit derselben Reaktion verknüpft ist (◘ Abb. 6.7). Die Erleichterungseffekte werden dadurch erklärt, dass der Bahnungsreiz in einem System, das auf die visuomotorische Integration und die Vorbereitung von motorischen Handlungen spezialisiert ist, automatisch eine bestimmte Handlungstendenz aktiviert. Neumann und Mitarbeiter (Neumann 1990; Neumann et al. 1998) sprechen in diesem Kontext von „der direkten Spezifikation der motorischen Parameter" durch Reize. Ist die geforderte Handlung zwischen Bahnungs- und Zielreiz kongruent, erfolgt eine Beschleunigung der Reaktion aufgrund der Voraktivierung der Reaktion. Diese Reaktionszeitdifferenz wird als Bahnungseffekt bezeichnet. Erfordert der Zielreiz eine andere Handlung als der Bahnungsreiz (inkongruente Bedingung), muss die voraktivierte, falsche Reaktion unterdrückt werden. Es tritt eine Reaktionsverlangsamung ein. In einer Reihe von Experimenten konnte gezeigt werden,



◘ **Abb. 6.6** Modell zur visuellen Maskierung von Enns und Di Lollo (2000). Grundlage für die Entstehung eines Perzepts ist im Modell ein Konsolidierungsprozess, der eine wechselseitige Aktivierung des primären visuellen Cortex und höherer visueller Cortices erfordert. Die Darbietung der Maske interferiert mit dem Konsolidierungsprozess. (Nach Enns und Di Lollo 2000)

dass eine solche Reaktionsbahnung (und Verlangsamung bei inkongruenten Reizpaaren) auch dann stattfindet, wenn der Bahnungsreiz maskiert und nicht bewusst wahrgenommen wurde (z. B. Klotz und Neumann 1999; Vorberg et al. 2003). Neumann erklärt diese Befunde dahingehend, dass solche Prozesse der visuomotorischen Integration und der Handlungsvorbereitung nicht bewusstseinspflichtig sind und entsprechend nicht an die bewusste Wahrnehmung der Stimuli gebunden sind. Möglicherweise liegen der hier beschriebenen Reaktionsbahnung durch maskierte Reize bei gesunden Probanden und den in ▶ Abschn. 6.4.2 beschriebenen visuomotorischen Leistungen von Patienten mit neuropsychologischen Störungen des visuellen Bewusstseins ähnliche Prozesse zugrunde.

Als *semantische Bahnung* (*semantic priming*) wird die Erleichterung einer Reaktion auf einen Zielreiz aufgrund der vorherigen Darbietung eines semantisch verwandten Bahnungsreizes bezeichnet (Neely 1991). Den Versuchspersonen werden semantisch verwandte (z. B. „Zitrone" – „gelb") oder semantisch nicht verwandte Wortpaare (z. B. „Huhn" – „Dach") und Wort-Pseudowort-Paare (z. B. „Blatt" – „refte") präsentiert, anhand derer sie eine lexikalische Entscheidungsaufgabe lösen, nämlich so schnell wie möglich entscheiden, ob es sich bei dem Zielreiz um ein sinnvolles Wort oder um eine sinnlose Buchstabenfolge handelt. Typischerweise zeigt sich in solchen Experimenten, dass Reaktionen auf semantisch verwandte Wortpaare schneller erfolgen als auf nichtverwandte Wortpaare (semantischer Bahnungseffekt). Der semantische Bahnungseffekt kann jedoch auch bei Maskierung des Bahnungsreizes beobachtet werden. In diesem Fall spiegelt er die Wirkung unbewusst wahrgenommener Reize wider.

Zwei Mechanismen im semantischen Gedächtnis werden zur Erklärung von Bahnungseffekten vorgeschlagen (Posner und Snyder 1975; zu automatischer vs. kontrollierter Verarbeitung s. auch ▶ Abschn. 6.3.1 sowie ▶ Kap. 5); beide unterscheiden sich in der Notwendigkeit der bewussten Wahrnehmung des Bahnungsreizes:

- Bahnung durch *automatische Aktivationsausbreitung* setzt voraus, dass das semantische Gedächtnis topologisch als Netzwerk organisiert ist: Die Konzeptknoten, welche die Wortbedeutung semantisch verwandter Wörter codieren, liegen räumlich benachbart. Die Darbietung des Bahnungs-

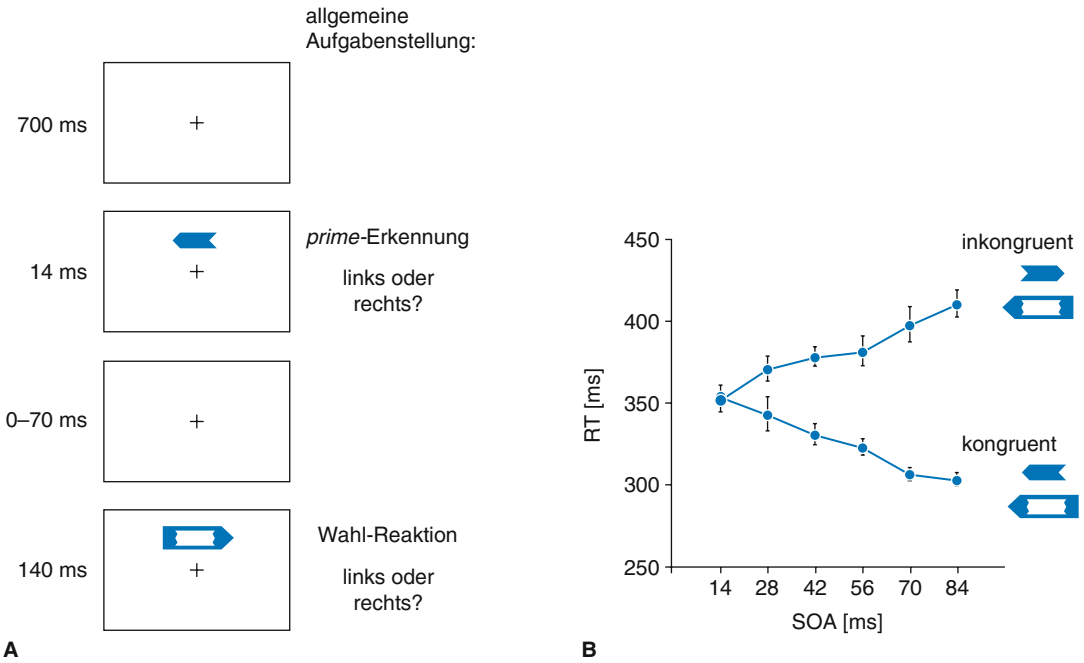


Abb. 6.7 Reaktionsbahnungsparadigma. **A** Bahnungs- und Zielreiz sind entweder mit der gleichen Reaktion (kongruente Bedingung: beide Pfeile deuten in die gleiche Richtung und zeigen einen Tastendruck mit derselben Hand an) oder mit unterschiedlichen Reaktionen (inkongruente Bedingung: Pfeile deuten in unterschiedliche Richtungen) verknüpft. In diesem Experiment dient der Zielreiz gleichzeitig als Metakontrastmaske für den Bahnungsreiz. Je nach Richtung des Zielreizes muss so schnell wie möglich mit einem Tastendruck der linken oder rechten Hand reagiert werden. In einer anderen Phase des Experiments wird überprüft, ob die Ausrichtung des Bahnungsreizes erkannt wird (Prime-Erkennung). **B** Reaktionszeiten (RT) auf den Zielreiz in den kongruenten und inkongruenten Bedingungen in Abhängigkeit des zeitlichen Abstands von Bahnungs- und Zielreiz (*stimulus onset asynchronie*, SOA). Ab einer SOA von 28 ms erfolgen Reaktionen auf kongruente Zielreize schneller als auf inkongruente, wobei der Bahnungseffekt mit der SOA zunimmt. Bei allen SOAs kann der Bahnungsreiz nicht bewusst erkannt werden. (Nach Vorberg et al. 2003)

reizes führt zunächst zur Aktivierung des zugehörigen Konzeptknotens. Diese Aktivierung breitet sich schrittweise räumlich um diesen Knoten aus und hebt die Aktivierungsniveaus weiterer Knoten in der Nachbarschaft in Abhängigkeit von ihrem Abstand zum Konzeptknoten des Bahnungsreizes an. Der Zielreiz wird als Wort erkannt, sobald die Aktivierung des zugehörigen Konzeptknotens eine kritische Schwelle erreicht hat. Im Gegensatz zu semantisch unverwandten Wörtern setzt bei semantisch Verwandten der Aufbau der Aktivierung im Konzeptknoten des Zielreizes auf einem höheren Aktivierungsniveau ein, die Schwelle wird schneller erreicht und damit das Wort schneller erkannt. Der Bahnungsreiz selbst muss nicht bewusst wahrgenommen werden, um eine Ausbreitung der Aktivierung auszulösen.

Unter die Kategorie *kontrollierter Prozesse* fällt eine Reihe von unterschiedlichen strategischen Mechanismen, die eine bewusste Wahrnehmung des Bahnungswortes voraussetzen. Bei *erwartungsbasierter Bahnung* bilden die Versuchspersonen aufgrund des Bahnungsreizes Erwartungen darüber aus, welches Wort als Zielreiz folgen könnte, Reaktionen können schneller erfolgen, wenn Zielwort und erwartetes Wort übereinstimmen. Erwartungsbasierte Bahnung kann jedoch nur bei einem großen zeitlichen Abstand zwischen dem Beginn des Bahnungs- und des Zielreizes (*stimulus onset asynchrony*, SOA: größer als 700 ms) wirksam werden, da die Herausbildung von Erwartungen eine bestimmte Zeit benötigt.

Ob Maskierung tatsächlich geeignet ist, die bewusste Wahrnehmung von Reizen zu verhindern, war Gegenstand einer langen und äußerst kontroversen Debatte. Üblicherweise wird in Maskierungsexperimenten vor oder nach dem Hauptexperiment ein Sichtbarkeitstest durchgeführt, in dem die Probanden eine Entscheidung hinsichtlich bestimmter Merkmale der maskierten Reize fällen müssen (z. B. Groß-/Kleinschreibung, lexikalische Entscheidung, An-/Abwesenheit). Antworten die Probanden mit einer der Ratewahrscheinlichkeit entsprechenden Genauigkeit, dann gilt als sichergestellt, dass die maskierten Wörter nicht bewusst wahrgenommen wurden. Der Kritik an der Validität von maskierten Bahnungseffekten als Indikatoren für unbewusste Wahrnehmungsprozesse wurde mit einer Verbesserung der experimentellen Technik begegnet (▶ Zur Vertiefung 6.2).

Auch bei Anwendung dieser strengeren Kriterien konnten maskierte Bahnungseffekte beobachtet werden. Weiterhin konnte in einer Regressionsanalyse gezeigt werden, dass bei einer vollständigen Nichtsichtbarkeit des Bahnungsreizes trotzdem noch Bahnungseffekte zu erwarten sind (Greenwald et al. 1996; Kiefer 2002). Schließlich wurde für maskierte Reize ein negativer Zusammenhang zwischen Sichtbarkeit und Bahnung beobachtet (Kiefer 2002). Dies deutet darauf hin, dass bei Reizen nahe der Erkennensschwelle eine partielle bewusste Identifikation des Bahnungsreizes die Verarbeitung des Zielreizes nicht fördert.

Das stärkste Argument für das Vorliegen von unbewussten Wahrnehmungsprozessen bei Reizmaskierung sind aber Befunde, wonach maskierte bzw. unmaskierte Reize *qualitativ* unterschiedliche Effekte hervorrufen. Eine solche qualitative Disso-

Zur Vertiefung 6.2

Probleme bei der Operationalisierung der Bewusstheit von Reizen

Wenn phänomenales Bewusstsein empirisch untersucht wird, muss in irgendeiner Form der Inhalt des Wahrnehmungserlebnisses erhoben werden. Experimente zu unbewusster Wahrnehmung müssen sicherstellen, dass Reize nicht phänomenal bewusst werden. Es stellt sich somit die Frage, wie Bewusstheit bzw. Unbewusstheit operationalisiert, d. h. gemessen, werden soll. Eine weitverbreitete Methode ist es, Versuchspersonen verbal über ihr Erleben berichten zu lassen, das mit Wahrnehmungen und Gedanken assoziiert ist. Verbale Berichte müssen aber nun den Inhalt des phänomenalen Bewusstseins nicht notwendigerweise zutreffend widerspiegeln. Dieses Problem ist dann besonders groß, wenn auf die Unbewusstheit eines Reizes rückgeschlossen werden soll. Eine Versuchsperson mag unsicher sein, einen bestimmten Reiz gesehen zu haben, und berichtet lieber, um nichts Falsches zu sagen, dass sie gar nichts gesehen habe. Aus diesem Grund werden in vielen Untersuchungen sogenannte Verhaltensberichte oder „objektive Maße" erhoben: Versuchspersonen werden dabei in einem Sichtbarkeitstest aufgefordert, eine Entscheidung über eine bestimmte Merkmalsausprägung eines Reizes zu treffen und eine entsprechende Taste zu drücken (Reiz an-/abwesend, Wort-/Pseudowort, Groß-/Kleinschreibung). Die Wahrnehmung gilt dann als unbewusst, wenn die Antwortgenauigkeit bei einer Serie von Reizen der Ratewahrscheinlichkeit entspricht. Außerdem kann auf der Grundlage der Signaldetektionstheorie (Green und Swets 1966) aus der Trefferrate (z. B. relative Häufigkeit der korrekten Wortidentifikation) und der Falsche-Alarm-Rate (z. B. relative Häufigkeit einer „Wort"-Antwort, wenn tatsächlich kein Wort, sondern ein Pseudowort präsentiert wurde) der Sensitivitätsindex d' berechnet werden. Dieser Sensitivitätsindex ist ein Maß für die Identifikationsgenauigkeit unabhängig von möglichen Entscheidungstendenzen der Probanden.

Ein erstes Problem bei dieser Art der Operationalisierung von Bewusstheit besteht darin, dass Versuchspersonen in Abhängigkeit von der gestellten Aufgabe unterschiedliche Entscheidungs- oder Antwortstrategien anwenden können, die auch bei der Anwendung des Sensitivitätsindex d' die Ergebnisse verzerren. Ein weiteres Problem könnte sein, dass die Aufgaben unterschiedlich schwer zu lösen sind, da sie unterschiedlich viel Information über den Stimulus voraussetzen. Es ist durchaus möglich, dass Versuchspersonen bei einer Aufgabenserie mit der Ratewahrscheinlichkeit, bei einer anderen mit identischem Stimulusmaterial jedoch überzufällig richtig antworten. Dieses Problem könnte man nun dadurch lösen, dass ein Konsens über die einfachste Aufgabe erreicht wird. Dies löst allerdings nicht ein zweites Problem: Es ist durchaus möglich, dass unbewusst wahrgenommene Information die motorische Reaktion beeinflusst. Überzufällig richtiges Antwortverhalten würde somit fälschlicherweise als bewusste Wahrnehmung interpretiert. Würden die Kriterien für Unbewusstheit zu streng ausgelegt, ließe sich das Phänomen der unbewussten Wahrnehmung nicht mehr nachweisen. Ein möglicher Ausweg aus diesem Dilemma könnte darin bestehen, in einem Experiment unterschiedliche Kriterien anzuwenden und abzuschätzen, inwieweit die Ergebnisse von der spezifischen Operationalisierung der Bewusstheit abhängen. Vermutlich tragen die verschiedenen Aspekte eines Reizes (z. B. An- oder Abwesenheit eines Reizes, Form, Farbe, Bedeutung) in unterschiedlichem Ausmaß zum bewussten Perzept bei und können deshalb mehr oder weniger gut bei Sichtbarkeitstests berichtet werden (Kouider et al. 2011).

ziation spricht für die Beteiligung unterschiedlicher Prozesse und entkräftet den Einwand, dass der Sichtbarkeitstest nicht sensitiv genug sei, eine bewusste Wahrnehmung des maskierten Reizes aufzudecken. Gleichzeitig liefern qualitativ unterschiedliche Effekte maskiert bzw. unmaskiert dargebotener Reize Hinweise auf die Funktion bewusster Wahrnehmung. Im Folgenden wird im Detail auf drei qualitative Dissoziationen eingegangen.

Selektion kontextadäquater Information

Marcel (1980) konnte zeigen, dass nur bei bewusster Wahrnehmung kontextadäquate Information ausgewählt wird, bei unbewusster Wahrnehmung dagegen relevante wie irrelevante Inhalte gleichermaßen repräsentiert sind. Er zeigte seinen Versuchspersonen am Computerbildschirm hintereinander Wörter eines Triplets. Die Wort-Triplets bestanden jeweils aus einem mehrdeutigen, homonymen Wort („Bank") sowie einem Kontextwort („Park"), das die Mehrdeutigkeit des Homonyms aufhebt (Desambiguierung). Das dritte Wort konnte sich entweder auf die durch den Kontext unterstützte („sitzen") oder nicht unterstützte („sparen") Bedeutung des Homonyms beziehen bzw. war semantisch nicht verwandt („kochen"). Das Kontextwort wurde entweder maskiert oder unmaskiert dargeboten, und die Versuchspersonen sollten eine lexikalische Entscheidung für das dritte Wort fällen, wobei die Reaktionszeit gemessen wurde. Es zeigte sich, dass bei Maskierung des Kontextwortes Reaktionen auf semantisch verwandte Wörter generell schneller erfolgen konnten als auf nichtverwandte, und zwar unabhängig davon, ob sich die verwandten Wörter auf die kontextadäquate und kontextinadäquate Bedeutung des Homonyms beziehen. War dagegen das Kontextwort unmaskiert, zeigten nur die kontextadäquaten, nicht aber die inadäquaten Wörter einen Reaktionszeitvorteil gegenüber den nichtverwandten Wörtern. Dieser Befund lässt die Schlussfolgerung zu, dass nur bei unmaskierter Präsentation der Kontextwörter diejenigen Bedeutungen des Homonyms inhibiert werden, die dem Kontext nicht entsprechen.

Zeitverlauf maskierter und unmaskierter Bahnungseffekte

Maskierte und unmaskierte Bahnungseffekte weisen qualitativ unterschiedliche Zeitverläufe auf. Maskierte Bahnungseffekte zerfallen rasch innerhalb von ungefähr 200 ms, unmaskierte Bahnungseffekte werden dagegen umso größer, je mehr Zeit für die Verarbeitung zur Verfügung steht. Vermutlich kommt die Verstärkung der unmaskierten Bahnung dadurch zustande, dass strategische Verarbeitungsmechanismen erst nach Ablauf einer gewissen Zeitdauer wirksam werden (Greenwald et al. 1996). Maskierte und unmaskierte Bahnungseffekte könnten daher unterschiedliche Zeitverläufe von Hirnaktivierungen auslösen. Hirnaktivierungen aufgrund semantischer Bahnung können mithilfe von ereigniskorrelierten Hirnpotenzialen (EKPs) abgebildet werden. EKPs sind Potenzialveränderungen innerhalb des Elektroencephalogramms, die mit sensorischen oder kognitiven Verarbeitungsprozessen in Zusammenhang stehen. Ein bestimmtes Potenzial, das aufgrund seiner negativen Polarität und seiner Latenz von ungefähr 400 ms als N400 bezeichnet wird, ist spezifisch für semantische Informationsverarbeitung (Kutas und Hillyard 1980). Die Amplitude des N400-Potenzials spiegelt, vereinfacht gesagt, den kognitiven Aufwand für die Aktivierung einer Wort-

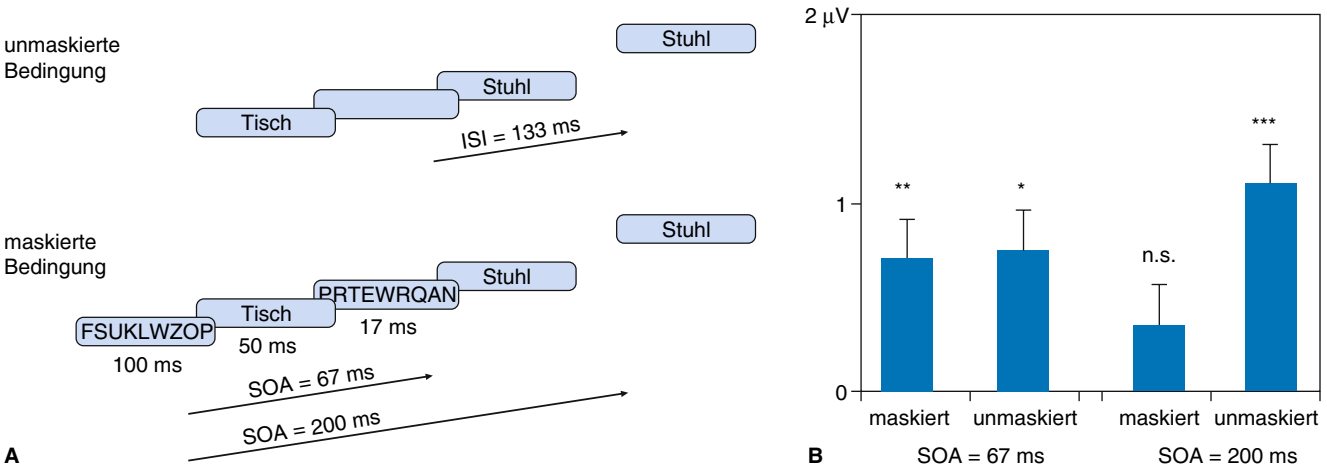


Abb. 6.8 Zeitverlauf maskierter und unmaskierter Bahnungseffekte. **A** Experimentelles Design und zeitliche Abfolge der Stimuli im Bahnungsexperiment. *ISI* = Interstimulusintervall. **B** Bahnungseffekte auf das ereigniskorrelierte N400-Potenzial in Abhängigkeit der Maskierung und der SOA. * = $p < 0{,}05$, ** = $p < 0{,}01$, *** = $p < 0{,}001$, *n. s.* = nicht signifikant (Nach Kiefer und Spitzer 2000)

bedeutung wider. Entsprechend ist die N400-Amplitude bei der Darbietung semantisch verwandter Wortpaare im Vergleich zu nichtverwandten Wörtern verringert (Übersicht in Kiefer 1999). Analog zu Reaktionszeitbahnungseffekten kann man hier von N400-Bahnungseffekten sprechen.

In einem EKP-Experiment zu semantischer Bahnung bekamen die Versuchspersonen semantisch verwandte und nichtverwandte Wortpaare gezeigt und mussten eine lexikalische Entscheidung auf das zweite Wort fällen (Kiefer und Spitzer 2000). Der Bahnungsreiz wurde entweder maskiert oder unmaskiert präsentiert (Abb. 6.8), und der zeitliche Abstand zwischen Bahnungs- und Zielreiz (SOA) war entweder kurz (67 ms) oder lang (200 ms). Während die Probanden die Aufgabe bearbeiteten, wurden EKPs hochauflösend mit 64 Elektroden aufgezeichnet. Wie erwartet, riefen semantisch nichtverwandte Wortpaare im Vergleich zu verwandten ein N400-Potenzial mit einer größeren Amplitude hervor. Diese N400-Bahnungseffekte variierten in Abhängigkeit von Maskierung und SOA (Abb. 6.8). Bei kurzer SOA waren die N400-Bahnungseffekte für maskierte und unmaskierte Stimuli identisch. Bei langer SOA nahmen die unmaskierten N400-Bahnungseffekte im Vergleich zur kurzen SOA zu. Unmaskierte N400-Bahnungseffekte waren nun größer als die maskierten Bahnungseffekte, die sich statistisch nicht mehr von null unterschieden. Die Befunde legen nahe, dass bewusste und unbewusste Reize semantische Aktivierungen in identischen Hirnarealen auslösen, diese Aktivierungen aber zeitlich unterschiedliche Zerfallscharakteristiken aufweisen.

Flexibilität der kognitiven Kontrolle

Es konnte mittlerweile klar gezeigt werden, dass nicht nur bewusste, sondern auch unbewusste Prozesse durch Aufmerksamkeit und anderen Mechanismen der kognitiven Kontrolle beeinflusst werden. So waren maskierte semantische Bahnungseffekte verstärkt, wenn vor Präsentation des Bahnungswortes der Aufmerksamkeitsfokus auf der Bedeutungsdimension von Reizen lag, im Vergleich zu einer Bedingung mit Aufmerksamkeitslenkung auf die der Formdimension. Somit werden unbewusste Prozesse ähnlich wie bewusste Prozesse durch die aufmerksamkeitsbasierte Sensitivierung der Verarbeitungspfade beeinflusst. Allerdings ist die kognitive Kontrolle unbewusster Verarbeitung weniger flexibel als bei bewusster Verarbeitung (Ansorge et al. 2014):

- Kognitive Kontrolle wirkt bei unbewusster Wahrnehmung präemptiv, d. h., sie muss vor Beginn des unbewussten Prozesses oder Reizes aktiv sein. Nur bewusste, typischerweise als „kontrolliert" klassifizierte Prozesse erlauben eine reaktive Kontrolle, welche die andauernde Stimulusverarbeitung modifizieren kann.
- Die Anwendung von kognitiven Kontrollmechanismen erfolgt bei unbewussten Prozessen in der Regel nicht intentional, d. h. absichtsvoll, da die auslösenden Reize nicht mit einem bewussten Wahrnehmungserlebnis verknüpft sind.
- Unbewusste Prozesse erlauben nur im geringeren Ausmaß als bewusste Prozesse eine Etablierung bzw. situationsabhängige Anpassung von Strategien oder Verarbeitungsweisen.

Weitere Paradigmen zur Untersuchung unbewusster Verarbeitungsprozesse

Ein mit Maskierungseffekten verwandtes Wahrnehmungsphänomen ist das **Aufmerksamkeitsblinzeln** (*attentional blink*). Zu dessen Evozierung wird den Versuchspersonen ein rascher Strom von visuellen Reizen im sogenannten RSVP-Paradigma (RSVP = *rapid serial visual presentation*) dargeboten. So wird beispielsweise im Abstand von 66 ms ein Wort für eine Dauer von 16 ms präsentiert, was einer Stimulationsfrequenz von ungefähr 12 Hz entspricht. In der Abfolge der Reize sind zwei Zielreize enthalten, die sich in einem Merkmal, z. B. in der Farbe, von den übrigen Reizen (Distraktorreizen) unterscheiden. Die Ausprägungen des Merkmals bei Ziel- und Distraktorreizen sind den Versuchspersonen bekannt. Diese müssen die Zielreize in der Sequenz entdecken und nach Beendigung der Stimulation verbal berichten oder aus einer Menge von Wörtern auswählen (Abb. 6.9). Typischerweise weist die Identifikationsrate für den zweiten Zielreiz in Abhängigkeit vom Abstand zum ersten einen U-förmigen Verlauf auf: Die Identifikationsrate ist hoch,

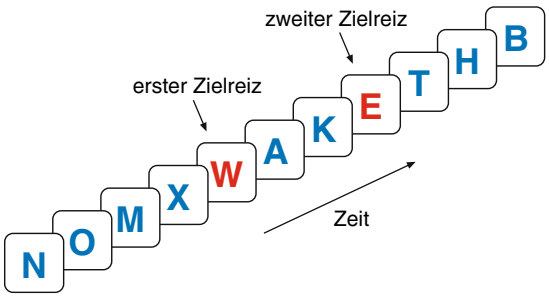


Abb. 6.9 Beispiel für eine Stimulationssequenz im RSVP-Paradigma zur Evozierung des Aufmerksamkeitsblinzelns

wenn der zweite Zielreiz dem ersten unmittelbar folgt oder weit von ihm entfernt ist, und niedrig, wenn der zweite Zielreiz zwei oder drei Positionen nach der Darbietung des ersten präsentiert wird. Dieser Einbruch bei der Identifikationsleistung wird als Aufmerksamkeitsblinzeln bezeichnet. Das Aufmerksamkeitsblinzeln tritt allerdings nur dann auf, wenn der erste Zielreiz erkannt wird; wird der erste Zielreiz verpasst, bleibt auch der Einbruch bei der Identifikationsleistung für den zweiten Zielreiz aus. Zurückgeführt wird dieser Befund auf ein Defizit bei der aufmerksamkeitsbasierten Selektion des zweiten Zielreizes, da die Verarbeitung des ersten noch eine gewisse Zeit andauert (Maki et al. 1997). Dieser Selektionsprozess jedoch ist eine Voraussetzung für die Identifikation und Berichtbarkeit des zweiten Zielreizes. Möglicherweise spielt aber auch ein Wettbewerb beim Abruf der Inhalte des ersten und zweiten Zielreizes aus dem visuellen Kurzzeitgedächtnis eine Rolle (Shapiro et al. 1994). Es liegt jedoch keine befriedigende Erklärung dafür vor, dass bei einer unmittelbaren Abfolge von erstem und zweitem Zielreiz kein Aufmerksamkeitsblinzeln auftritt. Möglicherweise benötigt die Selektion des ersten Zielreizes eine bestimmte Zeit. Innerhalb dieses Zeitintervalls könnte der zweite Zielreiz ebenfalls noch eine Selektion erfahren.

Rolke et al. (2001) untersuchten mithilfe von ereigniskorrelierten Potenzialen, inwieweit Wörter, die innerhalb des Aufmerksamkeitsblinzelns platziert sind und nicht berichtet werden können, einen Bahnungseffekt auf das N400-Potenzial zu einem nachfolgend präsentierten, semantisch verwandten Wort evozieren. Hierzu modifizierten sie das RSVP-Paradigma zur Evozierung des Aufmerksamkeitsblinzelns und verwendeten drei Zielreize. Der zweite Zielreiz war in der Spanne des durch den ersten Zielreiz ausgelösten Aufmerksamkeitsblinzelns platziert und diente gleichzeitig als Bahnungswort für den dritten Zielreiz, der vier Positionen nach dem zweiten präsentiert wurde. Der zweite und der dritte Zielreiz konnten entweder semantisch verwandt oder nichtverwandt sein. Es zeigte sich, dass der zweite Zielreiz, das Bahnungswort, einen Bahnungseffekt auf die Amplitude des N400-Potenzials des dritten Zielreizes auslöste, und zwar unabhängig davon, ob der zweite Zielreiz identifiziert wurde oder dem Aufmerksamkeitsblinzeln unterlag und nicht berichtbar war. Mit den N400-Amplituden vergleichbare Bahnungseffekte konnten auch für die Identifikationsraten des dritten Zielreizes beobachtet werden: Die Identifikationsrate war höher, wenn zuvor als zweiter Zielreiz ein semantisch verwandtes Wort dargeboten wurde (vgl. auch Maki et al. 1997). Die Studien zum Phänomen des Aufmerksamkeitsblinzelns belegen, dass Wörter, die nicht bewusst identifiziert werden können, dennoch bis zur semantischen Ebene hin verarbeitet werden, und stehen somit im Einklang mit den Befunden aus Experimenten zu unbewusster Bahnung durch Maskierung.

Maskierungsexperimente und Untersuchungen zum Aufmerksamkeitsblinzeln zeigen aber nicht nur, dass unbewusst wahrgenommene Reize über die sensorische Stufe hinaus verarbeitet werden, sondern geben auch Hinweise darauf, welche Voraussetzungen für die Entstehung eines bewussten Perzepts gegeben sein müssen. Kritisch für das Auftreten der Maskierungseffekte und des Aufmerksamkeitsblinzelns sind die Dauer der Stimulation und die Verfügbarkeit von Aufmerksamkeitsressourcen. Wie vom Objektsubstitutionsmodell der Maskierung (Enns und Di Lollo 2000; s. oben) vorhergesagt, ist für die Herausbildung eines bewussten visuellen Perzepts ein für eine gewisse Zeit stabiler visueller Input (von etwa 100 ms) notwendig. Für diese Annahme spricht auch das Phänomen der **Wiederholungsblindheit** (*repetition blindness*; Kanwisher 1987): Werden Stimuli bei rascher sequenzieller Präsentation unmittelbar nacheinander wiederholt, wird das zweite Auftreten des Stimulus nicht erkannt – Beobachter nehmen die beiden Stimuli als ein einzelnes Ereignis wahr. Neben der zeitlichen Stabilität des visuellen Inputs scheint aber auch eine aufmerksamkeitsbasierte Selektion des Stimulus eine Rolle für die bewusste Wahrnehmung zu spielen, wie das Phänomen des Aufmerksamkeitsblinzelns nahelegt. Fehlende Selektion eines Objekts oder eines Teiles einer visuellen Szene wird für das Entstehen der **Veränderungsblindheit** (*change blindness*) verantwortlich gemacht (Rensink et al. 1997; O'Regan et al. 1999): Große Veränderungen innerhalb einer Szene werden nicht bemerkt, wenn die Aufmerksamkeit nicht auf den entsprechenden Abschnitt gerichtet ist.

Gegenwärtig ist nicht völlig geklärt, wie die Stabilität des visuellen Inputs einerseits und die aufmerksamkeitsbasierte Selektion eines Reizes bei der Herausbildung eines bewussten Perzepts zusammenwirken. Auf der Grundlage des Modells von Enns und Di Lollo (2000) ist zu erwarten, dass beide Faktoren zumindest partiell kompensatorisch zum Erreichen eines stabilen Zustands im visuellen System als Grundlage für die bewusste Wahrnehmung beitragen.

6.4.2 Störungen des visuellen Bewusstseins bei hirnverletzten Patienten

Das visuelle System zeigt einen modularen Aufbau: Anatomisch eng umgrenzte visuelle Areale übernehmen spezifische Funktionen wie die Wahrnehmung von Form und Farbe, Objekt- und Gesichtserkennung. Dadurch führen Läsionen, die ein Areal entweder selbst schädigen oder durch Zerstörung neuronaler Verbindungen vom Rest des Systems isolieren, nicht zu einem kompletten Ausfall der visuellen Wahrnehmung, sondern betreffen nur ganz spezifische Teilleistungen. Dabei zeigt sich auch, dass nach Läsionen im visuellen System Reize auf verschiedenen Stufen weiterverarbeitet und in motorische Handlungen einbezogen werden, selbst wenn ihre bewusste Identifikation nicht mehr möglich ist. Befunde dazu können Aufschluss darüber geben, welche Teile des visuellen Verarbeitungsstranges unabhängig von

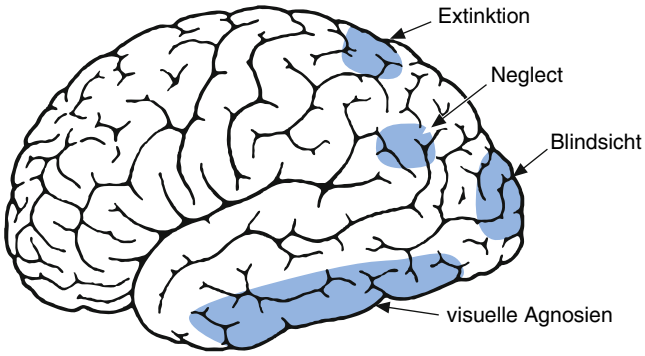


Abb. 6.10 Schematische Darstellung der anatomischen Lokalisation von Hirnschädigungen, die mit spezifischen Störungen des visuellen Bewusstseins einhergehen

einem intakten phänomenalen Bewusstsein welche Leistungen erbringen können. Umgekehrt kann auch auf die Hirnareale rückgeschlossen werden, die für das phänomenale Bewusstsein notwendig sind. Im Folgenden werden Störungen der bewussten visuellen Wahrnehmung bei hirnverletzten Patienten mit den Symptomen **Blindsicht**, **visuelle Agnosie**, **visuelle Extinktion** und **visuospatialer Neglect** vorgestellt und deren Leistungen beschrieben (Abb. 6.10).

Blindsicht

Das Phänomen der Blindsicht wird bei Schädigung des primären visuellen Cortex beobachtet. Pöppel et al.(1973) berichteten erstmals über vier Patienten, die aufgrund einer Läsion in den visuellen Cortices in Teilbereichen ihres Gesichtsfeldes erblindet waren (Hemianopsie), aber dennoch Sakkaden in Richtung eines Reizes durchführen konnten, der ins blinde Gesichtsfeld projiziert wurde. Patienten mit derartigen Gesichtsfeldausfällen können eine Reihe weiterer visueller und visuomotorischer Aufgaben ausführen, wie manuelles Lokalisieren oder Erkennen von Bewegung und Farbe (Weiskrantz 1997). Bei der Vorbereitung einer Greifhandlung können sie die Öffnung der Hand der Größe des zu greifenden, für sie unsichtbaren Objekts anpassen. Die Patienten konnten diese Handlungen erfolgreich durchführen, obwohl sie behaupteten, nichts zu sehen, weshalb dieses Phänomen als Blindsicht (*blindsight*) bezeichnet wird.

Das Phänomen der Blindsicht wird kontrovers diskutiert. Immer wieder wird infrage gestellt, ob die Patienten durch die Läsion im primären visuellen Cortex im betroffenen Gesichtsfeld wirklich vollständig blind waren, und argumentiert, dass die beobachteten Leistungen aufgrund einer residualen Funktion des geschädigten visuellen Cortex oder durch die Verarbeitung in benachbarten, intakten visuellen Arealen zustande kämen. Auch wenn diese Interpretation nicht für jeden berichteten Einzelfall ausgeschlossen werden kann, bleibt als Faktum dennoch die Dissoziation zwischen beeinträchtigter bewusster Wahrnehmung und weitgehend erhaltenen visuomotorischen Leistungen bestehen.

Es stellt sich die Frage, wie solche Leistungen trotz fehlender bewusster Wahrnehmung zustande kommen können. Die Erklärung von Milner und Goodale (1995) beruht auf der Einteilung des visuellen Systems in zwei räumlich getrennte Pfade, den ventralen Was- und den dorsalen Wo-Pfad (Ungerleider und Mishkin 1982). Der **ventrale Pfad** beginnt im primären visuellen Cortex im Okzipitallappen und verläuft durch die unteren Teile des Temporallappens bis hin zu dessen Spitze. Aufgrund von Untersuchungen an Affen ist bekannt, dass in diesem Pfad Information über das Aussehen von Objekten analysiert wird. Verarbeitung im ventralen Pfad resultiert in visueller Objektidentifikation. Der **dorsale Pfad** beginnt ebenfalls im primären visuellen Cortex, zweigt aber zum Parietallappen ab. Dort befinden sich sowohl Neurone, die sensitiv für den Ort eines Objekts sind, als auch Neurone, die besonders stark bei der Vorbereitung von visuomotorischen Handlungen mit Objekten (z. B. Greifhandlungen) feuern.

Milner und Goodale (1995) nehmen an, dass das phänomenale Bewusstsein bei der Objektwahrnehmung durch neuronale Aktivität im ventralen Pfad entsteht. Aktivität im dorsalen Pfad, dem neuronalen Substrat von Objektlokalisation und visuomotorischer Koordination, würde dagegen nicht zum visuellen Bewusstsein beitragen (▶ Kap. 22). Das bedeutet, dass visuomotorische Koordination und phänomenale Bewusstheit der visuellen Szene durch unterschiedliche Verarbeitungsstränge realisiert wären. Milner und Goodale (1995) vermuten, dass die visuomotorischen Leistungen der Blindsichtpatienten ohne bewusste Wahrnehmung durch den dorsalen Pfad vermittelt sind. Untersuchungen an Affen zeigten, dass der dorsale Pfad auch bei Schädigung des primären visuellen Cortex funktionsfähig bleibt, da er direkten visuellen Eingang von subcorticalen Strukturen wie dem Thalamus und dem Mittelhirn unter Umgehung des primären visuellen Cortex erhält. Der ventrale Pfad dagegen empfängt seinen Eingang wesentlich über den primären visuellen Cortex und ist nach dessen Schädigung nicht mehr funktionsfähig. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass ein intakter primärer visueller Cortex eine Voraussetzung für bewusste Wahrnehmung ist (Übersicht und kritische Diskussion in Stoerig 2001).

Visuelle Agnosien

Visuelle Agnosien entstehen durch Schädigungen höherer visueller Areale im ventralen Pfad unter Aussparung des primären visuellen Cortex. Patienten sind in der Lage, einfache visuelle Stimuli wie Lichtpunkte oder Linien bewusst zu identifizieren, weisen aber Defizite bei komplexeren Stimuli auf, können beispielsweise Umrisse oder Objekte nicht identifizieren bzw. diskriminieren oder Farbe mit Objekten assoziieren. Visuelle Agnosien betreffen also vor allem die Integration von visuellen Merkmalen zu einem einheitlichen Perzept. Für die Bewusstseinsforschung relevant sind Befunde, wonach agnostische Patienten trotz einer Beeinträchtigung der bewussten Wahrnehmung bestimmte Leistungen zeigen. Spezifische Ausfallserscheinungen schlagen sich in verschiedenen Arten der Agnosie nieder (Farah 1990), die im Folgenden beschrieben werden, bevor auf die Implikation der Befunde für die Entstehung des phänomenalen Bewusstseins eingegangen wird:

- *Apperzeptive Agnosie (visuelle Formagnosie):* Betroffene weisen Defizite beim Erkennen und Unterscheiden bereits sehr einfacher Formen auf. Sie haben beispielsweise Probleme, ein Quadrat von einem Dreieck zu unterscheiden. Entsprechend sind auch alle nachfolgenden Verarbeitungsschritte hinsichtlich Objekterkennung beeinträchtigt. Als Ursache

für diese Störung wird vermutet, dass die Areale, welche die Form eines Objekts repräsentieren, entweder selbst geschädigt sind oder keinen Eingang aus dem primären visuellen Cortex aufgrund einer durchtrennten Verbindung erhalten.

- *Assoziative Agnosie:* Betroffene sind nicht in der Lage, ein Objekt zu erkennen, obwohl sie keine Probleme mit der Wahrnehmung von Formen haben. Ihr Defizit kommt dadurch zustande, dass sie die Bedeutung des Objekts, das Konzept, nicht mit der visuellen Wahrnehmung assoziieren können. Vermutlich sind durch die Läsion neuronale Verbindungen zwischen Arealen, die für die visuelle Objektwahrnehmung spezialisiert sind, und Arealen, die semantisches Wissen repräsentieren, getrennt worden.
- *Prosopagnosie:* Diese Agnosie betrifft selektiv das Erkennen von Gesichtern. Patienten können Objekte identifizieren und auch Personen anhand der Stimme oder typischer Kleidungsstücke unterscheiden. Studien mit bildgebenden Verfahren deuten darauf hin, dass es im ventralen Pfad des visuellen Systems ein Areal – das sogenannte Gesichtsareal im *Gyrus fusiformis* – gibt, das auf die Verarbeitung von Gesichtern spezialisiert ist; dieses könnte bei diesen Patienten verletzt sein.
- *Farbagnosie:* Die Patienten sind nicht in der Lage, Farben mit Objekten zu assoziieren, obwohl die Farbwahrnehmung intakt ist. Sie können zwar isolierte Farben diskriminieren und benennen, nicht aber die Farbe und Form eines abgebildeten Objekts bei einer Benennung in einen Zusammenhang bringen (z. B. „das blaue Dreieck") oder die typische Farbe eines Objekts aus dem Gedächtnis abrufen (z. B. die Farbe einer Tomate). Grund für dieses Defizit ist wahrscheinlich eine Zerstörung der Verbindung zwischen dem farbverarbeitenden Areal und dem Areal, das Forminformation repräsentiert.

Einige agnostische Patienten vollbringen trotz der Defizite bei der bewussten Wahrnehmung nahezu perfekte Leistungen bei visuellen bzw. visuomotorischen Aufgaben. Goodale et al. (1991) beschreiben die Patientin D.F., die an einer apperzeptiven Agnosie litt und Rechtecke mit einem Seitenverhältnis von 2 : 1 nicht von Quadraten unterscheiden konnte. Trotz dieser Agnosie konnte sie Greifhandlungen mit rechteckigen Klötzen unterschiedlicher Größe durchführen und dabei die Position des Daumens und der übrigen Finger vor dem Zugreifen perfekt an die Größe der Klötze anpassen. Diese Dissoziation zwischen den Leistungen bei bewusster Formwahrnehmung und Greifhandlung steht im Einklang mit bewusster visueller Objekterkennung als Funktion des ventralen und unbewusster visuomotorischer Koordination als Funktion des dorsalen Verarbeitungspfades. Wahrscheinlich konnte D.F. Forminformation aufgrund der Hirnschädigung im ventralen Pfad zwar nicht für die Objekterkennung nutzen, dennoch stand diese Information im dorsalen Pfad für die Steuerung der Greifbewegung zur Verfügung.

Eine Dissoziation zwischen bewusster und unbewusster Verarbeitung konnte auch bei Patienten mit einer Prosopagnosie nachgewiesen werden. Solche Patienten sind nicht in der Lage, Gesichter von bekannten und unbekannten Personen zu diskriminieren. Beide Arten von Gesichtern riefen jedoch unterschiedlich starke elektrodermale Reaktionen, d. h. vegetative Aktivität der Haut, hervor. Dies kann als Hinweis dafür gewertet werden, dass im ventralen Pfad trotz der Läsion zwar Information über die Identität der Gesichter vorlag, diese aber nicht für das bewusste Erkennen genutzt werden kann.

Extinktion und visuospatialer Neglect

Im Gegensatz zu visuellen Agnosien liegt beiden Symptomen keine Störung der visuellen Objekterkennung, sondern ein Aufmerksamkeitsdefizit zugrunde (Übersicht in Karnath 2012).

Ein unter *visueller Extinktion* leidender Patient kann einen Stimulus, der in einem Gesichtsfeld präsentiert wird, nicht bewusst wahrnehmen, wenn gleichzeitig im anderen ein ähnlicher Stimulus gezeigt wird. Wird jedoch der Stimulus nur in einem der beiden Gesichtsfelder gezeigt, kann der Patient diesen erkennen und berichten. Patienten mit einem solchen Extinktionsphänomen haben in der Regel eine Schädigung im oberen Parietallappen, einem Areal, das mit dem Wechsel von Aufmerksamkeit in Verbindung gebracht wird. Durch eine einseitige Läsion in diesem Areal kann der Fokus der Aufmerksamkeit nicht hin zum kontralateralen Gesichtsfeld gewechselt werden, sondern verbleibt im gesunden Gesichtsfeld, wenn dort ein Stimulus vorhanden ist. Aufgrund fehlender aufmerksamkeitsbasierter Selektion wird der Reiz im betroffenen Halbfeld nicht bewusst wahrgenommen.

Neglectpatienten weisen häufig eine Schädigung des rechten unteren Parietallappens und angrenzender Areale im Temporallappen auf und können Stimuli nicht bewusst erkennen, die in ihr linkes Gesichtsfeld fallen (Driver und Vuilleumier 2001; Karnath et al. 2004). Interessanterweise betrifft dieses Defizit nicht nur wahrgenommene, sondern auch vorgestellte visuelle Szenen sowie die linke Seite von Objekten unabhängig von ihrer aktuellen Orientierung. Neglectpatienten „vergessen" auch häufig, ihre linke Gesichtshälfte zu rasieren oder von der linken Seite des Tellers zu essen. Die Entstehung des Neglects wird kontrovers diskutiert. Ähnlich den Patienten mit visueller Extinktion könnten Neglectpatienten nicht in der Lage sein, einen Aufmerksamkeitswechsel weg von der rechten hin zur linken Gesichtshälfte durchzuführen, sodass der Fokus der Aufmerksamkeit immer in der linken Gesichtshälfte verbleibt (Schacter 1989); alternativ könnten sie ein Defizit bei der Repräsentation von räumlichen Relationen zwischen Objekten aufweisen (Bisiach et al. 1979). Die Verankerung eines Objekts im Raum ist eine Voraussetzung für seine aufmerksamkeitsbasierte Selektion, diese wiederum ist notwendig für die bewusste Objekterkennung. Nach dieser Vorstellung codiert der untere Parietallappen die Position von Objekten in einem räumlichen Koordinatensystem, in einer „kognitiven Karte". Der rechte Parietallappen würde räumliche Relationen von beiden Gesichtsfeldern repräsentieren, während der linke nur für das kontralaterale rechte Gesichtsfeld zuständig wäre. Entsprechend führte eine Schädigung des rechten Parietallappens zu einem selektiven Ausfall für visuelle Information aus dem linken Gesichtsfeld.

Untersuchungen mit Neglectpatienten zeigen, dass Reize, die in das vom Neglect betroffene Gesichtsfeld präsentiert werden, dennoch eine weitgehende Verarbeitung bis hin zur semantischen Ebene erfahren (Berti und Rizzolatti 1992; Schweinberger

und Stief 2001) In Analogie zu den in ▶ Abschn. 6.4.1 beschriebenen Bahnungseffekten durch unbewusst wahrgenommene maskierte Reize bei gesunden Probanden lassen sich auch hier unbewusste Informationsverarbeitungsprozesse nachweisen.

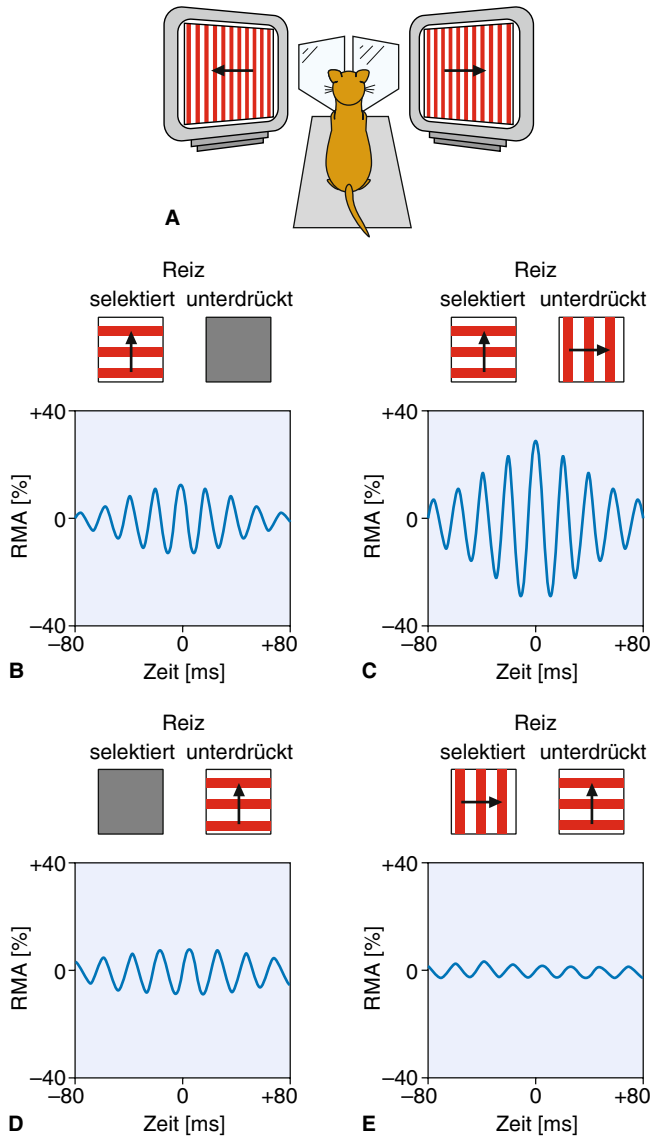
6.4.3 Das neuronale Korrelat des visuellen Bewusstseins

Ableitungen der Aktivität einzelner Neurone oder Neuronenverbände sollen im Tierexperiment das für das Entstehen des (visuellen) Bewusstseins notwendige und im Idealfall sogar hinreichende neuronale Substrat aufdecken. Zum einen will man Hirnareale bestimmen, deren Aktivität mit einem bestimmten Wahrnehmungserlebnis korreliert, zum anderen neuronale Mechanismen identifizieren, die mit einem bewussten Wahrnehmungserlebnis einhergehen. Da die zum Teil auch an anästhesierten (!) Katzen oder Affen durchgeführten Untersuchungen nicht notwendigerweise auf das menschliche Bewusstsein übertragbar sind, werden diese Tierexperimente zunehmend durch Studien mit bildgebenden Verfahren an Menschen ergänzt. Allerdings lässt sich derzeit durch bildgebende Verfahren nur die Aktivität relativ großer Neuronenpopulationen darstellen, sodass lediglich makroskopische Mechanismen untersucht werden können.

Eine Reihe tierexperimenteller Studien insbesondere von Singer und Kollegen (Übersicht in Engel et al. 1999; Singer 2000) liegt zum Thema phasensynchroner Aktivität (▶ Abschn. 6.3.3) vor, die sowohl die temporäre Kopplung von Objektmerkmalen ermöglichen als auch Grundlage der bewussten Wahrnehmung sein soll: Feuerraten auch räumlich weit auseinanderliegender Neurone sind phasengekoppelt, wenn sie Merkmale desselben Objekts codieren; diese Synchronisierung tritt nicht auf, wenn Neurone Merkmale verschiedener Objekte anzeigen. Systematische Veränderungen in der absoluten Feuerrate selbst konnten nicht beobachtet werden: Die Neurone feuerten nicht häufiger oder seltener, wenn sie Merkmale desselben oder verschiedener Objekte codierten (Engel et al. 1999).

Inwieweit die phasensynchrone Aktivität von Neuronen nicht nur der Bindung von Objektmerkmalen, sondern auch der bewussten Wahrnehmung zugrunde liegen könnte, wurde in einer Studie zur binokularen Rivalität bei Katzen untersucht (Fries et al. 1997). Auf das jeweils dominante Perzept wurde aufgrund der Augenbewegungen geschlossen, die durch nach oben oder unten bewegte Muster induziert wurden. Im primären und sekundären visuellen Cortex trat phasengekoppelte Aktivität innerhalb einer Neuronenpopulation auf, wenn das Perzept einem der beiden Reize entsprach (z. B. dem sich nach oben bewegenden Gittermuster). Diese Population wies dagegen keine Phasenkopplung auf, wenn der andere Reiz das Perzept dominierte (◘ Abb. 6.11). Die Feuerraten selbst zeigten wie oben keine Veränderung in Abhängigkeit vom aktuellen Perzept.

Engel et al. (1999) schließen aus diesen Befunden, dass synchrone neuronale Aktivität die Grundlage für die bewusste Wahrnehmung ist; synchrone neuronale Aktivität korreliert bereits im primären visuellen Cortex mit dem Wahrnehmungserleben. Dies steht allerdings im Widerspruch zu vielen weiteren Befunden, die unten dargestellt werden, wonach Aktivität von



◘ **Abb. 6.11** Phasensynchronisation bei binokularer Rivalität. **A** Katzen wurden so vor zwei Spiegeln platziert, dass jedes Auge durch einen anderen Monitor stimuliert wurde. **B–E** Normalisiertes Kreuzkorrelogramm (RMA, relative Modulation der Amplitude im Korrelogramm) als Maß für die Phasensynchronisation der neuronalen Aktivität zwischen zwei Ableitungsorten. **B, D** Unter monokularer Stimulation (Kontrollbedingung ohne binokulare Rivalität) ergab sich eine erhöhte Synchronisation sowohl für den unter Rivalitätsbedingungen selektierten als auch den dann unterdrückten Stimulus. Unter binokularer Stimulation konnte eine verstärkte Synchronisation nur für den selektierten (**C**), nicht aber für den unterdrückten Reiz beobachtet werden (**D**) und (**E**). (Nach Engel et al. 1999)

Neuronen im primären visuellen Cortex nur zu einem geringen Teil mit einem bewussten Wahrnehmungserlebnis zusammenhängt. Möglicherweise lässt sich der Widerspruch dadurch auflösen, dass die in der Untersuchung von Fries et al. (1997) erfassten reflexartige Augenbewegungen keinen validen Indikator für ein bewusstes Wahrnehmungserlebnis darstellen.

Leopold und Logothetis (1996) untersuchten mithilfe des Paradigmas der **binokularen Rivalität**, in welchen Arealen des ventralen Verarbeitungspfades die Aktivität von Neuronen mit dem Perzept einer visuellen Stimulation korreliert. Zur Erzeugung der binokularen Rivalität werden dem linken und dem rechten Auge

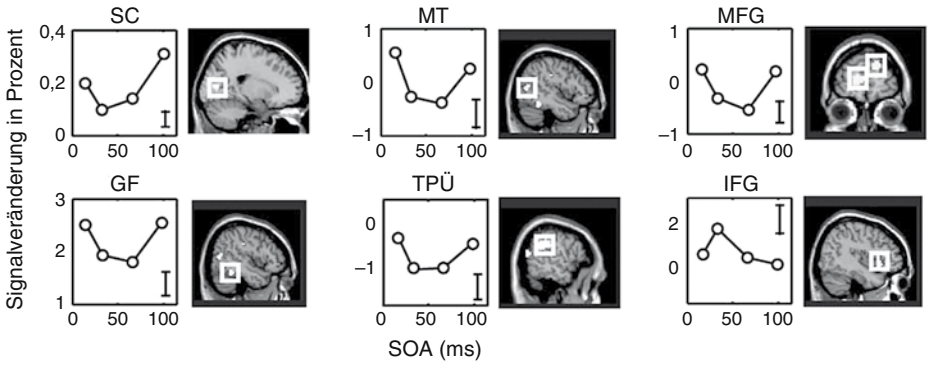


Abb. 6.12 Korrelation der Hirnaktivität mit bewusstem Wahrnehmungserlebnis in Hirnregionen, für die eine signifikante Korrelation mit der Sichtbarkeit des metakontrastmaskierten Reizes gefunden wurde. Metakontrastmaskierung geht typischerweise mit einer U-förmigen Maskierungsfunktion einher: Bei kurzem und sehr langem Abstand zwischen Reiz und Maske (SOA) ist der Reiz gut sichtbar, bei einem mittlerem Abstand ist der Reiz dagegen nicht bewusst wahrnehmbar (▶ Abschn. 6.4.1). Ein vergleichbarer U-förmiger Verlauf der Hirnaktivität in Abhängigkeit der SOA wurde im Sulcus calcarinus (SC), einem Teilgebiet des primären visuellen Cortex, in zwei höheren visuellen Arealen (*GF* = Gyrus fusiformis, *MT* = mediales temporales Areal) und in parietalen (*TPÜ* = temporoparietaler Übergang) und frontalen Arealen (*MFG* = mittlerer frontaler Gyrus; *IFG* = inferiorer frontaler Gyrus) gefunden. (Nach Haynes et al. 2005)

unterschiedliche Reize präsentiert (s. auch ▶ Zur Vertiefung 6.3). Der Betrachter nimmt bei dieser Art von visueller Stimulation kein aus beiden Reizen zusammengesetztes Perzept wahr, sondern das Perzept spiegelt abwechselnd entweder den Reiz des linken oder den des rechten Auges wider. Das Wahrnehmungserlebnis bleibt jeweils über einige Sekunden stabil, dann dominiert der Reiz des anderen Auges. Der besondere Vorteil dieses Paradigmas für die Untersuchung des visuellen phänomenalen Bewusstseins besteht darin, dass identische visuelle Stimulation über die Zeit zu unterschiedlichen Wahrnehmungserlebnissen führt. Dadurch kann diejenige neuronale Aktivität ermittelt werden, die spezifisch mit einem Wahrnehmungserlebnis korreliert. Leopold und Logothetis (1996) verwendeten bei ihrem an wachen Affen durchgeführten Experiment Reize in Form eines Gittermusters mit zwei unterschiedlichen Orientierungen, da jeweils unterschiedliche Neurone auf diese Reize spezialisiert sind. Die Affen waren trainiert worden, ihr aktuelles Perzept durch das Drücken eines Hebels anzuzeigen. Durch verschiedene Verhaltenstests wurde sichergestellt, dass sie die Hebel nicht zufällig drücken, sondern in der Tat ihren „Wahrnehmungseindruck" übermitteln. Im primären visuellen Cortex (zur Lokalisation s. ▶ Kap. 2) feuerten die meisten Neurone immer, wenn der von ihnen bevorzugte Reiz zu sehen war, unabhängig davon, ob er das Perzept bildete oder nicht. Nur wenige Neurone (18 %) änderten ihre Feuerrate in Abhängigkeit des aktuellen Perzepts. Dieser Anteil war in einem späteren visuellen Areal (V4) deutlich erhöht (38 %) und noch verstärkt im unteren temporalen Cortex, der Endstrecke im ventralen Pfad (90 %; Sheinberg und Logothetis 1997). Diese Befunde lassen den Schluss zu, dass vor allem neuronale Aktivität in einem sehr späten Abschnitt des visuellen Verarbeitungsstranges, der spezifisch in Objekterkennung involviert ist, zum bewussten Wahrnehmungserlebnis beiträgt.

In fMRI-Studien (▶ Kap. 2) wurde auch beim Menschen Hirnaktivität während der binokularen Rivalität aufgezeichnet. Ähnlich wie in den Untersuchungen am Affen korrelierte nur die Hirnaktivität im unteren Temporallappen, nicht aber die im primären visuellen Cortex mit dem Wahrnehmungserlebnis. Bei einer rivalisierenden Stimulation mit einem Gesicht und einem Haus stieg die Aktivität im Gesichtsareal des unteren Temporallappens nur dann, wenn die Versuchspersonen auch das Perzept eines Gesichts berichten (Tong et al. 1998). Beim Wechsel des Perzepts wurde darüber hinaus eine vermehrte Aktivierung in Arealen außerhalb des visuellen Cortex, im präfrontalen Cortex und im anterioren Cingulum – einer in der Tiefe des Frontallappens gelegenen Struktur – beobachtet (Lumer et al. 1998). Diese Areale sind in Arbeitsgedächtnis- und Aufmerksamkeitsfunktionen involviert. Vergleichbare Ergebnisse zu den Arbeiten mit binokularer Rivalität erbrachte eine Studie, in der das neuronale Korrelat der Sichtbarkeit maskierter Reize untersucht wurde (Haynes et al. 2005). Ein Zusammenhang zwischen Sichtbarkeit des Reizes und Hirnaktivität im fMRI ergab sich nur in einem kleinen Bereich des primären visuellen Cortex, dafür aber verstärkt in mehreren höheren visuellen Arealen und im parietalen und frontalen Cortex (■ Abb. 6.12). Gleichzeitig führte eine Verringerung der Sichtbarkeit eines Reizes zu einer Entkopplung der Aktivität zwischen primärem visuellen Cortex und höheren visuellen Arealen. Der Übergang zwischen verschiedenen phänomenal bewussten Zuständen scheint somit von einer Veränderung der Hirnaktivität in mehreren, vor allem höheren Hirnarealen begleitet zu sein und korreliert nicht mit der Aktivität eines einzigen Hirnareals. Da die Messung der Hirnaktivität mit fMRI an langsame Blutflussänderungen gekoppelt ist, kann über den Zeitverlauf der Aktivierungen keine Aussage gemacht werden.

Mit einem bewussten Wahrnehmungserlebnis verknüpfte neuronale Aktivität lässt sich beim Menschen mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung aufgrund der Messung von lokalen Feldpotenzialen auf der Cortexoberfläche erfassen. Solche Messungen können bei Patienten durchgeführt werden, die aus medizinischen Gründen, z. B. zur Bestimmung des Ursprungsortes eines epileptischen Anfalls, Elektroden direkt auf dem Gehirn implantiert bekommen und in die Teilnahme eingewilligt haben. In einer Studie wurden Patienten zunächst Bilder mit Gesichtern und Objekten gezeigt, die sichtbar waren, und Elektroden in Teilen des visuellen System bestimmt (kategorienselektive Elektroden), die eine spezifische Aktivierung für eine Stimuluskategorie zeigten (Fisch et al. 2009). In Übereinstimmung mit der bekannten funktionalen Neuroanatomie des visuellen Systems befanden sich diese ausschließlich in höheren

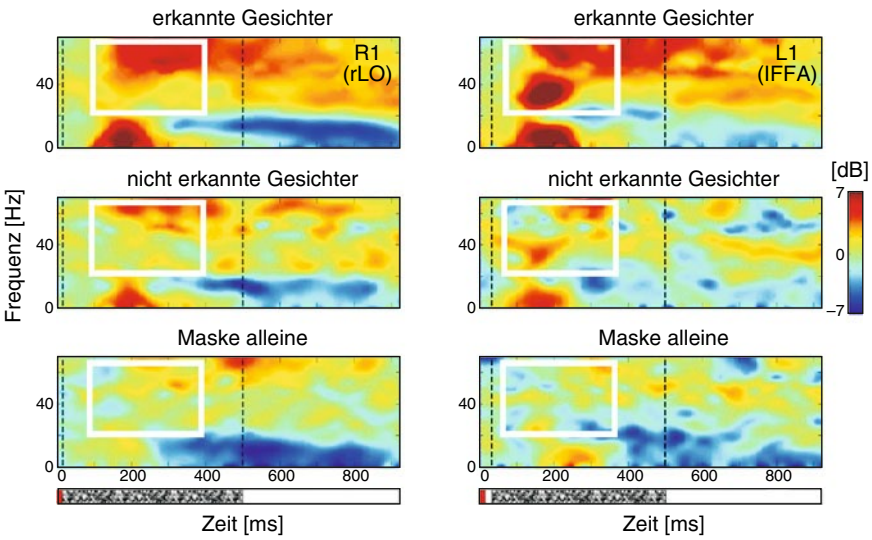


Abb. 6.13 Stärke der oszillatorischen elektrischen Hirnaktivität für erkannte und nicht erkannte Gesichter unter Reizmaskierung. Dargestellt ist die oszillatorische elektrische Hirnaktivität an zwei Elektroden in höheren visuellen Arealen, die eine spezifische Aktivität auf Gesichter zeigten (Elektrode R1, *rLO* = rechter lateraler okzipitaler Cortex; Elektrode L1, *IFFa* = linker fusiformer Cortex, *left fusiform face area*). Für jede Elektrode ist die Aktivität auf erkannte Gesichter, nicht erkannte Gesichter und Maske abgebildet. Zeitpunkt der Reiz- bzw. Maskenpräsentation wird durch den kleinen roten bzw. den schraffierten Balken unten angezeigt. Erkannte Gesichter führen zu einer verstärkten oszillatorischen Aktivität im Gamma-Frequenzband zwischen 30 und 70 Hz im Vergleich zu nicht erkannten Gesichtern und zur Präsentation der Maske alleine. (Nach Fisch et al. 2009)

und nicht in primären oder sekundären visuellen Arealen. In einem zweiten Schritt wurden die Reize nur sehr kurz (16 ms) und mit einer nachfolgenden Mustermaske präsentiert, wobei ein individueller zeitlicher Abstand zwischen Reiz und Maske (SOA) gewählt wurde, der eine Sichtbarkeit des Reizes in der Hälfte der Durchgänge gewährleistete. In der anderen Hälfte der Durchgänge war der Reiz nicht bewusst erkennbar. Außerdem gab es Kontrolldurchgänge, in denen nur die Maske und kein Reiz gezeigt wurde. Als Maß für die neuronale Aktivität wurde an jeder Elektrode die Stärke von oszillatorischen Potenzialveränderungen im Frequenzband von 30–70 Hz (die sogenannte Power im Gammaband) erfasst, welche die globale Feuerrate in einer Hirnregion widerspiegelt. Es zeigte sich, dass nur bewusst erkannte Reize von Gesichtern oder Objekten an den kritischen kategorienselektiven Elektroden eine starke und lang anhaltende Aktivität über mehrere Hundert Millisekunden hinweg auslösten, die weit über die Stimuluspräsentationszeit von 16 ms hinausging (Abb. 6.13). Wurden die maskierten Reize nicht erkannt, war die neuronale Antwort schwächer und weniger lang anhaltend. Diese lang anhaltende Aktivität bei erkannten Reizen steht in Einklang mit der Annahme, dass ein bewusstes Wahrnehmungserlebnis auf einer schleifenförmigen Verarbeitung in einem Netzwerk von mehreren Hirnarealen beruht, die aufgrund vorwärts- und rückwärtsgerichteter Aktivierung (rekurrente Verarbeitung) zu einer Selbstverstärkung der Aktivität führt. Möglicherweise wird dieser schleifenförmige Informationsaustausch zwischen auch räumlich entfernten Arealen durch eine zeitliche Synchronisation der Aktivität, wie sie in den oben beschriebenen Experimenten von Singer und Kollegen (Engel et al. 1999; Singer 2000) gefunden wurde, unterstützt. Offen ist, ob eine lokale interaktive Aktivierung innerhalb des sensorischen (hier visuellen) Systems, wie in der Theorie der rekurrenten Verarbeitung von Lamme (2006) angenommen, für die bewusste Wahrnehmung hinreichend ist oder ob im Sinne der Global-Workspace-Theorie (Dehaene und Nacchache 2001) auch die Einbeziehung frontaler Areale notwendig ist.

6.4.4 Bewusstsein und höhere kognitive Funktionen

Bislang wurde Bewusstsein vor allem vor dem Hintergrund visueller Wahrnehmung diskutiert. Dieser Abschnitt wendet sich dem Zusammenhang zwischen Bewusstsein und höheren kognitiven Funktionen zu. Da kognitiven Funktionen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis, exekutive Kontrolle im vorliegenden Buch eigene Kapitel gewidmet sind, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet; stattdessen werden exemplarisch Untersuchungen angeführt, die einen interessanten Einblick in die Rolle des phänomenalen Bewusstseins bei der Vorbereitung von Handlungen und bei Entscheidungsprozessen bieten.

Vorbereitung und Einleitung willentlich initiierter motorischer Handlungen sind subjektiv bewusst. Stellen wir uns hierzu eine Situation vor, in der wir gebeten werden, wann immer wir wollen die Hand zu bewegen. Vermutlich werden wir uns zu einem bestimmten Zeitpunkt entscheiden, diese motorische Handlung durchzuführen, und danach die Bewegung einleiten. Die Absicht und der Entschluss gehen in der Regel mit einem bewussten Erleben einher, wenngleich uns die danach erfolgende motorische Steuerung der Muskelkontraktionen nicht bewusst wird.

Eine Reihe von Experimenten hat die von uns subjektiv empfundene zeitliche Reihenfolge von Operationen bei der Handlungsplanung – erst bewusster Entschluss, dann motorische Ausführung – infrage gestellt. Die Ergebnisse lassen vielmehr den Schluss zu, dass die motorische Steuerung der Muskelkontraktionen bereits eingesetzt hat, bevor der Entschluss zur Handlung bewusst wird. In einem klassische Experiment von Libet et al. (1983) sollten die Versuchspersonen anhand der Position eines schnell umlaufenden Zeigers den Zeitpunkt mitteilen, an dem sie den Entschluss gefällt hatten, ihre Hand zu bewegen. Gleichzeitig wurde das Bereitschaftspotenzial – durch die Vorbereitung der Bewegung hervorgerufene elektrische Hirnaktivität über dem Motorcortex – abgeleitet. Dieses Potenzial setzte ungefähr 400 ms vor dem Bewusstwerden des Entschlusses ein, was den Satz prägte: „Das Bewusstsein hinkt der aktuellen Ver-

Zur Vertiefung 6.3

Selbstversuch zur binokularen Rivalität

Das Phänomen der binokularen Rivalität kann man in einem Selbstversuch nachvollziehen. Halten Sie dazu eine Pappröhre mit der rechten Hand vor Ihr rechtes Auge und fixieren Sie durch die Röhre einen Stimulus. Halten Sie Ihre linke Hand in rund 10 cm Abstand so vor Ihr linkes Auge, dass die Handkante die Röhre berührt. Zuerst kann der Wahrnehmungseindruck entstehen, dass die Hand ein Loch hat. Nach einigen Sekunden jedoch schließt sich das Loch, und es sollte die vollständige Handfläche etwas unscharf zu sehen sein. Wenn man beide Reize lange genug betrachtet, wechseln die Perzepte einander ab. Für jeweils eine bestimmte Zeit wird der Stimulus, der in der Röhre erscheint, oder die Hand wahrgenommen. Vermutlich ist der Stimulus in der Röhre häufiger zu sehen als die Hand, da die Hand im Vergleich zur Röhre aufgrund der unschärferen Konturen und des geringeren Kontrasts der schwächere Konkurrent bei der binokularen Rivalität darstellt (nach Logothetis 2000).

arbeitung 400 ms hinterher." Libet (1985) folgert daraus, dass die Intention für eine Handlung zunächst unbewusst entsteht und die motorische Vorbereitung aktiviert. Die Intention würde erst zu einem späteren Zeitpunkt bewusst, wenn bereits ein großer Teil der motorischen Vorbereitung abgelaufen sei. Allerdings berücksichtigt er bei dieser Interpretation nicht die Zeitspanne, die vom Bewusstwerden bis zur Erkennung der Zeigerposition benötigt wird.

Eine ähnliche Dissoziation zwischen Bewusstheit und Verhalten wurde in Untersuchungen zur Korrektur von schnellen *Greifhandlungen* beobachtet. Die Arbeit von Castiello et al. (1991) zeigt, dass Korrekturen der Trajektorie einer Greifbewegung auf einen Zielreiz ungefähr 300 ms vor der bewussten Wahrnehmung der veränderten Zielreizposition vorgenommen werden. Allerdings setzt auch diese Arbeit, wie die von Libet et al. (1983), den Auftrittszeitpunkt des Bewusstseins mit dem Zeitpunkt der Artikulation gleich. Die Versuchspersonen sollten denjenigen von drei Stäben, bei dem als Letztes ein Lämpchen aufblitzte, so schnell wie möglich mit einer Hand ergreifen. Ein Fünftel der Durchgänge beinhaltete eine Positionsveränderung: Zunächst leuchtete das Lämpchen des mittleren Stabes, kurz nach Beginn der Bewegung wurde einer der äußeren Stäbe als Zielreiz gekennzeichnet. Zusätzlich zur Greifbewegung sollten die Versuchspersonen eine vokale Antwort abgeben, sobald sie den Zielreiz wahrnahmen, wobei die Reaktionszeit aufgezeichnet wurde. In Durchgängen mit Positionsveränderung sollten sie ein zweites Mal antworten, sobald sie die Veränderung der Position erkannten (Abb. 6.14). Castiello et al. (1991) fanden, dass eine Korrektur der Trajektorie bereits 100 ms nach Positionsveränderung des Zielreizes vorgenommen wurde; die vokale Antwort, die die Bewusstheit der Positionsveränderung anzeigen sollte, erfolgte häufig erst, als die Versuchspersonen den Stab bereits ergriffen hatten. Die Ergebnisse werden von den Autoren dahingehend interpretiert, dass die Korrektur der Greifbewegung durch schnelle unbewusste Verarbeitung im dorsalen Pfad des visuellen Systems erfolgt (s. die Untersuchungen zur Reaktionsbahnung in ▶ Abschn. 6.4.1 und die Befunde bei Blindsichtpatienten in ▶ Abschn. 6.4.2), während die bewusste Objektidentifikation auf langsameren Prozessen im ventralen Pfad beruht. Allerdings ist es vorstellbar, dass die Probanden, da sie zwei Aufgaben im Prinzip gleichzeitig auszuführen hatten, der Greifaufgabe eine Priorität einräumten und die vokale Reaktion erst zeitlich verzögert abgaben. Aus diesen Gründen sind die aufgeführten Befunde nicht eindeutig als Beleg dafür zu werten, dass das Bewusstsein der Vorbereitung von motorischen Handlungen „hinterherhinkt".

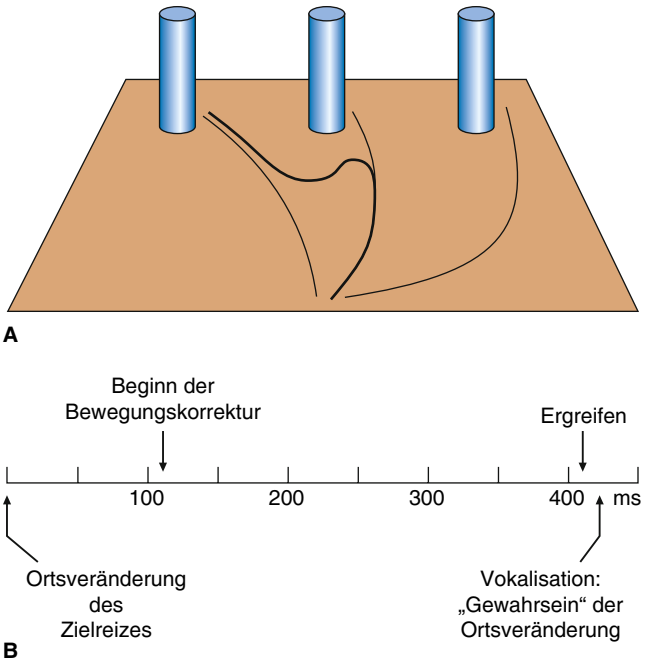


Abb. 6.14 Korrektur von Greifhandlungen. **A** Versuchsaufbau und Bewegungstrajektorie im Experiment von Castiello et al. (1991). **B** Zeitliche Abfolge von Korrektur der Greifbewegung und Reaktion auf die Ortsveränderung des Zielreizes. (Nach Castiello et al. 1991)

Hinweise für die Beeinflussung komplexer Entscheidungen durch unbewusste *emotionale Bewertungsprozesse* ergaben sich in einer Studie von Bechara et al. (1997). Die Autoren untersuchten Entscheidungen in einer Glücksspielaufgabe, bei der Versuchspersonen eine Karte von einem der vier Stapel A, B, C oder D ziehen sollten. Mit jeder gezogenen Karte war per Zufall ein gewisser Gewinn oder Verlust verbunden, und die Versuchsteilnehmer hatten die Aufgabe, im Verlauf des Spieles ihren Gewinn zu maximieren. Ihnen war vorab nicht bekannt, dass die Kartenstapel unterschiedliche Gewinn- und Verlustchancen boten: Stapel A und B beinhalteten sehr hohe momentane Gewinne, aber auch sehr hohe Verluste und brachten langfristig Verlust („schlechte Stapel"); Stapel C und D beinhalteten mäßige Gewinne und geringe Verluste und brachten langfristig Gewinn („gute Stapel"). Vor der Wahl einer Karte wurde die elektrodermale Antwort – die vegetative Reaktion der Haut – aufgezeichnet, um Rückschlüsse auf die emotionale Erregung der Probanden zu ziehen.

Zu Beginn des Spieles zogen die Versuchspersonen vor allem Karten von den schlechten Stapeln, die eine hohe Belohnung versprachen, und die elektrodermale Antwort unterschied sich

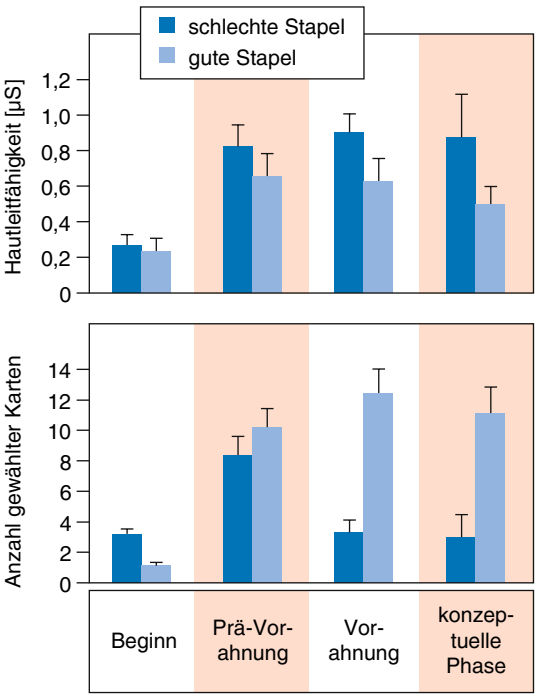


Abb. 6.15 Darstellung der Ergebnisse des Kartenspielexperiments von Bechara et al. (1997). *Oben:* Hautleitfähigkeit zu den guten und schlechten Kartenstapeln während der Spielphasen. *Unten:* Anzahl der gewählten Karten von den guten und schlechten Kartenstapeln während der Spielphasen. (Nach Bechara et al. 1997)

nicht zwischen den Stapeln (Abb. 6.15). Nach zehn Spielrunden (Prä-Vorahnung) war noch keine Änderung in der Präferenz bei der Wahl der Stapel zu beobachten; die Probanden gaben bei einer Befragung an, keine Vorstellung von den Regeln zu haben, nach denen sich die Gewinnchancen auf die Kartenstapel verteilten. Dennoch war jetzt die elektrodermale Antwort vor der Wahl einer Karte von den schlechten Stapeln höher, was darauf hindeutet, dass bereits in dieser Phase des Spieles eine unbewusste emotionale Bewertung der Kartenstapel vorgenommen wurde, die jedoch nicht verhaltenswirksam war. Nach 50 Spielrunden (Vorahnung) begannen die Probanden, vermehrt Karten von den guten Stapeln zu ziehen. Die elektrodermale Antwort unterschied sich weiterhin zwischen den guten und schlechten Stapeln. Probanden berichteten auch, ein „komisches Gefühl" bei der Wahl einer Karte von den schlechten Stapeln zu haben, ohne jedoch die Regeln für die Verteilung der Gewinne und Verluste angeben zu können. Nach 80 Spielrunden (konzeptuelle Phase) wählten die Probanden nur noch Karten von den guten Stapeln; gleichzeitig konnten die meisten von ihnen auch die Spielregeln angeben, verfügten also über bewusstes Regelwissen. Bechara et al. (1997) vermuten, dass eine unbewusste emotionale Bewertung von Handlungskonsequenzen zu einem früheren Zeitpunkt vorliegen und Handlungsentscheidungen beeinflussen kann, noch bevor ein berichtbares, bewusstes Regelwissen über den Zusammenhang zwischen Handlung und Handlungsergebnis erworben wurde. Diese emotionale Bewertung hilft, sich in durch Unsicherheit geprägten Situationen vorteilhaft zu entscheiden. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Beispiele zeigen, dass unbewusste Prozesse die menschliche Handlungskontrolle und offenes Verhalten auf vielfältige Art und Weise beeinflussen können. Vermutlich ist das im Alltag dann der Fall, wenn wir rasch und intuitiv handeln. Wie in ▶ Abschn. 6.4.1 beschrieben, ist die Verhaltenssteuerung durch unbewusste Prozesse weniger flexibel als im bewussten Verarbeitungsmodus. Eine wichtige Funktion des phänomenalen Bewusstseins könnte somit in der Gewährleistung einer hohen Anpassungsfähigkeit der kognitiven Verarbeitung an die dynamisch sich verändernden Herausforderungen der Umwelt bestehen.

6.5 Synopse der empirischen und theoretischen Bewusstseinsforschung: Grundlegende Mechanismen

Aufgrund des fehlenden Konsenses über eine Definition von Bewusstsein und der vielfältigen oft wenig präzisen theoretischen Ansätze klaffen in der derzeitigen Bewusstseinsforschung die theoretische und die empirische Ebene weit auseinander. Um die dennoch in unterschiedlichem Ausmaß existierenden Zusammenhänge zwischen theoretischen Ansätzen und empirisch gewonnenen Ergebnissen zu verdeutlichen, fasst dieser Abschnitt die wesentlichen Befunde aus ▶ Kap. 1 in Form von Thesen mit sich daraus ergebenden Implikationen für Theorien des Bewusstseins zusammen. Allerdings decken die vorhandenen empirischen Untersuchungen nicht alle Aspekte der Bewusstseinsthematik ab, die in theoretischen Ansätzen diskutiert werden. So sind beispielsweise die Ich-Bezogenheit bewusster mentaler Repräsentationen oder die kulturelle Bedingtheit des Bewusstseins – beides sind wesentliche Bestimmungsstücke evolutionärer Theorien (▶ Abschn. 6.3.2) – nicht Gegenstand empirischer Untersuchungen gewesen. Wenn auch zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Entstehung phänomenalen Bewusstseins nicht geklärt ist, können doch Aussagen darüber getroffen werden, wie Bewusstsein aller Wahrscheinlichkeit nach *nicht* entsteht.

▪ Phänomenales Bewusstsein entsteht als Ergebnis verteilter Verarbeitungsprozesse und ist nicht Funktion eines spezifischen Moduls

Schädigungen einzelner, funktionell abgrenzbarer Hirnareale im visuellen System ziehen spezifische Ausfälle der bewussten Wahrnehmung nach sich (▶ Abschn. 6.4.2): Sie können ein visuelles Halbfeld (Blindsicht, Hemianopsie, Neglect oder Extinktion) oder – wie bei Agnosien – selektiv nur bestimmte Reizkategorien bzw. Wahrnehmungsinhalte wie Form, Farbe und Gesichter betreffen. Angenommen, das phänomenale Bewusstsein entsteht durch die Aktivität eines spezifischen kognitiven Moduls – Arbeitsgedächtnis oder CAS im Modell von Schacter (1989; ▶ Abschn. 6.3.1) –, dann ließen sich die spezifischen Ausfälle der bewussten visuellen Wahrnehmung durch die Läsion der entsprechenden visuellen Areale selbst oder durch die Zerstörung ihrer Verbindungen zum bewusstseinserzeugenden Modul erklären. Umgekehrt müsste bei Schädigung dieses „Bewusstseinsmoduls" das phänomenale Bewusstsein für alle Sinnesmodalitäten ausfallen. Eine solche neuropsychologische Störung des Bewusstseins ist bis jetzt noch nicht beschrieben

worden. Aus elektrophysiologischen Untersuchungen und fMRI ist bekannt, dass bewusste Wahrnehmung mit Aktivität in mehreren Hirnarealen korreliert (▶ Abschn. 6.4.3), die jedoch auch an anderen Funktionen beteiligt sind. In der Konsequenz scheint somit ein cartesisches Theater, in dem alle Information zusammengeführt wird, wenig plausibel. Phänomenales Bewusstsein entsteht vermutlich durch (noch zu spezifizierende) verteilte, mehrere Teilsysteme umfassende dynamische Prozesse. Störungen des visuellen Bewusstseins ließen sich dadurch erklären, dass aufgrund der Schädigung eines Teilsystems die Dynamik innerhalb einer solchen Verarbeitungsschleife nicht mehr vollständig aufrechterhalten werden kann.

- **Phänomenales Bewusstsein beruht auf stabilen Repräsentationen**

Reizdauer, Reizabstand (SOA) und Aufmerksamkeit sind kritische Parameter für die Bewusstheit von Reizen. Dies belegen u. a. Maskierungsexperimente, das Wahrnehmungsphänomen des Aufmerksamkeitsblinzelns (▶ Abschn. 6.4.1) sowie die neuropsychologischen Symptome des Neglects und der Extinktion (▶ Abschn. 6.4.2). Wenn – wie die Maskierungseffekte vermuten lassen – die Sichtbarkeit und damit die Bewusstheit des Zielreizes mit vergrößertem zeitlichem Abstand zum Maskierungsreiz zunimmt, dann könnte Bewusstsein an das Erreichen einer stabilen Repräsentation gebunden sein. Allerdings ist gegenwärtig nicht klar, wie ein derartiger stabiler Zustand definiert sein könnte. Unter der Annahme verteilter Verarbeitungsprozesse sind wechselseitige Aktivierungen untereinander gekoppelter Verarbeitungsmodule über mehrere Verarbeitungszyklen hinweg wahrscheinlich (s. die Theorie der rekurrenten Verarbeitung von Lamme [2006] in ▶ Abschn. 6.3.3 und das Modell zur Maskierung von Enns und Di Lollo [2000] in ▶ Abschn. 6.4.1). Repräsentationen, die eine gewisse Mindestaktivierung nicht erreichen, zerfallen, bevor ein stabiler Zustand erreicht wird (s. auch das Workspace-Modell von Dehaene und Naccache [2001] in ▶ Abschn. 6.3.3). Nichtsdestoweniger können Repräsentationen, die keinen stabilen Zustand einnehmen und damit nicht bewusst werden, Verarbeitungsprozesse in nachgeschalteten Systemen auslösen und Verhalten beeinflussen (▶ Abschn. 6.4.1 und ▶ Kap. 1).

- **Phänomenales Bewusstsein hat Konsequenzen für die Informationsverarbeitung**

Unbewusst und bewusst wahrgenommene Reize werden unterschiedlich verarbeitet. Nur wenn eine Wahrnehmung bewusst wird, können exekutive Prozesse auf die dazugehörigen Repräsentationen zugreifen, wie bei der kontextadäquaten Selektion von Information oder der Anwendung von Strategien (▶ Abschn. 6.4.1). Bei unbewusster Wahrnehmung laufen dagegen Informationsverarbeitungsprozesse automatisch ab. Auch willentliche Handlungen mit Gegenständen sind nur bei bewusster Wahrnehmung möglich: Blindsichtpatienten können zwar nach Aufforderung ein Objekt ergreifen, das sich in ihrem blinden Gesichtsfeld befindet, würden aber spontan nie eine solche Handlung initiieren. Exekutive Funktionen können offenbar nur dann auf wahrnehmungsbasierte Repräsentationen zugreifen, wenn sie einen stabilen Zustand aufweisen, d. h. phänomenal bewusst sind. In diesem Fall ist phänomenales Bewusstsein eine Voraussetzung für Zugriffsbewusstsein. Phänomenales Bewusstsein ist jedoch nicht nur für exekutive Funktionen, sondern auch für Gedächtnisprozesse von Bedeutung. Nur bewusste Wahrnehmungen können kurzfristig im Arbeitsgedächtnis oder langfristig im episodischen Gedächtnis gespeichert und wieder abgerufen werden. Unbewusste Wahrnehmungsereignisse wie beispielsweise maskierte Reize hinterlassen zwar ebenfalls Gedächtnisspuren, diese sind aber nur aufgrund von Verhaltensleistungen messbar (implizites Gedächtnis).

- **Nur ein geringer Teil der Repräsentationen wird phänomenal bewusst**

In der Regel können nur wahrnehmungsbasierte Repräsentationen (visuell, auditiv, taktil, propriozeptiv etc.) mit einem bewussten Erleben einhergehen; andere Repräsentationen wie motorische Schemata und semantisches Wissen sind in der Regel nicht phänomenal bewusst. Jedoch auch nicht alle wahrnehmungsbasierten Repräsentationen werden bewusst erlebt. So tragen nur die visuellen Objektrepräsentationen im ventralen, nicht aber die räumlichen und visuomotorischen Repräsentationen im dorsalen Pfad zum visuellen Bewusstsein bei (▶ Abschn. 6.4.2). Gegenwärtig ist nicht geklärt, worin sich bewusstseinsfähige von nicht-bewusstseinsfähigen Repräsentationen unterscheiden. Als wahrscheinlich kann gelten, dass nur durch neuronale Aktivitätsmuster kodierte Repräsentationen bewusstseinsfähig sind (s. das Workspace-Modell von Dehaene und Naccache [2001] in ▶ Abschn. 6.3.3). Dies kann allerdings nur eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung sein, da jegliche interne, auch unbewusste Repräsentation durch neuronale Aktivitätsmuster codiert ist. Vorstellbar ist, dass sich bewusstseinsfähige und nichtbewusstseinsfähige Repräsentationen durch den Grad der Stabilität der zugrunde liegenden neuronalen Aktivitätsmuster unterscheiden. Es ist weiterhin denkbar, dass ein solcher Zustand z. B. aufgrund der spezifischen anatomischen Verbindungsstruktur nicht in allen Hirnarealen erreicht wird.

6.6 Anwendungsbeispiele

Wie zu Beginn des Kapitels bereits beschrieben, ist das menschliche Bewusstsein zentral für unsere Identität und bestimmt zu einem wesentlichen Teil unser Selbstverständnis als Mensch. Erkenntnisse über Mechanismen und Funktion des Bewusstseins berühren damit unmittelbar unser Selbstbild, unser mentales Ich. Dies zeigt sich u. a. an den zum Teil emotionalen Debatten über die Interpretation von Befunden der Bewusstseinsforschung. Insbesondere die Vorstellung, dass Bewusstsein anhand von funktionalen und neuronalen Mechanismen zumindest in ersten Ansätzen erklärt werden kann, löst bei manchen Menschen eine ablehnende Reaktion aus, möglicherweise da diese Vorstellung das Gefühl der individuellen Freiheit, die losgelöst ist von allen materiellen Begrenzungen, beeinträchtigt. Eine solche ablehnende Haltung zu den Erkenntnissen der Bewusstseinsforschung ignoriert, dass unser kognitives System und sein biologisches Substrat, das Gehirn, uns überhaupt Bewusstsein, willentliche Handlungskontrolle und damit eine individuelle Freiheit ermög-

licht. Wie auch immer eine adäquate Theorie des menschlichen Bewusstseins letztendlich genau beschaffen sein wird, die sich akkumulierenden Erkenntnisse der Bewusstseinsforschung über kognitive und neuronale Mechanismen, die bewusstem Erleben zugrunde liegen, werden im Laufe der kommende Jahrzehnte das menschliche Selbstbild beeinflussen. Somit ist zu erwarten, dass wissenschaftlich begründete Theorien zu Bewusstsein und Handlungskontrolle zunehmend alltagspsychologische Modelle gerade auch im gesellschaftlichen Diskurs über Eigenschaften des menschlichen Geistes ersetzen

Bewusstseinsforschung ist gegenwärtig sicherlich in erster Linie Grundlagenforschung zur Aufklärung des Phänomens „Bewusstsein", ohne dass ein unmittelbarer Anwendungsbezug gegeben ist. Allerdings können folgende drei Anwendungsbereiche von der empirischen Bewusstseinsforschung profitieren.

Diagnostik und Rehabilitation von Störungen des Bewusstseins

Schädigungen des Gehirns durch Schlaganfall, Blutung oder Tumor können zu spezifischen Störungen der bewussten Wahrnehmung führen (▶ Abschn. 6.4.2). Die Bewusstseinsforschung kann zur Entwicklung von Testverfahren zur differenzierten Bestimmung der Beeinträchtigung des bewussten Erlebens im Rahmen einer neuropsychologischen Diagnostik beitragen und helfen, Rehabilitationsprogramme zur Verbesserung der Bewusstseinsdefizite bei diesen neurologischen Patienten theoriegeleitet zu konzipieren. Ein Optimierungsbedarf ist in dieser Hinsicht vorhanden, da beispielsweise vorhandene Rehabilitationsprogramme für Patienten mit visuospatialem Neglect nur zu einer geringen Verbesserung der Symptomatik führten (Bowen et al. 2013). Defizite des bewussten Erlebens können nicht nur bei neurologischen Patienten mit umschriebenen Hirnschädigungen, sondern auch bei psychiatrischen Erkrankungen, z. B. der Schizophrenie, beobachtet werden, die mit subtilen verteilten Veränderungen von Gehirnstruktur und -funktion einhergehen. Bei Patienten mit Schizophrenie sind erhöhte Wahrnehmungsschwellen beim Erkennen maskierter Reize im Vergleich zu psychiatrisch unauffälligen Menschen beobachtet worden (Del Cul et al. 2006). Gleichzeitig konnten bei diesen Patienten auch verstärkte unbewusste Bahnungseffekte gefunden werden, was auf eine überschießende unbewusste Verarbeitung hindeutet (Kiefer et al. 2009). Die Bewusstseinsforschung kann somit auch zur Aufklärung der pathologischen kognitiven Verarbeitungsmechanismen bei psychischen Störungen und möglicherweise zur psychiatrischen Diagnostik beitragen.

Kognitive Verarbeitung bei Bewusstlosigkeit

Die Bewusstseinsforschung kann experimentelle Paradigmen zur Verfügung stellen, welche die Untersuchung unbewusster Verarbeitungsprozesse bei bewusstlosen Patienten (z. B. aufgrund eines Komas) ermöglicht. In erster Linie kommen hier Paradigmen mit akustischer Stimulation zum Einsatz, um unbewusste Verarbeitungsprozesse nachweisen zu können. Dadurch kann festgestellt werden, ob und auf welcher Ebene Reize bei diesen Patienten verarbeitet werden – ein wichtiger Prädiktor für ein späteres Aufwachen aus dem komatösen Zustand (Fischer et al. 2004). Bei nicht reagierenden, anscheinend komatösen Patienten können neurophysiologische Marker für bewusste Verarbeitungsprozesse beobachtet werden (Faugeras et al. 2011), sodass Erkenntnisse zur Abgrenzung verschiedener Bewusstlosigkeitszustände bei nicht reagierenden Patienten gewonnen werden können (Wachkoma, *minimal consciousness state*). Untersuchungen dieser Art können möglicherweise zur Optimierung der Pflege und Rehabilitation komatöser Patienten beitragen.

Beurteilung der Schuldunfähigkeit

Befunde und Theorien zu Bewusstsein und Handlungskontrolle können helfen, die Beurteilung der Schuldunfähigkeit von Straftätern, welche die Tat unter veränderten Bewusstseinszuständen, z.B aufgrund starker affektiver Erregung, Alkohol- oder Drogenkonsum, begangen haben, zu verbessern. Erkenntnisse der Bewusstseinsforschung können in die Abschätzung einfließen, ob aufgrund des veränderten Bewusstseinszustands die Handlungskontrollfähigkeit eines Täters so stark herabgesetzt war, dass von einer strafrechtlich relevanten Minderung der Einsichts- und Steuerungsfähigkeit ausgegangen werden kann (Kröber et al. 2010).

6.7 Ausblick

Zahlreiche psychologische und neurowissenschaftliche Befunde deuten darauf hin, dass phänomenales Bewusstsein dann entsteht, wenn über mehrere Systeme verteilte Repräsentationen für eine gewisse Zeit einen stabilen Zustand einnehmen. Noch ist offen, wie ein solcher Zustand beschrieben werden könnte und welche kognitiven Systeme bzw. Hirnareale beteiligt sind. Zur genaueren Charakterisierung dieser Zustände sind Überlegungen aus der Systemtheorie zu dynamischen Systemen sowie formalisierbare, im Computer simulierbare Modelle hilfreich. Dadurch werden Prozessmodelle gewonnen, die sich unmittelbar in Experimenten testen lassen.

Eine weitere Einschränkung der gegenwärtigen Bewusstseinsforschung besteht darin, dass bis auf wenige Ausnahmen mit visuellen Reizen gearbeitet wird, da in anderen Sinnesmodalitäten eine vergleichbare Reizpräsentation schwieriger zu realisieren ist. Es ist nicht geklärt, ob die an visuellen Reizen gewonnenen Ergebnisse auch auf andere sensorische Systeme übertragbar sind. Hinter diesem Problem steht die Frage, ob es für alle sensorischen Systeme gültige Mechanismen gibt, die zu phänomenalem Bewusstsein führen. Um die postulierten Mechanismen anhand von Reizen aus unterschiedlichen Modalitäten zu testen, ist es notwendig, das Experimentaldesign analog von einer Modalität in die andere zu übertragen, wobei die unterschiedlichen physikalischen Reizstrukturen zu berücksichtigen sind.

Wie in anderen Forschungsgebieten auch, ist in naher Zukunft keine vollständige, alle Aspekte des Bewusstseins umfassende Theorie zu erwarten. Es ist auch fraglich, ob eine solche Theorie überhaupt fruchtbar wäre, da sie einerseits sehr heterogene Phänomene zusammenfassen würde und andererseits äußerst komplex wäre. Vielversprechender ist es, für einzelne Aspekte des Bewusstseins möglichst präzise (Prozess-)Theorien zu entwickeln, die im Experiment getestet und gegebenenfalls

auch falsifiziert werden können. Dadurch wird eine systematische Erkenntnis über „das Rätsel Bewusstsein“ gewonnen, die vielleicht auch Skeptiker davon überzeugt, dass eine wissenschaftliche Erklärung von Bewusstsein auf kognitiver und/oder neurobiologischer Basis möglich ist. Offen ist, ob das Vorliegen gut bestätigter Prozesstheorien des Bewusstseins die postulierte Erklärungslücke (▶ Abschn. 6.3.4) schließt, wonach es grundsätzlich unmöglich sei, ein subjektives, nur in der Erste-Person-Perspektive erlebbares Phänomen aufgrund von objektiven, in der Dritte-Person-Perspektive zu beschreibenden kognitiven oder neuronalen Prozessen zu erklären.

6.8 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Bewusstsein ist ein heterogener Begriff, der in verschiedene theoretisch und empirisch differenzierbare Aspekte zerfällt.
- Das phänomenale Bewusstsein ist das Kernproblem der Bewusstseinsforschung und ist definiert als das individuelle Erleben mentaler Repräsentationen. Seine Erklärung ist problematisch, da es sich um ein nur subjektiv erfahrbares Phänomen handelt.
- Das Zugriffsbewusstsein ist definiert als Zugriffsmöglichkeit übergeordneter, koordinierter und kontrollierter Verarbeitungsprozesse auf eine Repräsentation. Seine Erklärung ist vergleichsweise wenig problematisch, da sich Zugriffsbewusstsein auf aus einer Außenperspektive objektivierbare Sachverhalte bezieht.
- Gegenwärtig klaffen in der Bewusstseinsforschung theoretische und empirische Ebene weit auseinander: Die meisten vorliegenden Bewusstseinstheorien sind zu allgemein formuliert und empirisch nicht überprüfbar, während empirische Untersuchungen häufig aus angrenzenden Forschungsgebieten stammen und daher meist ohne Bezug auf eine Bewusstseinstheorie durchgeführt wurden.
- Der größte Teil der Informationsverarbeitung ist nicht phänomenal bewusstseinsfähig.
- In der Regel sind wahrnehmungsbasierte Repräsentationen (unmittelbar wahrgenommene oder aus dem Gedächtnis abgerufene) bewusstseinsfähig. Visuomotorische und visuospatiale Repräsentationen sind als Ausnahmen jedoch nicht bewusstseinsfähig.
- Informationsverarbeitungsprozesse werden auch durch Repräsentationen/Stimulationen ausgelöst, die nicht phänomenal bewusst sind bzw. werden.
- Phänomenales Bewusstsein entsteht als Ergebnis verteilter Verarbeitungsprozesse und ist nicht Funktion eines spezifischen Moduls.
- Phänomenales Bewusstsein beruht auf stabilen Repräsentationen. Aufmerksamkeit und Reizdauer bzw. Reizabstand sind kritische Faktoren, welche die Stabilität von Repräsentationen beeinflussen.
- Stabile Repräsentationen können durch wiederholte wechselseitige Aktivierungen untereinander gekoppelter Verarbeitungsmodule entstehen.

Schlüsselbegriffe

Aufmerksamkeitsblinzeln (*attentional blink*) Bei einem Strom rasch dargebotener visueller Reize wird kurz nach einem ersten Zielreiz ein zweiter Zielreiz nicht bewusst wahrgenommen.

Bahnung (*priming*) Voraktivierung der Repräsentation eines Zielreizes (*target*) aufgrund eines zuvor gezeigten Bahnungsreizes (*prime*). Bahnungseffekte können anhand von verkürzten Reaktionszeiten, verringerten Fehlerraten oder aber auch anhand von verringerten neurophysiologischen Maßen der Hirnaktivierung zu den Zielreizen nachgewiesen werden. Bahnungseffekte werden häufig zur Demonstration unbewusster Wahrnehmungsprozesse verwendet.

Binokulare Rivalität (*binocular rivalry*) Wahrnehmungsphänomen, für dessen Erzeugung jedem Auge ein anderer Reiz präsentiert wird. Es wird dabei trotz konstanter visueller Stimulation jeweils abwechselnd für eine bestimmte Zeit der Reiz des linken oder des rechten Auges bewusst wahrgenommen. Binokulare Rivalität wird als Stimulationsverfahren in Untersuchungen zu bewussten visuellen Wahrnehmungsprozessen eingesetzt.

Blindsicht (*blindsight*) Phänomen bei Patienten mit Läsionen im primären visuellen Cortex, die trotz eines vollständigen Ausfalls der bewussten Wahrnehmung nach Aufforderung bestimmte Handlungen an visuellen Reizen ausrichten können.

Dorsaler visueller Pfad (*dorsal visual pathway*) Verarbeitungsstrang innerhalb des visuellen Systems, welcher der Objektlokalisation und der visuomotorischen Koordination dient (Wo-Pfad).

Dualismus (*dualism*) Philosophische Position, wonach psychische Prozesse grundsätzlich von materiellen Prozessen verschieden sind.

Eliminativer Materialismus (*eliminative materialism*) Philosophische Position, wonach psychische Prozesse mit materiellen Prozessen (vor allem Gehirnprozessen) identisch und auf diese reduzierbar sind.

Erklärungslücke (*explanatory gap*) Behauptung, dass phänomenales Bewusstsein grundsätzlich nicht durch die Angabe kognitiver oder neurobiologischer Mechanismen erklärbar ist.

Funktionalismus (*functionalism*) Philosophische Position, wonach psychische Prozesse zwar auf materiellen Prozessen beruhen, aber eigenen Gesetzmäßigkeiten folgen und somit nicht auf materielle Prozesse reduzierbar sind.

Monitoring-Bewusstsein (*monitoring consciousness*) Wissen über die eigenen internen Zustände. Mit dem psychologischen Konzept der Metakognition vergleichbar.

Phänomenales Bewusstsein (*phenomenal consciousness*) Individuelles Erleben mentaler Repräsentationen wie die Wahrnehmung „der Röte des Rots“ oder das Fühlen „des Stechens des Schmerzes“.

Phasensynchronisation neuronaler Aktivität (*phase-locked synchronization of neural activity*) Die Aktionspotenziale mehrerer Neurone erfolgen zu bestimmten Zeitpunkten gleichzeitig, wenn sie Merkmale desselben Objekts codieren. Neuronaler Mechanismus, der sowohl der Bindung verschiedener Merkmale eines Objekts (zeitliche Bindungshypothese) als auch der bewussten visuellen Wahrnehmung zugrunde liegen soll.

Qualia (*qualia*) Aus der Philosophie stammender, lateinischer Terminus für die Erlebniseigenschaften mentaler Repräsentationen.

Rekurrente Verarbeitung (*recurrent processing*) Interaktive vorwärts- und rückwärtsgerichtete Verarbeitung zwischen niederen und höheren sensorischen Arealen. Wird als notwendiger und hinreichender Mechanismus für bewusstes Wahrnehmungserleben diskutiert.

Selbst-Bewusstsein (*self-consciousness*) Wissen und Gedanken über sich selbst. Vergleichbar mit dem psychologischen Konstrukt des Selbstkonzepts. Bestandteil des Selbst-Bewusstseins ist die Repräsentation eines situationsunabhängig stabilen Ich.

Subliminale Wahrnehmung (*subliminal perception*) Wahrnehmungsprozesse, die unterhalb einer gedachten Wahrnehmungsschwelle stattfinden, die für eine Reizidentifikation notwendig ist („unterschwellige Wahrnehmung“).

Unbewusste Wahrnehmung (*unconscious perception*) Reizwahrnehmung ohne damit verbundenes subjektives Erleben, d. h. ohne phänomenales Bewusstsein. Die Reize werden dennoch verarbeitet und können das Verhalten beeinflussen (s. auch subliminale Wahrnehmung).

Ventraler visueller Pfad (*ventral visual pathway*) Verarbeitungsstrang innerhalb des visuellen Systems, welcher der Objektidentifikation dient (Was-Pfad).

Veränderungsblindheit (*change blindness*) Wahrnehmungsphänomen, wonach große Veränderungen innerhalb einer komplexen visuellen Szene nicht erkannt werden.

Visuelle Agnosien (*visual agnosias*) Wahrnehmungsstörungen aufgrund der Schädigung von visuellen Arealen außerhalb des primären visuellen Cortex, welche die Integration von Reizmerkmalen betreffen.

Visuelle Extinktion (*visual extinction*) Auslöschung der bewussten Wahrnehmung für einen Reiz, wenn im anderen visuellen Halbfeld gleichzeitig ein zweiter Reiz dargeboten wird. Tritt häufig bei Schädigungen im oberen Parietallappen auf und wird mit Aufmerksamkeitsdefiziten in Verbindung gebracht.

Visuelle Maskierung (*visual masking*) Experimentelles Verfahren, bei dem vor und/oder nach einem Zielreiz ein anderer Reiz (Maske) präsentiert wird, wodurch der Zielreiz nicht bewusst wahrgenommen wird.

Visuospatialer Neglect (*neglect*) Neuropsychologisches Syndrom, bei dem nach einer Hirnverletzung im unteren Parietallappen die bewusste Wahrnehmung für alle Reize innerhalb eines visuellen Halbfeldes ausfällt.

Wachheitszustand (*wakefulness*) Erregungszustand eines Systems, der von Bewusstlosigkeit (Koma) über Schlaf bis zu Zuständen höchster Vigilanz reicht. Diese Form des Bewusstseins existiert auch bei Tieren.

Wiederholungsblindheit (*repetition blindness*) Wenn zwei identische, kurz dargebotene Reize unmittelbar hintereinander wiederholt werden, wird die Wiederholung nicht bewusst wahrgenommen, sondern beide Reize werden zu einem Wahrnehmungsereignis zusammengefasst.

Zugriffsbewusstsein (*access consciousness*) Repräsentationen sind Gegenstand koordinierter und kontrollierter Verarbeitungsprozesse. Zugriffsbewusstsein ist vergleichbar mit dem psychologischen Konzept von exekutiven Funktionen.

Weiterführende Literatur

Ansorge, U., Kunde, W. & Kiefer, M. (2014). Unconscious vision and executive control: How unconscious processing and conscious action control interact. *Consciousness and Cognition, 27C*, 268-287. (Dieser Artikel gibt einen umfassenden Überblick über Forschung zu unbewussten Verarbeitungsprozessen, die mithilfe von maskierten Bahnungsverfahren untersucht wurden und deren Interaktion mit exekutiven Kontrollprozessen.)

Breitmeyer, B. G. & Öğmen, H. (2006). *Visual masking: Time slices through conscious and unconscious vision*. Oxford: Oxford University Press. (Dieses Buch gibt einen aktuellen Überblick über Theorie und Empirie der visuellen Maskierung.)

Dehaene, S., Changeux, J. P., Naccache, L., Sackur, J. & Sergent, C. (2006). Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences, 10*, 204-211. (Dieser Artikel skizziert ein funktional-neuroanatomisches Modell über Unterschiede zwischen bewusster und unbewusster Verarbeitung auf der Grundlage aktueller behavioraler und neurophysiologischer Untersuchungen.)

Metzinger, T. (Hrsg.). (1996). *Bewußtsein. Beiträge aus der Gegenwartsphilosophie*. Paderborn: Schöningh. (Dieser Sammelband gibt einen Überblick über die unterschiedlichen philosophischen Positionen zur Bewusstseinsthematik.)

Metzinger, T. (Ed.). (2000). *Neural correlates of consciousness – Empirical and conceptual questions*. Cambridge, MA: MIT Press. (Dieser Sammelband fokussiert auf neurowissenschaftliche Theorien und Befunde.)

Sonderheft von *Cognition* zu Bewusstsein (2001, Vol. 79, issues 1–2). (Dieses Sonderheft enthält Übersichtsarbeiten vor allem aus der psychologischen und neurowissenschaftlichen Perspektive.)

Sonderheft von *Consciosness & Cognition* (2015, Vol. 35).

Sonderhefte von *Advances of Cognitive Psychology* zu Bewusstsein (2011, Vol. 7, 2 und 2012, Vol. 8, 1). (Diese Sonderhefte umfassen Original- und Übersichtsartikel sowie theoretische

Arbeiten zu den neurokognitiven Mechanismen der bewussten und unbewussten visuellen Wahrnehmung.)

Webseiten

- http://www.ac-psych.org/ – Homepage der frei zugänglichen Internetzeitschrift *Advances of Cognitive Psychology*, in der häufig Studien zur visueller Maskierung und unbewussten Informationsverarbeitung publiziert werden (u.a. auch ein Sonderheft; 2006, Vol. 2, issue 1).
- http://www.theassc.org/ – Homepage der Association for the Scientific Study of Consciousness (ASSC) mit Tagungsankündigungen, elektronischen Seminaren und Publikationen zur Bewusstseinsthematik aus einer interdisziplinären Perspektive.
- http://www.consciousness.arizona.edu/ – Homepage des interdisziplinären Center for Consciousness Studies in Tucson, Arizona mit Tagungsankündigungen (Tucson Conference), elektronischen Seminaren und Publikationen zur Bewusstseinsthematik.
- http://www.sfu.ca/~enzo/os16_600/os16_600.html/ – Demo zur Maskierung durch Objektsubstitution von Vince Di Lollo, Publikationen zur visuellen Maskierung und zum Aufmerksamkeitsblinzeln.
- http://www.blogs.uni-mainz.de/fb05philosophieengl/thmetzinger/ – Homepage von Thomas Metzinger mit Publikationen zur philosophischen Bewusstseinsdiskussion.
- http://nivea.psycho.univ-paris5.fr – Homepage von Kevin O'Regan mit Demos und Publikationen zur Veränderungsblindheit.

Literatur

Ansorge, U., Kunde, W., & Kiefer, M. (2014). Unconscious vision and executive control: How unconscious processing and conscious action control interact. *Consciousness and Cognition*, *27C*, 268–287.

Baars, B. J. (1989). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.

Baars, B. J. (1997). In the theatre of consciousness: Global workspace theory, a rigorous scientific theory of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, *4*, 292–309.

Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon.

Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1997). Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, *275*, 1293–1295.

Berti, A., & Rizzolatti, G. (1992). Visual processing without awareness. Evidence from unilateral neglect. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *4*, 345–351.

Bisiach, E., Luzzatti, C., & Perani, D. (1979). Unilateral neglect, representational schema, and consciousness. *Brain*, *102*, 609–618.

Block, N. (1995). On a confusion about a function of consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, *18*, 227–287.

Block, N. (1996). Eine Verwirrung über eine Funktion des Bewußtseins. In T. Metzinger (Hrsg.), *Bewußtsein. Beiträge aus der Gegenwartsphilosophie* (2. Aufl. S. 523–581). Paderborn: Schöningh.

Bowen, A., Hazelton, C., Pollock, A., & Lincoln, N. B. (2013). Cognitive rehabilitation for spatial neglect following stroke. *Cochrane Database Systematic Review*, *7*, CD003586. doi:10.1002/14651858.CD003586.pub3.

Castiello, U., Paulignan, Y., & Jeannerod, M. (1991). Temporal dissociation of motor response and subjective awareness. *Brain*, *114*, 2639–2655.

Chalmers, D. J. (1995). Facing up to the problem of consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, *2*, 200–219.

Churchland, P. S. (1988). Reduction and the neurobiological basis of consciousness. In A. J. Marcel, & E. Bisiach (Hrsg.), *Consciousness in contemporary science* (S. 273–304). New York: Oxford University Press.

Churchland, P. S. (1996). Die Neurobiologie des Bewußtseins. Was können wir von ihr lernen? In T. Metzinger (Hrsg.), *Bewußtsein. Beiträge aus der Gegenwartsphilosophie* (2. Aufl. S. 463–490). Paderborn: Schöningh.

Crick, F., & Koch, C. (1990). Towards a neurobiological theory of consciousness. *Seminar in the Neurosciences*, *2*, 263–275.

Crick, F., & Koch, C. (1995). Are we aware of neural activity in primary visual cortex? *Nature*, *275*, 121–123.

Dehaene, S., & Naccache, L. (2001). Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework. *Cognition*, *79*, 1–37.

Dehaene, S., Changeux, J. P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2006). Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 204–211.

Delacour, J. (1995). An introduction to the biology of consciousness. *Neuropsychologia*, *33*, 1061–1074.

Del Cul, A., Dehaene, S., & Leboyer, M. (2006). Preserved subliminal processing and impaired conscious access in schizophrenia. *Archives of General Psychiatry*, *63*, 1313–1323.

Dennett, D. C. (1991). *Consciousness explained*. Boston: Little Brown. In deutscher Sprache erschienen 1994, Philosophie des menschlichen Bewusstseins. Hamburg: Hoffmann & Campe

Dennett, D. C., & Kinsbourne, M. (1992). Time and the observer: The where and when of consciousness in the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, *15*, 183–247.

Donald, M. (1995). The neurobiology of human consciousness: An evolutionary approach. *Neuropsychologia*, *33*, 1087–1102.

Driver, J., & Vuilleumier, P. (2001). Perceptual awareness and its loss in unilateral neglect and extinction. *Cognition*, *79*, 39–88.

Engel, A. K., Fries, P., König, P., Brecht, M., & Singer, W. (1999). Temporal binding, binocular rivalry, and consciousness. *Consciousness and Cognition*, *8*, 128–151.

Enns, J. T., & Di Lollo, V. (2000). What's new in visual masking. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 345–352.

Farah, M. (1990). *Visual agnosia*. Cambridge, MA: MIT Press.

Faugeras, F., Rohaut, B., Weiss, N., Bekinschtein, T. A., Galanaud, D., Puybasset, L., Bolgert, F., Sergent, C., Cohen, L., Dehaene, S., & Naccache, L. (2011). Probing consciousness with event-related potentials in the vegetative state. *Neurology*, *77*, 264–268.

Fisch, L., Privman, E., Ramot, M., Harel, M., Nir, Y., Kipervasser, S., Andelman, F., Neufeld, M. Y., Kramer, U., Fried, I., & Malach, R. (2009). Neural „ignition": enhanced activation linked to perceptual awareness in human ventral stream visual cortex. *Neuron*, *64*, 562–574.

Fischer, C., Luaute, J., Adeleine, P., & Morlet, D. (2004). Predictive value of sensory and cognitive evoked potentials for awakening from coma. *Neurology*, *63*, 669–673.

Fries, P., Roelfsema, P. R., Engel, A. K., König, P., & Singer, W. (1997). Synchronization of oscillatory responses in visual cortex correlates with perception in interocular rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *94*, 12699–12704.

Gadenne, V. (1997). Das Bewußtsein in der kognitiven Psychologie. *Sprache und Kognition*, *16*, 143–150.

Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. A. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, *349*, 154–156.

Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley.

Greenwald, A. G., Draine, S. C., & Abrams, R. L. (1996). Three cognitive markers of unconscious semantic activation. *Science*, *273*, 1699–1702.

Haynes, J. D., Driver, J., & Rees, G. (2005). Visibility reflects dynamic changes of effective connectivity between V1 and fusiform cortex. *Neuron*, *46*, 811–821.

Kanwisher, N. (1987). Repetition blindness: Type recognition without token individuation. *Cognition*, *27*, 117–143.

Karnath, H.-O. (2012). Neglect. In H.-O. Karnath, & P. Thier (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaften* (3. Aufl. S. 279–291). Heidelberg: Springer.

Karnath, H. O., Fruhmann Berger, M., Kuker, W., & Rorden, C. (2004). The anatomy of spatial neglect based on voxelwise statistical analysis: A study of 140 patients. *Cerebral Cortex*, *14*, 1164–1172.
Kiefer, M. (1999). *Die Organisation des semantischen Gedächtnisses*. Bern: Huber.
Kiefer, M. (2002). The N400 is modulated by unconsciously perceived masked words: Further evidence for a spreading activation account of N400 priming effects. *Cognitive Brain Research*, *13*, 27–39.
Kiefer, M., & Brendel, D. (2006). Attentional modulation of unconscious 'automatic' processes: Evidence from event-related potentials in a masked priming paradigm. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 184–198.
Kiefer, M., & Martens, U. (2010). Attentional sensitization of unconscious cognition: Task sets modulate subsequent masked semantic priming. *Journal of Experimental Psychology: General*, *139*, 464–489.
Kiefer, M. & Spitzer, M. (2000). Time course of conscious and unconscious semantic brain activation. *NeuroReport*, *11*, 2401–2407.
Kiefer, M., Martens, U., Weisbrod, M., Hermle, L., & Spitzer, M. (2009). Increased unconscious semantic activation in schizophrenia patients with formal thought-disorder. *Schizophrenia Research*, *114*, 79–83.
Klotz, W., & Neumann, O. (1999). Motor activation without conscious discrimination in metacontrast masking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 976–992.
Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (1996). *Neuropsychologie* (2. Aufl.). Akademischer Verlag: Heidelberg: Spektrum.
Kouider, S., Gardelle, V. de, Sackur, J., & Dupoux, E. (2011). How rich is consciousness? The partial awareness hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*, 301–307.
Kröber, H.-L., Dilling, D., Leygraf, N., & Sass, H. (Hrsg.). (2010). *Psychopathologische Grundlagen und Praxis der forensischen Psychiatrie im Strafrecht*. Handbuch der forensischen Psychiatrie, Bd. 2. Heidelberg: Springer.
Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, *207*, 203–205.
Lamme, V. A. (2006). Towards a true neural stance on consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 494–501.
Leopold, D. A., & Logothetis, N. K. (1996). Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry. *Nature*, *379*, 549–553.
Levine, J. (1983). Materialism and qualia: The explanatory gap. *Pacific Philosophical Quarterly*, *64*, 354–361.
Libet, B. (1985). Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and Brain Sciences*, *8*, 529–566.
Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W. J., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activities (readiness potential): The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*, *106*, 623–642.
Llinás, R. R., & Ribary, U. (1993). Coherent 40-Hz oscillation characterizes dream states in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *90*, 2078–2081.
Logothetis, N. K. (2000). Das Sehen – ein Fenster zum Bewußtsein. *Spektrum der Wissenschaft*,1, 37–43.
Lumer, E. D., Friston, K. J., & Rees, G. (1998). Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain. *Science*, *280*, 1930–1934.
Maki, S. W., Frigen, K., & Paulson, K. (1997). Associative priming by targets and distractors during rapid serial visual presentation: Does word meaning survive the attentional blink? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 1014–1034.
Marcel, A. J. (1980). Conscious and preconscious recognition of polysemous words: Locating the selective effect of prior verbal context. In J. Long, & A. Baddely (Hrsg.), *Attention and performance VIII* (S. 435–457). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Merikle, P. M., & Daneman, M. (1998). Psychological investigations of unconscious perception. *Journal of Consciousness Studies*, *5*, 5–18.
Merikle, P. M., & Joordens, S. (1997). Parallels between perception without attention and perception without awareness. *Consciousness and Cognition*, *6*, 219–236.
Metzinger, T. (1993). *Subjekt und Selbstmodell*. Paderborn: mentis.
Metzinger, T. (1996). Einleitung: Das Problem des Bewußtseins. In T. Metzinger (Hrsg.), *Bewußtsein. Beiträge aus der Gegenwartsphilosophie* (2. Aufl. S. 15–53). Paderborn: Schöningh.
Metzinger, T., & Schuhmacher, R. (1999). Bewusstsein. In H. J. Steinkühler (Hrsg.), *Enzyklopädie der Philosophie* (S. 172–183). Hamburg: Meiner.
Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: Oxford University Press.
Neely, J. H. (1991). Semantic priming effects in visual word recognition: A selective review of current findings and theories. In D. Besner, & G. W. Humphreys (Hrsg.), *Basic progresses in reading – Visual word recognition* (S. 264–333). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Neumann, O. (1990). Direct parameter specification and the concept of perception. *Psychological Research*, *52*, 207–215.
Neumann, O., Ansorge, U., & Klotz, W. (1998). Funktionsdifferenzierung im visuellen Cortex: Grundlage für motorische Aktivierung durch nicht bewusst wahrgenommene Reize? *Psychologische Rundschau*, *49*, 185–196.
O'Regan, J. K., Rensink, R. A., & Clark, J. J. (1999). Change-blindness as a result of „mudsplashes". *Nature*, *398*, 34.
Paré, D., & Llinás, R. (1995). Conscious and pre-conscious processes as seen from the standpoint of sleep-waking cycle neurophysiology. *Neuropsychologia*, *33*, 1155–1168.
Pöppel, E., Held, R., & Frost, D. (1973). Residual visual function after brain wounds involving the central visual pathways in man. *Nature*, *243*, 295–296.
Popper, K. R., & Eccles, J. C. (1994). *Das Ich und sein Gehirn* (11. Aufl.). München: Piper.
Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Hrsg.), *Information processing and cognition: The Loyota Symposium* (S. 55–85). Hillsdale: Erlbaum.
Prinz, W. (1996). Bewußtsein und Ich-Konstitution. In G. Roth, & W. Prinz (Hrsg.), *Kopf-Arbeit: Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen* (S. 451–467). Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag.
Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). To see or not to see – the need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, *8*, 368–373.
Rolke, B., Heil, M., Streb, J., & Henninghausen, E. (2001). Missed target words within the attentional blink evoke an N400 semantic priming effect. *Psychophysiology*, *38*, 165–174.
Schacter, D. (1989). On the relation between memory and consciousness: Dissociatable interactions and conscious experience. In H. Roediger, & F. Craik (Hrsg.), *Varieties of Memory and Consciousness: Essays in Honor of Endel Tulving* (S. 355–389). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Schweinberger, S. R., & Stief, V. (2001). Implicit perception in patients with visual neglect: Lexical specificity in reptition priming. *Neuropsychologia*, *39*, 420–429.
Shapiro, K. L., Raymond, J. E., & Arnell, K. M. (1994). Attention to visual pattern information produces the attentional blink in rapid serial visual presentation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 357–371.
Sheinberg, D. L., & Logothetis, N. K. (1997). The role of temporal cortical areas in perceptual organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *94*, 3408–3413.
Singer, W. (2000). Phenomenal awareness and consciousness from a neurobiological perspective. In T. Metzinger (Hrsg.), *Neural correlates of consciousness: Empirical and conceptual questions* (S. 121–137). Cambridge, MA: The MIT Press.
Stoerig, P. (2001). The neuroanatomy of phenomenal vision: A psychological perspective. In P. C. Marijuán (Hrsg.), *Cajal and consciousness, Scientific approaches to consciousness on the centennials of Ramón y Cajal's Textura* (S. 176–194). New York.: Annals of the New York Academy of Sciences.
Tong, F., Nakayama, K., Vaughan, J. T., & Kanwisher, N. (1998). Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex. *Neuron*, *21*, 753–759.
Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of visual behavior* (S. 549–586). Cambridge, MA: MIT Press.
Velmans, M. (1991). Is human information processing conscious? *Behavioral and Brain Sciences*, *14*, 651–726.
Vorberg, D., Mattler, U., Heinecke, A., Schmidt, T., & Schwarzbach, J. (2003). Different time courses for visual perception and action priming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, *100*, 6275–6280.
Weiskrantz, L. (1997). *Consciousness lost and found. A neuropsychological exploration*. New York: Oxford University Press.
Wilkes, K. V. (1988). yìshì, duh, um, and consciousness. In A. J. Marcel, & E. Bisiach (Hrsg.), *Consciousness in contemporary science* (S. 16–41). Oxford: Oxford University Press.

Emotion und Motivation

Kapitel 7 **Emotion – 185**
Andreas B. Eder und Tobias Brosch

Kapitel 8 **Motivation – 223**
Rosa Maria Puca und Julia Schüler

Kapitel 9 **Volition und kognitive Kontrolle – 251**
Thomas Goschke

Alle Organismen bewerten unaufhörlich die Zustände und Situationen, in denen sie sich gerade befinden: Ist der Zustand angenehm oder unangenehm? Ist die Situation förderlich oder bedrohlich? Dies gilt nicht nur für das Jetzt, sondern gleichermaßen für mögliche zukünftige Zustände und Situationen, auf die das Handeln ausgerichtet wird. Dieser Teil befasst sich mit den Auswirkungen dieser Bewertungen auf das Verhalten und Handeln.

In ► Kap. 7 werden Emotionen behandelt. Diese „Elixiere des Lebens" sind in ihrem Ausgangspunkt bewertende Stellungnahmen zu inneren oder äußeren Ereignissen. Als geradezu charakterisierendes Merkmal gilt ihre automatische Entstehung, aber es gibt auch Möglichkeiten, sie zu beeinflussen. Wie entstehen Emotionen, welche Funktionen haben sie, und wie kann man sie messen? Dies sind die Fragen, die in diesem Kapitel behandelt werden.

In ► Kap. 8 wird die Frage nach dem Warum, also nach den motivationalen Faktoren des Handelns in den Vordergrund gestellt. Motivationspsychologie beschäftigt sich mit der Zielgerichtetheit von Verhalten. Das beginnt mit der Frage, wie Ziele überhaupt entstehen und ob diese Ziele das Verhalten mit oder ohne Bewusstheit ausrichten. Wenn ein Ziel generiert wird, muss die Zielerreichung vorbereitet werden. Dies leisten motivationale Faktoren, indem sie die Informationsverarbeitungsvorgänge, physiologische Prozesse und das Verhalten darauf hin konfigurieren.

Insbesondere wenn Ziele langfristig verfolgt werden oder gegen starke konkurrierende Motivationstendenzen abgeschirmt werden müssen, kommt die willentliche Steuerung ins Spiel, die (scheinbar) an Bewusstheit gebunden ist. Wie funktioniert der Wille? Im abschließenden ► Kap. 9 werden die dazu notwendigen Mechanismen und auch die Fragen erörtert, wie man Verführungen widerstehen oder wie man gegen angeregte Handlungstendenzen angehen und diese unterdrücken kann.

Emotion

Andreas B. Eder und Tobias Brosch

7.1 Einleitung – 186

7.2 Emotionspsychologie: Eine kurze Geschichte – 186

7.3 Emotion: Gegenstandseingrenzung und Definition – 188

7.4 Emotionskomponenten und ihre Messung – 189
7.4.1 Kognitive Komponente – 189
7.4.2 Physiologische Komponente – 189
7.4.3 Motivationale Komponente – 190
7.4.4 Expressive Komponente – 190
7.4.5 Subjektive Erlebenskomponente – 191
7.4.6 Zusammenhang zwischen den Emotionskomponenten – 191

7.5 Klassifikation von Emotionen – 192
7.5.1 Diskrete Modelle – 192
7.5.2 Dimensionale Modelle – 193
7.5.3 Modale Modelle – 195

7.6 Funktionen von Emotionen – 195
7.6.1 Informative Funktionen – 195
7.6.2 Motivierende Funktionen – 197
7.6.3 Soziale Funktionen – 199

7.7 Biologische Grundlagen von Emotionen – 201
7.7.1 Das emotionale Gehirn: Neuronale Grundlagen von Emotionen – 201
7.7.2 Emotion und Körper: Emotionale Reaktionen im vegetativen Nervensystem – 203

7.8 Emotionstheorien – 205
7.8.1 Ältere Emotionstheorien – 205
7.8.2 Evolutionsbiologische Theorien – 208
7.8.3 Kognitive Theorien – 210
7.8.4 Konstruktivistische Theorien – 211

7.9 Emotionsregulation – 212

7.10 Anwendungsbeispiele – 215

7.11 Ausblick – 216

7.12 Weiterführende Informationen – 216

Literatur – 217

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_7

Im Blickfang

Flieht, ihr Narren!

Am 30. Oktober 1938 versetzte eine Sondermeldung im Radio die Ostküste der Vereinigten Staaten in Angst und Schrecken. Der Radiosender CBS verbreitete die Nachricht, dass eine 30 m breite Scheibe vom Mars kommend in Grover's Mill in New Jersey gelandet sei. Aus der Scheibe seien Marsmenschen mit giftigem Gas und Waffen entstiegen, die alles im Umkreis von New York in Brand setzen. Die US Army sei bereits mit schweren Waffen angerückt, um einen Kampf um das Überleben der Menschheit auszufechten.

Bei diesem „Kampf der Welten" handelte es sich glücklicherweise nur um eine Hörspielumsetzung des gleichnamigen Buches von Orson Welles. Die Radiosendung erzeugte jedoch laut übereinstimmenden Zeitungsberichten eine landesweite Massenpanik. Viele Einwohner von New Jersey und Umgebung waren von Zuhause geflüchtet, um dem „Gasangriff vom Mars" zu entkommen, und besorgte Telefonanrufe überlasteten die Polizeistellen (◘ Abb. 7.1). Offenbar hatten Radiohörer das Hörspiel für eine authentische Reportage gehalten und einen tatsächlichen Angriff von Außerirdischen befürchtet.

Selbst wenn uns der Anlass für die Massenhysterie aus sicherer Distanz etwas lächerlich vorkommen mag, so können wir die Angst der Menschen und ihre Panikreaktion gut nachvollziehen. Wer von uns würde nicht vor aggressiven Invasoren fliehen? Dabei stellen sich schnell grundsätzliche Fragen: Was macht Menschen „Angst" (und was nicht)? Welche Reaktionen löst Furcht in einem Menschen aus? Worin unterscheiden sich Ängste von anderen (emotionalen) Zuständen? Ist Furcht (vor Außerirdischen) angeboren, oder wird sie erlernt? Können wir Ängste willentlich kontrollieren? Die Emotionspsychologie versucht, auf diese und andere Fragen mit wissenschaftlichen Methoden Antworten zu finden. Ziel ist es, menschliche Emotionen zu beschreiben, ihre Entstehungsbedingungen zu analysieren und ihre Auswirkungen auf das Verhalten und Erleben einer Person zu erklären. Historiker haben übrigens die Berichte einer Massenhysterie nach der Ausstrahlung der Radiosendung als Zeitungsente entlarvt. Weitere Beispiele sind allerdings rasch zur Hand. Laut epidemiologischen Studien haben etwa 3,5–6,1 % der Allgemeinbevölkerung (mit einem hohen Frauenanteil) eine übersteigerte Angst vor Spinnen (Chapman 1997). Bei einer ungefähren Bevölkerungszahl von 80 Mio. Deutschen entspricht dies einer Zahl von 2.800.000 bis 4.880.000 Personen. Die Zahl von heimischen Giftspinnen, die einem gesunden Menschen gefährlich werden können, beträgt exakt null.

7.1 Einleitung

Jeder Mensch kennt Ängste und Hoffnungen, Trauer und Freude, Verzweiflung und Euphorie, Ärger und Vergebung, Stolz und Scham. Wir beschreiben diese Zustände als **Emotionen**, und viele von ihnen sind alltäglich (Scherer et al. 2004). Der Ärger über den Verkehrsstau, die Freude über das nette Dankeswort, die Angst vor der anstehenden Prüfung – manche dieser Erlebnisse sind schnell wieder vergessen, andere wiederum begleiten uns ein ganzes Leben lang. Es gibt kaum einen Lebensbereich, der nicht emotional besetzt werden kann. Emotionen werden in Romanen beschrieben, in Dramen inszeniert und in Liedern besungen. Verkäufe werden mit „emotionalen" Werbebotschaften angekurbelt und politische Wahlen mit „Angstthemen" entschieden. Es werden „emotionale Kompetenzen" trainiert und „emotionale Störungen" (Depression, Panikstörung) behandelt. Angesichts der herausragenden Stellung von Emotionen in unserem Leben würde man meinen, dass ihre wissenschaftliche Erforschung eines der drängendsten und forschungsaktivsten Aufgaben der Psychologie war und bis heute ist. Dem ist leider nicht so. Um es mit einer leichten Abwandlung des berühmten Ausspruchs von Hermann Ebbinghaus zu sagen: Die Emotionspsychologie hat eine lange Vergangenheit und eine besonders kurze Geschichte. Tatsächlich hat die wissenschaftliche Erforschung von Emotionen erst in den letzten 30 Jahren richtig an Fahrt aufgenommen.

7.2 Emotionspsychologie: Eine kurze Geschichte

Eine gedankliche Auseinandersetzung mit Passionen, Gemütsbewegungen und **Affekten** begann bereits in der Philosophie der Antike. So geht auf Platon (427–347 v. Chr.) eine Dreiteilung der Seele (griech.: *psyche*) in Vernunft (griech.: *logos*), leidenschaftliche Affekte (griech.: *thymos*) und begierdehafte Sinnlichkeit (griech.: *epithymetikon*) zurück. Diese klassische Dreiteilung in Kognition, Emotion und Motivation findet sich auch heute noch in der Psychologie und hat immer wieder kontroverse Diskussionen erzeugt (vgl. z. B. die Kognitions-Emotions-Debatte zwischen Robert Zajonc [1984] und Richard Lazarus [1984]). Platon zeichnete zudem ein eher kritisch bis negatives Bild von Affekten, da diese häufig im Widerspruch zur Vernunft stehen und ein Hindernis für rationales Handeln darstellen würden. In der Folgezeit haben sich viele bedeutende Philosophen mit menschlichen Emotionen in ihren Werken auseinandergesetzt, die auf die Psychologie als jüngeren Spross der Philosophie einen nachhaltigen Einfluss ausübten (Überblick in Landweer und Renz 2012).

Die Geburt einer modernen Psychologie mit einer naturwissenschaftlich-empirischen Ausrichtung wird in der Regel mit der Gründung des ersten Instituts für experimentelle Psychologie durch Wilhelm Wundt in Leipzig im Jahr 1879 datiert. Gendron und Barrett (2009) sehen in dieser Gründerzeit eine „goldene Epoche" der Emotionspsychologie, da in diesem Zeitraum mehrere Klassiker der Emotionspsychologie von Charles Darwin (1872), William James (1884) und Wilhelm Wundt (1874) erschienen sind. Der Gründerzeit folgte mit dem Behaviorismus zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein „dunkles Zeitalter", in dem subjektive Erlebniszustände wie Emotionen weitgehend ignoriert oder als abergläubisches Denken verunglimpft wurden (Skinner 1953). Eine „Renaissance" der Emotionspsychologie wurde schließlich in den 1960er Jahren mit den Werken von Magda Arnold (1960), Silvan Tomkins (1962) sowie Schachter und Singer (1962) eingeleitet.

Man sollte mit den Wertungen in „goldene" und „dunkle" Zeitalter jedoch vorsichtig sein. In der Gründerzeit wurden generell sehr wenige Arbeiten publiziert, und viele davon be-

Im Blickfang (*Fortsetzung*)

Average net paid circulation for September exceeded Daily---1,800,000 Sunday-3,150,000

DAILY NEWS

Copyright 1938 by News Syndicate Co., Inc. Reg. U. S. Pat. Off. NEW YORK'S PICTURE NEWSPAPER Entered as 2nd class matter, Post Office, New York, N. Y.

FINAL

Vol. 20. No. 109 New York, Monday, October 31, 1938* 48 Pages 2 Cents IN CITY LIMITS | 3 CENTS Elsewhere

FAKE RADIO 'WAR' STIRS TERROR THROUGH U.S.

Story on Page 2

(NEWS foto)

"War" Victim

Caroline Cantlon, WPA actress, listening to this radio in West 49th St., heard announcement of "smoke in Times Square." Running to street, she fell, broke her arm.

(By Associated Press)

"I Didn't Know". Orson Welles, after broadcast expresses amazement at public reaction. He adapted H. G. Wells' "War of the Worlds" for radio and played principal role. Left: a machine conceived for another H. G. Wells story. Dramatic description of landing of weird "machine from Mars" started last night's panic. —Story on page 2.

Abb. 7.1 Zeitungsbericht der *Daily News* vom 31. Oktober 1938 über den „Krieg der Welten". (▶ http://culturecrasher.com/chronicles/the-greatest-media-pranks-of-all-time/).

nutzten sehr fehleranfällige (introspektive) Methoden. Zudem haben auch Behavioristen wichtige Forschungsarbeiten über Emotionen durchgeführt (z. B. die erste Demonstration einer Furchtkonditionierung; Watson und Rayner 1920). Falls man von einer goldenen Epoche der Emotionspsychologie sprechen möchte, dann zählen dazu wohl eher die letzten 30 Jahre. Ähnlich einer „kognitiven Wende" in den 1950er Jahren wurde um 1980 eine „affektive Wende" in der Psychologie eingeleitet. Tatsächlich wurde noch nie zuvor so viel zu Emotionen geforscht und publiziert wie in den letzten Jahrzehnten. Vor allem die Neuropsychologie hat große Fortschritte in der Erforschung der biologischen Grundlagen von Emotionen gemacht und mit ihren Methoden das Interesse an einer Erforschung von emotionalen Vorgängen neu entfacht (LeDoux 2000; Panksepp 1998). Die moderne Emotionspsychologie ist dabei Teil einer interdisziplinär angelegten Wissenschaftsinitiative, an der neben der Psychologie und Neurobiologie noch viele andere „affektive Wissenschaften" mitwirken (Gross und Barrett 2013). Die Hoffnung ist somit berechtigt, dass das goldene Zeitalter der Emotionspsychologie im 21. Jahrhundert fortgesetzt wird.

7.3 Emotion: Gegenstandseingrenzung und Definition

Der Begriff „Emotion" fand erst vor circa 200 Jahren vermehrt Eingang in Wissenschaftstexten und ist deshalb eine relativ moderne „Spracherfindung" im Westen (Danziger 1997). Eine inkonsistente Verwendung des Emotionsbegriffs und das Fehlen einer allgemein akzeptierten Definition von Emotion wurden schon früh beklagt (Duffy 1934). Dieser Zustand hat sich seitdem nicht wesentlich gebessert. Der Emotionspsychologe Caroll Izard befragte 2009 führende Emotionsforscherinnen und -forscher nach ihrer Definition von „Emotion" und konnte keinen Konsens in den Definitionen feststellen. Vielmehr empfiehlt er, den Begriff „Emotion" erst in einem bestimmten Kontext zu erklären und nicht in einem absoluten Sinn zu verwenden (Izard 2010). Es scheint sich somit zu bewahrheiten, was Fehr und Russell bereits 1984 (S. 464) etwas sarkastisch bemerkten: „Everyone knows what an emotion is until one is asked to give a definition. Then, it seems, no one knows."

Ein Lehrbuchtext über Emotionen kommt natürlich nicht daran vorbei, seinen Gegenstand zumindest provisorisch zu erklären. Aus diesem Grund wird hier eine Arbeitsdefinition angeboten, die zum einen so allgemein formuliert ist, dass möglichst viele Forschungsansätze der Emotionspsychologie integriert werden können, und zum anderen spezifisch genug ist, damit eine Abgrenzung von verwandten Konzepten (Stimmung, Motivation etc.) möglich wird. Gemäß dieser Definition haben Emotionen folgende Merkmale:

- *Affektivität (Gefühlscharakter):* Wir *empfinden* Ärger, Angst, Freude, Stolz usw., und ohne diese Empfindungen würden wir wohl kaum von einem emotionalen Erlebnis sprechen (Russell 1991). Charakteristisch für die Phänomenologie von emotionalen Erlebnissen ist ihre *Valenz*, d. h., ihre Angenehmheit oder Unangenehmheit (Charland 2005). Diese affektiven Empfindungen können in das Bewusstsein treten, sie müssen es aber nicht (Lambie und Marcel 2002).
- *Intentionalität (Objektgerichtetheit):* Wenn eine Person sich freut, stolz ist oder Angst hat, dann freut sie sich über etwas, ist stolz auf etwas oder hat Angst vor etwas. Emotionen sind somit immer auf „etwas" ausgerichtet. Dabei ist es unwesentlich, ob das Bezugsobjekt tatsächlich vorliegt, gedanklich nur vorgestellt oder für die Zukunft erwartet wird. Nicht die reale Existenz eines Bezugsobjekts ist somit entscheidend, sondern die Einschätzung, dass ein bestimmter Sachverhalt vorliegen bzw. eintreten könnte.
- *Zeitliche Dynamik und begrenzte zeitliche Dauer:* Diese sind mehr oder weniger eng an das Auftreten ihres Bezugsobjekts gekoppelt. Die Prüfungsangst besteht vor und während der Prüfung, danach verschwindet sie. Wenn eine Person sich wochenlang über eine abfällige Bemerkung ärgert, so ist damit nicht gemeint, dass die Person sich wochenlang ununterbrochen ärgert. Vielmehr ist damit gemeint, dass die Person sich immer wieder neu ärgert, wenn sie sich an die Beleidigung erinnert.

Daraus ergibt sich folgende Definition von Emotion: *Eine Emotion ist eine auf ein bestimmtes Objekt ausgerichtete affektive Reaktion, die mit zeitlich befristeten Veränderungen des Erlebens und Verhaltens einhergeht.*

Mit dieser Arbeitsdefinition können Emotionen von **Stimmungen** abgegrenzt werden, die als diffuse positive und negative Gefühlszustände kein Bezugsobjekt haben und auch eher länger andauern (z. B. „Es geht mir heute sehr gut").

Eine ähnliche Abgrenzung gelingt hinsichtlich *emotionalen Dispositionen* (Temperamenten), die als zeitüberdauernde Persönlichkeitseigenschaften einen sehr allgemeinen Objektbezug haben. Beispiele hierfür sind eine generell erhöhte Ängstlichkeit (Eigenschaftsangst) oder eine generell erhöhte Reizbarkeit der Person gegenüber scheinbar nichtigen Anlässen (Ärgerdisposition).

Eine *Einstellung* bezieht sich auf eine relativ zeitstabile positive oder negative Beurteilung eines Objekts (Fazio 2007). Emotionen unterscheiden sich von ihr vor allem durch die Dynamik der Veränderungen und in ihrem episodischen Verlauf (Cunningham et al. 2013).

Von *Motivationen* unterscheiden sich Emotionen in dem Typus ihrer Bezugsobjekte. Motivation als aktives Streben hin zu einem Zielzustand ist zwangsläufig auf ein zukünftiges Ereignis ausgerichtet. Ihr Bezugsobjekt liegt somit *immer* in der Zukunft. Im Gegensatz dazu können Emotionen auch vergangene Ereignisse als Bezugsobjekt haben. Wir können uns z. B. über einen Erfolg freuen, selbst wenn der Erfolg schon Jahre zurückliegt und wir ihn uns in Erinnerung rufen. Emotionen lassen sich somit nicht auf motivationale Zustände reduzieren. Die Trennlinie zwischen Emotion und Motivation verwischt jedoch zunehmend, wenn Emotionen Ereignisse als Bezugsobjekt haben, die eintreten *könnten* (z. B. Furcht vor einem möglichen Misserfolg). In diesem Fall dienen Emotionen auch als Motivatoren (▶ Kap. 8).

7.4 Emotionskomponenten und ihre Messung

Im Alltag wird eine Emotion meistens mit einem bestimmten Gefühl oder Empfindung gleichgesetzt. In der Wissenschaft hat sich hingegen die Sichtweise durchgesetzt, dass eine Emotion mehrere Verhaltenssysteme beeinflusst und deshalb unterschiedliche Komponenten hat. Dazu zählen: (1) eine *subjektive Komponente*, (2) eine *kognitive Komponente*, (3) eine *physiologische Komponente*, (4) eine *expressive Komponente* und (5) eine *motivationale Komponente* (◘ Abb. 7.2). Eine Emotion kann sich in einer oder in mehreren Komponenten manifestieren (Bradley und Lang 2000). Diese multidimensionale Sichtweise hat den Vorteil, dass unterschiedliche Facetten von Emotionen untersucht werden können, ohne dass auf einen subjektiven Erlebensbericht zurückgegriffen werden muss. Darüber hinaus können bestimmte Abläufe und Sequenzen in Aktivierungen von Komponenten studiert werden (Scherer 2009). Sie stellt Theoretiker jedoch auch vor das Problem, welche Komponenten notwendig und hinreichend für eine Emotion sind und wie sie miteinander zusammenhängen.

Im Folgenden wird jede Komponente und ihre Messung einzeln besprochen. Für eine Veranschaulichung wird jede Komponente am Beispiel einer Prüfungsangst erklärt.

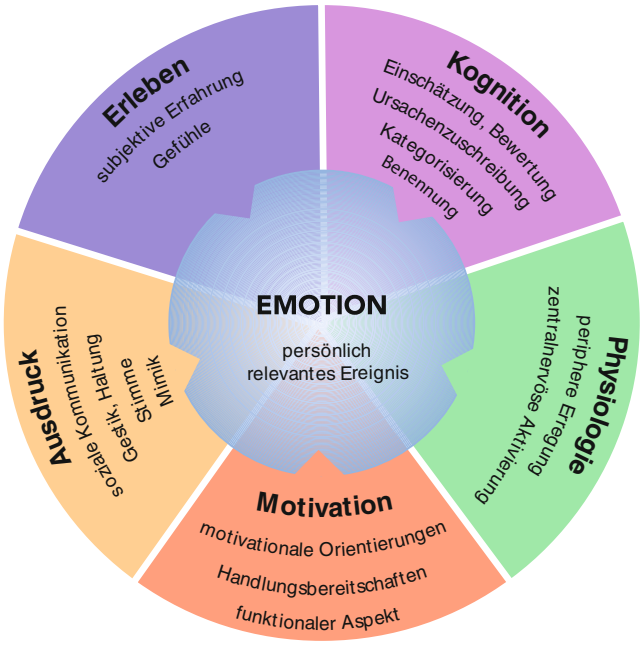
Anna hatte sich intensiv auf ihr Referat vorbereitet. Heute würde sich entscheiden, ob ihre Noten für ein Masterstudium reichen. Ihre Kommilitonen und der Dozent warten auf ihren Vortrag. Es geht jetzt um alles oder nichts.

7.4.1 Kognitive Komponente

Anna starrt auf ihre Notizkarten. Sie hat Schwierigkeiten, sich auf ihr Referat zu konzentrieren. Gedanken an ein Scheitern schießen ihr durch ihren Kopf: „Oh Gott, was mache ich, wenn ich eine schlechte Note bekomme? Was denken dann die anderen von mir?" Sie verhaspelt sich, und es fallen ihr Dinge nicht mehr ein, die sie auswendig gelernt hat. Anna bemerkt nicht, dass ein Kommilitone eine Frage stellen möchte. Stattdessen blickt sie nervös immer wieder zu dem Dozenten.

Emotionen beeinflussen mehrere kognitive Funktionen: Sie lenken die Aufmerksamkeit auf ein emotional bedeutsames Ereignis. Sie beanspruchen kognitive Ressourcen für die Bewältigung einer Situation, und sie beeinflussen selektiv die Zugänglichkeit von Informationen im Gedächtnis. Je nach situativen Erfordernissen können sich somit Emotionen günstig oder ungünstig auf kognitive Leistungen auswirken.

Umgekehrt beeinflussen kognitive Vorgänge aber auch das emotionale Erleben einer Situation. Ein Erfolg in der Matheklausur löst z. B. unterschiedliche Emotionen aus, je nachdem ob der Erfolg einer eigenen Leistung (Stolz), der Hilfestellung durch den Banknachbarn (Dankbarkeit) oder einer glücklichen Auswahl von Prüfungsfragen (Erleichterung) zugeschrieben wird (Brosch et al. 2010; Weiner 1985). Diese Beurteilungen und Zuschreibungen müssen einer Person nicht zwangsläufig bewusst



◘ **Abb. 7.2** Komponentenmodell der Emotion. (Die Farbcodierung der Komponenten wird auch in den folgenden Abbildungen verwendet.)

sein, sondern sie können auch unbewusst erfolgen (Clore und Ortony 2000).

Messung Die Emotionspsychologie setzt unterschiedliche Methoden für die Erfassung von kognitiven Vorgängen und Denkinhalten in emotionalen Episoden ein. Für die Messung einer emotionalen Aufmerksamkeitslenkung sind kognitive Paradigmen geeignet, in denen emotionale Reize detektiert, ignoriert oder diskriminiert werden müssen (▶ Kap. 5). Mit expliziten und impliziten Gedächtnistests wird geprüft, wie sich Emotionen auf das Behalten und Erinnern von (emotional bedeutsamen) Informationen auswirken (▶ Kap. 12). Mit Doppelaufgaben (▶ Kap. 18) und degradierten Reizpräsentationen wird eine Ressourcenabhängigkeit von emotionalen Verarbeitungsprozessen untersucht (▶ Kap. 6). Kognitive Beurteilungen und Einschätzungen von emotionalen Ereignissen können entweder mit direkten Befragungen oder indirekt mit elektrophysiologischen und behavioralen Messmethoden erfasst werden. Grundsätzlich kann jedes kognitionspsychologische Paradigma für eine Untersuchung von kognitiven Vorgängen in emotionalen Episoden eingesetzt werden, sofern dieses für die Fragestellung angemessen ist (Eder et al. 2007).

7.4.2 Physiologische Komponente

In Annas Gehirn werden Strukturen in limbischen, temporalen und präfrontalen Hirngebieten verstärkt aktiv. Stresshormone werden über den Blutstrom im Körper verteilt, und der sympathische Zweig des autonomen Nervensystems wird aktiviert. Annas Herz schlägt schneller, und die Blutgefäße der Haut und der inneren Organe ver-

engen sich. Ihre Bronchien erweitern sich, und sie beginnt, schneller zu atmen. Der Speichelfluss wird reduziert, und der Speichel wird zähflüssig. Die Pupillen weiten sich. Ihre Körpertemperatur steigt an, und es bildet sich kalter Schweiß auf der Haut. Die Magenmuskulatur verkrampft sich, und ihr wird übel. Die Skelettmuskeln werden angespannt, und der erhöhte Muskeltonus erzeugt Zittern in den Gelenken und einen unsicheren Stand.

Emotionen lösen Veränderungen im Körper aus, die wiederum mit einer emotionsgesteuerten Anpassung an bedeutende Lebensereignisse erklärt werden. Eine stärkere Anspannung der Skelettmuskeln erleichtert z. B. eine Flucht vor einer Bedrohung. Schön früh haben Psychologen auf die Bedeutung von körperlichen Veränderungen für die Emotionsentstehung hingewiesen (James-Lange-Theorie; ► Abschn. 7.8.1), und dementsprechend lange beschäftigt sich die Emotionspsychologie mit ihrer Untersuchung. Erste Studien untersuchten hauptsächlich eine emotionale Aktivierung des peripheren Nervensystems und eine Differenzierung von Emotionen in diesen Aktivitäten (Friedman 2010). Spätestens mit der Verbreitung von modernen bildgebenden Verfahren verlagerte sich der Schwerpunkt jedoch auf die Identifizierung von emotionsspezifischen Strukturen und Netzwerken im Gehirn (Dalgleish et al. 2009).

Messung Die moderne Emotionspsychologie hat Zugang zu einem breiten Sortiment an biopsychologischen und neurobiologischen Messmethoden (Überblick in Larsen et al. 2008). Emotionale Anpassungen von Körperfunktionen werden mit kardiovaskulären (z. B. Herzrate, Blutdruck), elektrodermalen (z. B. Hautleitfähigkeit) und respiratorischen (z. B. Atemfrequenz) Maßen erfasst. Bildgebende Verfahren wie die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI) und die Positronenemissionstomografie (PET) eignen sich, um lokale Veränderungen von Hirnaktivitäten, insbesondere des Hirnstoffwechsels und der Hirndurchblutung, zu erfassen. Die zeitliche Dynamik von hirnphysiologischen Prozessen kann mit Ableitungen von elektrischen Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche (Elektroencephalografie, EEG) gemessen werden. Psychopharmakologische Messmethoden werden in Untersuchungen von Transmitter-Rezeptor-Systemen und ihren komplexen Wechselwirkungen im Gehirn eingesetzt.

7.4.3 Motivationale Komponente

Anna würde am liebsten alles hinschmeißen und den Raum verlassen. Sie möchte jedoch ihr Gesicht vor den anderen nicht verlieren und an ihrem Leistungsziel weiter festhalten. Sie versucht deshalb, ihre Angst zu unterdrücken und vor den anderen zu verbergen.

Emotionen erzeugen bestimmte Motivationen und Handlungsbereitschaften (Frijda 1986). Zum Beispiel motiviert *Furcht* als Reaktion auf eine Bedrohung ein Verhalten der Vermeidung, während *Ärger* als Reaktion auf eine wahrgenommene Ungerechtigkeit eine Vergeltungssuche anregt. Emotionen als motivationalen *Verhaltensstrategien* werden nicht konkrete Verhaltensweisen, sondern abstrakte Mittel-Zweck-Relationen (Vermeidung, Attacke, Vergeltung etc.) zugeordnet, die in einer konkreten Situation mit sehr unterschiedlichen Bewegungen umgesetzt werden können. Es hängt von der Situation ab, ob eine wütende Person mit der Faust auf den Tisch haut, einem defekten Automaten einen Tritt verpasst oder an einer Protestkundgebung teilnimmt. Trotz ihrer Verschiedenheit wird diesen *Verhaltenstaktiken* jedoch eine ähnliche Funktion unterstellt, nämlich ein erlebtes Unrecht zu vergelten oder (zumindest symbolisch) rückgängig zu machen (Lang 1995).

Messung Verhaltensneigungen und Motivationen können direkt erfragt (z. B. Roseman et al. 1994) oder indirekt aus dem Verhalten einer Person erschlossen werden (z. B. Coombes et al. 2007; Eder und Dignath 2013). Einen weiteren methodischen Zugang bietet die Messung von Verhaltensreflexen und biopsychologischen Signalen, die mit bestimmten motivationalen Tendenzen in Verbindung gebracht wurden (Harmon-Jones et al. 2010; Lang und Bradley 2010).

7.4.4 Expressive Komponente

Annas Körperhaltung ist geduckt. Ihre Bewegungen wirken steif und fahrig. Immer wieder wechselt sie von einem Bein auf das andere, oder sie fährt hektisch mit den Händen durch ihre Haare. Ihr Sprechtempo ist gesteigert, ihre Sprechstimme ist erhöht, und die Sprechmelodie wirkt monoton. Ihr Gesicht ist starr, und ihre Augen sind weit geöffnet. Einen direkten Blickkontakt mit anderen Personen im Raum vermeidet sie.

Emotionen beeinflussen die Mimik, Haltung und die Stimme einer Person. Vor allem der Emotionsausdruck im Gesicht wurde detailliert untersucht. Menschen ordnen mit Leichtigkeit bestimmten Ausdrücken bestimmte Emotionen zu, was sich die Schauspielkunst professionell zunutze macht (Gosselin et al. 1995). Selbst Angehörige fremder Kulturen erkennen einen mimischen Ausdruck von Furcht, Ärger, Überraschung, Freude, Traurigkeit und Ekel (Ekman 1993; vgl. auch Russell 1994). Darüber hinaus zeigen auch blind geborene Kinder spontan „emotionale" Gesichtsausdrücke, weshalb eine angeborene Basis dieses Ausdrucksverhaltens angenommen wird (Galati et al. 2001; vgl. auch Darwin 1872). Das nonverbale Verhalten wird allerdings auch von soziokulturell festgelegten „Benimmregeln" beeinflusst, weshalb ein direkter Schluss von einem Ausdruck auf eine bestimmte emotionale Befindlichkeit nicht zulässig ist (Fridlund und Russell 2006).

Messung Das nonverbale Verhalten einer Person wird gewöhnlich auf Video aufgezeichnet und mit einem Codiersystem nach Ähnlichkeiten mit einem prototypischen Ausdrucksmuster einer Emotion analysiert. Ein besonders ausgeklügeltes Codiersystem der Gesichtsmimik hat Paul Ekman mit dem Facial Action Coding System (FACS) entwickelt, das 44 verschiedene Bewegungseinheiten bestehend aus einzelnen oder mehreren Muskelbewegungen definiert (Ekman und Rosenberg 1997;

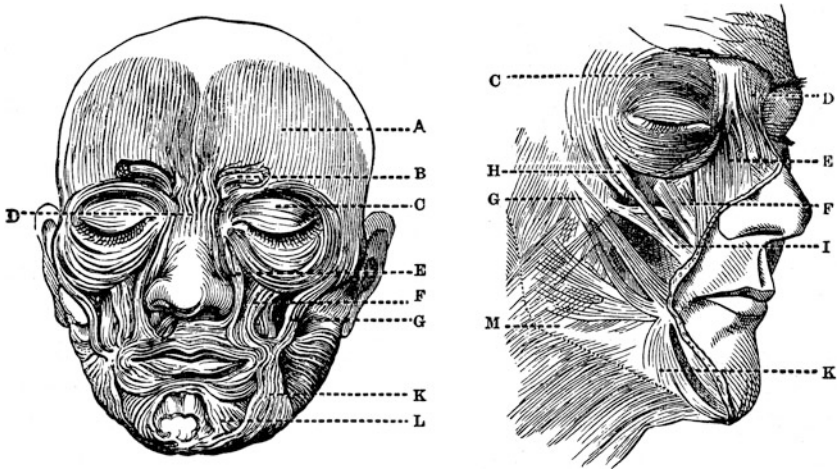


Abb. 7.3 Darstellungen der Gesichtsmuskulatur aus der Frontalsicht (*links*) und von der rechten Seite (*rechts*). Für den mimischen Ausdruck besonders wichtige Muskelpartien sind: *B* = Augenbrauenrunzler (Musculus corrugator supercilii), *C* = Augenringmuskel (Musculus orbicularis oculi), *E, F* = Oberlippenheber (Musculus levator labii), *G* = Großer Jochbeinmuskel (Musculus zygomaticus major). (Aus Darwin 1872, S. 20)

Abb. 7.3). Spezielle Kombinationen von Bewegungseinheiten werden dann über ein sogenanntes Lexikon bestimmten Emotionskategorien zugeordnet (Emotional Facial Action Coding System EmFACS). Darüber hinaus können mittels Elektroden elektrische Muskelaktivitäten im Gesicht gemessen werden, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind (Dimberg 1990).

7.4.5 Subjektive Erlebenskomponente

Die Prüfungssituation ist für Anna belastend und unangenehm. Sie verspürt eine große innere Unruhe, und sie fühlt sich körperlich unwohl und angespannt. Im Vordergrund steht ihre Angst zu versagen. Ihre Nervosität macht sie aber auch betroffen und wütend auf sich selbst.

Das für viele wohl typischste Kennzeichen von Emotionen ist eine Veränderung des momentanen Erlebens. Emotionen wie Trauer, Zorn und Freude fühlen sich subjektiv „verschieden" an und werden im Alltag meist mit bestimmten Empfindungen gleichgesetzt. Die Emotionspsychologie tut sich hingegen mit der Untersuchung von Gefühlen traditionell schwer. Zum einen ist ihre Untersuchung mit dem philosophischen Problem der *Qualia* verbunden, d. h. mit der Schwierigkeit, subjektive Erlebensinhalte intersubjektiv (objektiv) zu vergleichen. Zum anderen bleibt die Erfassung von Gefühlen auf einen Selbstbericht (Interviews, Ratings etc.) der Person beschränkt, sodass sprachliche Gepflogenheiten und Beschränkungen auf bewusst zugängliche Inhalte die „Gefühlsberichte" verzerren. Diese Probleme haben einige Emotionsforscher dazu veranlasst, eine Untersuchung von Gefühlen als „unwissenschaftlich" oder gar als unwichtig für einen Erkenntnisfortschritt abzutun (z. B. LeDoux 2000). Andere Emotionsforscher halten dagegen, dass affektive Empfindungen grundlegend für Handlungsentscheidungen und für unser bewusstes Erleben sind (Damasio 1999; Lambie und Marcel 2002; Panksepp 2005). Unstrittig ist, dass das momentane emotionale Erleben maßgeblich von den aktuellen Kognitionen, Motivationen und körperlichen Expressionen einer Person geprägt wird (Scherer 2009). Es stellt sich somit die Frage, ob ein emotionales Gefühl als eine eigenständige Komponente betrachtet werden soll oder ob sie nicht vielmehr eine integrative Wahrnehmung (ein Epiphänomen) von Aktivitäten auf anderen Verhaltensebenen repräsentiert.

Messung Wichtigster Zugang zu den subjektiven Empfindungen einer Person sind ihre Gefühlsberichte, die sie introspektiv in Interviews, Befragungen oder in schriftlichen Protokollen erstellt (Überblick in Ekkekakis 2013). Der Gefühlsbericht wird meistens mit Fragen vorstrukturiert, und es werden Einschätzungen von Gefühlsintensitäten auf mehrstufigen Ratingskalen verlangt. Tagebuchmethoden eignen sich für eine Protokollierung von emotionalen Erlebnissen im Alltag über einen längeren Zeitraum hinweg (Brandstätter 2007).

7.4.6 Zusammenhang zwischen den Emotionskomponenten

An das Komponentenmodell der Emotion wird häufig die Annahme geknüpft, dass Reaktionen in den unterschiedlichen Verhaltenssystemen koordiniert ausgelöst werden und für jede emotionale Herausforderung ein anderes „Reaktionspaket" geschnürt wird, das auf die Bewältigung einer bedeutsamen Herausforderung in der Umwelt maßgeschneidert ist (Levenson 1999). Diese Annahme einer Reaktionskohärenz lässt erwarten, dass die Größen der emotionalen Reaktionen auf den verschiedenen Ebenen statistisch miteinander zusammenhängen (korrelieren): Je intensiver das subjektive Empfinden einer Emotion ist, desto stärker sollte z. B. auch die körperliche Reaktion der Person sein (und umgekehrt).

Für eine empirische Überprüfung dieser Hypothese haben Wissenschaftler 687 Studien metaanalytisch ausgewertet, in denen mehr als eine emotionale Reaktion erfasst wurden (Lench et al. 2011). Die Reaktionen wurden zunächst in (1) *kognitive Reaktionen* (Wahrnehmen, Erinnern etc.), (2) *Urteile* (Präferenzen, Risikoeinschätzungen etc.), (3) *Verhaltensreaktionen* (mimischer Ausdruck, Reaktionsgeschwindigkeit etc.), (4) *Gefühlsreaktionen* (selbstberichtete Gefühle, Empfindungen etc.) und (5) *physiologische Reaktionen* (Herzrate, Hautleitfähigkeit etc.) eingeteilt. Dann wurden standardisierte Effektgrößen

Tab. 7.1 Korrelationen (mit Anzahl der Freiheitsgrade) zwischen Effektgrößen von emotionalen Reaktionen auf unterschiedlichen Ebenen. (Aus Lench et al. 2011, S. 844)

	Kognition	Urteil	Verhalten	Erleben	Physiologie
Kognition	–	.19 (58)	–.01 (66)	–.01 (253)	.40 (35)*
Urteil		–	.14 (63)	.08 (292)	.27 (25)
Verhalten			–	.59 (216)***	.28 (54)*
Erleben				–	.41 (145)***
Physiologie					–

*p < .05, *** p < .001

(Hedges' g) für jede emotionale Reaktion berechnet und auf Zusammenhänge überprüft. Tab. 7.1 zeigt die Ergebnisse dieser korrelativen Analyse. So zeigen sich über alle Studien hinweg robuste Zusammenhänge zwischen Empfindungen, Verhalten und physiologischen Veränderungen. Die Stärke dieser Beziehungen ist aber eher moderat ($.28 < r < .59$). Mit Kognitionen und Urteilen zeigte sich wider Erwarten kein signifikanter Zusammenhang, was aber auch an den geringen Fallzahlen für diese Vergleiche liegen könnte. Zusammengefasst spricht diese Analyse somit eher für einen losen Zusammenhang zwischen den emotionalen Verhaltenssystemen (experimentelle Befunde in Mauss et al. 2005; Reisenzein 2000).

Die Annahme eines maßgeschneiderten „Reaktionspakets" lässt zudem typische Muster von Beziehungen zwischen den Emotionskomponenten erwarten, die charakteristisch für ausgewählte Emotionen sind. Ein „Angstpaket" sollte z. B. anders geschnürt sein als ein Freude- oder Zornpaket. Auch zu dieser Annahme liefert die Metaanalyse von Lench et al. (2011) aufschlussreiche Ergebnisse. So zeigen paarweise Emotionsvergleiche klare Unterschiede zwischen Reaktionen der Angst, Freude, Trauer oder Wut (Abb. 7.4). Auffällig ist, dass eine Diskrimination besonders gut zwischen negativen Emotionen und Freude gelingt, die als einzige positive Emotion in die Analyse aufgenommen wurde. Zusammengefasst belegt die Metaanalyse von Lench et al. (2011) somit sowohl eine moderate Kohärenz als auch eine moderate Unterschiedlichkeit (Distinktheit) der einer bestimmten Emotion zugeschriebenen Reaktionen.

7.5 Klassifikation von Emotionen

Im Alltag tun wir uns oft schwer, verschiedene Gefühle auseinanderzuhalten. Die Wissenschaft hat es hier nicht leichter. Für eine wissenschaftliche Untersuchung von Emotionen benötigt die Wissenschaft allerdings ein Ordnungssystem, das emotionale Zustände nach grundlegenden Eigenschaften gruppiert und voneinander abgrenzt. Ähnlich einem Periodensystem für chemische Elemente sucht deshalb auch die Emotionspsychologie nach grundlegenden Bausteinen oder „Elementen" von Emotionen, die eine sinnvolle und umfassende Klassifikation von emotionalen Zuständen zulassen. Bei dieser Suche gibt es unterschiedliche Ansätze:

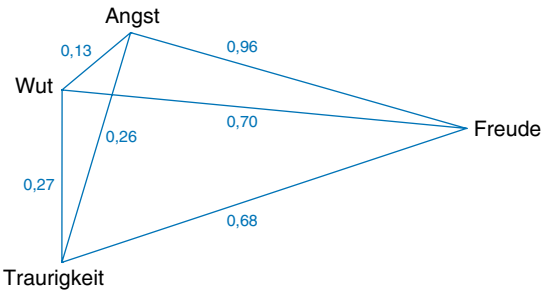


Abb. 7.4 Mittlere Effektstärke von paarweisen Emotionsvergleichen in der Metaanalyse von Lench et al. (2011)

- *Diskreter Ansatz:* Suche nach „primären" Emotionen, aus deren Vermischung oder Kombination zusätzliche Emotionen abgeleitet werden.
- *Dimensionaler Ansatz:* Suche nach primären Dimensionen des emotionalen Erlebens, auf denen sich alle emotionalen Zustände verorten lassen.
- *Modaler Ansatz*: Mittelweg zwischen diskreten und dimensionalen Ansätzen.

7.5.1 Diskrete Modelle

Diskrete Modelle nehmen eine begrenzte Anzahl von Basis- oder **primären Emotionen** an, die klar voneinander abgrenzbar sind und bei allen Menschen unabhängig von ihrem Alter, Geschlecht und ihrer Sozialisation auftreten. Eine Emotion ist nach Ekman (1992) eine Basisemotion, wenn sie (1) eine angeborene Basis hat (z. B. auch bei Primaten auftritt), (2) bei allen Menschen unter ähnlichen Umständen auftritt (z. B. Trauer nach einem persönlichen Verlust), (3) einen unverwechselbaren Ausdruck im Verhalten hat (z. B. spezifischer Gesichtsausdruck), (4) distinkte physiologische Veränderungen auslöst, (5) ein kohärentes Reaktionsmuster besitzt und (6) automatisch (d. h. schnell und ungewollt) ausgelöst wird. Diese Kriterien wurden jedoch nicht einheitlich angewandt oder zum Teil verändert, weshalb sich Auflistungen von Basisemotionen zum Teil erheblich unterscheiden (Ortony und Turner 1990; Tracy und Randles 2011). Trotz dieser Unterschiede werden jedoch folgende vier Emotionen in fast allen Listen übereinstimmend als Basisemotionen genannt: *Angst/Furcht*, *Ärger*, *Traurigkeit* und *Freude* (Abb. 7.5).

Basisemotionen werden als psychologisch „primär" aufgefasst, da sie grundlegend für alle emotionalen Empfindungen sind. Sogenannte *Mischtheorien* erklären dann die Vielfalt von emotionalen Empfindungen mit Vermischungen von primären Emotionen, aus denen sich komplexe, d. h. **sekundäre Emotionen** ergeben. Plutchik (2001) sieht z. B. *Liebe* als eine Verschmelzung von Freude und Akzeptanz, *Neugierde* als Mischung von Überraschung und Akzeptanz und *Bescheidenheit* als gemischte Gefühle von Furcht und Akzeptanz. Andere Forscher verstehen Basisemotionen wiederum als *prototypische Zustände*, um die sich ähnliche emotionale Zustände herum gruppieren (Shaver et al. 1987). Freude benennt z. B. eine Familie von emotionalen Zuständen, die Erheiterung, Erleichterung, Genugtuung, Zufriedenheit und Stolz mit einschließt. Die einzelnen Spielarten einer Freude unterscheiden sich hier nicht so sehr in ihrer subjektiven Empfindung, sondern dieselbe Basisemotion (Freude) wird in Abhängigkeit von der Situation lediglich unterschiedlich benannt (z. B. Stolz benennt Freude über eine vollbrachte Leistung; Dankbarkeit benennt eine Freude über eine Hilfeleistung).

Empirische Evidenz Belege für universell auftretende Emotionen liefern kulturvergleichende Studien des Emotionsausdrucks im Gesicht (Ekman und Friesen 1971; Izard 1994) und in der Stimme (Scherer und Wallbott 1994). In einer klassischen Studie wurden Angehörigen aus verschiedenen Kulturkreisen Fotografien von Europäern vorgelegt, die Freude, Ärger, Angst, Überraschung oder Ekel im Gesicht ausdrückten (Ekman et al. 1969). Die Studienteilnehmer sollten von verschiedenen zur Auswahl stehenden Emotionsbegriffen dasjenige Wort wählen, das den gezeigten Ausdruck am besten beschreibt. Wie ◘ Tab. 7.2 zeigt, war die „Trefferquote" in allen Kulturen ziemlich hoch, selbst wenn diese Kulturen nur wenig Austausch mit westlichen Nationen hatten. Nachfolgestudien kamen zu einem ähnlichen Ergebnis (Metaanalyse von 168 Studien in Elfenbein und Ambady 2002), wenngleich viele dieser Studien wegen ihrer Verwendung von gekünstelt-übertriebenen Ausdrücken und einer erzwungenen Auswahl zwischen Emotionskategorien kritisiert wurden (Russell 1994).

Weitere Hinweise auf eine begrenzte Anzahl von angeborenen Basisemotionen kommen von vergleichenden Tierstudien. Panksepp (1998; 2011) identifizierte mit tierexperimentellen Methoden (Hirnstimulation, Läsions- und neuropharmakologischen Studien) sieben Basisemotionen: Appetenz (SEEKING), Furcht (FEAR), Wut (RAGE), erotische Lust (LUST), Fürsorge (CARE), Panik/Trauer (PANIC/GRIEF) und Spielfreude (PLAY). Jede Basisemotion verfügt über ein weitgehend eigenständiges neuronales System im Mittel- und Zwischenhirn. Obwohl Panksepp homologe emotionale Systeme für alle Säugetiere annimmt, ist die Gültigkeit dieses Modells für den Menschen jedoch noch nicht zweifelsfrei belegt (Barrett et al. 2007a).

◘ **Abb. 7.5** Die vier Basisemotionen: Ärger (**A**), Freude (**B**), Trauer (**C**) und Angst/Furcht (**D**)

7.5.2 Dimensionale Modelle

Eine alternative Position nehmen dimensionale Modelle ein. Dimensionale Ansätze bezweifeln, dass Emotionen wie Angst,

◘ **Tab. 7.2** Erkennungsraten von Emotionsausdrücken in fremden Kulturen. (Aus Ekman et al. 1969, S. 87)

Kultur	Emotionsausdruck					
	Freude	Angst	Abscheu	Ärger	Überraschung	Traurigkeit
USA.	97 %	88 %	82 %	69 %	91 %	73 %
Brasilien	97 %	77 %	86 %	82 %	82 %	82 %
Japan	87 %	71 %	82 %	63 %	87 %	74 %
Neuguinea (isoliert)	82 %	54 %	44 %	50 %		
Borneo (isoliert)	92 %	40 %		64 %	36 %	52 %

Hinweis: Bei leeren Zellen wurden mehrheitlich andere Emotionen zugeordnet und es wird keine Trefferquote berichtet.

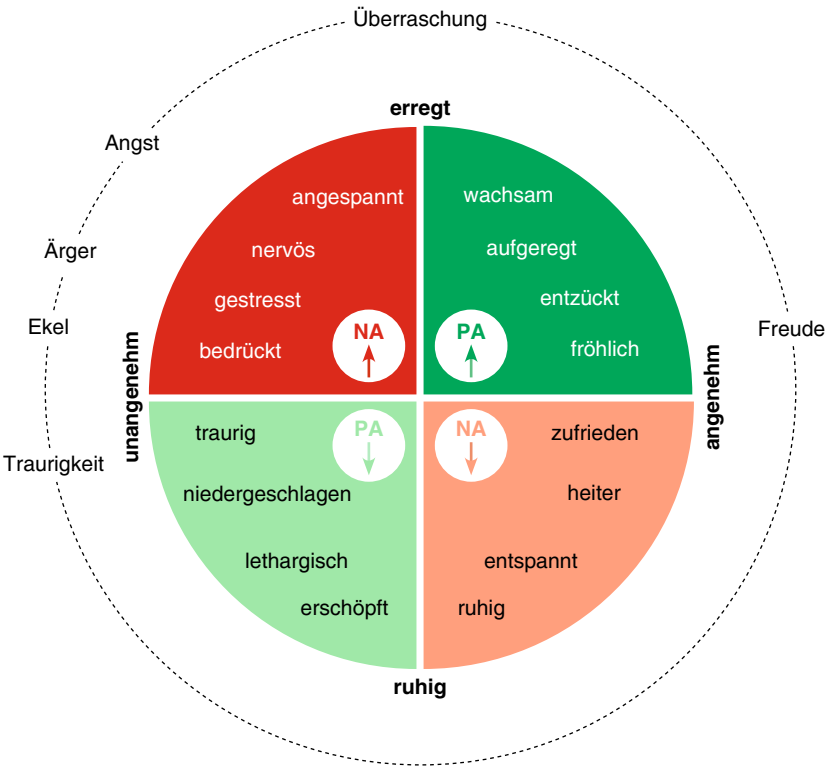


Abb. 7.6 Das Circumplexmodell von Russell (1980) mit Valenz und Erregung sowie das (farbig dargestellte) alternative Modell von Watson und Tellegen (1985) mit positiven und negativen Affekten (PA und NA) als unabhängige Konstituenten des emotionalen Erlebens

Ärger, Freude etc. die „Atome" des emotionalen Erlebens sind. Stattdessen suchen sie nach noch kleineren Bausteinen, die sie z. B. in Gefühlen einer Angenehmheit oder einer Aufregung identifizieren.

Ein erstes dimensionales Emotionsmodell hat Wilhelm Wundt (1874) ausgearbeitet. Im Einklang mit der Programmatik einer Elementenpsychologie versuchte er introspektiv zu ergründen, aus welchen einfachen Gefühlen – den Partialgefühlen – sich komplexere Gefühle zusammensetzen. In diesen Untersuchungen identifizierte er drei Partialgefühle: (1) Lust/Unlust (*Valenz*), (2) Erregung/Beruhigung (*Aktivierung*) und (3) Spannung/Lösung (*Erwartungshaltung*). Wundt ging davon aus, dass jedes emotionale Gefühl an einem bestimmten Schnittpunkt der drei Dimensionen verortet werden kann. Nachfolgende Arbeiten bekräftigten die Bedeutung der Valenz- und Erregungsdimension für eine Beschreibung des emotionalen Erlebens, während eine dritte Dimension von den meisten Modellen nicht benötigt wird (Yik et al. 1999).

Ein bekanntes dimensionales Modell ist das *Circumplexmodell*, in dem sich emotionale Zustände um zwei orthogonale Dimensionen – Valenz und Erregung – herum kreisförmig anordnen (Russell 1980; Abb. 7.6). Zum Beispiel wird „Überraschung" als Zustand mit hoher Erregung und neutraler Valenz ganz oben (90°) im zweidimensionalen Raum lokalisiert, während „Freude" als positiver Zustand mittlerer Erregung im Sektor ganz rechts (0°) verortet wird. Kennzeichnend für das Modell ist die kreisförmige Anordnung von Emotionen, die eine regelmäßige Besetzung der Sektoren in gleichen Abständen vorschlägt (daher auch der Name „Circumplex"). Diese Annahme wird aber nicht von allen Modellen geteilt. So wurde kritisiert, dass niedrige Erregungszustände wie *ruhig*, *entspannt* oder *erschöpft* wohl kaum als „emotionale" Zustände durchgehen dürften. Watson und Tellegen (1985) haben daraufhin ein alternatives Modell vorgeschlagen, das Emotionen vorwiegend in den Sektoren mit hohen Aktivierungen verortet. Entsprechend ihrer Valenz wurden diese Sektoren *positive und negative Affekte* (später: *positive und negative Aktivierungen*; Watson et al. 1999) genannt, die einen alternativen zweidimensionalen Raum aufspannen. Positive und negative Affekte sind in diesem Modell *bivariat* repräsentiert (d. h. voneinander unabhängige Dimensionen), weshalb sie gleichzeitig auftreten können (Cacioppo et al. 2012). Das Circumplexmodell hingegen sieht Valenz als eine *bipolare* Dimension, in der eine zunehmende Positivität zu einer verringerter Negativität führt und umgekehrt (Russell und Carroll 1999).

Empirische Evidenz Hauptmethode von dimensionalen Ansätzen ist die Extraktion von latenten Dimensionen (Faktoren) aus Gefühlsberichten und Einschätzungen mit datenreduzierenden Verfahren (z. B. Faktorenanalyse oder multidimensionale Skalierung). Die Ergebnisse dieser Methoden hängen wesentlich von der Menge und Repräsentativität der analysierten Daten sowie von statistischen Methodenentscheidungen ab (Green et al. 1993; Watson und Tellegen 1999). So wurde z. B. kritisiert, dass hauptsächlich verbale Berichte und Einschätzungen analysiert wurden, die von sprachlichen Gepflogenheiten und Zusammenhängen beeinflusst werden. Die statistischen Methoden liefern zudem keine inhaltliche Beschreibung der identifizierten Dimensionen. Diese inhaltliche Interpretation erfolgt erst vor dem Hintergrund einer bestimmten Emotionstheorie (integrativer Überblick in Yik et al. 1999).

7.5.3 Modale Modelle

Eine Zwischenposition, die verschiedene Aspekte von diskreten und der dimensionalen Modelle integriert, wurde von Scherer (1994) vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf einem kognitiven Prozessmodell der Emotion, in dem fortgesetzte kognitive Situationseinschätzungen fortlaufend Veränderungen in den emotionalen Reaktionssystemen erzeugen (Scherer 2001; 2009; ausführliche Beschreibung in ▶ Abschn. 7.8.3). Im Gegensatz zu diskreten Emotionsmodellen, die eine stark limitierte Anzahl von angeborenen Basisemotionen und emotionalen Zuständen annehmen, kann es in der modalen Perspektive aufgrund der reichhaltig ausdifferenzierten Bewertungsdimensionen prinzipiell unendlich viele unterschiedliche Emotionszustände geben. Es gibt nun aber eine Reihe von Herausforderungen, mit denen sich ein Organismus immer wieder aufs Neue konfrontiert sieht (z. B. Blockierung eines wichtigen Zieles, akute Bedrohungen). Daraus resultiert eine gewisse Häufung von wiederkehrenden Situationsbewertungen, die wiederum ähnliche Veränderungen in den Emotionskomponenten herbeiführen. Diese häufig auftretenden Reaktionsmuster werden im Sprachgebrauch in Kategorien zusammengefasst und mit diskreten Emotionslabels (Angst, Ärger, Freude etc.) versehen (Shaver et al. 1987). Im Gegensatz zu diskreten Modellen wird die begrenzte Anzahl der Emotionen also nicht mit biologisch vorgefertigten **Emotionsmodulen**, sondern mit sprachlichen Kategorisierungsprozessen erklärt. Ein modaler Ansatz kann deshalb sowohl universell auftretende Emotionen (mit kulturübergreifenden Mustern von Situationsbewertungen) als auch eine kulturspezifische Ausdifferenzierung von emotionalen Zuständen (mit kulturell beeinflussten Bewertungs- und Sprachgewohnheiten) erklären (Scherer 2009). Empirisch gestützt wird ein modaler Ansatz von Strukturanalysen, die im Einklang mit dem theoretischen Modell vier Dimensionen (Valenz, Kontrolle, Aktivierung, Neuheit) für eine umfassende Beschreibung von emotionalen Zuständen benötigen (Fontaine et al. 2007). Darüber hinaus gibt es aber nur wenige direkte Überprüfungen, weshalb eine abschließende Beurteilung diese Ansatzes zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich ist.

7.6 Funktionen von Emotionen

Seit Anbeginn der Emotionspsychologie machen sich Forscher Gedanken über mögliche Funktionen von Emotionen. Lange Zeit wurden Emotionen vorwiegend als störende Einflüsse betrachtet, die das rationale Denken und ein überlegtes Handeln beeinträchtigen. Diese Sichtweise hat sich grundlegend gewandelt. Heute sieht die Mehrheit der Emotionsforscher eine Emotion als eine adaptive Reaktion auf persönlich bedeutsame Herausforderungen in der Umwelt (Keltner und Gross 1999). In funktionalen Analysen von Emotionen wurden vor allem informative, handlungsvorbereitende und sozial-kommunikative Funktionen von Emotionen hervorgehoben. Diese werden im Folgenden näher vorgestellt.

7.6.1 Informative Funktionen

Emotionen informieren die Person über bedeutsame Ereignisse und Veränderungen in der Umwelt:

- Als *Relevanzdetektoren* lenken sie die Aufmerksamkeit auf Chancen und Risiken in der Umwelt (Orientierung).
- Als *Überwachungssysteme* melden sie Fortschritte und Rückschläge in der Zielverfolgung.
- Als *Feedbacksysteme* informieren sie über die Folgen von Entscheidungen und Handlungen. Je nach Beschaffenheit einer Situation und den Zielen und Bedürfnissen einer Person können somit unterschiedliche Ereignisse emotional hervortreten und auf eine Berücksichtigung in der Verhaltenssteuerung drängen.

Aufmerksamkeitslenkung

Eine automatische Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf emotionale Reize wurde in kognitionspsychologischen Versuchen nachgewiesen, in denen Reize ignoriert (z. B. dichotisches Hören, emotionale Stroop-Aufgabe), gesucht (z. B. visuelle Suchaufgaben) oder entdeckt (z. B. Paradigma zum Aufmerksamkeitsblinzeln) werden müssen. ◘ Abb. 7.7 zeigt eine typische visuelle Suchaufgabe mit Pilzen (als neutrale Reize) und Spinnen als Bedrohungsreizen. Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass emotionale Reize stärker beachtet werden und eine Ablösung der Aufmerksamkeit von ihnen erschwert ist (Yiend 2010). Effekte einer emotionalen Aufmerksamkeitslenkung wurden sowohl mit (bedrohlichen) negativen als auch mit positiven Reizen beobachtet, sofern diese erregend sind (Anderson 2005; Schimmack 2005; Vogt et al. 2008) oder eine biologische Relevanz haben (Brosch et al. 2007). Ein exklusiver Negativitätsbias wird somit von Studien mit kontrolliertem Reizmaterial nicht gestützt.

Gedächtnis

Eine erhöhte Aufmerksamkeit für emotionale Ereignisse ist vermutlich auch ein Grund dafür, warum wir uns an diese Ereignisse besser erinnern. Die Prügelei im Schulhof oder der erste Kuss bleiben uns oft noch nach vielen Jahren lebhaft in Erinnerung. Neben einer erhöhten Salienz sind emotionale Ereignisse aber auch distinkter (Edery-Halpern und Nachson 2004), sie werden häufiger aus dem Gedächtnis abgerufen (Walker et al. 2009) und besser im Langzeitgedächtnis konsolidiert (McGaugh 2004), sodass multiple Gedächtnisprozesse und -systeme zu einer Verbesserung beitragen. Studien haben gezeigt, dass vor allem zentrale Inhalte von emotionalen Erlebnissen detailgetreu erinnert werden. In einer Studie wurden beispielsweise Kinder nach ihren Erinnerungen an eine schmerzhafte Verletzung mit anschließendem Krankenhausaufenthalt befragt. Die Kinder erinnerten sich besser an die Verletzung als an die anschließende Behandlung im Krankenhaus (Peterson und Whalen 2001). Zu einem ähnlichen Schluss kommen Untersuchungen von Augenzeugenberichten, in denen Tatzeugen ein „Tunnelgedächtnis“ für zentrale Inhalte auf Kosten von peripheren Details haben (Safer et al. 1998). Forschungen zu sogenannten *Blitzlichterinnerungen* (*flashbulb memories*) an traumatische Erlebnisse (Katastrophen, Attentate etc.) zeigen

Abb. 7.7 Illustration einer typischen visuellen Suchaufgabe. In welchem Suchbild finden Sie den Abweichling (Spinne in **A** bzw. Pilz in **B**) schneller?

andererseits, dass die Begleitumstände von diesen Ereignissen häufig ungewöhnlich lebhaft und detailgetreu erinnert werden (Brown und Kulik 1977; Davidson 2008). Kvavilashvili et al. (2009) befragten beispielsweise Personen einige Tage nach dem Flugzeuganschlag auf die Twin Towers in New York nach den Begleitumständen, in denen sie von dem Anschlag erfahren haben (Wann? Wo? Von wem?; Abb. 7.8). Diese Befragung wurde zwei und drei Jahre später wiederholt. Die Konsistenz der Berichte nahm mit dem Zeitraum zwar ab, aber sie war immer noch überdurchschnittlich hoch.

In der Summe zeigen diese Forschungsarbeiten, dass Emotionen die Erinnerungsleistung sowohl verbessern als auch verschlechtern können (Levine und Edelstein 2009). Zentrale Inhalte von emotionalen Ereignissen werden generell besser erinnert als periphere Details, die in manchen Situationen sogar schlechter als neutrale Ereignisse behalten werden. Details können aber in das „emotionale Scheinwerferlicht" rücken, wenn sie mit zentralen Inhalten in einem inhaltlichen Zusammenhang stehen und/oder für die Ziele und Bedürfnisse einer Person bedeutsam sind (Christianson 1992; Laney et al. 2004). Schließlich zählt nicht die Augenfarbe eines Bankräubers, sondern die Waffe, die er in der Hand hält (Christianson und Hübinette 1993).

Abb. 7.8 Der Anschlag von 9/11. Wo waren Sie an diesem Tag? (▶ Creative Commons ▶ Attribution-Share Alike 2.0 Generic; Abdruck des Bildes mit Genehmigung der CC BY-SA 2.0 Lizenz)

Denken und Entscheiden

Emotionen und Stimmungen beeinflussen Denkprozeduren und Verarbeitungsstrategien, die eine Person in ihren Urteilen und Entscheidungen anwendet (▶ Kap. 17). Tab. 7.3 zeigt eine Auswahl von Kognitionen und Denkvorgängen, die von emotionalen Zuständen beeinflusst werden (Überblick in Clore und Huntsinger 2007). Generell zeigt sich, dass positive Emotionen eine flexible, heuristische und weite Informationsverarbeitung anregen, während negative emotionale Zustände eher eine systematische, detaillierte und fokussierte Verarbeitung begünstigen. Eine mögliche Funktion von positiven Emotionen könnte deshalb im Aufbau und in einer Erweiterung von Fertigkeiten und (sozialen, physischen, intellektuellen) Ressourcen liegen (*broaden-and-built theory*; Fredrickson 2001), während negative Emotionen kognitive Ressourcen auf die Bewältigung eines spezifischen Problems oder einer Herausforderung in der Umwelt bündeln (Lerner und Keltner 2000).

Menschen nutzen darüber hinaus momentane Gefühle als Entscheidungshilfen für Werturteile unter Unsicherheit (*feelings-as-information*; Schwarz und Clore 2007; *affect heuristic*; Slovic et al. 2007). In einer klassischen Studie wurden Personen nach ihrer Lebenszufriedenheit an sonnigen und regnerischen Tagen telefonisch befragt (Schwarz und Clore 1983). Die Personen gaben an sonnigen Tagen (gute Stimmung) eine höhere Lebenszufriedenheit an als an regnerischeren Tagen (schlechte Stimmung). Offenbar nutzten die Personen ihre momentane Gefühlslage als Hinweis auf ihr allgemeines Wohlbefinden. Diese Entscheidungsheuristik macht sich auch die Werbung zunutze. Personen entscheiden sich z. B. eher für einen spontanen Kauf, wenn sie in guter Stimmung sind (Brown et al. 1998). Dieser Einfluss schwindet jedoch, wenn die Entscheidung kognitiv durchdrungen und analysiert wird. Dementsprechend vertrauen Personen auf ihr „Bauchgefühl" vor allem dann, wenn bei der Entscheidung wenig auf dem Spiel steht, kognitive Ressourcen knapp und/oder keine zuverlässigeren Entscheidungshilfen zur Hand sind (Schwarz et al. 1991).

Zielverfolgung und Handlungsüberwachung

Eine wichtige Funktion von Emotionen liegt in der Überwachung von Vorgängen in der Umwelt und von Fortschritten in

Tab. 7.3 Emotionaler Einfluss auf Kognitionen und Denkvorgänge (Auswahl)

Kognition	Emotionaler Einfluss	Beispielreferenz
Semantische Bahnung	Positiver Affekt erhöht die Zugänglichkeit von semantisch assoziierten Konzepten (z. B. Brot – Butter) im Langzeitgedächtnis	Hänze und Hesse (1993)
Globale vs. lokale Verarbeitung	Bevorzugung einer globalen (lokalen) Reizverarbeitung in positiven (negativen) Affektlagen	Gasper und Clore (2002)
Heuristische Verarbeitung	Bevorzugung von heuristischen (systematischen) Verarbeitungsstrategien in positiven (negativen) affektiven Zuständen	Schwarz et al. (1991)
Stereotypisierung	Positiver Affekt verstärkt die Anwendung von Stereotypen relativ zu negativem Affekt	Bodenhausen (1993)
Scheinerinnerung	Positiver Affekt erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Erinnerung an Ereignisse, die faktisch nicht stattgefunden haben	Storbeck und Clore (2005)
Schemagesteuerter Gedächtnisabruf	Positiver Affekt verstärkt das Ausfüllen von Gedächtnisinhalten mit schemakonsistenter Information	Bless et al. (1996)
Abrufinduziertes Vergessen	Negativer Affekt reduziert die Inhibition von nicht abgerufenen Gedächtnisinhalten	Bäuml und Kuhbandner (2007)
Aufgabenwechsel	Positiver Affekt begünstigt impulsive Entscheidungen und erleichtert einen Wechsel zwischen Aufgaben	Dreisbach und Goschke (2004)
Kognitive Kontrolle	Positiver Affekt erschwert eine Anpassung an Reaktionskonflikten	Steenbergen et al. (2009)

der Zielerreichung. Der Nobelpreisträger und Kognitionspsychologe Herbert A. Simon (1967) wies früh auf eine mögliche Unterbrechungsfunktion von Emotionen hin: Die serielle Informationsverarbeitung wird von einer unspezifischen emotionalen Erregung unterbrochen, sobald ein drängendes Problem oder eine günstige Gelegenheit in der Umwelt auftritt. Diese Unterbrechung ermöglicht eine Neuausrichtung des Verhaltens auf die veränderten Umstände, sodass Chancen und Risiken in der Umwelt von dem kognitiven „Prozessor" adäquat berücksichtigt werden (ähnlicher Ansatz in Mandler 1964).

Oatley und Johnson-Laird (1987) haben die Hypothese einer emotionalen Unterbrechung aufgegriffen und um emotionsspezifische Signale erweitert. In ihrem Modell gibt es fünf Basisemotionen, die von bestimmten Schlüsselstellen in der Zielverfolgung ausgelöst werden und das kognitive System auf die veränderte Situation hinweisen (Tab. 7.4). Das emotionale Signal drängt das kognitive System auf eine Überführung (Transition) des aktuellen Zustands in einen neuen Zustand, der den Bedürfnissen

Tab. 7.4 Basisemotionen nach Oatley und Johnson-Laird (1987), ihre Auslöser (Schlüsselstellen in der Zielverfolgung) und ihre Effekte (die Transition in einen neuen Zustand)

Emotion	Schlüsselstelle	Transition
Freude	Erreichung eines Etappenzieles	Setze Plan fort und modifiziere ihn falls nötig.
Traurigkeit	Scheitern eines wichtigen Planes oder Unerreichbarkeit eines aktiven Zieles	Tue nichts. Suche nach neuem Plan.
Angst	Bedrohtes Selbsterhaltungsziel	Stoppe, überwache die Umwelt und/oder ergreife die Flucht.
Ärger	Frustration eines aktiven Zieles	Streng dich mehr an und/oder attackiere.
Ekel	Verletzung eines Geschmackszieles	Weise die Substanz zurück und/oder ziehe dich zurück.

der Person entspricht. Empirisch gestützt wird das Modell von Tagebuchaufzeichnungen, in denen Personen emotionale Erlebnisse an theoriekonformen Schlüsselstellen überzufällig häufig berichten (Oatley und Duncan 1994). Experimentelle Nachweise fehlen jedoch, sodass die Gültigkeit des Modells nicht belegt wurde.

Carver und Scheier (1990) haben ein dynamisches Modell der emotionalen Handlungsüberwachung auf der Grundlage eines kybernetischen Modells entwickelt. In einer Handlungsschleife werden Diskrepanzen zwischen einem aktuellen Zustand (Istwert) und einem angestrebten Ziel (Sollwert) durch Aktionen reduziert (Annäherungsmotivation), oder es wird eine Diskrepanz zu einem abgelehnten Standard (Anti-Ziel) erhöht (Vermeidungsmotivation). Carver und Scheier nehmen an, dass die Geschwindigkeit einer Diskrepanzveränderung in der Handlungsschleife von einer übergeordneten „Metaschleife" überwacht und bei Erwartungsverletzungen emotional ausgelesen wird (Abb. 7.9): Erfolgt eine Annäherung an einen erwünschten Zielzustand schneller als erwartet, so entstehen Freude und ein Hochgefühl; ist sie langsamer als gedacht, so wird die Person niedergeschlagen und traurig. Im Fall einer Vermeidung eines Anti-Zieles erzeugt eine unverhofft schnelle Vergrößerung der Diskrepanz Erleichterung und Ruhe, während eine unerwartet langsame Distanzvergrößerung Angst und Furcht auslöst. Emotionen geben hier somit sehr spezifische Signale hinsichtlich der Zielorientierung und der Geschwindigkeit der Zielverfolgung.

7.6.2 Motivierende Funktionen

Eine verhaltensvorbereitende Funktion von Emotion wird bereits in dem Wort „Emotion" offenbar. *Emotion* stammt ursprünglich aus dem Lateinischen und hat seine etymologischen Wurzeln in dem Verb *emovere*, das „hinaustreiben", „herausbewegen", „in Bewegung setzen" oder „in einen erregten Zustand versetzen"

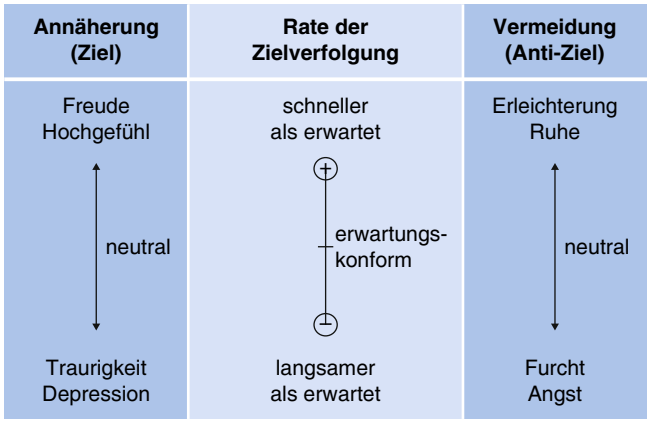


Abb. 7.9 Emotionsgenese im Selbstregulationsmodell von Carver und Scheier (1990)

7

bedeutet. Emotionen drängen uns dazu, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen oder bestimmte Zustände anzustreben bzw. zu vermeiden. Populäre Beispiele sind ein Wanderer, der panisch vor dem wilden Bären davonläuft, oder ein zorniger Mann, der aggressiv auf eine andere Person losgeht. Obwohl diese Beispiele sehr eindringlich eine verhaltensmotivierende Funktion von *einigen* Emotionen vor Augen halten, so bleibt die Frage offen, ob auch tatsächlich *alle* emotionalen Zustände mit Motivationen einhergehen. Zum Beispiel ist es schwierig, einen konkreten Verhaltensimpuls für positive Emotionen wie Stolz oder Zufriedenheit zu benennen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob nur sehr einfache, eventuell angeborene Verhaltensweisen von Emotionen motiviert werden können oder ob auch komplexe Handlungen, die mehrere Handlungsschritte erfordern (z. B. Panikverkäufe an einer Finanzbörse), emotional angeregt werden. Die Antwort auf diese Fragen hängt – wenig überraschend – von den theoretischen Annahmen über die Beschaffenheit von Emotionen ab (Überblick in Eder und Rothermund 2013). In einigen Fragen wurde aber auch ein breiter Konsens über theoretische Gräben hinweg erzielt. Diese Entwicklungen werden hier nachgezeichnet.

Ein wichtiger Impetus für eine funktionale Analyse von Emotionen kommt von der biologischen Evolutionslehre. Ihr Begründer, Charles Darwin, widmete ein ganzes Buch einer funktionalen Analyse von emotionalen Verhaltensweisen (*The Expression of the Emotions in Man and Animals*, 1872). Darwin nahm an, dass Verhaltensweisen mit bestimmten Gefühlszuständen automatisch verknüpft werden, wenn diese in der Vergangenheit wiederholt gemeinsam auftreten (*principle of serviceable associated habits*). Die assoziierte Verhaltensreaktion wird dann von einer emotionalen Situationsbewertung automatisch ausgelöst, wie Darwin mit folgender Anekdote aus seinem Leben beschreibt:

» „I put my face close to the thick glass-plate in front of a puff adder in the Zoological Gardens, with the firm determination of not starting back if the snake struck at me; but, as soon as the blow was struck, my resolution went for nothing, and I jumped a yard or two backwards with astonishing rapidity. My will and reason were powerless against the interpretation of a danger which had never been experienced." (Darwin 1872, S. 38)

Er nahm an, dass bewährte emotionale Verhaltensgewohnheiten an die nächste Generation weitergegeben und folglich vererbt werden können. Wir wissen heute, dass diese *Lamarck'sche Hypothese* falsch (oder genauer: nicht plausibel) ist. Es fällt jedoch leicht, die Theorie auf Verhaltensdispositionen einzugrenzen, die eine genetische Basis haben und die sich stammesgeschichtlich vermutlich in der Bewältigung einer wiederkehrenden physischen oder sozialen Herausforderung bewährt haben könnten (Cosmides und Tooby 2000). Diese Verhaltensdispositionen lassen sich am besten als breite motivationale Zustände (Flucht, Aggression etc.) beschreiben. Einen wichtigen theoretischen Schritt in diese Richtung hat McDougall (1909) mit einer Aufstellung von „emotionalen Instinkten" gemacht, die bestimmte Motivationen, Kognitionen und Gefühle umfassen. Ein „Fluchtinstinkt" löst z. B. Gefühle der Furcht und eine Tendenz zu fliehen aus, während ein „Neugierinstinkt" Gefühle des Staunens und einen Erkundungsdrang hervorruft. Der motivationale Antrieb und das begleitende Gefühl wurden von ihm als angeboren und deshalb als unveränderlich angesehen, während das offene Verhalten von Lernerfahrungen abhängt. Auf dieser Grundlage hat McDougall sieben angeborene Instinkte bzw. Emotionen identifiziert: einen Fluchtinstinkt (Furcht), einen Abstoßungsinstinkt (Ekel), einen Neugierinstinkt (Staunen), einen Kampfinstinkt (Ärger), einen Dominanzinstinkt (Hochgefühl), einen Unterwerfungsinstinkt (Demut) und einen Elterninstinkt (Zärtlichkeit).

In der Folgezeit haben Emotionsforscher immer wieder ähnliche Kataloge entwickelt, in denen Emotionen mit bestimmten motivationalen Orientierungen in Verbindung gebracht werden. Ein bekanntes neueres Modell stammt von Plutchik (2001), der acht Basisemotionen nach ihren auslösenden Ereignissen und motivationalen Bestrebungen unterscheidet (Tab. 7.5). Jede Emotion ist auf die Lösung eines speziellen Problems ausgerichtet, mit denen sich Menschen in ihre Stammesgeschichte (vermutlich) immer wieder konfrontiert sahen.

Ein kritischer Blick auf die in Tab. 7.5 aufgelisteten Funktionen zeigt aber auch die Schwächen dieses Ansatzes. Ein Problem ist, dass das Verhalten, das von Menschen und Tieren in emotionalen Situationen gezeigt wird, mit den erwarteten Motivationen häufig nicht übereinstimmt. In Bedrohungssituationen ergreifen Menschen und Tiere z. B. oftmals nicht die Flucht, sondern gehen spontan in eine Attacke über (*defensive Aggression*; Blanchard et al. 2001). Menschen gehen einem Ärgernis wiederum oftmals lieber aus dem Weg (Flucht), anstatt es zu attackieren. Das gezeigte emotionale Verhalten einer Person ist folglich sehr viel heterogener als von der Theorie erwartet.

Um dieser Heterogenität gerecht zu werden, wurden emotionale Motivationen auf theoretischer Ebene zunehmend breiter aufgestellt und abstrakter beschrieben. Eine einflussreiche Theorie ordnet beispielsweise Furcht ein Fight-Flight-Freeze-System (FFFS) zu, das Flucht, Angriff und eine Verhaltensstarre in einer Bedrohungssituation gleichermaßen motivieren kann (Gray und McNaughton 2000). Frijda (1986) begreift *emotionale Handlungsbereitschaften* wiederum als relativ abstrakte Mittel-Zweck-Relationen, die spezifische Verhaltensimpulse, generelle Motivationen der Annäherungen und Vermeidung sowie unspezifische Erregungszustände umfassen können. Selbst die Abwesenheit eines motivationalen Impulses kann als eine emotionale Hand-

Tab. 7.5 Motivationale Funktionen von Primäremotionen. (Nach Plutchik 2001, S. 348)

Ereignis	Kognition	Gefühl	Verhalten	Funktion
Bedrohung	„Gefahr"	Furcht	Flucht	Schutz
Hindernis	„Feind"	Ärger	Angriff	Zerstörung des Hindernisses
Erwerb eines geschätzten Objekts	„Besitz"	Freude	Behalten oder Wiederholen	Ressourcenvermehrung
Verlust eines geschätzten Objekts	„Verlust"	Traurigkeit	Weinen	Wiedervereinigung
Mitglied der Eigengruppe	„Freund"	Akzeptanz	Umsorgen	Gegenseitige Unterstützung
Ungenießbares Objekt	„Gift"	Ekel	Ausspucken	Zurückweisung von Schadstoffen
Neues Territorium	„Erforschen"	Antizipation	Erkunden	Exploration
Unerwartetes Ereignis	„Was ist das?"	Überraschung	Stoppen	Zeitgewinn für Orientierung

lungsbereitschaft interpretiert werden (z. B. die Abwesenheit von Aggression bei Scham). Eine breite Konzeptualisierung von emotionalen Handlungsneigungen erleichtert eine Integration von unterschiedlichen Verhaltensbeobachtungen in die Theorie. Sie erschwert aber auch eine empirische Falsifizierung ihrer Annahmen, weshalb ihre Gültigkeit von einigen Forschern angezweifelt wurde (Baumeister et al. 2010; Russell 2009).

Im Gegensatz dazu stehen Beobachtungen von emotionalen Verhaltenstendenzen der Annäherung und Vermeidung auf einem festen empirischen Fundament. Zahlreiche Studien finden Belege, dass Menschen Situationen, die positive Emotionen auslösen, aufsuchen, während sie Situationen, die negative Emotionen auslösen, tendenziell meiden (Überblick in Elliot 2008). In einem Untersuchungsansatz wird beispielsweise die Stärke eines protektiv-defensiven Lidschlusses, der von einem Schreckreiz (z. B. einem lauten Knall) ausgelöst wird, während einer Betrachtung von positiven, negativen und neutralen Bildern gemessen. In vielen Studien hat sich gezeigt, dass der Lidschlag von der Betrachtung von (erregenden) negativen Bildern verstärkt und von der Betrachtung von (erregenden) positiven Bildern abgeschwächt wird (Bradley et al. 2001; Lang und Bradley 2010). In einem anderen Untersuchungsansatz werden Bewegungen des Körpers oder einer virtuellen Figur hin und weg von emotionalen Reizen untersucht (Überblick in Eder und Dignath 2013). Auch hier zeigt sich, dass positive Reize eine Annäherung und negative Reize eine Vermeidung erleichtern (Eder und Rothermund 2008; Laham et al. 2014). Studien haben aber auch gezeigt, dass bestimmte negative Emotionen (z. B. Ärger) eine Annäherung anstelle einer Vermeidung auslösen, was eine emotionsspezifische Regelung von Tendenzen der Annäherung und Vermeidung nahelegt (Carver und Harmon-Jones 2009; Marsh et al. 2005). Welche Merkmale von emotionalen Situationen eine Annäherung oder Vermeidung motivieren, ist jedoch noch nicht hinreichend geklärt (Überblick des aktuellen Forschungsstands bei Elliot et al. 2013).

7.6.3 Soziale Funktionen

Emotionen regulieren zwischenmenschliche Beziehungen, indem sie emotionale Befindlichkeiten kommunizieren und selektive Reaktionen in anderen Personen hervorrufen (Keltner und Haidt 1999). Zum Beispiel behalten Kinder, die Traurigkeit oder Ärger in einem Streit um ein Spielzeug ausdrücken, ihr Spielzeug häufiger als Kinder, die keine Emotion zeigen (Camras 1977). Ein emotionaler Ausdruck ist hier ein soziales Signal, das neben einer emotionalen Befindlichkeit („So fühle ich mich") auch eine Verhaltensabsicht („Das werde ich tun") und eine Verhaltensaufforderung („Das will ich, dass du tust") kommuniziert (Horstmann 2003). Emotionen werden deshalb auch besonders häufig in sozialen Situationen gezeigt. Kraut und Johnston (1979) haben in einer Feldstudie die sozialen Umstände analysiert, in denen Menschen häufig lächeln. Zum Beispiel beobachteten sie den Ausdruck von Bowlern nach einem geglückten (oder missglückten) Bowling-Wurf, die Zuschauerreaktionen bei einem Hockey-Match oder den Gesichtsausdruck von Spaziergängern an regnerischen und sonnigen Tagen. Es zeigte sich, dass Menschen hauptsächlich dann lächeln, wenn sie mit anderen Personen interagieren (Abb. 7.10). Ein Bowling-Spieler lächelt z. B. vor allem dann, wenn er sich zu seinen Mitspielern umdreht, und nicht vorher, wenn er mit dem Rücken zu ihnen steht. Das Ereignis selbst (z. B. ein geglückter oder missglückter Kegelwurf) scheint dabei nur eine geringe Rolle zu spielen. Lächeln ist somit nicht zwangsläufig ein Ausdruck einer inneren Befindlichkeit; vielmehr dient es auch sozialen Zwecken der Begrüßung, der Beschwichtigung und einer Auflockerung von Beziehungen (Fridlund 1994).

Die Darstellung und Decodierung von emotionalen Ausdrucksweisen wird dabei stark von den sozialen Gepflogenheiten und Werten einer Kultur beeinflusst (Matsumoto 2006). Schon im frühen Kindesalter wird uns beigebracht, welche Emotion für eine Situation angebracht ist und wie eine Emotion passend ausgedrückt wird (Malatesta und Haviland 1982). So wird von uns erwartet, Freude über ein Geschenk zu zeigen, selbst wenn das Geschenk eine Enttäuschung ist. Ein enttäuschtes Gesicht könnte in diesem Kontext als ein Affront aufgefasst werden. Andere „Darstellungsregeln" (*display rules*) legen wiederum Verbote

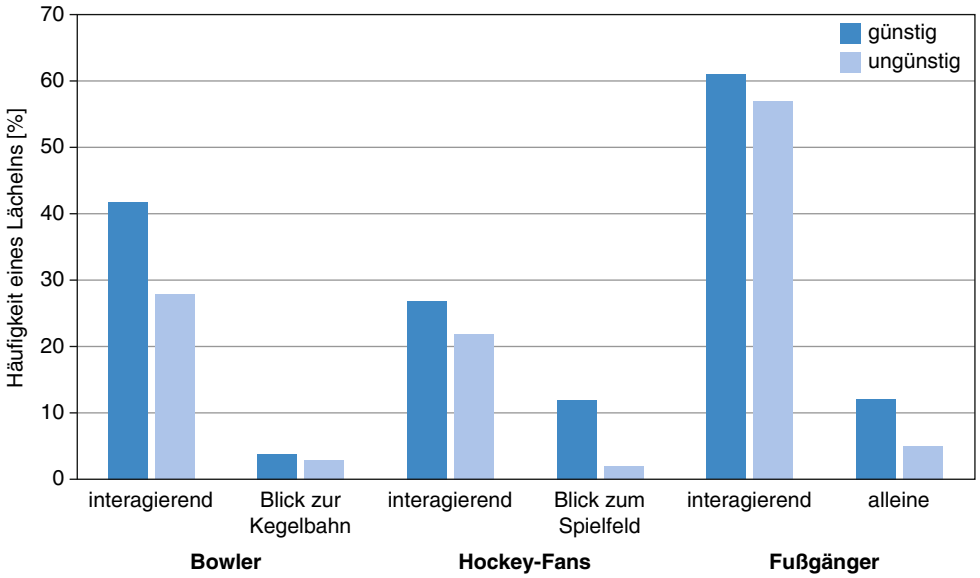


Abb. 7.10 Lächeln von Bowlern, Hockey-Fans und Fußgängern bei günstigen und ungünstigen Ereignissen in verschiedenen sozialen Situationen. (Nach Kraut und Johnson 1979)

für bestimmte Ausdrucksmuster fest. In einer klassischen Studie wurde z. B. japanischen und amerikanischen Studenten ein ekelerregender Film gezeigt. In einer Bedingung sahen die Studenten den Film alleine; hier zeigten alle Studenten ein Ekelgesicht. In einer anderen Versuchsbedingung war der Versuchsleiter im Raum mit anwesend. Während die amerikanischen Studenten unverändert Ekel ausdrückten, zeigten die japanischen Studenten in dieser Situation ein höfliches Lächeln (Friesen 1973). In Japan wird die soziale Hierarchie viel stärker betont als in den USA, und der Ausdruck einer negativen Emotion gegenüber einer höhergestellten Person gilt dort als unhöflich. Amerikanische Studenten kennen diese Verhaltensregel jedoch nicht, weshalb sie sich auch nicht bemühen, ihren Ekel vor dem Versuchsleiter zu verbergen. In Hinblick auf kulturell tradierte Darstellungsregeln ist es deshalb auch nicht weiter überraschend, dass Menschen die emotionalen Gesichtsausdrücke von Angehörigen ihrer eigenen Kultur generell besser identifizieren und „lesen" können als die von Angehörigen fremder Kulturen (Elfenbein und Ambady 2002).

Nach Fischer und Manstead (2008) haben Emotionen in sozialen Beziehungen zwei Hauptfunktionen:

- Sie helfen, Kontakt mit anderen Personen aufzunehmen und bestehende Beziehungen zu vertiefen.
- Sie können dazu beitragen, eine soziale Position relativ zu anderen einzunehmen und abzusichern.

Eine beziehungsstiftende und vertrauensbildende Funktion von Emotionen zeigt sich am deutlichsten bei positiven Emotionen, die wir als Liebe, Freundschaft oder Vertrautheit beschreiben. In engen Beziehungen werden generell mehr Emotionen ausgetauscht, und in glücklichen Partnerschaften werden mehr positive Emotionen geteilt als in unglücklichen Ehen (Carstensen et al. 1995). Es können aber auch negative Emotionen den Zusammenhalt zwischen Personen stärken. Anzeichen von Scham, Schuld oder Bedauern signalisieren z. B., dass eine Person einsichtig ist bezüglich einer Regelüberschreitung oder einer begangenen Dummheit. Menschen, die solche Emotionen zeigen, wird mehr Hilfsbereitschaft, Sympathie und Vertrauen entgegengebracht als Personen, die keine entsprechende emotionale Reaktion zeigen. Eifersucht entsteht wiederum durch die Wahrnehmung einer bedrohten Beziehung und kommuniziert sowohl die Wertschätzung einer Beziehung als auch eine Bereitschaft, um ihren Erhalt zu kämpfen. Verachtung, Hass und moralischer Ekel vor einer fremden Gruppe stärken den Zusammenhalt zwischen Gruppenmitgliedern, indem sie eine gleichgeschaltete Wahrnehmung und ein Gefühl der Überlegenheit erzeugen. Diese gruppenbasierten Emotionen helfen bei der Verteidigung von Normen und Werten, die von einer Gruppe als zentral angesehen werden. Sie können aber auch zu einer Ausgrenzung und Verfolgung von Andersdenkenden anstiften, wie Kennern der neueren deutschen Geschichte hinreichend bekannt sein dürfte.

Eine Orientierung auf soziale Abgrenzung und Machtausübung zeigt sich, wenn Personen sich über das Verhalten von anderen Personen ärgern, um ihre Rechte und ihren Status fürchten oder eine Person mit Verachtung strafen. Ärger kommt in zwischenmenschlichen Beziehungen häufig dann zum Ausdruck, wenn es darum geht, Einfluss über eine Person zu gewinnen und das Verhalten dieser Person zu kontrollieren. Zum Beispiel wird eine Person dazu gedrängt, sich zu entschuldigen, ein bestimmtes Verhalten aufzugeben oder eine Kompensation für ein wahrgenommenes Unrecht zu leisten. Ärger ist hier ein Instrument, das genutzt wird, um Macht über eine andere Person auszuüben bzw. wiederzugewinnen. Dazu passt, dass statushohe Personen sich über eine negative Rückmeldung tendenziell mehr ärgern, während Personen mit niedrigem Status eher mit Traurigkeit und Schuldgefühlen reagieren (Niemann et al. 2014). Umgekehrt wird zornigen Personen ein höherer Status zugewiesen als traurigen Personen (Tiedens 2001). Ein Grund für diese unterschiedlichen Wahrnehmungen könnte in der Beurteilung der Kontrolle liegen, die zornigen und traurigen Personen zugeschrieben wird. Ärger impliziert eine hohe Kontrollierbarkeit der Situation, da andere Personen für eine ungünstige Situation verantwortlich gemacht werden können. Bei Traurigkeit oder Schuld wird die Verantwortlichkeit hingegen in der Person selbst gesehen, sodass der Eindruck entsteht, dass die ungünstige Situation für diese Person

unkontrollierbar ist (Lerner und Tiedens 2006). Die sozialen Effekte des emotionalen Ausdrucksverhaltens hängen somit von den Kognitionen ab, mit denen sich ein Interaktionspartner die emotionale Reaktion der Person erklärt (de Melo et al. 2014).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Emotionen *intra-* und *interpersonale* Funktionen haben: Emotionen informieren die Person über Ereignisse in der Umwelt, die für sie persönlich bedeutsam sind und Aufmerksamkeit benötigen. Sie motivieren Verhalten zur Bewältigung dieser Ereignisse, und sie regulieren soziale Interaktionen, indem sie Verhaltensaufforderungen kommunizieren und die soziale Nähe zwischen Personen beeinflussen. Emotionen sind somit funktional, ohne dass ihre Effekte in jeder Situation vorteilhaft wären. Furcht schützt uns beispielsweise vor Verletzungen, sie hält uns aber auch vom Zahnarztbesuch ab. Ärger belastet soziale Beziehungen, er bewahrt uns aber auch vor Ausbeutung durch andere. Der Übergang von einer funktionalen zu einer dysfunktionalen emotionalen Reaktion ist somit fließend und von den Anforderungen der jeweiligen Situation abhängig.

7.7 Biologische Grundlagen von Emotionen

Die physiologischen Grundlagen der Emotionen, also die Rolle von Prozessen im Körper und Gehirn, waren schon immer von großem Interesse für die Emotionspsychologie. Während der letzten 20 Jahre wurden allerdings aufgrund von technologischen Entwicklungen in der funktionellen Bildgebung noch einmal enorme Fortschritte in unserem Verständnis der biologischen Grundlagen von Emotionen gemacht (Dalgleish et al. 2009).

7.7.1 Das emotionale Gehirn: Neuronale Grundlagen von Emotionen

▪ Historische Vorläufer

Im Kontext seiner Kritik an der *James-Lange-Theorie* entwickelte Walter Cannon (1927) zusammen mit seinem Schüler Philip Bard ein erstes neuroanatomisches Modell von emotionalen Reaktionen (▶ Abschn. 7.8.1). Laut Cannon sind insbesondere zwei Hirnregionen bedeutsam für die Auslösung von emotionalen Reaktionen: der Thalamus und der Hypothalamus. Weiterhin nahm Cannon an, dass deren Aktivität kontinuierlich von höheren neocorticalen Regionen reguliert und inhibiert wird. Experimentelle Tierstudien, in denen eine elektrische Stimulation des Hypothalamus emotionale Reaktionen (Ärger, Furcht) auslöst, sowie Studien, in denen eine operative Entfernung des Neocortex aggressive Ausbrüche gegenüber harmlosen Dingen begünstigt (*sham rage*; Bard 1928), unterstützten dieses Modell.

Auf diesen Überlegungen aufbauend entwickelte James Papez (1937) ein neuronales Schaltkreismodell der Emotion. In diesem Modell wird sensorische Information im Thalamus in zwei neuronale Bahnen aufgeteilt: einen „Gedankenpfad", der zum sensorischen Cortex führt und für Wahrnehmung, Kognition und Gedächtnisprozesse zuständig ist, und einen „Gefühlspfad", der direkt zum Hypothalamus führt. Emotionen resultieren aus der Integration der Information aus beiden Pfaden im cingulären Cortex.

Ein weiteres wichtiges neuroanatomisches Modell wurde 1949 von Paul MacLean vorgestellt. Laut seiner Theorie eines „dreieinigen Gehirns" besteht das menschliche Gehirn aus drei interagierenden Systemen:

1. dem evolutionär alten *Reptiliengehirn* (den Basalganglien) als Sitz primitiver Triebe und Emotionen wie Aggression und Furcht,
2. dem *limbischen System* (bestehend aus Amygdala, präfrontalem Cortex, Hypothalamus, Thalamus, Hippocampus und cingulärem Cortex) als Sitz komplexer Emotionen,
3. dem *neomammalischen Gehirn* (Neocortex), das emotionale Reaktionen über Kognitionen beeinflusst und kontrolliert.

Emotionen entstehen durch die Integration von sensorischer Information bezüglich der Außenwelt mit Information über den Körper im limbischen System.

▪ Aktuelle Forschung

Viele der Strukturen, die MacLean (1949) als Teil des limbischen Systems identifizierte, sind auch heute noch im Fokus des Forschungsinteresses. Im Folgenden werden die wichtigsten Forschungsergebnisse bezüglich der Funktionen von einigen Kernstrukturen des emotionalen Gehirns zusammengefasst (◘ Abb. 7.11).

Die Amygdala Die Amygdala wird übereinstimmend als eine der zentralen Regionen für emotionale Verarbeitungsprozesse angesehen. Die mandelförmige Struktur sitzt im medialen Temporallappen direkt vor dem Hippocampus. Aufgrund ihrer starken Vernetzung mit anderen corticalen und subcorticalen Regionen ist sie optimal positioniert, um sensorische Informationen zu empfangen und emotionale Reaktionen in Gehirn und Körper zu orchestrieren. Die Amygdala spielt eine Schlüsselrolle in mehreren emotionalen Prozessen: die Decodierung von emotional relevanter Information, assoziative emotionale Lernprozesse und die Konsolidierung von emotionalen Gedächtnisinhalten. So kann die Amygdala beispielsweise emotional bedeutsame Informationen schnell decodieren und dafür sorgen, dass diese Informationen prioritär verarbeitet werden (Vuilleumier und Brosch 2009). Studien mit bildgebenden Verfahren berichten eine erhöhte Aktivierung der Amygdala bei der Verarbeitung von emotionalen Reizen in allen sensorischen Modalitäten (Costafreda et al. 2008). Die Amygdala wird selbst dann aktiv, wenn die Stimuli unterhalb der bewussten Wahrnehmungsschwelle präsentiert werden (Morris et al. 1998). Der größte Anteil der Forschungsliteratur befasst sich zwar mit der Rolle der Amygdala bei der Verarbeitung von (bedrohlichen) negativen Stimuli; allerdings spielt diese Struktur eine ebenso wichtige Rolle bei der Verarbeitung von positiven Reizen und Belohnungen (Murray 2007).

Die Amygdala ist zudem eine Schlüsselstruktur beim emotionalen Lernen. Bei der Furchtkonditionierung wird eine Assoziation zwischen einem ursprünglich neutralen Stimulus und einem aversiven Stimulus (z. B. einem elektrischer Schock) gelernt (ausführliche Darstellung in ▶ Zur Vertiefung 7.3). Schon nach

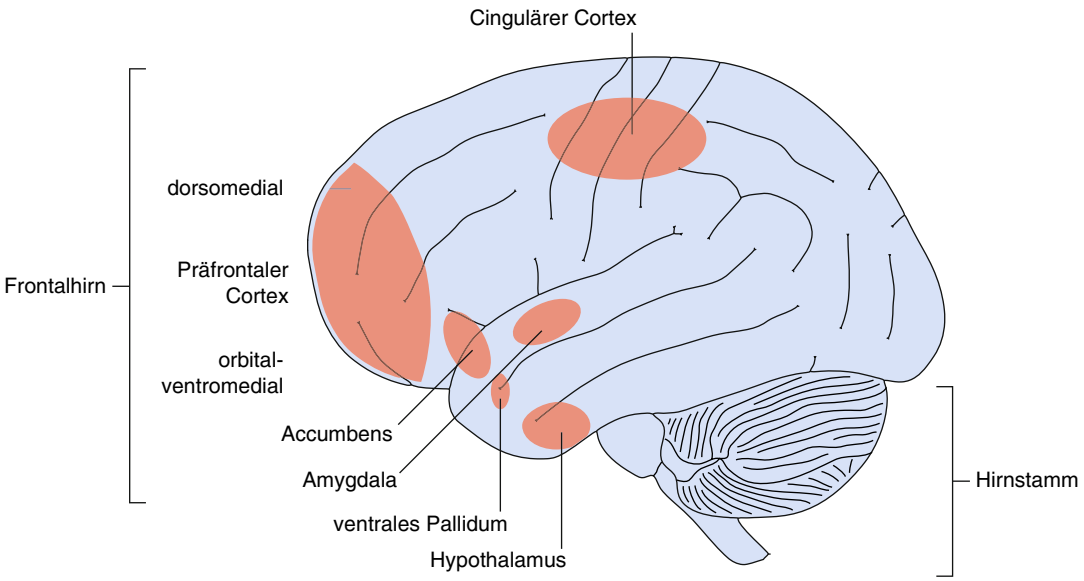


Abb. 7.11 Kernstrukturen des „emotionalen Gehirns". Aufgrund der lateralen Ansicht ist immer nur ein Teil von bilateral angelegten Gehirnstrukturen sichtbar. (Modifiziert nach Dalgleish 2004)

wenigen Lerndurchgängen beginnt der ursprünglich neutrale Stimulus, eine Furchtreaktion auszulösen, die z. B. durch erhöhte Hautleitfähigkeit festgestellt werden kann. Patienten mit Läsionen der Amygdala haben Schwierigkeiten, solche Assoziationen zu lernen. Insbesondere die ausführlichen Forschungsarbeiten von Joe LeDoux (1996) haben viel zu unserem Verständnis der Rolle der Amygdala bei diesen Lernprozessen beigetragen. LeDoux zeigte, dass die Synapsen, die eine Furchtkonditionierung repräsentieren, in der Amygdala gebildet werden, wobei die Lernprozesse über zwei verschiedene Bahnen verlaufen können: (1) eine direkte Verbindung von Thalamus zur Amygdala (*low road*), die grob aufgelöste sensorische Information direkt zur Amygdala für die schnelle Auslösung einer Furchtreaktion weiterleitet, (2) eine längere, zweite Verbindung (*high road*), die vom Thalamus über den sensorischen Cortex zur Amygdala führt. Diese Verbindung ist zwar langsamer, aber dafür ermöglicht sie eine gründlichere Reizverarbeitung (Abb. 7.12). Durch die zahlreichen neuronalen Verbindungen mit dem Hippocampus, einer zentralen Struktur für Gedächtnisprozesse, spielt die Amygdala zudem eine wichtige Rolle bei der Konsolidierung von emotionalen Inhalten im Langzeitgedächtnis, die das Gedächtnis an emotionale Ereignisse verbessert (▶ Abschn. 7.6.1).

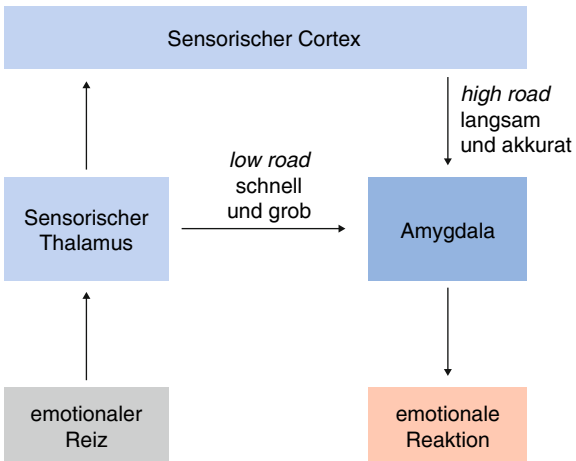


Abb. 7.12 Das Modell einer Furchtkonditionierung über zwei Wege. (Nach LeDoux 1996)

Der präfrontale Cortex Im Jahre 1848 hantierte der Eisenbahnarbeiter Phineas Gage als Vorarbeiter an einer Eisenbahnbaustelle mit einer Eisenstange an einem mit Schießpulver gefüllten Bohrloch. Ein unabsichtlicher Schlag auf einen Stein entzündete das Schießpulver, und die Explosion trieb die Eisenstange direkt durch seinen Kopf: Sie trat unter seiner linken Augenbraue in den Schädel ein, verließ den Kopf durch die Schädelspitze und landete 20 m weit entfernt auf dem Boden (Abb. 7.13). Wie durch ein Wunder erholte sich Gage von dem Unfall, aber er war, wie es sein Arzt John Harlow (1869/1993) beschrieb, „nicht mehr Gage". Phineas Gage, bis zu seinem Unfall ein liebenswürdiger Mensch und effizienter Vorarbeiter, wurde respektlos, ungeduldig, schnell verärgert und unzuverlässig. Die Balance „zwischen seinen intellektuellen Fähigkeiten und seinen tierischen Neigungen" schien zerstört zu sein (Macmillan 2002).

Die radikale Veränderung von Phineas Gage nach seinem Unfall sind eine der ersten Beschreibungen der Auswirkungen von Läsionen des präfrontalen Cortex (PFC) auf das emotionale Erleben. Auch wenn bis heute noch keine integrierte Theorie über die Funktion des PFC vorliegt, existiert dennoch eine Menge Literatur über die Kernfunktionen der verschiedenen Subregionen dieser Hirnregion. So spielt besonders der orbitofrontale Cortex (OFC), eine Region direkt über den Augen, eine wichtige Rolle beim Lernen des emotionellen und motivationellen Werts eines Stimulus (Rolls 2005). Im Zusammenspiel mit der Amygdala lernt und repräsentiert der OFC Assoziationen zwischen sekundären und primären Verstärkern und kann dabei sehr flexibel auf Veränderungen der Belohnungszusammenhänge reagieren. Laut der *Theorie der somatischen Marker* von Antonio Damasio (1998) integriert der OFC körperliche Signale von emotionalen Handlungskonsequenzen und benutzt diese Information während der Entscheidungsfindung (▶ Zur Vertiefung 7.1).

Der anteriore cinguläre Cortex Der anteriore cinguläre Cortex (ACC) gilt als wichtiges Integrationszentrum von visceralen,

Abb. 7.13 Historische Fotografie von Phineas Gage mit „seiner" Eisenstange. (Aus der Sammlung von Jack und Beverly Wilgus, ▶ http://commons.wikimedia.org)

emotionalen und kognitiven Informationen und ist im Verbund mit dem dorsolateralen PFC eine wichtige Schaltstelle für die Emotionsregulation und für andere Formen einer Top-down-Regulation. Der ACC ist Teil eines Schaltkreises, der Konflikte zwischen aktuellen und intendierten Zuständen registriert und im Falle eines Konflikts entsprechende Korrekturen einleitet (*conflict-control loop*; Botvinick 2007). Zudem ist der ACC in der Schmerzwahrnehmung involviert, einschließlich „sozialer Schmerzen" wie des empathischen Mitleidens mit anderen (Singer et al. 2004) und der schmerzvollen Erfahrung sozialer Isolation (Eisenberger et al. 2003).

Die Insula Die Insula spielt eine zentrale Rolle bei der Repräsentation körperlicher Zustände im Gehirn (Craig 2011). So weisen Studien mit bildgebenden Verfahren eine erhöhte Aktivierung der Insula bei Aufgaben zur Körperwahrnehmung nach, in denen Personen z. B. darauf achten müssen, ob ein rhythmischer Ton gleichzeitig oder zeitlich versetzt mit ihrem Herzschlag präsentiert wird (Critchley et al. 2004). Angesichts der Bedeutung von körperlichen Empfindungen für das Emotionserleben ist es nicht weiter erstaunlich, dass die Insula an vielen emotionalen Vorgängen (Emotionserkennung, Empathie, Risikoentscheidungen, Furchtkonditionierung etc.) beteiligt ist.

7.7.2 Emotion und Körper: Emotionale Reaktionen im vegetativen Nervensystem

Historische Modelle

Im Alltag beschreiben wir Emotionen häufig mit Verweisen auf unseren Körper: Die Knie „schlottern vor Angst", oder man liebt jemanden „mit ganzem Herzen". In Anlehnung daran schreiben auch Emotionstheoretiker körperlichen Veränderungen eine zentrale Rolle bei der Entstehung von Emotionen zu. So meinte William James (1884. S. 189 f.): „My thesis […] is that the bodily changes follow directly the PERCEPTION of the exciting fact, and that our feeling of the same changes as they occur IS the emotion" (Hervorhebung im Originaltext; ausführliche Darstellung der James-Lange-Theorie in ▶ Abschn. 7.8.1). Cannon (1927) konterte mit der Kritik, dass körperliche Reafferenzen weder schnell genug seien noch fein genug zwischen körperlichen Zuständen differenzieren könnten, um die Grundlage für das emotionale Erleben zu bilden. Als Alternative schlug er vor, dass Emotionen im Gehirn entstehen und körperliche Veränderungen nur die Intensität – aber nicht die Qualität – des emotionalen Erlebens beeinflussen (Cannon-Bard-Theorie; ▶ Abschn. 7.8.1). Schachter und Singer (1962) schlugen schließlich vor, dass Emotionen aus einer kognitiven Zuschreibung von körperlichen Zuständen auf eine emotionale Ursache hervorgehen. Folglich kann selbst ein

Zur Vertiefung 7.1

Die Theorie der somatischen Marker

Gemäß der Theorie der somatischen Marker von Antonio Damasio (1998) werden Assoziationen zwischen Verhaltensentscheidungen und ihren emotional-somatischen Folgen (z. B. feuchte Hände, rasender Puls) in Entscheidungssituationen automatisch gebildet. Steht ein Verhalten später erneut zur Auswahl, wird die assoziierte emotionale Konsequenz automatisch reaktiviert, und die Verhaltensoption wird auf diese Weise emotional „markiert". Für eine Überprüfung dieser Annahmen ließen Damasio und seine Kollegen gesunde Personen und Patienten mit Läsionen im OFC ein Kartenspiel spielen, bei dem man im Laufe des Spieles die Strategie lernen muss, auf schnelle, hohe Gewinne zu verzichten und eher auf längerfristige, kleinere Gewinne zu setzen (Bechara et al. 1994). Karten von zwei „guten" Stapeln erbrachten mit niedrigen Gewinnen und noch niedrigeren Verlusten insgesamt einen Nettogewinn; die beiden übrigen „schlechten" Stapel erbrachten mit hohen Gewinnen und noch höheren Verlusten insgesamt einen Nettoverlust. Gesunde Versuchsteilnehmer lernten relativ schnell, Karten von den guten Stapeln zu ziehen. Weiterhin war bei diesen Personen eine physiologisch-emotionale Reaktion in Form einer erhöhten Hautleitfähigkeit messbar, bevor sie eine Karte von den schlechten Stapeln zogen. Im Gegensatz dazu blieben die Patienten mit Läsionen des OFC bei den schlechten Stapeln, und sie zeigten auch keine erhöhten Hautleitreaktionen vor dem Ziehen einer Karte. Laut Damasio nutzen gesunde Personen ihre körperlich-emotionale Erregung als Entscheidungshilfe, d. h., sie entscheiden danach, welche Entscheidung sich gut oder schlecht anfühlt. Dieses intuitive „Bauchgefühl" fehlte den Patienten mit Läsionen des OFC, weshalb ihr Entscheidungsverhalten beeinträchtigt war. Die Theorie der somatischen Marker ist nicht unumstritten (Dunn et al. 2006); nichtsdestotrotz ist sie bis heute eine der bedeutendsten Theorien über den Einfluss von Emotionen auf das Entscheidungsverhalten.

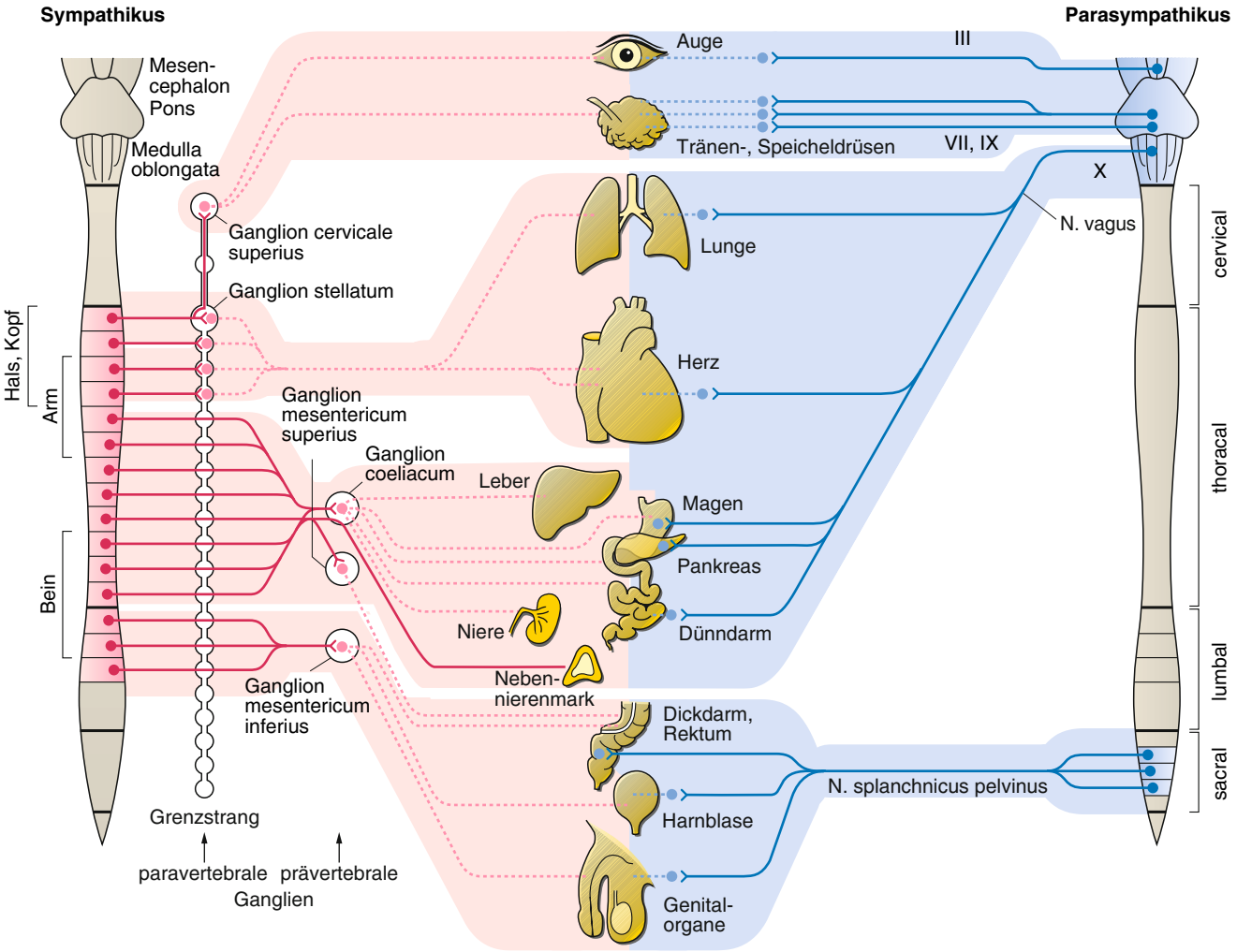


Abb. 7.14 Sympathisches (rot) und parasympathisches (blau) Nervensystem. (► http://commons.wikimedia.org)

unspezifische körperlicher Erregungszustand emotional wahrgenommen werden, wenn dieser in einem entsprechenden Kontext auftritt (Zwei-Faktoren-Theorie; ► Abschn. 7.8.1).

Aktuelle Forschung

Als Konsequenz dieser theoretischen Debatten beschäftigte sich ein Großteil der einschlägigen Forschungsliteratur mit der Frage, ob körperliche Veränderungen tatsächlich – wie von James (1884) behauptet – die Grundlage für das emotionale Erleben bilden (Friedman 2010). Der Großteil der Arbeiten untersuchte die Auswirkungen von Emotionen auf das vegetative Nervensystem, eine Reihe von Nervensträngen, welche die Organfunktionen im menschlichen Körper regulieren. Das vegetative Nervensystem innerviert die inneren Organe, Blutgefäße, Drüsen und andere Gewebe. Es besteht aus einem sympathischen und einem parasympathischen Zweig, die beide die Organe innervieren und eine antagonistische Wirkung auf Organtätigkeiten ausüben (Abb. 7.14). Vereinfacht beschrieben bereitet der sympathische Teil den Körper durch Ressourcenmobilisierung auf Aktivitäten vor (z. B. durch Beschleunigung der Herzrate und der Atemfrequenz), während der parasympathische Zweig Energie konserviert und Ruhe, Erholung und Schonung fördert. Die wichtigsten Organsysteme, die durch das vegetative Nervensystem innerviert werden, sind das Herz-Kreislauf-System, die Atemwege und das elektrodermale System.

Die Psychophysiologie benutzt eine Reihe von Messverfahren, um emotionale Veränderungen in kardiovaskulären (z. B. Herzrate, Herzratenvariabilität, Blutdruck, Hauttemperatur), respiratorischen (z. B. Atemfrequenz, Atemvolumen, CO_2-Konzentration in der Atemluft) und elektrodermalen Systemen (z. B. Hautleitfähigkeit) zu messen (Übersicht in Stemmler 2003). In einer Pionierstudie wurden physiologische Aktivitäten gemessen, während die Versuchsteilnehmer Experimentalabschnitte durchliefen, in denen abwechselnd Ärger, Furcht, Trauer, Freude, Überraschung und Ekel induziert wurden (Ekman et al. 1983). In dieser Studie zeigte sich, dass einzelne Emotionen sowie allgemein positive und negative Emotionen auf der Grundlage von physiologischen Aktivitäten unterschieden werden können. Dieses Ergebnis wurde als Beleg dafür angesehen, dass Basisemotionen distinkte Profile in physiologischen Aktivitäten haben. Die Studie regte zahlreiche Folgearbeiten an, die allerdings nicht immer die Spezifizität der Reaktionsmuster der Basisemotionen replizieren konnten. So kommen Cacioppo et al. (2000, S. 184) nach 20 Jahren For-

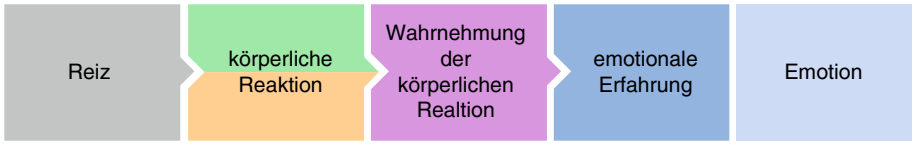


Abb. 7.15 Die James-Lange-Theorie der Emotionsentstehung (Erläuterung der Farbcodierung in . Abb. 7.2)

schung in einer Metaanalyse von 22 Studien zu dem Schluss, „that even a limited set of discrete emotions such as happy, sad, fear, anger, and disgust cannot be fully differentiated by visceral activity alone."

Eine neue Metaanalyse von 134 Studien kommt zu dem Schluss, dass spezifische Reaktionsprofile zwar nicht für Basisemotionen nachweisbar sind, aber für bestimmte Untertypen von emotionalen Zuständen existieren (Kreibig 2010). So nimmt bei *Furcht* vor einer immanenten Bedrohung, ausgelöst durch einen Horrorfilm oder beim Anblick einer Bedrohung (Waffe, Schlange etc.), die Herzrate ab, während sie bei *erwartungsbasierten Ängsten*, z. B. induziert durch die Androhung eines elektrischen Schocks, zunimmt. Für *Ekel* wurden wiederum stark unterschiedliche Aktivitätsmuster beobachtet, je nachdem ob die Person sich vor einer Verschmutzung (verdreckter Toilette, Ungeziefer etc.) oder vor einer Verletzung (Verstümmelungen, Operationen etc.) ekelte. *Aktivierende Traurigkeit*, oft von Weinen begleitet, erzeugt eine markante Aktivitätssteigerung in respiratorischen und kardiovaskulären Systemen, wohingegen *deaktivierende Traurigkeit*, die mit einem Rückzugsverhalten verbunden ist, diese reduziert. *Freude* aktiviert elektrodermale und respiratorische Systeme, während *Erleichterung* Aktivitäten in diesen Systemen eher inhibiert.

Zusammenfassend kann man also feststellen, dass zwar ein gewisser Grad von Reaktionsspezifizität vorliegt, insbesondere wenn man über die Kategoriengrenzen von Basisemotionen hinausgeht, die physiologische Spezifizität aber nicht hinreichend genug ist, um das emotionale Erleben auf der Grundlage dieser körperlichen Veränderungen vorhersagen zu können. Vielmehr scheint es der Fall zu sein, dass das Körpermilieu an globale Verhaltensorientierungen einer *Aktivität/Passivität* oder einer *Annäherung/Vermeidung* angepasst wird. Auf funktioneller Ebene könnte dies den unterschiedlichen Anforderungen bezüglich einer Ressourcenmobilisierung in verschiedenen emotionalen Kontexten entsprechen: Zum Beispiel werden für einen wütenden Protest entsprechende Energien benötigt, während sie für eine „stille" Anklage in Form eines beleidigten Rückzugs nicht gebraucht werden (Stemmler et al. 2007). Die physiologische Reaktion hängt somit von der Beschaffenheit der emotionalen Situation ab, die eine Person zu bewältigen versucht.

7.8 Emotionstheorien

Emotionstheorien suchen nach den Entstehungsbedingungen und Prozessen, die eine Emotion verursachen. In der Emotionspsychologie haben sich drei grundlegende Erklärungsansätze herausgebildet:

1. *Evolutionsbiologische Ansätze* vermuten einen biologischen Ursprung in funktional spezialisierten Emotionsmodulen.
2. *Kognitive Ansätze* behaupten, dass Emotionen von kognitiven Einschätzungen der Umwelt in Bezug auf das eigene Wohlergehen und Wohlbefinden verursacht werden.
3. *Konstruktivistische Ansätze* nehmen an, dass Emotionen aus kulturell vereinbarten Kategorisierungen von unspezifischen affektiven Zuständen hervorgehen.

Jeder Ansatz repräsentiert eine eigene Theoriefamilie, deren Annahmen und historische Vorläufer im Folgenden vorgestellt werden.

7.8.1 Ältere Emotionstheorien

James-Lange-Theorie

Die James-Lange-Theorie der Emotionsentstehung beruht auf zwei Annahmen:

1. Ein emotionales Ereignis löst körperliche Veränderungen aus (z. B. beschleunigter Herzschlag, Schwitzen).
2. Diese körperlichen Veränderungen werden von der Person als eine Emotion wahrgenommen.

Somit werden hier Emotionen (Gefühle) mit Empfindungen von spezifischen körperlichen Reaktionen gleichgesetzt (Abb. 7.15). Wir weinen nicht, weil wir traurig sind, sondern wir sind traurig, weil wir weinen. Die Theorie wurde nahezu zeitgleich von dem amerikanischen Psychologen William James (1884) und von dem dänischen Physiologen Carl Georg Lange (1887/2012) formuliert, weshalb sie als *James-Lange-Theorie der Emotion* bekannt wurde. Sie wurde bereits kurz nach ihrer Veröffentlichung heftig kritisiert (Cannon 1927; Ellsworth 1994). Neben anderen Kritikpunkten, die sich später als haltlos herausgestellt haben, wurde vor allem die Existenz von emotionsspezifischen körperlichen Reaktionen angezweifelt. Dieser Einwand konnte bis heute nicht restlos ausgeräumt werden (▶ Abschn. 7.7.2).

Empirisch gestützt wird die James-Lange-Theorie allerdings von Überprüfungen der Theorie der somatischen Marker (▶ Zur Vertiefung 7.1) und der Facial-Feedback-Hypothese (▶ Zur Vertiefung 7.2), die einen Einfluss von körperlichen Empfindungen auf das emotionale Erleben belegen.

Cannon-Bard-Theorie

Walter Cannon, amerikanischer Physiologe und früher Kritiker der James-Lange-Theorie, entwickelte zusammen mit seinem Schüler Philip Bard eine alternative Theorie, die ausschließlich zentrale Verarbeitungsprozesse im Gehirn für eine Emotionsentstehung verantwortlich macht (Bard 1934; Cannon 1927). Gemäß dieser Theorie werden sensorische Signale vom Thalamus gleichzeitig an den Cortex für eine emotionale Interpretation des Ereignisses und an den Hypothalamus für die Steuerung des vege-

Zur Vertiefung 7.2

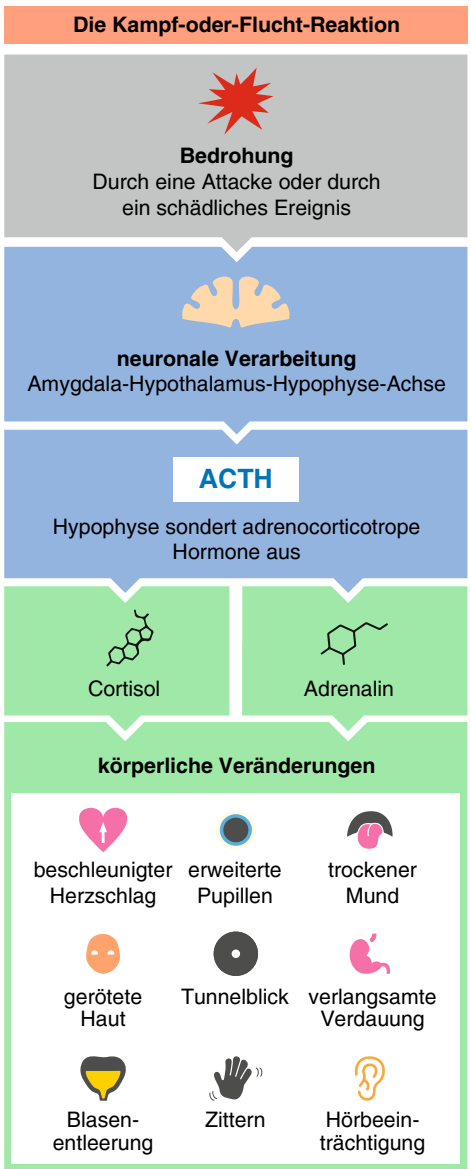
Die Facial-Feedback-Hypothese

Die Facial-Feedback-Hypothese behauptet, dass Emotionen von einem propriozeptiven Feedback der Gesichtsmuskulatur beeinflusst werden (schwache Version) oder durch dieses entstehen (starke Version). Ein Lächeln verbessert die Stimmung, ein Stirnrunzeln verschlechtert sie (Soussignan 2004). Als vermittelnde Prozesse wurden (1) eine Aktivierung von „Emotionsprogrammen" über faziale Konfigurationen (Tomkins 1962), (2) vaskuläre Veränderungen des cerebralen Blutflusses (Zajonc et al. 1989) und (3) kognitive Inferenzen der Person von ihrem Ausdruck auf ihr emotionales Befinden (Bem 1967) vorgeschlagen. Letztere Erklärung stimmt im Wesentlichen mit den Grundannahme der James-Lange-Theorie überein, dass eine Emotion auf der Wahrnehmung einer spezifischen körperlichen Reaktion (hier: einem mimischen Ausdruck) beruht (Laird und Lacasse 2014). Eine Erklärung mit methodischen Artefakten (z. B. Erwartungseffekten) konnte mit unaufdringlichen Manipulationen des Gesichtsausdrucks ausgeräumt werden. In einer klassischen Studie bewerteten Personen lustige Cartoons entweder mit dem Stift zwischen den Zähnen (Lächelstellung), mit dem Stift zwischen gespitzten Lippen (Unterdrückung von Lächeln) oder mit dem Stift in der Hand (Kontrollgruppe). Die Cartoons wurden lustiger mit dem Stift zwischen den Zähnen und weniger lustig mit dem Stift zwischen den Lippen relativ zur Kontrollgruppe eingeschätzt (Strack et al. 1988). Dieses Ergebnis bestätigt einen modulierenden Einfluss der Mimik auf das emotionale Erleben (schwache Version). Tests der starken Version produzierten jedoch inkonsistente Befunde (z. B. Tourangeau und Ellsworth 1979), und Feedback der Gesichtsmuskulatur ist nicht notwendig für emotionale Empfindungen (Keillor et al. 2002). Ein Lächeln allein sorgt somit nicht für gute Laune.

7

tativen Nervensystems weitergeleitet (▶ Abschn. 7.7.1). Infolge der unterschiedlichen Verarbeitungswege treten emotionale Gefühle und körperliche Veränderungen simultan auf, ohne dass eine Reaktion primär wäre oder die andere Reaktion beeinflussen könnte. Darüber hinaus unterscheiden sich die ausgelösten körperlichen Reaktionen nur in ihrer Intensität (Erregung), aber nicht in ihrer Qualität. Wir wissen heute, dass beide Annahmen falsch sind. Körperliche Zustände beeinflussen das emotionale Erleben einer Person (s. oben), und zumindest manche Emotionen haben spezifische vegetative Reaktionsprofile (▶ Abschn. 7.7.2). Diese Argumente und neue Erkenntnisse der neurowissenschaftlichen Forschung haben dazu geführt, dass die Theorie aufgegeben wurde.

Einen nachhaltigen Einfluss auf die Emotionspsychologie hat Cannons Erforschung einer *Kampf-oder-Flucht-Reaktion* (*fight-or-flight reaction*), die in Situationen einer akuten Bedrohung (z. B. bei einem Angriff) eintritt und den Köper in eine erhöhte Abwehr-und Fluchtbereitschaft versetzt. Ein Alarmsignal aus dem Gehirn setzt Stresshormone frei, die über das sympathische Nervensystem und den Blutstrom den Körper auf die Bedürfnisse einer schneller Notfallreaktion einstellen: Der Herzschlag und die Atemfrequenz erhöhen sich (mehr Energie), die Muskelspannung steigt an, und die Skelettmuskeln werden besser durchblutet (verbesserte Muskelleistung) usw. (◘ Abb. 7.16). Diese körperlichen Veränderungen erleichtern eine Flucht oder eine defensive Attacke, die Bestandteile eines evolutionär angelegten „Notfallprogramms" sind.



◘ **Abb. 7.16** Die Kampf-oder-Flucht-Reaktion auf akute Belastungen

▪ Zwei-Faktoren-Theorie

Nach der Zwei-Faktoren-Theorie von Stanley Schachter (1964) sind zwei Komponenten für die Entstehung einer Emotion notwendig:

1. Die Person bemerkt eine physiologische Erregung (physiologische Komponente).
2. Sie erklärt sich ihre Erregung mit einer emotionalen Ursache (kognitive Komponente).

Im Normalfall liefert die Ursache für die Erregung die passende Erklärung gleich mit: Ein knurrender Hund löst z. B. einen Zustand der physiologischen Erregung (schnelle Atmung, erhöhter

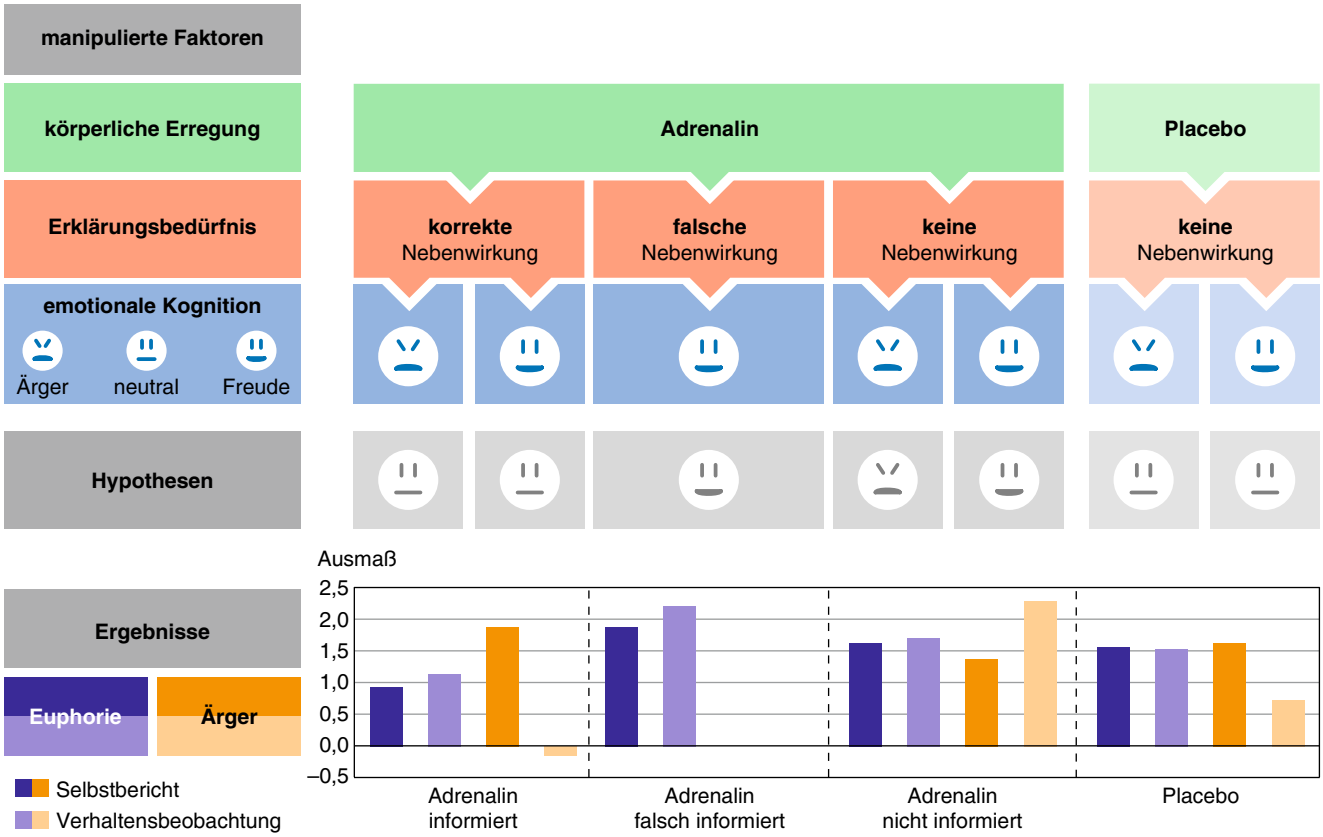


Abb. 7.17 Versuchsaufbau, Hypothesen und Ergebnisse von Schachter und Singer (1962)

Muskeltonus, etc.) aus, die sich die Person mit einer Angst vor dem Hund erklärt. In Sonderfällen kann ein Erregungszustand aber auch fälschlicherweise einer emotionalen Ursache zugeschrieben werden, wie Schachter und Singer (1962) in einem klassischen Experiment nachgewiesen haben (Abb. 7.17).

In diesem Experiment wurden drei Faktoren manipuliert:

1. Zustand einer physiologischen Erregung,
2. Erklärungsbedürfnis für diesen Zustand,
3. Erklärung der Erregung mit einer emotionalen Kognition.

In der Studie sollte angeblich die Wirkung eines Vitaminpräparats („Suproxin") auf das Sehvermögen untersucht werden. Tatsächlich wurde jedoch einer Gruppe Adrenalin injiziert, das erregungsähnliche Symptome hervorruft (beschleunigter Herzschlag, Schwitzen, leichtes Zittern etc.), während einer anderen Gruppe ein Placebopräparat (Kochsalzlösung) verabreicht wurde. Das Erklärungsbedürfnis wurde mit einer Beschreibung von „Nebenwirkungen" von Suproxin manipuliert: Eine Gruppe erhielt eine Beschreibung, die der Wirkweise von Adrenalin entspricht (*informierte Gruppe*); eine andere Gruppe eine inkorrekte Beschreibung (z. B. taube Füße, Hautprickeln, leichter Kopfschmerz; *falsch informierte Gruppe*); einer dritten Gruppe (einschließlich der Placebogruppe) wurde gesagt, dass Suproxin keine Nebenwirkungen habe (*nicht informierte Gruppe*). Unmittelbar nach Verabreichung des Präparats wurden die Personen gebeten, einen Fragebogen zusammen mit einer anderen Versuchsperson auszufüllen. Die zweite Person war in Wirklichkeit ein Strohmann (ein Vertrauter des Versuchsleiters), dessen Verhalten die emotionale Kognition der Versuchsperson beeinflussen sollte. In der Freudebedingung veranstaltete der Strohmann allerlei Späße: Er warf Papierkugeln um sich, ließ einen Papierflieger durch den Raum segeln und spielte mit einem Hula-Hoop-Reifen. In der Ärgerbedingung empörte sich der Strohmann lautstark über das Setting und den Ablauf des Versuchs. Das Verhalten der Versuchsperson wurde währenddessen über einen Einwegspiegel beobachtet, und die Person wurde abschließend nach ihrem emotionalen Befinden befragt.

Ausgehend von der Zwei-Faktoren-Theorie wurde eine Angleichung der emotionalen Reaktion an die Emotion des Strohmanns erwartet, wenn (1) Adrenalin verabreicht und (2) die körperliche Erregung falsch bzw. nicht erklärt wurde (d. h., wenn ein erklärungsbedürftiger Erregungszustand vorliegt). Diese Vorhersagen wurden jedoch nur zum Teil bestätigt (s. Ergebnisse in Abb. 7.17). Die Gruppen, die keine (passende) Erklärung für ihre Erregung hatten, zeigten in Abhängigkeit von der Emotionsbedingung zwar mehr Freude bzw. Ärger als die Gruppe, die über ihren Erregungszustand korrekt aufgeklärt wurde. In Vergleichen mit der Placebogruppe zeigten sich jedoch nur geringe und statistisch unbedeutende Unterschiede, weshalb die Bedeutung der physiologischen Komponente für die Emotionsentstehung nicht zweifelsfrei belegt wurde.

Die Studie hat zahlreiche Nachfolgearbeiten mit zum Teil widersprüchlichen Ergebnissen angeregt (Reisenzein 1983). Eine Studie konnte mit fiktiven Rückmeldungen von Herzratenver-

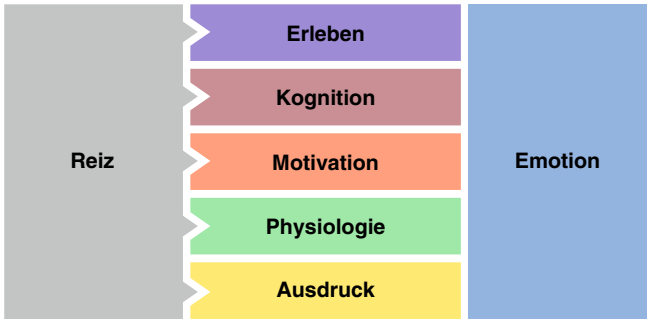


Abb. 7.18 Evolutionsbiologische Emotionstheorien (Erläuterung der Farbcodierung in . Abb. 7.2)

änderungen zeigen, dass der bloße Glaube der Person, erregt zu sein, schon ausreicht, um emotionale Einschätzungen zu verändern (Valins 1966). Eine medikamentöse Dämpfung von Erregungszuständen (z. B. mit Betablockern) beeinflusst zudem nur in Sonderfällen die emotionale Befindlichkeit einer Person in die erwartete Richtung (Erdmann und van Lindern 1980). Diese Beobachtungen stellen die Notwendigkeit einer physiologischen Erregung für das Emotionserleben infrage, woraufhin die Zwei-Faktoren-Theorie zunehmend von kognitiven Ansätzen verdrängt wurde.

7.8.2 Evolutionsbiologische Theorien

Evolutionsbiologische Theorien der Emotionsentstehung gehen auf niemand Geringeren als auf den Begründer der Evolutionstheorie selbst, Charles Darwin (1809–1882), zurück. In seinem Werk *The Expression of the Emotions in Man and Animals* (1872) formulierte Darwin erstmals die wegweisende Idee, dass Emotionen und ihr Ausdruck im Verhalten angeborene Merkmale darstellen, die durch natürliche Selektion (Auslese) entstanden sind. Häufig wiederkehrende, für das Überleben und den Reproduktionserfolg einer Spezies bedeutsame Ereignisse (physische Gefahren, sexuelle Untreue etc.) haben zu der Entwicklung (Evolution) von funktional spezialisierten Emotionssystemen (Furcht, Eifersucht etc.) geführt, die sich in der Bewältigung dieser Ereignisse bewährt haben (Cosmides und Tooby 2000). Diese evolutionspsychologische Annahme wurde in modernen Theorien aufgegriffen und in unterschiedlichen Versionen weiterentwickelt (z. B. Ekman 1992; Levenson 1999; Panksepp 1998; Plutchik 2001).

Evolutionsbiologische Emotionstheorien unterteilen das Spektrum von Emotionen in eine begrenzte Anzahl von Primär- oder Basisemotionen, aus deren Vermischung sich weitere, sekundäre Emotionen ergeben (▶ Abschn. 7.5.1). Jede Basisemotion wird als ein eigenständiges informationsverarbeitendes System oder *Emotionsmodul* gesehen, das auf eine spezifische Klasse von Umweltreizen selektiv anspricht (*Domänenspezifizität*), über ein eigenständiges biologisches System implementiert wird und weitgehend abgeschlossen von anderen Systemen operiert (*Enkapsulierung*). Öhman und Mineka (2001) verorten z. B. ein *Furchtmodul* in einem subcorticalen System, das von Bedrohungsreizen automatisch aktiviert wird und relativ abgeschottet von einem kognitiven Kontrollsystem (im Neocortex)

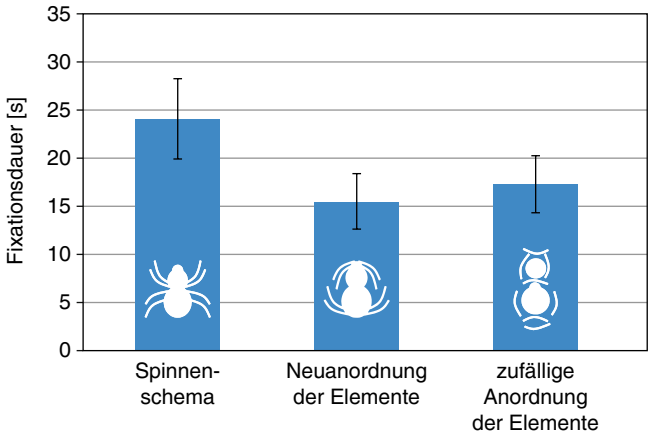


Abb. 7.19 Durchschnittliche Dauer der Betrachtung von schematischen Figuren von fünf Monate alten Babys in der Studie von Rakison und Derringer (2008)

arbeitet. Der evolutionsbiologische Entstehungshintergrund des Furchtmoduls erklärt kulturübergreifende Ängste vor Spinnen und Schlangen und ihre Hartnäckigkeit gegenüber kognitiven Umdeutungen („Spinnen sind doch harmlos").

Evolutionsbiologische Emotionstheorien sehen in einer Emotion einen evolutionär erprobten Reaktionskomplex, ohne dass eine bestimmte Reihenfolge oder Rangordnung der Reaktionen angenommen wird (Abb. 7.18). Als spezifische Strategien im Umgang mit bestimmten Herausforderungen wird jede Basisemotion von einem anderen Umweltthema ausgelöst: *Furcht* von Anzeichen einer Bedrohung, *Ekel* von krankheitserregenden Objekten und *Eifersucht* von Hinweisen auf Untreue (Beispielliste in Tab. 7.5). Eine besondere Annahme ist hier, dass eine Emotion keine spezielle kognitive Analyse der Situation voraussetzt, sondern direkt von der Wahrnehmung eines Situationsmerkmals ausgelöst werden kann (Zajonc 1980). Nicht die kognitive Einschätzung einer Spinne als „bedrohlich", sondern die Wahrnehmung einer „spinnentypischen" Anordnung von acht Gliedmaßen zu konzentrischen Kreisen erzeugt demnach eine Angst (Abb. 7.19). Dazu passend hat sich gezeigt, dass spinnenähnliche Reize bereits von fünf Monate alten Säuglingen, die keine oder nur sehr wenig Erfahrung mit Spinnen haben, bevorzugt beachtet werden (Rakison und Derringer 2008). Es scheint somit angeborene Wahrnehmungs- und Bewertungsschemata für emotionale Reize zu geben, die auf unsere Vorfahren vermutlich einen Selektionsdruck ausgeübt haben (Öhman 2009).

Mit einer Einschränkung auf einige wenige, biologisch relevante „Schlüsselreize" wäre der Geltungsbereich von evolutionsbiologischen Theorien jedoch sehr gering. Menschen fürchten sich schließlich nicht nur vor gefährlichen Tieren, dunklen Orten oder vor einem Fall aus der Höhe, sondern sie haben auch Angst vor modernen Erfindungen wie z. B. einem Zahnarztbohrer oder einem „Shitstorm" (wütende und beleidigende Kommentare) in einem Internetforum. Studien haben zudem gezeigt, dass moderne Drohreize (Waffen, Injektionsnadeln etc.) emotional ähnlich intensiv verarbeitet werden wie phylogenetisch alte Bedrohungen (Schlangen, Spinnen etc.) (Brosch und Sharma 2005). Eine Einschränkung auf einige wenige emotio-

Zur Vertiefung 7.3

Furchtkonditionierung – der Fall des kleinen Albert

In einer berühmten Fallstudie („Der kleine Albert") haben Watson und Rayner (1920) eine emotionale Reizkonditionierung nachgewiesen. Ausgangspunkt der Untersuchung war die Fragestellung, ob ursprünglich neutrale Reize zu konditionierten Auslösern von Furchtreaktionen werden, wenn sie mit einem angstauslösenden Ereignis wiederholt gepaart werden. Einziger Versuchsteilnehmer war der elf Monate alte Albert B., der einer Prozedur der Furchtkonditionierung unterzogen wurde, die moderne ethische Forschungsstandards klar verletzt. In einer ersten Phase wurde dem kleinen Albert eine weiße Ratte vorgesetzt, auf die er keinerlei Anzeichen von Furcht zeigte. Diese weiße Ratte diente als neutraler Reiz (CS). Albert zeigte jedoch eine ausgeprägte Angst (Aufschrecken, Weinen), wenn der Versuchsleiter mit einem Hammer auf eine Eisenstange schlug. Dieses laute Geräusch diente als unkonditionierter Reiz (UCS). In einer zweiten Phase wurde die Ratte mit dem lauten Geräusch gepaart: In dem Augenblick, in dem Albert sich der Ratte näherte, wurde die Eisenstange geschlagen. Diese Konditionierungsprozedur wurde mit einem Zeitabstand von bis zu einer Woche insgesamt siebenmal wiederholt. Danach wurde die Ratte alleine gezeigt. In dem Moment, in dem Albert die weiße Ratte sah, begann er zu weinen und versuchte, vor ihr zu fliehen. Die weiße Ratte wurde somit für Albert zu einem konditionierten Auslöser von Furcht.

In einer weiteren Phase, die fünf Tage nach der Konditionierung stattfand, prüften Watson und Rayner, ob die gelernte Furcht auch auf andere Objekte übertragen wird, die einer Ratte ähneln (Reizgeneralisierung). Albert zeigte starke Furcht vor einem Kaninchen, einem Hund und einem Seehundfell sowie geringe Furcht vor einer bärtigen Nikolausmaske und einem Flecken Baumwolle. Bauklötze und der Raum, in dem die Versuche stattfanden, lösten hingegen keine Furcht aus. Die zeitliche Stabilität von Alberts Furcht wurde 31 Tage nach der Konditionierungsphase geprüft. Wieder zeigte Albert – wenn auch mit etwas geringerer Intensität – Angst vor der Ratte und ihr ähnelnden Dingen. Die gelernte Furcht war somit zeitlich stabil. In einer letzten Phase sollte die gelernte Furchtreaktion beseitigt werden, indem (1) der CS (Ratte) wiederholt ohne UCS (lautes Geräusch) dargeboten wird (Löschung), (2) der CS mit einem positiven UCS (z. B. Süßigkeiten) gepaart wird (Gegenkonditionierung) und (3) Albert das Verhalten eines furchtlosen Modells beobachtet (Modelllernen). Diese Phase fand jedoch nicht mehr statt, da Alberts Mutter in eine andere Gegend zog. Die Effektivität dieser Methoden wurde jedoch in einer Untersuchung mit einem anderen Kind namens Peter (drei Jahre) nachgewiesen, der ähnlich wie Albert Angst vor Ratten zeigte (Jones 1924).

nale „Schlüsselreize" ist somit weder plausibel, noch wird sie empirisch gestützt.

Evolutionsbiologische Emotionstheorien werden deshalb in der Regel mit lernpsychologischen Annahmen kombiniert. Menschen haben demnach nicht nur angeborene Dispositionen für emotionale Verhaltensweisen in ausgewählten Situationen, sondern sie lernen im Laufe ihres Lebens hinzu, auf neue Situationen und Hinweise emotional zu reagieren. So können beispielsweise ursprünglich neutrale Situationen eine emotionale Reaktion auslösen (konditionierter Reiz, CS), wenn sie wiederholt mit einem Reiz (unkonditionierter Reiz, UCS) auftreten, der eine Emotion zuverlässig hervorruft (*emotionale Reizkonditionierung*; ▶ Zur Vertiefung 7.3). Emotionale Ausdrucksweisen können zudem indirekt über die Beobachtung der emotionalen Reaktionen von anderen Personen gelernt werden (*Beobachtungslernen*). Kinder fürchten sich z. B. vor einer Spielzeugschlange, wenn ihre Mutter vor dieser Furcht zeigt (Gerull und Rapee 2002). Ganz ähnlich fürchten in Gefangenschaft aufgezogene Affen eine Spielzeugschlange, wenn sie zuvor in einem Video gesehen haben, dass ein Affe auf die Schlange mit Furcht reagiert. Eine analoge Furchtreaktion wird jedoch nicht erworben, wenn der Affe in dem Video Angst vor einer Plastikblume zeigt (Cook und Mineka 1990). Es scheint somit angeborene Lernbereitschaften zu geben, die ein emotionales Lernen in bestimmten Situationen begünstigen (Seligman 1971). Diese Idee eines biologisch vorbereiteten Lernens (*preparedness*) deckt sich mit der Beobachtung, dass sich Phobien vorwiegend gegenüber offenen Plätzen, Dunkelheit, Höhen und bestimmten Tieren (Schlangen, Insekten etc.) entwickeln, während moderne Dinge wie Waffen, elektrische Geräte und Autos davon nur selten betroffen sind, obwohl diese in der heutigen Welt sehr viel gefährlicher sind.

Kritische Würdigung Evolutionsbiologische Emotionstheorien sehen Emotionen als angeborene Verhaltenssysteme, die sich infolge eines natürlichen Selektionsdruckes bei unseren Vorfahren herausentwickelt haben und deren Anlagen an nachfolgende Generationen weitervererbt werden. Diese Sichtweise lenkt den Blick der Emotionspsychologie auf den biologischen Ursprung von Emotionen, ihre Implementierung im Körper und auf mögliche Funktionen von Emotionen in einem evolutionsgeschichtlichen Kontext. Darüber hinaus erklären sie kulturübergreifende Invarianten im emotionalen Ausdrucksverhalten, Analogien im emotionalen Verhalten von Mensch und Tier und angeborene Lernbereitschaften gegenüber bestimmten emotionalen Reizen.

Evolutionsbiologische Emotionstheorien wurden allerdings auch wegen ihrer weitgehenden Ausblendung von kognitiven und kulturellen Einflüssen auf die Emotionsentstehung stark kritisiert. In kultureller Hinsicht wurde eine Vernachlässigung von sozialen Einflüssen auf das Erleben von Emotionen und ihren Ausdruck im Verhalten angemahnt. So gibt es Hinweise, dass manche Emotionen nur in bestimmten Kulturen auftreten und dass ähnliche Situationen unterschiedliche Emotionen in verschiedenen Kulturen auslösen (Russell 1991). Zum Beispiel gelten gebratene Spinnen in manchen Regionen Kambodschas als köstliche Delikatesse, während sie hier bei uns (selbst im gebratenen Zustand) mehrheitlich Ekel auslösen. Unsicher sind auch eine Einteilung in „primäre" und „sekundäre" Emotionen sowie die Behauptung von fest vorgegebenen Emotionskategorien, die unabhängig von der verwendeten Sprache existieren (Barrett 2006a; Ortony und Turner 1990). Aus Sicht der Kognitionspsychologie wurde vor allem die Annahme einer direkten Emotionsauslösung durch situative Hinweise ohne dazwischengeschaltete Kognitionen angezweifelt (Frijda 1988; Lazarus 1982). In vielen Situationen scheint nicht der objektive Sachverhalt, sondern vielmehr die subjektive Einschätzung der Sache bestimmend für das Auftreten einer Emotion zu sein. Letztere Annahme bildet den Kern von kognitiven Theorien der Emotionsentstehung, die als Nächstes vorgestellt werden.

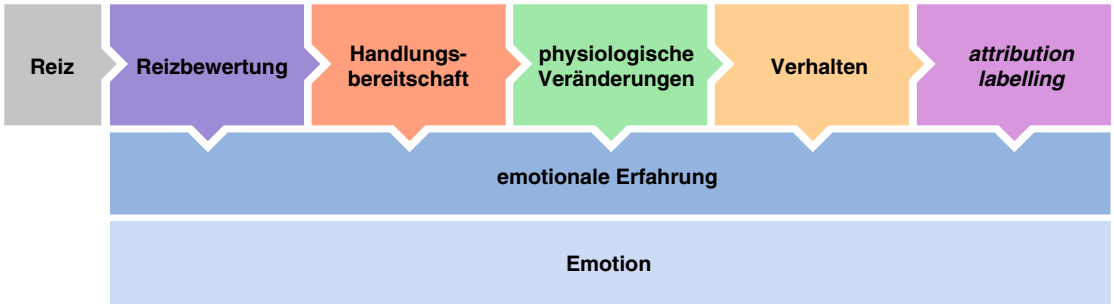


Abb. 7.20 Kognitive Theorien der Emotionsentstehung (Erläuterung der Farbcodierung in . Abb. 7.2)

7.8.3 Kognitive Theorien

Kognitive Emotionstheorien gehen davon aus, dass Emotionen von subjektiven Einschätzungen einer Situation in Hinblick auf Werte, Ziele und Wünsche der Person ausgelöst werden. Diese kognitive Einschätzung (*appraisal*) ist eine Voraussetzung für das Entstehen von Emotionen, weshalb diese Theorien auch **Appraisal**-Theorien genannt werden (Ellsworth und Scherer 2003). Die Einschätzungen lösen spezifische Reaktionen in physiologischen, motivationalen und expressiven Systemen aus. Die Dynamik dieser Veränderungen wird von der Person als eine spezifische Emotion erlebt (Abb. 7.20).

Appraisal-Theorien unterscheiden sich zum Teil recht stark in ihren Annahmen bezüglich der genauen Ausgestaltung und Ausdifferenzierung des Appraisal-Prozesses. So vertritt Lazarus (1991) in der neuesten Version seiner Theorie einen themenbasierten Ansatz, in dem er sich für eine limitierte Anzahl fundamentaler „relationaler Themen" im Appraisal-Prozess ausspricht, die bestimmte Emotionen generieren (Tab. 7.6). Dieser Ansatz ähnelt einem diskreten Emotionsmodell (▶ Abschn. 7.5.1).

Eine andere Extremposition nimmt das *Komponenten-Prozess-Modell* von Klaus Scherer (2009) ein, das prinzipiell so viele emotionale Zustände gestattet, wie es unterschiedliche Appraisal-Resultate gibt. Laut Scherer wird eine Emotion von Einschätzungen auf den folgenden vier Dimensionen festgelegt, die in einer festen Reihenfolge vorgenommen werden:

1. Einschätzung der *Relevanz* (Wie relevant ist dieses Ereignis für mich? Betrifft es mich/meine soziale Bezugsgruppe?),
2. Einschätzung der *Implikation* (Was sind die Implikationen oder Konsequenzen dieses Ereignisses? Wie beeinflusst es mein Wohlbefinden und meine unmittelbaren oder langfristigen Ziele?),
3. Einschätzung des *Bewältigungspotenzials* (Wie gut kann ich die Konsequenzen bewältigen bzw. mich ihnen anpassen?),
4. Einschätzung der *normativen Signifikanz* (Wie wichtig ist das Ereignis in Bezug auf mein Selbstkonzept und soziale Normen und Werte?).

Abb. 7.21 illustriert die Sequenz des Appraisal-Prozesses mit den jeweiligen Bewertungskriterien (Neuheit, Angenehmheit, Dringlichkeit etc.), die Auswirkungen auf andere emotionale Reaktionssysteme (Motivation, Ausdruck etc.) und Interaktionen mit anderen kognitiven Systemen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis etc.).

Tab. 7.6 Einige Emotionen und relationale Themen nach Lazarus (1991)

Emotion	Relationales Thema
Ärger	Beleidung oder Angriff gegen mich
Angst	Unbestimmte existenzielle Bedrohung
Ekel	Ein unverdauliches Objekt (oder Idee) aufnehmen oder zu nahe kommen
Freude	Gutes Vorankommen bei der Realisierung von Zielen
Furcht	Konkrete und plötzliche körperliche Bedrohung
Neid	Verlangen nach etwas, was jemand anderes besitzt
Scham	Einem Ego-Ideal nicht genügen
Traurigkeit	Ein unwiederbringlicher Verlust

Andere Theorien, die zwischen diesen Extremen angesiedelt sind, werden vertreten von Smith und Ellsworth (1985), Roseman (1984) oder Frijda (1986). Trotz einiger Unterschiede zwischen den Ansätzen gibt es eine große Übereinstimmung in der Annahme, dass Emotionen auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Appraisal-Kriterien vorhergesagt werden können. So sollte z. B. ein Ereignis, das als relevant, zielblockierend und potenziell bedrohlich bewertet wird, *Furcht* auslösen, sofern das eigene Bewältigungspotential niedrig eingeschätzt wird. Wird das Bewältigungspotenzial in der gleichen Situation hingegen als hoch eingestuft, dann sollte *Ärger* entstehen. Die Ergebnisse des Appraisal-Prozesses beruhen auf individuellen Inferenzen, die nicht unbedingt mit den objektiven Charakteristika einer gegebenen Situation übereinstimmen müssen. Unterschiede in der Persönlichkeit, in Motivationslagen, kulturellen Werten und in anderen sozialen Variablen (z. B. Gruppendruck) können folglich das Appraisal-Resultat und die resultierende Emotion systematisch beeinflussen. Appraisal-Theorien sind deshalb auch besonders geeignet, um interindividuelle und kulturelle Unterschiede im Auftreten von Emotionen zu erklären.

Kritische Würdigung Kognitive Ansätze sehen den Schlüssel für ein Verständnis von Emotionen in den kognitiven Einschätzungen einer Situation. Auslöser einer Emotion ist nicht die objektive Situation, sondern ihre subjektive Einschätzung in Hinblick auf Werte, Ziele und Normen der Person. Diese Annahme wurde von

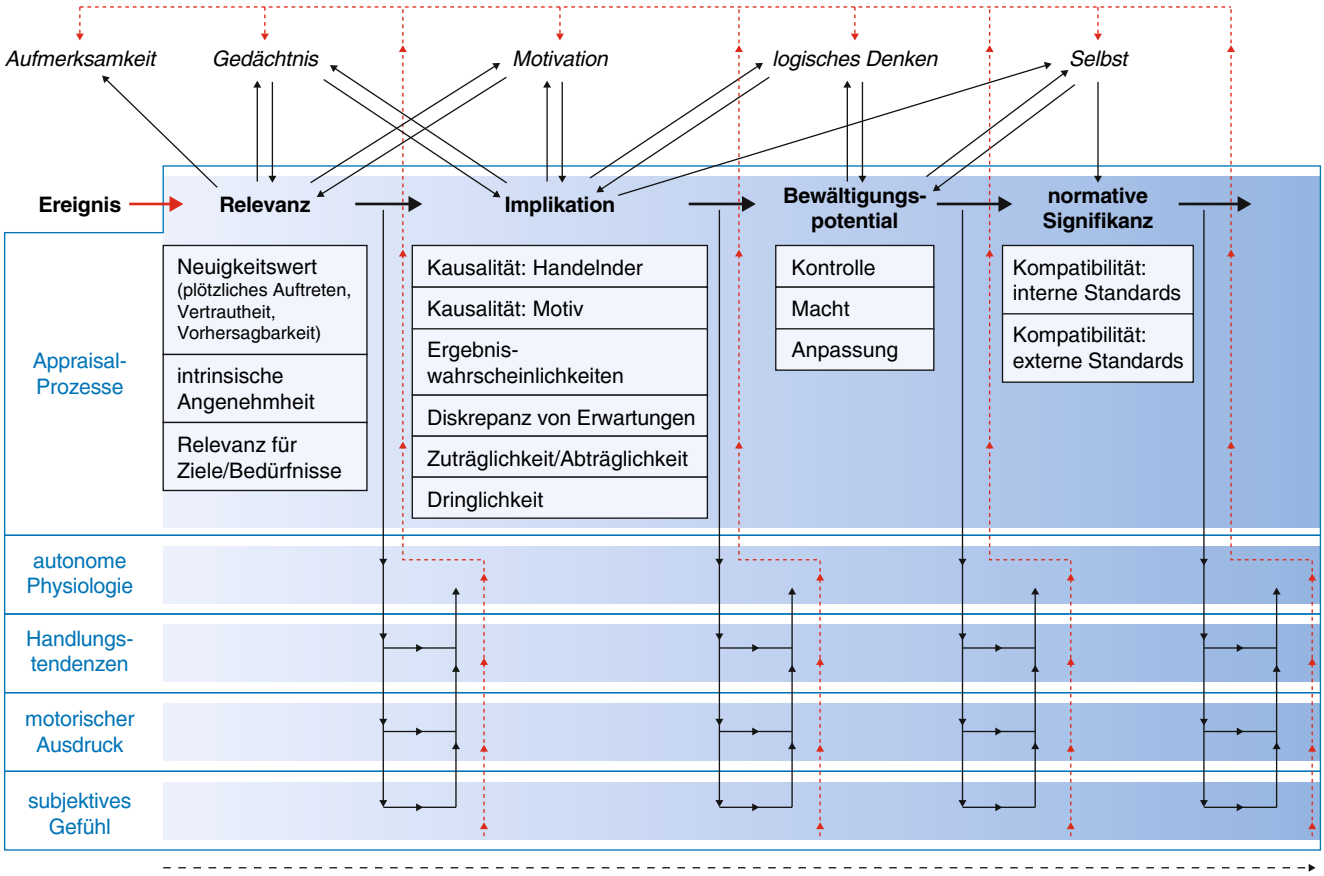


Abb. 7.21 Das Komponenten-Prozess-Modell von Scherer (2009). (Aus Brosch und Scherer 2008)

zahlreichen Untersuchungen bestätigt (Ellsworth und Scherer 2003). Kognitive Einschätzungen, die nicht an bestimmte Situationen gebunden sind, erklären ähnliche Emotionen in verschiedenen Situationen und verschiedene Emotionen in ähnlichen Situationen. Die Kenntnis der individuellen Einschätzung einer Situation erlaubt deshalb eine Emotionsvorhersage mit hoher Genauigkeit.

Empirische Untersuchungen haben aber auch gezeigt, dass selbst mit Berücksichtigung einer großen Anzahl von kognitiven Variablen ein bedeutender Anteil der Varianz von emotionalen Zuständen unerklärt bleibt. Diese Erklärungslücke deutet darauf hin, dass neben Kognitionen noch weitere Faktoren für die Entstehung und Ausdifferenzierung von Emotionen bedeutsam sind (z. B. motivationale Variablen; Frijda et al. 1989). Darüber hinaus besteht Uneinigkeit darüber, welche Einschätzungen grundlegend für die Emotionsentstehung sind (und welche nicht), in welcher Reihenfolge sie vorgenommen werden und wie kognitive Einschätzungen Veränderungen in nichtkognitiven (physiologischen, motivationalen) Systemen anstoßen.

7.8.4 Konstruktivistische Theorien

Stellen Sie sich vor, Sie sehen sich nach ausgiebigem Sport zu Hause einen Horrorfilm an. Wie werden Sie sich fühlen, wenn Sie die Horrorszenen sehen? Untersuchungen eines **Erregungstransfers** legen nahe, dass Sie die Szenen wahrscheinlich gruseliger wahrnehmen: Die Resterregung von der körperlichen Ertüchtigung wird irrtümlich als Anzeichen einer Angst interpretiert, wodurch das emotionale Erleben intensiviert wird (Zillmann 1983). Als Erklärung für solche und ähnliche Beobachtungen hat Stanley Schachter (1964) eine Zwei-Faktoren-Theorie vorgeschlagen, die eine Emotion mit einer Attribution von unspezifischen Erregungszuständen auf eine emotionale Ursache erklärt (▶ Abschn. 7.8.1).

Moderne konstruktivistische Emotionstheorien bauen auf der Zwei-Faktoren-Theorie auf (Barrett 2006b; Russell 2003). Abweichend vom klassischen Ansatz sehen sie jedoch die körperliche Grundlage von Emotionen in sogenannten Rohgefühlen oder **Basisaffekten** (*core affect*), die neben einer Erregung auch in ihrer Angenehmheit variieren (▶ Abschn. 7.5.2). Basisaffekten fehlt ein Objektbezug, und ihre Verursachung ist der Person auch meistens nicht bewusst (Barrett und Bliss-Moreau 2009). Ähnlich anderen sensorischen Empfindungen (Sehen, Hören etc.) werden ihre Veränderungen jedoch fortwährend registriert und unter Einbezug von interpretativen Schemata automatisch kategorisiert. Bieten sich für diese Kategorisierung emotionale Konzepte wie Ärger, Angst und Freude an, so entsteht eine Emotion im klassischen Sinn: Die Aufregung während der Achterbahnfahrt wird zur *Angst*, die Unruhe während der Autofahrt zur *Ungeduld* und die Erregung während des Streitgesprächs zur *Verärgerung*. Emotionale Kategorisierungen ordnen Rohgefühle auf diese Weise in einen Gesamtzusammenhang ein, der über eine reine sprachliche Benennung von Gefühlszuständen hinausgeht. Die

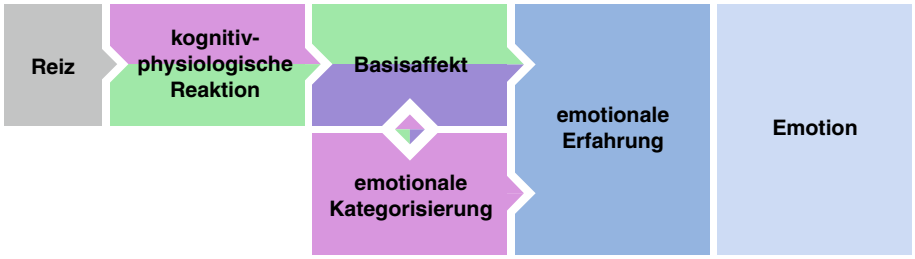


Abb. 7.22 Konstruktivistische Emotionstheorien (Erläuterung der Farbcodierung in Abb. 7.2)

Wahrnehmung einer unangenehmen Lage als Verärgerung wird z. B. einen anderen Verhaltenswunsch nach sich ziehen als eine Kategorisierung mit Nervosität. Die affektive Valenz des Rohgefühls schränkt jedoch die Möglichkeiten einer sinnvollen Kategorisierung ein, sodass diese nicht beliebig vorgenommen werden kann. Die Angst vor dem knurrenden Hund, die Angst während der Achterbahnfahrt und die Angst vor einem Wertverlust des Aktiendepots beziehen sich demnach nicht auf eine Gemeinsamkeit in den ausgelösten Reaktionen. Ihnen ist vielmehr gemeinsam, dass sie eine mehr oder wenig stark ausgeprägte Ähnlichkeit zu einer kognitiven Vorstellung einer prototypischen Angst besitzen – ähnlich wie verschiedene Rottöne in einem kontinuierlich abgestuften Farbenspektrum unserer Vorstellung von einem „reinen" Rot unterschiedlich nahekommen. Je mehr eine Gefühlslage in einer Situation unserem Bild von einer „typischen" Emotion entspricht, umso wahrscheinlicher ist ihre Kategorisierung als „emotionale" Reaktion. Emotionen sind folglich nicht von der Natur vorgegeben, sondern sie werden psychologisch „konstruiert" (Abb. 7.22).

Welche Emotionen wir fühlen und welche Emotionen wir bei anderen Personen wahrnehmen, hängt folglich davon ab, welche interpretativen Schemata zu einem Zeitpunkt kognitiv verfügbar sind (Barrett et al. 2007b). Individuelle Unterschiede im Wissen über Emotionen beeinflussen demnach das emotionale Erleben einer Situation: Eine Person, die mehrere Konzepte zur Verfügung hat, um beispielsweise eine Gefühlsreaktion auf ein rücksichtsloses Verhalten eines Autofahrers zu beschreiben (z. B. *Irritation, Empörung, Abscheu*), wird diese Situation vermutlich anders erleben als eine Person, die nur das Konzept *Ärger* kennt. Umgekehrt sollte eine Person, die kein passendes Emotionskonzept zur Verfügung hat, auch keine diskrete Emotion empfinden bzw. wahrnehmen können. Passend dazu haben Lindquist et al. (2014) Personen mit einer neurodegenerativen Erkrankung untersucht, die den Abruf von kategorialem Wissen aus dem semantischen Gedächtnis stark beeinträchtigt (*semantische Demenz*). Diese Personen sollten folglich Schwierigkeiten mit einer emotionalen Kategorisierung von affektiven Rohgefühlen (und ihrem Ausdruck) haben, während die Wahrnehmung des Rohgefühls selbst unbeeinträchtigt sein sollte. Diese Hypothese bestätigte sich in der Untersuchung. Die Patienten (und eine gesunde Kontrollgruppe) wurden gebeten, Bilder von sechs diskreten emotionalen Gesichtsausdrücken in Stapel zu sortieren, die ihrer Meinung nach eine sinnvolle Gruppierung der Bilder anzeigen. Gesunde Personen bevorzugten als Gruppierungseinheit für diese Aufgabe erwartungsgemäß den Ausdruck einer diskreten Emotion (Ärger, Traurigkeit, Freude etc.). Nicht so die Patienten mit semantischer Demenz: Sie sortierten die Gesichtsausdrücke mehrheitlich in zwei Stapel mit positiven und negativen Expressionen. Diese Gruppierung legt nahe, dass die Patienten zwar die Valenz eines Gesichtsausdrucks erkennen konnten, aber darüber hinaus keinen Zugang zu einem nuancierten Wissen über emotionale Ausdrücke hatten.

Kritische Würdigung Konstruktivistische Ansätze behaupten, dass Emotionen durch emotionale Kategorisierungen von unspezifischen affektiven Zuständen entstehen. Wie wir eine Situation erleben und welchen Stellenwert wir einer Gefühlslage zuschreiben, hängt vor allem davon ab, ob sie zu einem „emotionalen Skript" passt, das eine typische emotionale Episode (Angst, Ärger, Freude etc.) beschreibt. Diese kategoriale Einordnung erfolgt über vage Ähnlichkeiten, ohne dass notwendige Merkmale für eine konkrete Emotion bestimmt werden. Ähnlich wie wir Pinguine zu Vögeln zählen, obwohl sie nicht fliegen können, können wir auch verschiedene Zustände einer „Angst" erleben, ohne dass sie einen systematischen Überschneidungsbereich in den Verhaltensreaktionen haben (Barrett 2006a). Konstruktivistische Emotionstheorien geben folglich die Suche nach angeborenen emotionsspezifischen Verhaltensprofilen auf; stattdessen betonen sie Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der psychologischen Konstruktion von Emotionen, die von sensorischen Bottom-up-Prozessen (Basisaffekt) und gedächtnisbasierten Top-down-Prozessen (Kategorisierung) gleichermaßen beeinflusst wird.

Mit ihrer Erwartung einer soziokulturell geprägten Emotionsvielfalt haben konstruktivistische Emotionstheorien jedoch Schwierigkeiten, Beobachtungen von universell auftretenden Emotionen und Ausdrucksmustern zu erklären (Russell 1994). Darüber hinaus bleibt weitgehend ungeklärt, (1) wodurch Basisaffekte bzw. Veränderungen in Basisaffekten ausgelöst werden, (2) wie Valenz und Erregung zu einem „Rohgefühl" integriert werden (3) und welches Ereignis bzw. welche Information eine emotionale Kategorisierung anstößt. Die Theorieentwicklung ist somit in zentralen Fragen noch nicht abgeschlossen.

7.9 Emotionsregulation

Emotionen regulieren das Verhalten und Erleben der Person (Regulation *durch* Emotionen). Emotionen können aber auch selbst zum Gegenstand der Regulation werden (Regulation *von* Emotionen). **Emotionsregulation** bezeichnet alle Wege und Mittel, über die Personen Einfluss darauf nehmen, welche Emotionen sie haben, wann sie sie haben und wie sie Emotionen erleben und ausdrücken (Gross und Thompson 2007).

Die Gründe für eine Emotionsregulation können vielfältig sein. Ein wichtiger Antrieb ist eine *hedonistische Motivation*, die auf eine Maximierung von Lust (positive Emotionen) und eine

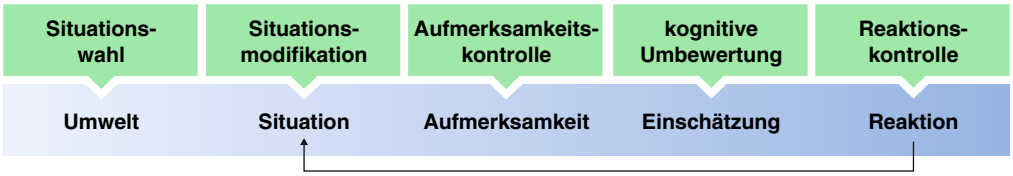


Abb. 7.23 Prozessmodell der Emotionsregulation nach Gross und Thompson (2007)

Vermeidung von Unlust (negative Emotionen) drängt. In manchen Situationen kommt es aber eher darauf an, eine „richtige" Emotion zu haben, die zu aktuellen Handlungsanforderungen passt (*funktionale Motivation*). Personen verstärken beispielsweise ihre Wut, wenn sie sich auf eine harte Konfrontation mit einer anderen Person vorbereiten (Tamir et al. 2008). Häufig werden Emotionen aufgrund von *prosozialen Motiven* reguliert. Der unangenehme Körpergeruch der besten Freundin wird z. B. ertragen, um ihre Gefühle nicht zu verletzen. Emotionsregulation kann aber auch *Selbstschutz* als Ziel haben. Psychologische Abwehrmechanismen wie Verdrängung („Er ist nicht immer so!"), Distanzierung („Das geht mich nichts an!") oder kognitive Umdeutungen („Er hat es nicht böse gemeint!") schützen z. B. den Selbstwert, indem sie bedrohliche oder für die eigene Person schmerzhafte Erlebnisse mit dem Selbstbild in Einklang bringen. Emotionen werden schließlich auch gezielt für ein *Eindrucksmanagement* (*impression management*) eingesetzt. Die Schadenfreude über das Scheitern eines Konkurrenten wird vor anderen Personen verborgen, damit kein selbstsüchtiger Eindruck entsteht. Die gute Laune der Gastgeberin ist wiederum gespielt, damit sich die Gäste möglichst wohl fühlen.

Eine Emotionsregulation ist folglich in vielen Situationen notwendig, die wiederum nach unterschiedlichen Vorgehensweisen verlangen. Gross und Thompson (2007) haben ein Prozessmodell der Emotionsregulation vorgestellt, nach dem eine Emotionsregulation an fünf verschiedenen Aspekten einer emotionalen Episode ansetzen kann: (1) Die Auswahl einer Situation, (2) die Veränderung einer vorgefundenen Situation, (3) die Kontrolle der Aufmerksamkeit, (4) die Interpretation einer Situation und (5) die Unterdrückung (ggf. auch Verstärkung) einer emotionalen Reaktion (Abb. 7.23). Die ersten vier Strategien zielen darauf ab, die Entstehung einer Emotion zu beeinflussen (*antezedensfokussierte Emotionsregulation*), während die letzte Strategie emotionale Reaktionen verändern will, die bereits ausgelöst wurden (*reaktionsfokussierte Emotionsregulation*). Diese Strategien werden im Folgenden einzeln näher vorgestellt.

Situationsauswahl Personen können das Auftreten von bestimmten Emotionen beeinflussen, indem sie emotionsauslösende Situationen strategisch aufsuchen (z. B. Kinobesuch) oder vermeiden (z. B. Zahnarztbesuch).

Um ein Referat in einem gefürchteten Seminar nicht halten zu müssen, täuscht Anna kurz vor dem Termin eine Erkrankung vor.

Situationsmodifikation Emotionale Situationen können aktiv verändert werden, damit sie den eigenen Wünschen und Bedürfnissen besser entsprechen.

Anna muss ein Referat halten, damit sie einen Schein erhält. Für eine gute Vorbereitung wählt sie ein Themengebiet, mit dem sie bereits vertraut ist. Zusätzliche Sicherheit gibt ihr eine Studienfreundin, mit der sie sich gemeinsam auf das Referat vorbereitet.

Aufmerksamkeitskontrolle Personen können emotionale Reaktionen verstärken, indem sie die Aufmerksamkeit auf emotionale Aspekte einer Situation richten (Konzentration) bzw. abschwächen, indem sie die Aufmerksamkeit auf nichtemotionale Aspekte einer Situation oder auf irrelevante Reize lenken (Ablenkung).

Während des Referats vermeidet Anna einen direkten Blickkontakt mit dem Dozenten und konzentriert sich auf ihre Folien.

Kognitive Umbewertung Eine besonders effektive Methode für eine Emotionsregulation ist die kognitive Umbewertung (*reappraisal*) eines emotionalen Ereignisses. Zu dieser Klasse von Regulationsstrategien zählen neben Neubewertungen und günstigen Attributionen auch Abwehrmechanismen wie Verdrängung, Leugnung und Intellektualisierung. Aus der Krise wird eine Chance, das halbleere Glas wird halbvoll.

Anna spricht sich vor dem Referat selbst Mut zu. Darüber hinaus ruft sie sich in Erinnerung, dass ihre Referatsleistung nur als eine von mehreren Teilleistungen in die Gesamtbewertung einfließt.

Reaktionskontrolle Als letzte Strategie können emotionale Reaktionen willentlich verstärkt oder unterdrückt werden. Eine Unterdrückung des Emotionsausdrucks ist besonders dann wahrscheinlich, wenn die emotionale Befindlichkeit vor anderen Personen verborgen werden sollte.

Anna will sich ihre Angst während des Referats nicht anmerken lassen. Sie setzt sich auf einen Stuhl, damit niemand ihren unsicheren Stand bemerkt. Zudem nimmt sie ein Beruhigungsmittel ein, um ihre Nervosität einzudämmen.

Die Effektivität dieser Regulationsstrategien wurde in zahlreichen Studien untersucht (Koole 2009). Als eine wirksame Methode hat sich eine kognitive Umbewertung von emotionsauslösenden Situationen herausgestellt. In einer klassischen Studie wurde Personen ein furchtauslösender Film über Arbeitsunfälle gezeigt (Lazarus et al. 1965). Vor dem Abspielen des Filmes wurde ein leugnender (falsches Blut, Trickaufnahmen usw.), ein intellektualisierender (sachlicher Bericht über Arbeitsrisiken, objektive Analyse von Risikofaktoren usw.) oder ein neutraler

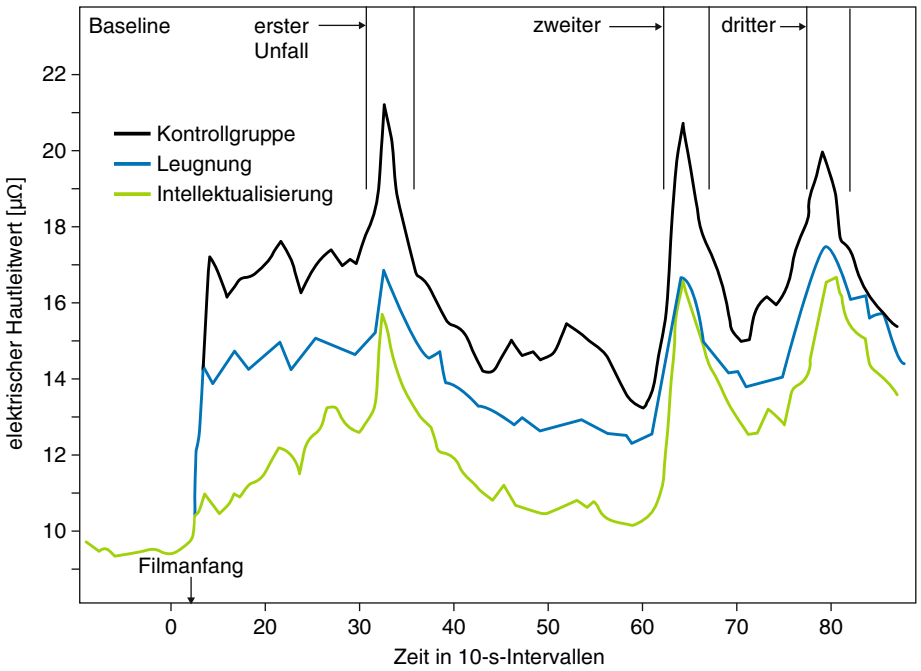


Abb. 7.24 Veränderungen der emotionalen Erregung (Hautleitfähigkeit) bei einer Leugnung und Intellektualisierung von furchteinflößenden Arbeitsunfällen. (Nach Lazarus et al. 1965)

Kommentar (Kontrollbedingung) zu dem Film gegeben. Messungen der elektrischen Hautleitfähigkeit (als Index einer emotionalen Erregung) ergaben, dass leugnende und intellektualisierende Kommentare die emotionale Erregung während des Filmes signifikant verringerten (Abb. 7.24). Eine kognitive Umbewertung kann folglich die emotionale Relevanz einer Situation wirksam verändern.

Studien haben zudem die Effektivität einer Reaktionskontrolle untersucht. Gross und Levenson (1997) zeigten Personen einen traurigen, fröhlichen oder einen neutralen Film. Während des Filmes sollte eine Gruppe ihre emotionale Befindlichkeit nach außen hin möglichst stark verbergen. Diese Anweisung reduzierte nicht nur instruktionsgemäß den Ausdruck der Befindlichkeit, sondern auch die Intensität der emotionalen Empfindung. Dieses Ergebnis deckt sich somit mit der Facial-Feedback-Hypothese, dass die Unterdrückung des Emotionsausdrucks im Gesicht das Empfinden dieser Emotion reduziert (▶ Abschn. 7.8.1). Infolge der Reaktionsunterdrückung nahm die kardiovaskuläre Erregung der Person jedoch stark zu, und zwar unabhängig davon, ob eine positive oder eine negative Emotion unterdrückt wurde. Dieser ironische Effekt auf die kardiovaskuläre Aktivität tritt nur bei einer Reaktionsunterdrückung, nicht aber bei einer kognitiven Umbewertung der Situation auf (Gross 1998). Eine Belastungsreaktion des Körpers während einer Reaktionskontrolle könnte somit erklären, warum Personen, die Angstempfindungen habituell unterdrücken (*repressors*), für Erkrankungen des Herz- Kreislauf-Systems besonders anfällig sind (Myers et al. 2008).

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass eine Reaktionskontrolle kognitive Ressourcen verbraucht und Interaktionen mit anderen Personen behindert. In einer Studie sahen jeweils zwei Frauen einen emotional aufwühlenden Film, über den sie sich in einem nachfolgenden Gespräch austauschen sollten (Butler et al. 2003). Eine der beiden Frauen (die Akteurin) sollte ihre Gefühle während des Gesprächs verbergen (Ausdrucksunterdrückung). Das Verhalten der Akteurin und der Gesprächspartnerin wurde während des Gesprächs beobachtet und die Qualität der Interaktion von beiden Frauen beurteilt. Relativ zu einer Kontrollgruppe, die keine spezifische Instruktion für das Gespräch erhalten hatte, zeigten die um Maskierung bemühten Akteure neben einer reduzierten Expressivität auch eine reduzierte Reaktivität auf die Gesprächsbeiträge ihrer Partnerinnen. Darüber hinaus berichtete diese Gruppe eine erhöhte Ablenkung während des Gesprächs. Interessanterweise reagierte auch die Gesprächspartnerin auf die Maskierungsbemühungen der Akteurin: Diese Frauen zeigten eine physiologische Stressreaktion während des Gesprächs, und sie schätzten die Wärme und Nähe zu den Akteuren geringer ein verglichen mit Frauen in der Kontrollbedingung. Ähnlich störende Auswirkungen einer Emotionskontrolle wurden jedoch nicht mit einer instruierten Neubewertung der Situation beobachtet. Nicht die reduzierte Expressivität der Akteurin, sondern die von den Maskierungsanstrengungen verursachte Ablenkung und verringerte Reaktivität wirkten sich somit störend auf ihr Interaktionsverhalten aus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es unterschiedliche Strategien gibt, um emotionale Gefühle zu kontrollieren. Eine Emotionskontrolle kann darauf abzielen, das eigene Wohlbefinden zu verbessern. Häufig sind sie aber darauf ausgerichtet, Emotionen situationsangemessen zu gestalten, damit sie mit Aufgabenanforderungen und sozialen Erwartungen in Einklang stehen. Eine vorausschauende Umgestaltung oder Neubewertung einer emotionsauslösenden Situation bildet einen Königsweg für eine Modifikation des emotionalen Erlebens, da diese in Prozesse vor der Emotionsentstehung eingreift. Reaktionskontrolle ist hingegen der Versuch, bereits ausgelöste emotionale Reaktionen unter Kontrolle zu bringen, was in den meisten Fällen mit erheblichen Anstrengungen verbunden ist. Mit Kompetenzen in der Regulation von emotionalen Zuständen sind wir emotionalen Zuständen jedoch nicht passiv ausgeliefert, sondern wir können sie aktiv gestalten und an persönliche Bedürfnisse und situative Erfordernisse anpassen.

Abb. 7.25 Schockbilder, die auf Zigarettenschachteln in Brasilien abgedruckt werden. (Bild erstellt vom Brazilian Health Ministry (MS) – Instituto Nacional do Câncer [INCA], ▶ http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACigarettes_brazil.JPG)

7.10 Anwendungsbeispiele

Wer kennt sie nicht – die Heilsversprechen der Selbsthilfeliteratur, die uns ein glückliches und stressfreies Leben, eine angstfreie Zukunft oder eine harmonische Partnerschaft versprechen. Emotionen und ein kompetenter Umgang mit ihnen werden dabei häufig als Schlüssel zum Erfolg gesehen. Die wissenschaftliche Emotionspsychologie stimmt in diesen Chor ein, wenngleich sie natürlich ein differenzierteres Bild zeichnet. Hier sind drei Beispiele:

Positive Psychologie

Was macht uns glücklich? Emotionspsychologen haben ein umfangreiches Forschungsprogramm gestartet, das sich genau mit dieser Frage beschäftigt und als *Positive Psychologie* bekannt geworden ist (Seligman und Csikszentmihalyi 2000; vgl. auch www.authentic-happiness.com). Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits kleine Maßnahmen, die im Alltag leicht umgesetzt werden können, das Wohlbefinden steigern. In einer Studie führten Personen jeden Abend Buch über drei positive Tageserlebnisse und ihre Verursachung (Seligman et al. 2005). Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe steigerte sich ihr Wohlbefinden mit zunehmender Dauer der Intervention auch noch nach sechs Monaten (die meisten Personen haben die Intervention freiwillig fortgesetzt). Eine plausible Erklärung für die hohe Wirksamkeit dieser Tagebuchmethode ist das Durchbrechen einer sogenannten *hedonischen Tretmühle*: Menschen gewöhnen sich sehr schnell an verbesserte Lebensumstände; deshalb werden wir zunehmend „betriebsblind" für die angenehmen Dinge in unserem Leben (ein gutes Essen, einen gemütlichen Abend im Kreis der Familie etc.). Die erneuerte Wertschätzung von kleinen Erfolgen durchbricht diese Gewöhnung und zeigt uns, wie gut wir es eigentlich haben (Diener et al. 2006).

Furchtappelle in der Gesundheitsvorsorge

Ab 2016 werden auf den Verpackungen von Zigaretten Schockbilder von zerfressenen Lungen, schwarzen Zähnen und Atemschläuchen großflächig abgedruckt werden. Die Europäische Union versucht mit dieser Maßnahme, den Zigarettenkonsum einzuschränken und Jugendliche vom Rauchen abzuhalten. Wissenschaftliche Untersuchungen geben dieser Richtlinie recht. In Ländern, in denen Schockbilder auf Zigarettenschachteln abgebildet werden (z. B. Kanada oder Australien), stieg die Nachfrage nach Entwöhnungsprogrammen nach ihrer Einführung sprunghaft an, und der Zigarettenkonsum sank in der Folgezeit (Hammond 2011). Eine abschreckende Wirkung tritt jedoch nur mit großflächigen Abbildungen von angsteinflößenden Bildern ein, während Textbotschaften einen unbedeutenden Effekt auf das Raucherverhalten haben. Das Schlüsselelement für die Maßnahme ist somit die Erzeugung von Furcht und der damit verbundene Appell, mit dem selbstschädigenden Verhalten aufzuhören. Schockbilder mögen kurzfristig unangenehme und unappetitliche Gefühle auslösen (Abb. 7.25). Längerfristig retten sie aber Menschenleben.

Ärger-Management-Programme

Menschen neigen zu Aggression und Gewalt, wenn sie wütend sind (Averill 1983; Berkowitz 1990). Die Emotionspsychologie hat eine Reihe von sogenannten Ärger-Management-Programmen entwickelt, mit denen Wut und Aggressionen von Jugendlichen und Erwachsenen reduziert werden können. Eine besonders häufig eingesetzte Methode ist ein kognitiv-behaviorales Training in drei Schritten:

1. Die Person lernt, ärgerliche Situationen zu erkennen und zu vermeiden.
2. Es werden Strategien und Techniken eingeübt, mit denen eine überstürzte Reaktion vermieden und Entspannung herbeigeführt wird (z. B. Atemtechniken, Selbstinstruktionen, Strategien der kognitiven Neubewertung).
3. Die Person übt (z. B. in Rollenspielen) alternative Problemlösestrategien und Umgangsformen ein, die sozial unproblematisch sind (Deffenbacher et al. 2002).

Die Effektivität dieser Trainingsmethoden hinsichtlich einer Reduktion von Ärger und sozial unerwünschten Verhaltensweisen wurde in zahlreichen Studien bestätigt (Beck und Fernandez 1998; DiGiuseppe und Tafrate 2003; Sukhodolsky et al. 2004).

7.11 Ausblick

Die Emotionspsychologie ist derzeit stark in Mode. Es werden „emotionale Intelligenzquotienten" gemessen und „emotionale Kompetenzen" trainiert, „emotionale Ansprachen" gehalten und „emotionale Anführer" gesucht. Eltern sollten ihren Kindern „emotionale Wärme" geben, und Kinder sollten „emotionale Reife" erlangen. Disney/Pixar dreht einen Kinofilm über ein emotionales Kontrollzentrum im Kopf (*Inside Out*), und die Musikindustrie verkauft uns „emotionale Lieder zum Kuscheln und Heulen". Die Emotionspsychologie boomt, und ihre Erkenntnisse sind stark nachgefragt. Es ist davon auszugehen, dass dieser Boom auch weiter anhalten wird. Mit neuen technischen Entwicklungen drängt die Emotionspsychologie immer stärker in unseren Alltag. Jedes moderne Smartphone kann heute mit einer passenden App ausgestattet den emotionalen Zustand einer Person ablesen. Neue Smartwatches und Fitness-Tracker sind serienmäßig mit Sensoren ausgestattet, die den Blutdruck und den Herzschlag einer Person überwachen und vor einer überhohen Erregung warnen. Softwareentwickler arbeiten an automatisierten Erkennungssystemen von Ärger, die z. B. in Callcentern eingesetzt werden, um den Mitarbeiter auf einen beschwichtigenden Umgangston hinzuweisen. Viele dieser Entwicklungen stecken heute noch in den Kinderschuhen oder arbeiten unzuverlässig. Mit dem technischen Fortschritt und dem Know-how über emotionale Vorgänge ist es jedoch nur eine Frage der Zeit, bis diese Probleme gelöst werden.

7.12 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Emotionen besitzen (1) eine subjektive Komponente, (2) eine kognitive Komponente, (3) eine physiologische Komponente, (4) eine expressive Komponente und (5) eine motivationale Komponente. Der Zusammenhang zwischen diesen Komponenten ist eher lose.
- Diskrete Emotionsmodelle nehmen eine begrenzte Anzahl von *Basisemotionen* an, die klar voneinander abgrenzbar sind und bei allen Menschen unabhängig von ihrem Alter, Geschlecht und ihrer Sozialisation auftreten. Zu den Basisemotionen zählen Angst/Furcht, Ärger, Trauer und Freude.
- Dimensionale Emotionsmodelle verorten Emotionen in vermischten Gefühlen von Angenehmheit und Erregung.
- Modale Emotionsmodelle verankern Emotionen in häufig auftretenden Mustern von Situationseinschätzungen, die bestimmte emotionale Reaktionen hervorrufen, denen in der Sprache wiederum Emotionskategorien zugeordnet werden.
- Emotionen haben informative, handlungsvorbereitende und sozial-kommunikative Funktionen.
- Wichtige, an emotionalen Funktionen beteiligte neuronale Strukturen sind: die Amygdala, der präfrontale Cortex, der anteriore cinguläre Cortex und die Insula.
- Distinkte physiologische Reaktionen wurden für bestimmte Untertypen von Emotionen in ausgewählten Situationen beobachtet. Emotionskategorien wie Angst, Ärger, Trauer etc. unterscheiden sich in ihren physiologischen Signaturen jedoch nicht klar voneinander.
- Evolutionsbiologische Ansätze sehen Emotionen und ihren Ausdruck im Verhalten als angeborene Merkmale, die durch natürliche Selektion (Auslese) entstanden sind.
- Kognitive Emotionstheorien nehmen an, dass Emotionen von den subjektiven Einschätzungen einer Situation in Hinblick auf die Werte, Ziele und Wünsche der Person ausgelöst werden.
- Konstruktivistische Emotionstheorien behaupten, dass Emotionen durch emotionale Kategorisierungen von unspezifischen affektiven Zuständen (sogenannten Rohgefühlen) entstehen.
- Wichtige Strategien der Emotionsregulation sind (1) Auswahl einer Situation, (2) Situationsmodifikation, (3) Aufmerksamkeitsausrichtung, (4) Neubewertung einer Situation und (5) Reaktionskontrolle.

Schlüsselbegriffe

Affekt (*affect*) Obergriff für alle möglichen Arten von positiven und negativen Empfindungen (Stimmung, Emotion, Schmerz etc.).

Appraisal *(appraisal)* Emotionale Einschätzung von Situationen, Ereignissen oder Objekten auf verschiedenen Kriteriumsdimensionen.

Emotion (*emotion*) Eine auf ein bestimmtes Objekt ausgerichtete affektive Reaktion, die mit zeitlich befristeten Veränderungen des Erlebens und Verhaltens einhergeht.

Basisaffekt (*core affect*) Vermischte Rohgefühle der Angenehmheit und der Erregung

Emotionsmodul (*emotion module*) Angeborenes und funktional spezialisiertes emotionales System, das auf eine spezifische Klasse von Umweltreizen selektiv anspricht, über ein eigenes biologisches System implementiert wird und weitgehend abgeschlossen von anderen Systemen operiert.

Emotionsregulation (*emotion regulation*) Alle Wege und Mittel, über die Personen Einfluss darauf nehmen, welche Emotionen sie haben, wann sie sie haben und wie sie sie erleben und ausdrücken.

Erregungstransfer (*excitation transfer*) Eine Resterregung aus Situation A verstärkt die emotionale Reaktion in einer nachfolgenden (emotional wahrgenommenen) Situation B.

Primäre Emotion bzw. Basisemotion (*primary, basic emotion*) Biologisch fixierte Emotion, die bei allen Menschen unabhängig von

ihrem Alter, Geschlecht und ihrer Sozialisation auftritt und einen unverwechselbaren Ausdruck im Verhalten findet.

Sekundäre Emotion (*secondary emotions*) Komplexe Emotion, die aus vermischten Aktivierungen von zwei oder mehreren primären Emotionen hervorgeht.

Stimmung (*mood*) Diffuse positive oder negative Gefühlslage ohne klaren Bezug zu einem Ereignis oder Objekt, die meistens länger andauert und eine geringe Intensität besitzt.

Weiterführende Literatur

Clore, G. L., & Huntsinger, J. R. (2007). How emotions inform judgment and regulate thought. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(9), 393–399. (Überblicksartikel zu dem Einfluss von Emotionen auf Urteile und Entscheidungen.)

Coan, J. A., & Allen, J. J. B. (2007) (Eds.). *Handbook of emotion elicitation and assessment* (Series in Affective Sciences). Oxford: Oxford University Press. (Handbuch zu Methoden einer Emotionsinduktion.)

Dalgleish, T., Dunn, B. D., & Mobbs, D. (2009). Affective neuroscience: Past, present, and future. *Emotion Review*, *1*(4), 355–368. (Historische Entwicklungen und aktueller Stand der neurowissenschaftlichen Emotionsforschung.)

Gendron, M., & Barrett, L. F. (2009). Reconstructing the past: A century of ideas about emotion in psychology. *Emotion Review*, *1*, 316-339. (Rückblick auf die historische Entwicklung der bedeutendsten Emotionstheorien.)

Gross, J. J. (2007) (ed.), *Handbook of emotion regulation*. New York: Guilford Press. (Einstieg in grundlegende Konzepte und Ergebnisse der Erforschung einer Emotionsregulation.)

Larsen, J. T., Berntson, G. G., Poehlmann, K. M., Ito, T. A., & Cacioppo, J. T. (2008). The psychophysiology of emotion. In M. Lewis, J. M. Haviland-Jones und L. F. Barrett (Eds.), *Handbook of emotions* (3rd ed.) (pp. 180–195). New York: Guilford Press. (Überblick über den aktuellen Stand der psychophysiologischen Emotionsforschung.)

Mauss, I. B., & Robinson, M. D. (2009). Measures of emotion. *Cognition and Emotion, 23,* 209-237. (Darstellung von etablierten Messmethoden von Emotionen.)

Moors, A. (2009). Theories of emotion causation: A review. *Cognition and Emotion*, *23*, 625-662. (Systematischer Vergleich der wichtigsten Emotionstheorien.)

Yiend, J. (2010). The effects of emotion on attention: A review of attentional processing of emotional information. *Cognition and Emotion*, *24*, 3-47. (Überblick von Forschungsergebnissen zu Prozessen einer emotionalen Aufmerksamkeitslenkung.)

Danksagung

Wir bedanken uns bei Florian Steinbichl für die professionelle Hilfe bei der Erstellung der Abbildungen.

Literatur

Anderson, A. K. (2005). Affective influences on the attentional dynamics supporting awareness. *Journal of Experimental Psychology: General*, *134*(2), 258–281.

Arnold, M. B. (1960). *Emotion and personality*. New York: Columbia University Press.

Averill, J. R. (1983). Studies on anger and aggression: Implications for theories of emotion. *American Psychologist*, *38*(11), 1145–1160. doi:10.1037/0003-066X.38.11.1145.

Bard, P. (1928). A diencephalic mechanism for the expression of rage with special reference to the sympathetic nervous system. *American Journal of Physiology*, *84*, 490–515.

Bard, P. (1934). On emotional expression after decortication with some remarks on certain theoretical views: Part I. *Psychological Review*, *41*(4), 309–329. doi:10.1037/h0070765.

Barrett, L. F. (2006a). Are emotions natural kinds? *Perspectives on Psychological Science*, *1*(1), 28–58.

Barrett, L. F. (2006b). Solving the emotion paradox: Categorization and the experience of emotion. *Personality und Social Psychology Review*, *10*(1), 20–46.

Barrett, L. F., & Bliss-Moreau, E. (2009). Affect as a psychological primitive. *Advances in Experimental Social Psychology*, *41*, 167–218. doi:10.1016/S0065-2601(08)00404-8.

Barrett, L. F., Lindquist, K. A., Bliss-Moreau, E., Duncan, S., Gendron, M., Mize, J., & Brennan, L. (2007a). Of mice and men: Natural kinds of emotions in the mammalian brain? A response to Panksepp and Izard. *Perspectives on Psychological Science*, *2*(3), 297–311.

Barrett, L. F., Lindquist, K. A., & Gendron, M. (2007b). Language as context for the perception of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(8), 327–332.

Baumeister, R. F., DeWall, C. N., Vohs, K. D., & Alquist, J. L. (2010). Does emotion cause behavior (apart from making people do stupid, destructive things)? In C. R. Agnew, D. E. Carlston, W. G. Graziano, & J. R. Kelly (Hrsg.), *Then a miracle occurs: Focusing on behavior in social psychological theory and research* (S. 119–136). New York: Oxford University Press.

Bäuml, K.-H., & Kuhbandner, C. (2007). Remembering can cause forgetting – but not in negative moods. *Psychological Science*, *18*(2), 111–115. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01857.x.

Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., & Anderson, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, *50*(1–3), 7–15.

Beck, R., & Fernandez, E. (1998). Cognitive-behavioral therapy in the treatment of anger: A meta-analysis. *Cognitive Therapy and Research*, *22*(1), 63–74. doi:10.1023/A:1018763902991.

Bem, D. J. (1967). Self-perception: An alternative interpretation of cognitive dissonance phenomena. *Psychological Review*, *74*(3), 183–200.

Berkowitz, L. (1990). On the formation and regulation of anger and aggression: A cognitive-neoassociationistic analysis. *American Psychologist*, *45*(4), 494–503. doi:10.1037/0003-066X.45.4.494.

Blanchard, D. C., Hynd, A. L., Minke, K. A., Minemoto, T., & Blanchard, R. J. (2001). Human defensive behaviors to threat scenarios show parallels to fear- and anxiety-related defense patterns of non-human mammals. *Neuroscience und Biobehavioral Reviews*, *25*(7–8), 761–770. doi:10.1016/S0149-7634(01)00056-2.

Bless, H., Clore, G. L., Schwarz, N., Golisano, V., Rabe, C., & Wölk, M. (1996). Mood and the use of scripts: Does a happy mood really lead to mindlessness? *Journal of Personality and Social Psychology*, *71*(4), 665–679. doi:10.1037/0022-3514.71.4.665.

Bodenhausen, G. V. (1993). Emotions, arousal, and stereotypic judgments: A heuristic model of affect and stereotyping. In D. M. Mackie, & D. L. Hamilton (Hrsg.), *Affect, cognition, and stereotyping: Interactive processes in group perception* (S. 13–37). San Diego, CA: Academic Press.

Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective und Behavioral Neuroscience*, *7*(4), 356–366.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2000). Measuring emotion: Behavior, feeling, and physiology. In R. D. Lane, & L. Nadel (Hrsg.), *Cognitive neuroscience of emotion* (S. 242–276). New York: Oxford University Press.

Bradley, M. M., Codispoti, M., Cuthbert, B. N., & Lang, P. J. (2001). Emotion and motivation I: defensive and appetitive reactions in picture processing. *Emotion*, *1*, 276–298.

Brandstätter, H. (2007). The time sampling diary (TSD) of emotional experience in everyday life situations. In J. A. Coan, & J. J. B. Allen (Hrsg.), *Handbook of emotion elicitation and assessment* (S. 318–331). New York: Oxford University Press.

Brosch, T., & Scherer, K. R. (2008). Plädoyer für das Komponenten-Prozess-Modell als theoretische Grundlage der experimentellen Emotionsforschung. In W. Janke, G. Debus, & M. Schmidt-Daffy (Hrsg.), *Experimentelle Emotionspsychologie: Methodische Ansätze, Probleme und Ergebnisse* (S. 193–204). Lengerich: Pabst.

Brosch, T., & Sharma, D. (2005). The role of fear-relevant stimuli in visual search: A comparison of phylogenetic and ontogenetic stimuli. *Emotion*, *5*(3), 360–364.

Brosch, T., Sander, D., & Scherer, K. R. (2007). That baby caught my eye... Attention capture by infant faces. *Emotion*, *7*(3), 685–689. doi:10.1037/1528-3542.7.3.685.

Brosch, T., Pourtois, G., & Sander, D. (2010). The perception and categorisation of emotional stimuli: A review. *Cognition and Emotion*, *24*(3), 377–400.

Brown, R., & Kulik, J. (1977). Flashbulb memories. *Cognition*, *5*(1), 73–99.

Brown, S. P., Homer, P. M., & Inman, J. J. (1998). A meta-analysis of relationships between ad-evoked feelings and advertising responses. *Journal of Marketing Research*, *35*(1), 114–126. doi:10.2307/3151934.

Butler, E. A., Egloff, B., Wlhelm, F. H., Smith, N. C., Erickson, E. A., & Gross, J. J. (2003). The social consequences of expressive suppression. *Emotion*, *3*(1), 48–67.

Cacioppo, J. T., Berntson, G. G., Larsen, J. T., Poehlman, T. A., & Ito, T. A. (2000). The psychophysiology of emotion. In M. Lewis, & J. M. Haviland (Hrsg.), *Handbook of emotions* (S. 173–191). New York: Guilford Press.

Cacioppo, J. T., Berntson, G. G., Norris, C. J., & Gollan, J. K. (2012). The evaluative space model. In P. A. M. Van Lange, A. W. Kruglanski, & E. T. Higgins (Hrsg.), *Handbook of theories of social psychology* (Bd. 1, S. 50–72). Thousand Oaks: CA: Sage Publications Ltd..

Camras, L. A. (1977). Facial expressions used by children in a conflict situation. *Child Development*, *48*(4), 1431–1435.

Cannon, W. B. (1927). The James-Lange theory of emotions: a critical examination and an alternative theory. *American Journal of Psychology*, *39*, 106–124.

Carstensen, L. L., Gottman, J. M., & Levenson, R. W. (1995). Emotional behavior in long-term marriage. *Psychology and Aging*, *10*(1), 140–149. doi:10.1037/0882-7974.10.1.140.

Carver, C. S., & Harmon-Jones, E. (2009). Anger is an approach-related affect: Evidence and implications. *Psychological Bulletin*, *135*(2), 183–204. doi:10.1037/a0013965.

Carver, C. S., & Scheier, M. F. (1990). Origins and functions of positive and negative affect: A control-process view. *Psychological Review*, *97*(1), 19–35.

Chapman, T. F. (1997). The epidemiology of fears and phobias. In G. C. L. Davey (Hrsg.), *Phobias: A handbook of theory, research and treatment* (S. 415–434). London: Wiley.

Charland, L. C. (2005). The heat of emotion: Valence and the demarcation problem. *Journal of Consciousness Studies*, *12*, 82–102.

Christianson, S.-Å. (1992). Emotional stress and eyewitness memory: A critical review. *Psychological Bulletin*, *112*(2), 284–309. doi:10.1037/0033-2909.112.2.284.

Christianson, S.-Å., & Hübinette, B. (1993). Hands upp: A study of witnesses' emotional reactions and memories associated with bank robberies. *Applied Cognitive Psychology*, *7*(5), 365–379. doi:10.1002/acp.2350070502.

Clore, G. L., & Huntsinger, J. R. (2007). How emotions inform judgment and regulate thought. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(9), 393–399.

Clore, G. L., & Ortony, A. (2000). Cognition in emotion: Always, sometimes, or never? In R. D. Lane, & L. Nadel (Hrsg.), *Cognitive neuroscience of emotion* (S. 24–61). New York: Oxford University Press.

Cook, M., & Mineka, S. (1990). Selective associations in the observational conditioning of fear in rhesus monkeys. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *16*(4), 372–389.

Coombes, S. A., Cauraugh, J. H., & Janelle, C. M. (2007). Emotional state and initiating cue alter central and peripheral motor processes. *Emotion*, *7*(2), 275–284.

Cosmides, L., & Tooby, J. (2000). Evolutionary psychology and the emotions. In M. Lewis, & J. M. Haviland-Jones (Hrsg.), *Handbook of emotions* (2. Aufl. S. 91–115). New York: Guilford Press.

Costafreda, S. G., Brammer, M. J., David, A. S., & Fu, C. H. Y. (2008). Predictors of amygdala activation during the processing of emotional stimuli: A meta-analysis of 385 PET and fMRI studies. *Brain Research Reviews*, *58*(1), 57–70. doi:10.1016/j.brainresrev.2007.10.012.

Craig, A. D. (2011). Significance of the insula for the evolution of human awareness of feelings from the body: Insula and awareness. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1225*(1), 72–82. doi:10.1111/j.1749-6632.2011.05990.x.

Critchley, H. D., Wiens, S., Rotshtein, P., Öhman, A., & Dolan, R. J. (2004). Neural systems supporting interoceptive awareness. *Nature Neuroscience*, *7*(2), 189–195. doi:10.1038/nn1176.

Cunningham, W. A., Dunfield, K. A., & Stillman, P. E. (2013). Emotional states from affective dynamics. *Emotion Review*, *5*(4), 344–355. doi:10.1177/1754073913489749.

Dalgleish, T. (2004). The emotional brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *5*(7), 583–589. doi:10.1038/nrn1432.

Dalgleish, T., Dunn, B. D., & Mobbs, D. (2009). Affective neuroscience: Past, present, and future. *Emotion Review*, *1*(4), 355–368.

Damasio, A. (1998). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. In A. C. Roberts, T. W. Robbins, & L. Weiskrantz (Hrsg.), *The prefrontal cortex: Executive and cognitive functions* (S. 36–50). New York: Oxford University Press.

Damasio, A. (1999). *The feeling of what happens: Body and emotion in the making of consciousness*. Fort Worth: Harcourt College Publishers.

Danziger, K. (1997). *Naming the mind: How psychology found its language*. Thousand Oaks: Sage Publications.

Darwin, C. (1872). *The expression of emotion in man and animals*. London: William Clows und Sons.

Davidson, P. S. R. (2008). The cognitive and neural bases of flashbulb memories. In D. Ekrem, A. Easton, L. Nadel, & J. P. Huston (Hrsg.), *Handbook of episodic memory* (Bd. 18, S. 81–97). Amsterdam: Elsevier.

Deffenbacher, J. L., Oetting, E. R., & DiGiuseppe, R. A. (2002). Principles of empirically supported interventions applied to anger management. *The Counseling Psychologist*, *30*(2), 262–280. doi:10.1177/0011000002302004.

Diener, E., Lucas, R. E., & Scollon, C. N. (2006). Beyond the hedonic treadmill: Revising the adaptation theory of well-being. *American Psychologist*, *61*(4), 305–314. doi:10.1037/0003-066X.61.4.305.

DiGiuseppe, R., & Tafrate, R. C. (2003). Anger treatment for adults: A meta-analytic review. *Clinical Psychology: Science and Practice*, *10*(1), 70–84. doi:10.1093/clipsy.10.1.70.

Dimberg, U. (1990). Facial electromyography and emotional reactions. *Psychophysiology*, *27*(5), 481–494. doi:10.1111/j.1469-8986.1990.tb01962.x.

Dreisbach, G., & Goschke, T. (2004). How positive affect modulates cognitive control: Reduced perseveration at the cost of increased distractibility. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*(2), 343–353. doi:10.1037/0278-7393.30.2.343.

Duffy, E. (1934). Emotion: An example of the need for reorientation in psychology. *Psychological Review*, *41*(2), 184–198. doi:10.1037/h0074603.

Dunn, B. D., Dalgleish, T., & Lawrence, A. D. (2006). The somatic marker hypothesis: A critical evaluation. *Neuroscience und Biobehavioral Reviews*, *30*(2), 239–271.

Ebbinghaus, E. (1907). Psychologie. In P. Hinneberg (Hrsg.), *Systematische Philosophie* (S. 173). Berlin/Leipzig: Druck und Verlag von B G Teubner.

Eder, A. B., & Dignath, D. (2013). Messung von Verhaltenstendenzen der Annäherung und Vermeidung: Eine praktische Anleitung [Measurement of approach and avoidance tendences: A manual]. In C. Bermeitinger (Hrsg.), *Paradigmen der Kognitiven Psychologie: Affektive Reize II* (S. 217–237). Berlin: Uni-Edition.

Eder, A. B., & Rothermund, K. (2008). When do motor behaviors (mis)match affective stimuli? An evaluative coding view of approach and avoidance reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*(2), 262–281.

Eder, A. B., & Rothermund, K. (2013). Emotional action: An ideomotor model. In C. Mohiyeddini, & M. Eysenck (Hrsg.), *Handbook of psychology of emotions: Recent theoretical perspectives and novel empirical findings* (Bd. 1, S. 11–38). Hauppauge, NY: Nova Science Publishers.

Eder, A. B., Hommel, B., & De Houwer, J. (2007). How distinctive is affective processing? On the implications of using cognitive paradigms to study affect and emotion. *Cognition and Emotion*, *21*(6), 1137–1154.

Edery-Halpern, G., & Nachson, I. (2004). Distinctiveness in flashbulb memory: Comparative analysis of five terrorist attacks. *Memory*, *12*(2), 147–157.

Eisenberger, N. I., Lieberman, M. D., & Williams, K. D. (2003). Does rejection hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*, *302*(5643), 290–292. doi:10.1126/science.1089134.

Ekkekakis, P. (2013). *The measurement of affect, mood, and emotion: A guide for health-behavioral research*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*, *6*(3–4), 169–200.

Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *American Psychologist*, *48*(4), 384–392.

Ekman, P., & Friesen, W. V. (1971). Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, *17*(2), 124–129.

Ekman, P., & Rosenberg, E. L. (1997). *What the face reveals: Basic and applied studies of spontaneous expression using the Facial Action Coding System (FACS)*. Bd. xvi. New York: Oxford University Press.

Ekman, P., Sorenson, E. R., & Friesen, W. V. (1969). Pan-cultural elements in facial displays of emotion. *Science*, *164*(3875), 86–88.

Ekman, P., Levenson, R. W., & Friesen, W. V. (1983). Autonomic nervous system activity distinguishes among emotions. *Science*, *221*(4616), 1208–1210.

Elfenbein, H. A., & Ambady, N. (2002). On the universality and cultural specificity of emotion recognition: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *128*(2), 203–235. doi:10.1037/0033-2909.128.2.203.

Elliot, A. J. (2008). Approach and avoidance motivation. In A. J. Elliot (Hrsg.), *Handbook of approach and avoidance motivation* (S. 3–14). New York: Psychology Press.

Elliot, A. J., Eder, A. B., & Harmon-Jones, E. (2013). Approach-avoidance motivation and emotion: Convergence and divergence. *Emotion Review*, *5*(3), 308–311. doi:10.1177/1754073913477517.

Ellsworth, P. C. (1994). William James and emotion: Is a century of fame worth a century of misunderstanding? *Psychological Review*, *101*(2), 222–229.

Ellsworth, P. C., & Scherer, K. R. (2003). Appraisal processes in emotion. In R. J. Davidson, K. R. Scherer, & H. H. Goldsmith (Hrsg.), *Handbook of affective sciences* (S. 572–595). New York: Oxford University Press.

Erdmann, G., & Lindern, B. van (1980). The effects of beta-adrenergic stimulation and beta-adrenergic blockade on emotional reactions. *Psychophysiology*, *17*(4), 332–338.

Fazio, R. H. (2007). Attitudes as object-evaluation associations of varying strength. *Social Cognition*, *25*(5), 603–637.

Fehr, B., & Russell, J. A. (1984). Concept of emotion viewed from a prototype perspective. *Journal of Experimental Psychology: General*, *113*(3), 464–486. doi:10.1037/0096-3445.113.3.464.

Fischer, A. H., & Manstead, A. S. R. (2008). Social functions of emotions. In M. Lewis, J. M. Haviland-Jones, & L. F. Barrett (Hrsg.), *Handbook of emotions* (3. Aufl. S. 456–468). New York: Guilford Press.

Fontaine, J. R. J., Scherer, K. R., Roesch, E. B., & Ellsworth, P. C. (2007). The world of emotions is not two-dimensional. *Psychological Science*, *18*(12), 1050–1057.

Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: The broaden-and-build theory of positive emotions. *American Psychologist*, *56*(3), 218–226.

Fridlund, A. J. (1994). *Human facial expression: An evolutionary view*. San Diego, CA: Academic Press.

Fridlund, A. J., & Russell, J. A. (2006). The functions of facial expressions: What's in a face? In V. Manusov, & M. L. Patterson (Hrsg.), *The Sage handbook of nonverbal communication* (S. 299–319). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.

Friedman, B. H. (2010). Feelings and the body: The Jamesian perspective on autonomic specificity of emotion. *Biological Psychology*, *84*(3), 383–393. doi:10.1016/j.biopsycho.2009.10.006.

Friesen, W. V. (1973). *Cultural differences in facial expressions in a social situation: An experimental test on the concept of display rules*. San Francisco, US: University of California.

Frijda, N. H. (1986). *The emotions*. New York: Cambridge University Press.

Frijda, N. H. (1988). The laws of emotion. *American Psychologist*, *43*(5), 349–358.

Frijda, N. H., Kuipers, P., & Schure, E. ter (1989). Relations among emotion, appraisal, and emotional action readiness. *Journal of Personality and Social Psychology*, *57*(2), 212–228.

Galati, D., Miceli, R., & Sini, B. (2001). Judging and coding facial expression of emotions in congenitally blind children. *International Journal of Behavioral Development*, *25*(3), 268–278.

Gasper, K., & Clore, G. L. (2002). Attending to the big picture: Mood and global versus local processing of visual information. *Psychological Science*, *13*(1), 34–40. doi:10.1111/1467-9280.00406.

Gendron, M., & Barrett, L. F. (2009). Reconstructing the past: A century of ideas about emotion in psychology. *Emotion Review*, *1*(4), 316–339.

Gerull, F. C., & Rapee, R. M. (2002). Mother knows best: The effects of maternal modelling on the acquisition of fear and avoidance behaviour in toddlers. *Behaviour Research and Therapy*, *40*(3), 279–287.

Gosselin, P., Kirouac, G., & Doré, F. Y. (1995). Components and recognition of facial expression in the communication of emotion by actors. *Journal of Personality and Social Psychology*, *68*(1), 83–96. doi:10.1037/0022-3514.68.1.83.

Gray, J. A., & McNaughton, N. (2000). *The neuropsychology of anxiety: An enquiry into the function of the septo-hippocampal system*. New York: Oxford University Press.

Green, D. P., Goldman, S. L., & Salovey, P. (1993). Measurement error masks bipolarity in affect ratings. *Journal of Personality and Social Psychology*, *64*(6), 1029–1041. doi:10.1037/0022-3514.64.6.1029.

Gross, J. J. (1998). Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *Journal of Personality and Social Psychology*, *74*(1), 224–237.

Gross, J. J., & Levenson, R. W. (1997). Hiding feelings: The acute effects of inhibiting negative and positive emotion. *Journal of Abnormal Psychology*, *106*(1), 95–103.

Gross, J. J., & Thompson, R. A. (2007). Emotion regulation: Conceptual foundations. In J. J. Gross (Hrsg.), *Handbook of emotion regulation* (S. 3–24). New York: Guilford Press.

Gross, J. J. & Barrett, L. F. (2013). The emerging field of affective science. *Emotion*, *13*(6), 997–998.

Hammond, D. (2011). Health warning messages on tobacco products: A review. *Tobacco Control*, *20*, 327–337. doi:10.1136/tc.2010.037630.

Hänze, M., & Hesse, F. W. (1993). Emotional influences on semantic priming. *Cognition and Emotion*, *7*(2), 195–205. doi:10.1080/02699939308409184.

Harlow, J. M. (1869). 1993). Recovery from the passage of an iron bar through the head. *History of Psychiatry*, *4*(14), 274–281.

Harmon-Jones, E., Gable, P. A., & Peterson, C. K. (2010). The role of asymmetric frontal cortical activity in emotion-related phenomena: A review and update. *Biological Psychology*, *84*(3), 451–462. doi:10.1016/j.biopsycho.2009.08.010.

Horstmann, G. (2003). What do facial expressions convey: Feeling states, behavioral intentions, or actions requests? *Emotion*, *3*(2), 150–166.

Izard, C. E. (1994). Innate and universal facial expressions: Evidence from developmental and cross-cultural research. *Psychological Bulletin*, *115*(2), 288–299.

Izard, C. E. (2010). The many meanings/aspects of emotion: Definitions, functions, activation, and regulation. *Emotion Review*, *2*(4), 363–370. doi:10.1177/1754073910374661.

James, W. (1884). What is an emotion? *Mind*, *9*, 188–205.

Jones, M. C. (1924). A laboratory study of fear: The case of Peter. *The Pedagogical Seminary*, *31*, 308–316.

Keillor, J. M., Barrett, A. M., Crucian, G. P., Kortenkamp, S., & Heilman, K. M. (2002). Emotional experience and perception in the absence of facial feedback. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *8*(1), 130–135.

Keltner, D., & Gross, J. J. (1999). Functional accounts of emotions. *Cognition and Emotion*, *13*(5), 467–480.

Keltner, D., & Haidt, J. (1999). Social functions of emotions at four levels of analysis. *Cognition and Emotion*, *13*(5), 505–521.

Koole, S. L. (2009). The psychology of emotion regulation: An integrative review. *Cognition and Emotion*, *23*(1), 4–41.

Kraut, R. E., & Johnston, R. E. (1979). Social and emotional messages of smiling: An ethological approach. *Journal of Personality and Social Psychology*, *37*(9), 1539–1553.

Kreibig, S. D. (2010). Autonomic nervous system activity in emotion: A review. *Biological Psychology*, *84*(3), 394–421.

Kvavilashvili, L., Mirani, J., Schlagman, S., Foley, K., & Kornbrot, D. E. (2009). Consistency of flashbulb memories of September 11 over long delays: Implications for consolidation and wrong time slice hypotheses. *Journal of Memory and Language*, *61*(4), 556–572. doi:10.1016/j.jml.2009.07.004.

Laham, S. M., Kashima, Y., Dix, J., & Wheeler, M. (2014). A meta-analysis of the facilitation of arm flexion and extension movements as a function of stimulus valence. *Cognition and Emotion*, *29*(6), 1069–1090. doi:10.1080/02699931.2014.968096.

Laird, J. D., & Lacasse, K. (2014). Bodily influences on emotional Feelings: Accumulating evidence and extensions of William James's theory of emotion. *Emotion Review*, *6*(1), 27–34. doi:10.1177/1754073913494899.

Lambie, J. A., & Marcel, A. J. (2002). Consciousness and the varieties of emotion experience: A theoretical framework. *Psychological Review*, *109*(2), 219–259.

Landweer, H., & Renz, U. (2012). *Handbuch Klassische Emotionstheorien: Von Platon bis Wittgenstein*. Berlin: De Gruyter.

Laney, C., Campbell, H. V., Heuer, F., & Reisberg, D. (2004). Memory for thematically arousing events. *Memory und Cognition*, *32*(7), 1149–1159. doi:10.3758/BF03196888.

Lang, P. J. (1995). The emotion probe: Studies of motivation and attention. *American Psychologist*, *50*(5), 372–385.

Lang, P. J., & Bradley, M. M. (2010). Emotion and the motivational brain. *Biological Psychology*, *84*(3), 437–450. doi:10.1016/j.biopsycho.2009.10.007.

Lange, C. G. (1887/2012). *Über Gemütsbewegungen: Eine psycho-physiologische Studie*. (H. Kurella, Übers.). Barsinghausen, DE: Unikum-Verlag.

Larsen, J. T., Berntson, G. G., Poehlmann, K. M., Ito, T. A., & Cacioppo, J. T. (2008). The psychophysiology of emotion. In M. Lewis, J. M. Haviland-Jones, & L. F. Barrett (Hrsg.), *Handbook of emotions* (3. Aufl. S. 180–195). New York: Guilford Press.

Lazarus, R. S. (1982). Thoughts on the relations between emotion and cognition. *American Psychologist*, *37*(9), 1019–1024.

Lazarus, R. S. (1984). On the primacy of cognition. *American Psychologist*, *39*(2), 124–129.

Lazarus, R. S. (1991). Progress on a cognitive-motivational-relational theory of emotion. *American Psychologist*, *46*(8), 819–834.

Lazarus, R. S., Opton Jr., E. M., Nomikos, M. S., & Rankin, N. O. (1965). The principle of short-circuiting of threat: Further evidence. *Journal of Personality*, *33*(4), 622–635.

LeDoux, J. E. (1996). *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*. New York: Simon und Schuster Paperbacks.

LeDoux, J. E. (2000). Emotion circuits in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, *23*, 155–184.

Lench, H. C., Flores, S. A., & Bench, S. W. (2011). Discrete emotions predict changes in cognition, judgment, experience, behavior, and physiology: A meta-analysis of experimental emotion elicitations. *Psychological Bulletin*, *137*(5), 834–855. doi:10.1037/a0024244.

Lerner, J. S., & Keltner, D. (2000). Beyond valence: Toward a model of emotion-specific influences on judgement and choice. *Cognition and Emotion*, *14*(4), 473–493. doi:10.1080/026999300402763.

Lerner, J. S., & Tiedens, L. Z. (2006). Portrait of the angry decision maker: How appraisal tendencies shape anger's influence on cognition. *Journal of Behavioral Decision Making*, *19*(2), 115–137. doi:10.1002/bdm.515.

Levenson, R. W. (1999). The intrapersonal functions of emotion. *Cognition and Emotion*, *13*(5), 481–504.

Levine, L. J., & Edelstein, R. S. (2009). Emotion and memory narrowing: A review and goal-relevance approach. *Cognition and Emotion*, *23*(5), 833–875.

Lindquist, K. A., Gendron, M., Barrett, L. F., & Dickerson, B. C. (2014). Emotion perception, but not affect perception, is impaired with semantic memory loss. *Emotion*, *14*(2), 375–387. doi:10.1037/a0035293.supp.

MacLean, P. D. (1949). Psychosomatic disease and the „visceral brain": Recent developments bearing on the Papez theory of emotion. *Psychosomatic Medicine*, *11*, 338–353.

Macmillan, M. (2002). *An odd kind of fame: Stories of Phineas Gage*. Cambridge, MA: MIT Press.

Malatesta, C. Z., & Haviland, J. M. (1982). Learning display rules: The socialization of emotion expression in infancy. *Child Development*, *53*(4), 991–1003. doi:10.2307/1129139.

Mandler, G. (1964). The interruption of behavior. *Nebraska Symposium on Motivation*, *12*, 163–219.

Marsh, A. A., Ambady, N., & Kleck, R. E. (2005). The effects of fear and anger facial expressions on approach- and avoidance-related behaviors. *Emotion*, *5*(1), 119–124. doi:10.1037/1528-3542.5.1.119.

Matsumoto, D. (2006). Culture and nonverbal behavior. In V. Manusov, & M. L. Patterson (Hrsg.), *The Sage handbook of nonverbal communication* (S. 219–235). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.

Mauss, I. B., Levenson, R. W., McCarter, L., Wilhelm, F. H., & Gross, J. J. (2005). The tie that binds? Coherence among emotion experience, behavior, and physiology. *Emotion*, *5*(2), 175–190.

McDougall, W. (1909). *An introduction to social psychology* (2. Aufl.). Boston, MA: John W Luce und Company.

McGaugh, J. L. (2004). The amygdala modulates the consolidation of memories of emotionally arousing experiences. *Annual Review of Neuroscience*, *27*(1), 1–28.

Melo, C. M. de, Carnevale, P. J., Read, S. J., & Gratch, J. (2014). Reading people's minds from emotion expressions in interdependent decision making. *Journal of Personality and Social Psychology*, *106*(1), 73–88. doi:10.1037/a0034251.

Morris, J. S., Öhman, A., & Dolan, R. J. (1998). Conscious and unconscious emotional learning in the human amygdala. *Nature*, *393*(6684), 467–470. doi:10.1038/30976.

Murray, E. A. (2007). The amygdala, reward and emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(11), 489–497. doi:10.1016/j.tics.2007.08.013.

Myers, L. B., Burns, J. W., Derakshan, N., Elfant, E., Eysenck, M. W., & Phipps, S. (2008). Current issues in repressive coping and health. In A. Vingerhoets, I. Nyklíček, & J. Denollet (Hrsg.), *Emotion regulation: Conceptual and clinical issues* (S. 69–86). New York: Springer Science + Business Media.

Niemann, J., Wisse, B., Rus, D., Yperen, N., & Sassenberg, K. (2014). Anger and attitudinal reactions to negative feedback: The effects of emotional instability and power. *Motivation and Emotion*, *38*(5), 687–699. doi:10.1007/s11031-014-9402-9.

Oatley, K., & Duncan, E. (1994). The experience of emotions in everyday life. *Cognition und Emotion*, *8*(4), 369–381. doi:10.1080/02699939408408947.

Oatley, K., & Johnson-Laird, P. N. (1987). Towards a cognitive theory of emotions. *Cognition und Emotion*, *1*(1), 29–50. doi:10.1080/02699938708408362.

Öhman, A. (2009). Of snakes and faces: An evolutionary perspective on the psychology of fear. *Scandinavian Journal of Psychology*, *50*(6), 543–552.

Öhman, A., & Mineka, S. (2001). Fears, phobias, and preparedness: Toward an evolved module of fear and fear learning. *Psychological Review*, *108*(3), 483–522.

Ortony, A., & Turner, T. J. (1990). What's basic about basic emotions? *Psychological Review*, *97*(3), 315–331.

Panksepp, J. (1998). *Affective neuroscience: The foundations of human and animal emotions*. New York: Oxford University Press.

Panksepp, J. (2005). Affective consciousness: Core emotional feelings in animals and humans. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, *14*(1), 30–80.

Panksepp, J. (2011). Cross-species affective neuroscience: Decoding of the primal affective experiences of humans and related animals. *PLoS ONE*, *6*(9), e21236. doi:10.1371/journal.pone.0021236.

Papez, J. W. (1937). A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology und Psychiatry (Chicago)*, *38*, 725–743.

Peterson, C., & Whalen, N. (2001). Five years later: Children's memory for medical emergencies. *Applied Cognitive Psychology*, *15*(7), 7–24. doi:10.1002/acp.832.

Plutchik, R. (2001). The nature of emotions. *American Scientist*, *89*(4), 344–350. doi:10.1511/2001.4.344.

Rakison, D. H., & Derringer, J. (2008). Do infants possess an evolved spider-detection mechanism? *Cognition*, *107*(1), 381–393.

Reisenzein, R. (1983). The Schachter theory of emotion: Two decades later. *Psychological Bulletin*, *94*(2), 239–264.

Reisenzein, R. (2000). Exploring the strength of association between the components of emotion syndromes: The case of surprise. *Cognition and Emotion*, *14*(1), 1–38.

Rolls, E. T. (2005). *Emotion explained*. Oxford, England: Oxford University Press.

Roseman, I. J. (1984). Cognitive determinants of emotion: A structural theory. *Review of Personality und Social Psychology*, *5*, 11–36.

Roseman, I. J., Wiest, C., & Swartz, T. S. (1994). Phenomenology, behaviors, and goals differentiate discrete emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *67*(2), 206–221.

Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, *39*(6), 1161–1178. doi:10.1037/h0077714.

Russell, J. A. (1991). Culture and the categorization of emotions. *Psychological Bulletin*, *110*(3), 426–450.

Russell, J. A. (1994). Is there universal recognition of emotion from facial expressions? A review of the cross-cultural studies. *Psychological Bulletin*, *115*(1), 102–141.

Russell, J. A. (2003). Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychological Review*, *110*(1), 145–172.

Russell, J. A. (2009). Emotion, core affect, and psychological construction. *Cognition and Emotion*, *23*(7), 1259–1283.

Russell, J. A., & Carroll, J. M. (1999). On the bipolarity of positive and negative affect. *Psychological Bulletin*, *125*(1), 3–30. doi:10.1037/0033-2909.125.1.3.

Safer, M. A., Christianson, S.-Å., Autry, M. W., & Österlund, K. (1998). Tunnel memory for traumatic events. *Applied Cognitive Psychology*, *12*(2), 99–117.

Schachter, S. (1964). The interaction of cognitive and physiological determinants of emotional state. In L. Berkowitz (Hrsg.), *Advances in Experimental Social Psychology* (Bd. 1, S. 49–80). New York: Academic Press.

Schachter, S., & Singer, J. (1962). Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. *Psychological Review*, *69*(5), 379–399.

Scherer, K. R. (1994). Toward a concept of „modal emotions". In P. Ekman, & R. J. Davidson (Hrsg.), *The nature of emotion: Fundamental questions* (S. 25–31). New York: Oxford University Press.

Scherer, K. R. (2001). Appraisal considered as a process of multilevel sequential checking. In K. R. Scherer, A. Schorr, & T. Johnstone (Hrsg.), *Appraisal processes in emotion: Theory, methods, research* (S. 92–120). New York: Oxford University Press.

Scherer, K. R. (2009). The dynamic architecture of emotion: Evidence for the component process model. *Cognition and Emotion*, *23*(7), 1307–1351.

Scherer, K. R., & Wallbott, H. G. (1994). Evidence for universality and cultural variation of differential emotion response patterning. *Journal of Personality and Social Psychology*, *66*(2), 310–328.

Scherer, K. R., Wranik, T., Sangsue, J., Tran, V., & Scherer, U. (2004). Emotions in everyday life: Probability of occurrence, risk factors, appraisal and reaction patterns. *Social Science Information*, *43*(4), 499–570. doi:10.1177/0539018404047701.

Schimmack, U. (2005). Attentional interference effects of emotional pictures: Threat, negativity, or arousal? *Emotion*, *5*(1), 55–66.

Schwarz, N., & Clore, G. L. (1983). Mood, misattribution, and judgments of well-being: Informative and directive functions of affective states. *Journal of Personality and Social Psychology*, *45*(3), 513–523.

Schwarz, N., & Clore, G. L. (2007). Feelings and phenomenal experiences. In A. W. Kruglanski, & E. T. Higgins (Hrsg.), *Social psychology: Handbook of basic principles* (2. Aufl. S. 385–407). New York: Guilford Press.

Schwarz, N., Bless, H., & Bohner, G. (1991). Mood and persuasion: Affective states influence the processing of persuasive communications. In M. P. Zanna (Hrsg.), *Advances in Experimental Social Psychology* (Bd. 24, S. 161–199). New York: Academic Press.

Seligman, M. E. (1971). Phobias and preparedness. *Behavior Therapy*, *2*(3), 307–320.

Seligman, M. E., & Csikszentmihalyi, M. (2000). Positive psychology: An introduction. *American Psychologist*, *55*(1), 5–14. doi:10.1037/0003-066X.55.1.5.

Seligman, M. E., Steen, T. A., Park, N., & Peterson, C. (2005). Positive psychology progress: Empirical validation of interventions. *American Psychologist*, *60*(5), 410–421. doi:10.1037/0003-066X.60.5.410.

Shaver, P., Schwartz, J., Kirson, D., & O'Connor, C. (1987). Emotion knowledge: Further exploration of a prototype approach. *Journal of Personality and Social Psychology*, *52*(6), 1061–1086.

Simon, H. A. (1967). Motivational and emotional controls of cognition. *Psychological Review*, *74*(1), 29–39. doi:10.1037/h0024127.

Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, *303*(5661), 1157–1162. doi:10.1126/science.1093535.

Skinner, B. F. (1953). *Science and human behavior*. Oxford: Macmillan Press.

Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., & MacGregor, D. G. (2007). The affect heuristic. *European Journal of Operational Research*, *177*(3), 1333–1352. doi:10.1016/j.ejor.2005.04.006.

Smith, C. A., & Ellsworth, P. C. (1985). Patterns of cognitive appraisal in emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, *48*(4), 813–838. doi:10.1037/0022-3514.48.4.813.

Soussignan, R. (2004). Regulatory function of facial actions in emotion processes. In S. P. Shohov (Hrsg.), *Advances in psychology research* (Bd. 31, S. 173–198). Hauppauge, NY: Nova Science Publishers.

Steenbergen, H. van, Band, G. P. H., & Hommel, B. (2009). Reward counteracts conflict adaptation: Evidence for a role of affect in executive control. *Psychological Science*, *20*(12), 1473–1477. doi:10.1111/j.1467-9280.2009.02470.x.

Stemmler, G. (2003). Methodological considerations in the psychophysiological study of emotion. In R. J. Davidson, K. R. Scherer, & H. H. Goldsmith (Hrsg.), *Handbook of affective sciences* (S. 225–255). New York: Oxford University Press.

Stemmler, G., Aue, T., & Wacker, J. (2007). Anger and fear: Separable effects of emotion and motivational direction on somatovisceral responses. *International Journal of Psychophysiology*, *66*(2), 141–153. doi:10.1016/j.ijpsycho.2007.03.019.

Storbeck, J., & Clore, G. L. (2005). With sadness comes accuracy; with happiness, false memory: Mood and the false memory effect. *Psychological Science*, *16*(10), 785–791. doi:10.1111/j.1467-9280.2005.01615.x.

Strack, F., Martin, L. L., & Stepper, S. (1988). Inhibiting and facilitating conditions of the human smile: A nonobtrusive test of the facial feedback hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*(5), 768–777.

Sukhodolsky, D. G., Kassinove, H., & Gorman, B. S. (2004). Cognitive-behavioral therapy for anger in children and adolescents: a meta-analysis. *Aggression and Violent Behavior*, *9*(3), 247–269. doi:10.1016/j.avb.2003.08.005.

Tamir, M., Mitchell, C., & Gross, J. J. (2008). Hedonic and instrumental motives in anger regulation. *Psychological Science*, *19*(4), 324–328.

Tiedens, L. Z. (2001). Anger and advancement versus sadness and subjugation: The effect of negative emotion expressions on social status conferral. *Journal of Personality and Social Psychology*, *80*(1), 86–94. doi:10.1037/0022-3514.80.1.86.

Tomkins, S. S. (1962). *The positive affects*. Affect, imagery, consciousness, Bd. I. Oxford: Springer.

Tourangeau, R., & Ellsworth, P. C. (1979). The role of facial response in the experience of emotion. *Journal of Personality and Social Psychology*, *37*(9), 1519–1531.

Tracy, J. L., & Randles, D. (2011). Four models of basic emotions: A review of Ekman and Cordaro, Izard, Levenson, and Panksepp and Watt. *Emotion Review*, *3*(4), 397–405. doi:10.1177/1754073911410747.

Valins, S. (1966). Cognitive effects of false heart-rate feedback. *Journal of Personality and Social Psychology*, *4*(4), 400–408.

Vogt, J., De Houwer, J., Koster, E. H. W., Van Damme, S., & Crombez, G. (2008). Allocation of spatial attention to emotional stimuli depends upon arousal and not valence. *Emotion*, *8*(6), 880–885.

Vuilleumier, P., & Brosch, T. (2009). Interactions of emotion and attention. In M. S. Gazzaniga (Hrsg.), *The cognitive neurosciences* (Bd. IV, S. 925–934). Cambridge, MA: MIT Press.

Walker, W. R., Skowronski, J. J., Gibbons, J. A., Vogl, R. J., & Ritchie, T. D. (2009). Why people rehearse their memories: Frequency of use and relations to the intensity of emotions associated with autobiographical memories. *Memory*, *17*(7), 760–773.

Watson, J. B., & Rayner, R. (1920). Conditioned emotional reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *3*(1), 1–14.

Watson, D., & Tellegen, A. (1985). Toward a consensual structure of mood. *Psychological Bulletin*, *98*(2), 219–235. doi:10.1037/0033-2909.98.2.219.

Watson, D., & Tellegen, A. (1999). Issues in dimensional structure of affect – effects of descriptors, measurement error, and response formats: Comment on Russell and Carroll (1999). *Psychological Bulletin*, *125*(5), 601–610.

Watson, D., Wiese, D., Vaidya, J., & Tellegen, A. (1999). The two general activation systems of affect: Structural findings, evolutionary considerations, and psychobiological evidence. *Journal of Personality and Social Psychology*, *76*(5), 820–838.

Weiner, B. (1985). An attributional theory of achievement motivation and emotion. *Psychological Review*, *92*(4), 548–573.

Wundt, W. M. (1874). *Grundzüge der physiologischen Psychologie*. Leipzig: W. Engelmann.

Yiend, J. (2010). The effects of emotion on attention: A review of attentional processing of emotional information. *Cognition and Emotion*, *24*(1), 3–47.

Yik, M. S. M., Russell, J. A., & Barrett, L. F. (1999). Structure of self-reported current affect: Integration and beyond. *Journal of Personality and Social Psychology*, *77*(3), 600–619.

Zajonc, R. B. (1980). Feeling and thinking: Preferences need no inferences. *American Psychologist*, *35*(2), 151–175.

Zajonc, R. B., Murphy, S. T., & Inglehart, M. (1989). Feeling and facial efference: Implications of the vascular theory of emotion. *Psychological Review*, *96*(3), 395–416.

Zillmann, D. (1983). Transfer of excitation in emotional behavior. In J. T. Cacioppo, & R. E. Petty (Hrsg.), *Social psychophysiology: A sourcebook* (S. 215–240). New York: Guilford Press.

Zajonc, R. B. (1984). On the primacy of affect. *American Psychologist*, *39*(2), 117–123.

Motivation

Rosa Maria Puca und Julia Schüler

8.1 Einleitung: Motive, Anreize und Ziele – die zentralen Begriffe der Motivationspsychologie – 224

8.2 Motivationspsychologische Theorien aus historischer Perspektive – 226

8.2.1 Von Triebtheorien zur Feldtheorie – 226

8.2.2 Erwartungswerttheorien – 228

8.3 Biologische Grundlagen der Motivation – 230

8.4 Implizite, explizite Motive und Motivinkongruenz – 231

8.4.1 Die Geschichte der Unterscheidung in implizite und explizite Motive – 231

8.4.2 Unterscheidungsmerkmale impliziter und expliziter Motive – 232

8.4.3 Motivinkongruenz und seine Folgen – 232

8.4.4 Messung von Motiven – 233

8.5 Motivklassen – 235

8.5.1 Anschluss/Intimität – 235

8.5.2 Macht und Dominanz – 238

8.5.3 Leistung – 239

8.6 Motivation durch Zielsetzung – 241

8.7 Anwendungsbeispiele – 243

8.8 Ausblick – 243

8.9 Weiterführende Informationen – 244

Literatur – 246

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_8

Im Blickfang

Der Wunsch zu siegen und Spaß zu haben

Jährlich findet in Tübingen auf dem Neckar das traditionelle Stocherkahnrennen statt. Etwa 45 Kähne sind mit je acht Personen besetzt (Abb. 8.1). Vom Jubeln und Pfeifen der Zuschauer begleitet stochern und paddeln die Teilnehmer um die Wette. An einer engen Stelle, dem sogenannten Nadelöhr, haben sich die Kontrahenten einer besonderen Herausforderung zu stellen. Hier müssen die Kähne wenden, um den Fluss wieder hinaufzufahren. Weil viele Kähne gleichzeitig die kritische Stelle erreichen, gehen die Teilnehmer nicht selten ins Wasser, um die Boote zu ziehen und danach nass und schmutzig die Fahrt fortzusetzen. Der Sieg bei diesem Rennen ist sehr begehrt; die Sieger stehen bei der Siegesfeier im Zentrum der Aufmerksamkeit und werden mit Freibier und einem Wanderpokal belohnt. Als Letzter hingegen will niemand das Ziel erreichen, denn jede Person des Verliererkahns muss einen halben Liter Lebertran trinken, und die Besatzung ist verpflichtet, das nächste Rennen auszurichten, ohne selbst daran teilnehmen zu dürfen.

Trotz der großen Anstrengungen, die das Rennen erfordert, und trotz der eher geringen Siegeschancen und des äußerst unattraktiven „Trostpreises" nehmen jährlich viele Personen an dem Wettstreit teil. Was veranlasst sie dazu, welche Ziele verfolgen sie damit? Haben sie sich vorgenommen, eine bessere Leistung als im Vorjahr zu erreichen? Genießen sie es, die Aufmerksamkeit der Zuschauer auf sich zu ziehen, wollen sie Spaß mit Freunden haben, oder folgen sie vielleicht nur einer eher ungeliebten Tradition?

Auf welche Ziele Verhalten ausgerichtet ist und mit welcher Ausdauer und Intensität diese Ziele verfolgt werden, ist eine typische Fragestellung der Motivationspsychologie, um die es in diesem Kapitel geht.

Abb. 8.1 Stocherkahnrennen in Tübingen (Künstlerische Umsetzung von Marina Stern)

8.1 Einleitung: Motive, Anreize und Ziele – die zentralen Begriffe der Motivationspsychologie

Warum lesen Sie dieses Kapitel? Tun Sie dies zur Prüfungsvorbereitung? Sind Sie am Thema interessiert? Oder trifft vielleicht beides zu? Der erste Grund ist so gut nachvollziehbar wie der zweite. Selbst für die Teilnahme am oben beschriebenen Stocherkahnrennen mögen sich plausible Gründe finden lassen. Warum aber nehmen Menschen z. B. an Reality Soaps wie *Dschungelcamp* teil, bei dem sie mit anderen wetteifern, indem sie Maden verspeisen oder in ein Gefäß voller Spinnen eintauchen müssen? Warum setzen jedes Jahr Menschen bei der Stierhatz in Pamplona ihr Leben aufs Spiel? Anders gefragt: Warum zeigt man Verhalten, dessen negative Konsequenzen auf den ersten Blick die positiven überwiegen?

Menschen handeln in der Regel nicht wahl- und planlos. Sie verfolgen mit ihrem Verhalten Ziele, die für sie von Bedeutung sind, auch wenn diese für ihr soziales Umfeld und manchmal sogar für sie selbst vielleicht nicht immer unmittelbar nachvollziehbar sind. Die Motivationspsychologie ist eine Teildisziplin der Allgemeinen Psychologie, die solches zielgerichtete Verhalten als Forschungsgegenstand hat. In der Motivationsforschung geht es wie in dem oben aufgeführten Beispiel u. a. um die Frage, auf welche Ziele Verhalten ausgerichtet ist oder, anders formuliert, zu welchem Zweck es ausgeführt wird.

Die Motivationspsychologie berücksichtigt stärker als andere Disziplinen der Allgemeinen Psychologie auch interindividuelle Unterschiede im Zielstreben und überschneidet sich so mit der Persönlichkeits- und Differenziellen Psychologie.

Die Ziele, auf die sich unser Verhalten richtet, sind hierarchisch organisiert. Das bedeutet, dass wir oft Ziele verfolgen, die ihrerseits einem übergeordneten Ziel dienen, das seinerseits wiederum einem darüber liegenden Ziel dient. So kann man z. B. das Ziel haben, eine Klausur zu bestehen, was dem „höher gelegenen" Ziel dient, ein Studium abzuschließen, was dazu dient, ein bestimmtes Berufsziel (Psychologe, Lehrer, Arzt) zu erreichen. Unter anderem durch diese Zielhierarchien sind der Sinn und Zweck mancher Verhaltensweisen nicht unmittelbar ersichtlich. Manchmal muss man zum Erreichen übergeordneter Ziele Verhaltensweisen zeigen, die wenig Spaß machen oder sogar unangenehm sind. Letztlich dient aber motiviertes, d. h. zielgerichtetes, Verhalten dem Zweck, langfristig unser Wohlbefinden zu steigern.

Menschen sowie Tiere streben danach, ihr Wohlbefinden durch eine Optimierung der Affektbilanz zu maximieren, indem sie Ereignisse, die positive Affekte auslösen, herbeizuführen und

Ereignisse, die negative Affekte auslösen, zu verhindern suchen (*Affektoptimierung*). Die Basis dieser beiden Strategien zur Optimierung der Affektbilanz stellen ein aversives und ein appetitives Motivationssystem dar. Diese beiden Systeme sind die Grundlage für Annäherungs- und Vermeidungsverhalten. Sie werden durch einen Mechanismus aktiviert, den wir im Folgenden als *Affektantizipation* bezeichnen. Reize, die negative Affekte hervorrufen oder erwarten lassen, aktivieren das *aversive Motivationssystem*. Dadurch wird Verhalten in Gang gesetzt, das geeignet ist, die negativen Affekte zu minimieren oder zu verhindern. Das kann z. B. Flucht oder Vermeidungsverhalten sein. Negative Affekte können aber nicht nur durch aktuell vorhandene Reize, wie eine akute Gefahr, sondern auch durch vorgestellte zukünftige Ereignisse und mögliche Zielzustände – etwa Schmerz oder eine Niederlage – hervorgerufen werden. Reize, die positive Affekte hervorrufen, oder vorgestellte zukünftige Ereignisse und Zielzustände, die positive Affekte erwarten lassen (z. B. ein Sieg oder ein Zusammensein mit Freunden), aktivieren das appetitive Motivationssystem. Sie setzen Verhalten zur Aufrechterhaltung oder Erreichung der positiven Reize und Ereignisse in Gang.

Die o. g. Reize und Ereignisse erhalten durch die Affekte, die sie hervorrufen oder ankündigen, *Anreizcharakter*. Welche Reize und Ereignisse wir mit welchen Affekten verbinden, kann angeboren oder erlernt sein. Schmerz und Nahrungsreize können z. B. ungelernt Affekte hervorrufen und entsprechendes *Annäherungs-* bzw. *Vermeidungsverhalten* in Gang setzen. Wenn solche Reize in der Vergangenheit mit neutralen Reizen gekoppelt waren, können auch die neutralen Reize Anreizcharakter erhalten. Neben Reizen und Ereignissen können auch Tätigkeiten Anreizcharakter haben. So kann z. B. Joggen mit positiven Affekten verbunden sein, weil die Tätigkeit selbst Spaß macht, unabhängig davon, ob man eine bestimmte Bestzeit erreichen oder ein Rennen gewinnen will. Heckhausen (1977) unterscheidet in diesem Zusammenhang *Tätigkeitsanreize* und *Folgeanreize*.

Ob und wie stark Reize oder Ereignisse nun tatsächlich Affekte hervorrufen bzw. erwarten lassen, hängt nicht nur von den Reizen selbst, sondern beim Menschen wie bei Tieren auch vom Zustand bzw. von Merkmalen des Organismus ab. Nahrungsreize aktivieren z. B. das appetitive System stärker, wenn sie auf einen hungrigen Organismus treffen. Ein satter Mensch wird hingegen wahrscheinlich nur wenig oder gar keine Anstrengungen unternehmen, um an ein trockenes Stück Brot zu gelangen, weil das Brot keinen Anreizcharakter für ihn hat. **Anreize** können allerdings auch unabhängig von den Merkmalen des Organismus variieren. So wird z. B. ein frisches und reich belegtes Brot sowohl für den hungrigen als auch für den satten Menschen einen höheren Anreizcharakter haben als das trockene Stück Brot. Die Variablen auf der Organismusseite bezeichnet man als *Motive* oder als *Bedürfnisse*.

Konkret versteht man unter einem **Motiv** die latente (d. h. nicht direkt beobachtbare) Bereitschaft, emotional auf Reize und Ereignisse zu reagieren, die die Möglichkeit der Annäherung an eine definierbare Klasse von Zielzuständen signalisieren. Die Antizipation eines Zielzustands (z. B. die Aussicht auf einen Sieg) setzt in der Folge Verhalten in Gang, das dem Erreichen bzw. der Aufrechterhaltung des Zielzustands dient (z. B. Anstrengung bei einer Leistungsaufgabe). Motive sind also Bewertungsdispositionen. Sie bestimmen, wie stark positiv Reize oder Ereignisse bewertet werden und so einen mehr oder weniger deutlichen Anreizcharakter erhalten. Der Begriff „Disposition" besagt, dass sie wie andere Persönlichkeitseigenschaften zeitlich relativ stabil sind.

Schneider und Schmalt (1994, S. 14) schlagen eine Definition des Motivbegriffs vor, in der dies zum Ausdruck kommt. Sie greifen dabei auf die Instinktdefinition von McDougall (1908) zurück und bezeichnen ein Motiv dementsprechend als eine „… psychophysische Disposition, welche ihren Besitzer befähigt, bestimmte Gegenstände wahrzunehmen und ihnen Aufmerksamkeit zu schenken, durch die Wahrnehmung eines solchen Gegenstands eine emotionale Erregung von ganz bestimmter Qualität zu erleben und daraufhin in einer bestimmten Weise zu handeln oder wenigstens den Impuls zu solch einer Handlung zu erleben".

Damit bestimmen Motive in entscheidendem Maße, was uns emotional anregt, welchen Aspekten unserer Umgebung wir entscheidend Aufmerksamkeit schenken, worauf wir uns (auch im übertragenen Sinne) zubewegen und was wir zu vermeiden versuchen.

In der Motivationspsychologie werden Motive verschiedenen Zielen und Zielzuständen zugeordnet. Dabei werden thematisch ähnliche Ziele zu Inhaltsklassen zusammengefasst. In ► Abschn. 8.5 werden einige biogene und soziogene Motive sowie die dazugehörigen Zielzustände und Anreize genauer beschrieben. Ursprünglich hat man unter *biogenen Motiven* solche Motive verstanden, die eher mit Reizen zusammenwirken, die ungelernt emotionale Qualität besitzen und eine starke genetische Basis haben. Es handelt sich hierbei z. B. um die Motive Hunger, Durst und Sexualität. Als *soziogene Motive* wurden Motive bezeichnet, die stark durch Lern- und Sozialisationsprozesse geformt sind. Dazu zählen z. B. die Motive **Anschluss/Intimität**, **Macht** und **Leistung**. Auch diese Motive sind wie Hunger und Durst Bewertungsdispositionen, durch die bestimmt wird, welche Reize und Ereignisse Anreizcharakter haben bzw. bekommen können und welche Zielzustände angestrebt werden. Soziogene Motive basieren jedoch nicht auf aktuellen biologischen Bedürfnissen, sondern auf Persönlichkeitseigenschaften, die im Lauf der Sozialisation entstehen. Für eine Person mag z. B. der Sieg in einem Wettbewerb Anreizcharakter haben, weil sie damit positive Affekte wie Stolz oder Freude verbindet. Diese Person hat wahrscheinlich ein hohes Leistungsmotiv. Eine Person mit einem niedrigen Leistungsmotiv steht der Bewertung der eigenen Leistung eher gleichgültig gegenüber. Das Empfinden von Stolz auf die eigene Leistung stellt für sie keinen Zielzustand dar, für dessen Erreichung sie bereit ist, sich besonders anzustrengen. Eine besonders gute Leistung in einer Klassenarbeit hat daher für sie keinen leistungsthematischen Anreizcharakter, selbst wenn diese dem Ziel dient, einen guten Schulabschluss zu machen.

Aus den bisherigen Ausführungen sollte klar geworden sein, dass Motive und Anreize eng aufeinander bezogen sind und gemeinsam eine **Motivation** hervorrufen, die dann Richtung, Intensität und Dauer des Verhaltens reguliert. Einerseits werden wertfreie Reize und Ereignisse durch Motive erst zu Anreizen, weil sie eben eine positive Bewertung erfahren, andererseits werden Motive erst durch Anreize angeregt und im Verhalten

beobachtbar. So wird sich z. B. ein starkes Leistungsmotiv besonders im Verhalten niederschlagen und zu entsprechend leistungsmotiviertem Verhalten führen, wenn es auf leistungsthematische Anreize wie z. B. herausfordernde Aufgaben trifft. Gröpel und Kehr (2014) haben gezeigt, dass durch passende Anreize angeregte Motive auch die Fähigkeit zur Selbstkontrolle erhöhen. So schnitten hoch leistungsmotivierte Personen, deren Motiv durch eine schwierige Aufgabe angeregt wurde, besser in einer nachfolgenden Stroop-Aufgabe ab als Personen, deren Motiv nicht angeregt wurde.

Der oben beschriebene Mechanismus der Affektantizipation sowie die zugrunde liegenden appetitiven und aversiven Motivationssysteme sind wahrscheinlich bei allen Menschen und Tieren vorhanden. Dennoch muss man besonders im Humanbereich Motivation auch differenzialpsychologisch betrachten. Soziogene Motive werden als Persönlichkeitseigenschaften verstanden, in denen sich Menschen unterscheiden. Diese Unterschiede beziehen sich zum einen darauf, ob das appetitive oder das aversive Motivationssystem bei einer Person dominant ist. Bei furchtmotivierten Personen ist das aversive Motivationssystem dominant. Sie werden eher durch negative Reize motiviert und optimieren ihre Affektbilanz, indem sie versuchen, negative Ereignisse zu vermeiden (z. B. Misserfolg, Ablehnung, Statusverlust). Bei hoffnungsmotivierten Personen ist das appetitive Motivationssystem dominant. Sie werden eher durch positive Reize motiviert und optimieren ihre Affektbilanz bevorzugt durch das Herbeiführen positiver Ereignisse.

Gable et al. (2003) haben gezeigt, dass Skalen, die Annäherungs- bzw. Vermeidungskomponenten spezifischer Motive wie Leistung oder Anschluss erfassen, gemeinsame Varianz mit anderen Skalen (z. B. Extraversion, Neurotizismus oder positive und negative Affektivität) aufweisen und mit ihnen zusammen auf einem zugrunde liegenden „appetitiven" bzw. „aversiven" Persönlichkeitsfaktor laden. Damit werden auch generelle Annäherungs- bzw. Vermeidungsdispositionen quantifizierbar.

Interindividuelle Unterschiede beziehen sich zum anderen darauf, welche Art von Zielzuständen Menschen zur Affektoptimierung anstreben. Eine anschlussmotivierte Person kann z. B. ihre Affekte optimieren, indem sie freundschaftliche Kontakte zu anderen Menschen knüpft und pflegt. Ist sie dabei furchtmotiviert, wird sie zu verhindern suchen, von anderen Menschen abgelehnt zu werden. Durch Einfluss auf andere Menschen, Status und Prestigegüter versuchen machtmotivierte Personen eine positive Affektbilanz zu erreichen. Sind sie furchtmotiviert, werden sie versuchen, den Verlust von Status und Prestige zu verhindern. Leistungsmotivierte erfahren positive Affekte, wenn sie anspruchsvolle Aufgaben meistern. Furchtmotivierte sind bestrebt, dem Scheitern bei solchen Aufgaben entgegenzuwirken. Das Anschluss-, das Macht- und das Leistungsmotiv sind drei wichtige Motive, die in ▶ Abschn. 8.5 noch genauer beschrieben werden. Diese Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Darüber hinaus gibt es noch andere Motivthemen, z. B. Neugier und Aggression.

Es stehen inzwischen verschiedene Instrumente zur Verfügung, die es erlauben, spezifische Motivdispositionen zu erfassen. Diese Instrumente werden in ▶ Abschn. 8.4.4 genauer beschrieben.

8.2 Motivationspsychologische Theorien aus historischer Perspektive

Die Motivationspsychologie hat im Laufe ihrer Geschichte Impulse aus verschiedenen Richtungen der Psychologie bekommen. Lerntheoretische Konzepte sind in die motivationspsychologische Theorienbildung ebenso eingeflossen wie z. B. aktivierungstheoretische Konzepte und Konzepte aus der Persönlichkeitspsychologie. Wir beschränken uns in diesem Kapitel auf die Darstellungen einiger klassischer Theorien, die die Motivationspsychologie nachhaltig beeinflusst haben und von denen mindestens einige Bestandteile auch heute noch als gültig angesehen werden. Modernere Ansätze werden dann in ▶ Abschn. 8.3, 8.4 und 8.5 besprochen.

8.2.1 Von Triebtheorien zur Feldtheorie

Den Triebbegriff führten in diesem Zusammenhang im deutschen Sprachraum Freud (1915) und im englischen Sprachraum Woodworth (1918) als Erste ein. Das Triebkonzept ersetzte damals das Instinktkonzept, das in Misskredit geraten war, weil Instinktlisten immer länger wurden und man hinter nahezu jedem beobachtbaren Verhalten einen eigenen **Instinkt** sah. Das Triebkonzept war universeller. Der **Trieb** wurde als Kraft verstanden, die eine physiologische Grundlage hat. Diese Kraft sollte z. B. durch einen physiologischen Mangelzustand wie Hunger entstehen und solches Verhalten energetisieren, das zum Ziel hat, den Mangelzustand zu beheben. Bereits behavioristisch ausgerichtete Forscher wie Thorndike (1911) hatten die Bedeutung von physiologischen Defiziten für das Verhalten erkannt, als sie beobachteten, dass nahrungsdeprivierte Tiere schneller den Weg zu einer Futterquelle lernten als gerade gefütterte Tiere. Die Frage nach der Energetisierung des Verhaltens wurde bei Lerntheoretikern aber erst in den 1920er Jahren zum Thema theoretischer Überlegungen und empirischer Untersuchungen.

Eine der bedeutendsten und am besten formalisierten Triebtheorien stammt von Clark Hull (1943, 1952). Die Triebreduktionstheorie enthält die Annahme, dass beim Lernen von Reiz-Reaktions-Verbindungen eine Triebreduktion, die der Reaktion folgt, belohnend wirkt und so die Reiz-Reaktions-Verbindungen verstärkt. Hull bezeichnete diese gelernten Reiz-Reaktions-Verbindungen als **Habit** (Gewohnheit). Er nahm an, dass die Habitstärke mit der Anzahl der vorangegangenen belohnten Lerndurchgänge steigt. Durch das Habit sollte bestimmt werden, welches Verhalten in einer bestimmten Situation ausgeführt wird, während ein allgemeiner Trieb für die Energetisierung des Verhaltens angenommen wurde. In diesen unspezifischen Trieb sollten alle Bedürfnisse, wie z. B. Hunger, Durst oder das Bedürfnis nach Schmerzvermeidung, einfließen. Die zentrale Aussage von Hulls Theorie war nun, dass die Verhaltensstärke (E = *evocation potential*) aus der multiplikativen Verknüpfung von Trieb (D = *drive*) und Habit (H) resultiert: $E = D \times H$.

Mit der multiplikativen Verknüpfung der beiden Bestimmungsgrößen wollte Hull (1943) ausdrücken, dass sowohl ein Habit als auch ein Trieb vorhanden sein muss, damit die Verhaltensstärke einen Wert größer als Null annehmen kann. Auf eine

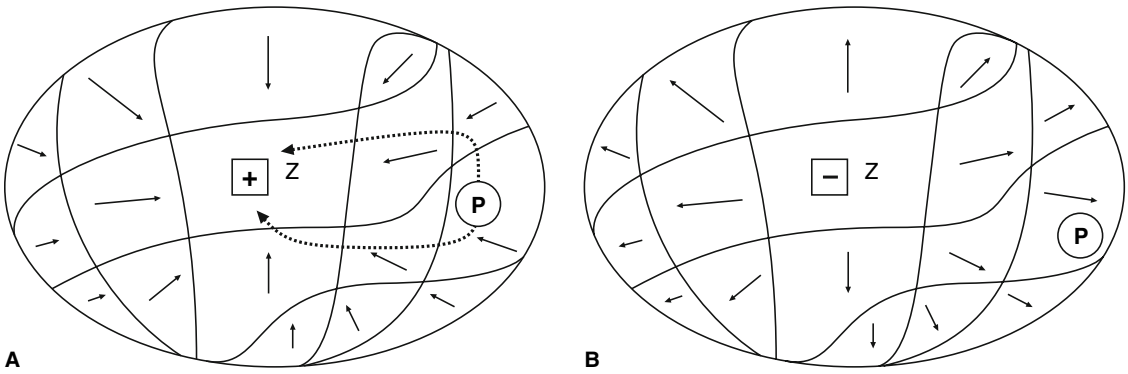


Abb. 8.2 Lewins Umweltmodell. Positive Feldkräfte (**A**) bzw. negative Feldkräfte (**B**) wirken auf die Person (*P*) ein. Die Kräfte ziehen die Person in den Zielbereich (+*Z*) mit positiver Valenz, oder sie drängen die Person vom Zielbereich (–*Z*) mit negativer Valenz weg. Die gestrichelten Linien zeigen mögliche Wege, die zum Ziel führen. (Modifiziert nach Lewin 1946)

multiplikative Verknüpfung von Trieb und Habit wiesen aber auch Befunde von Williams (1938) und Perin (1942) hin. In den beiden Untersuchungen hatten Ratten gelernt, durch Hebeldrücken an Futter zu gelangen. Die Befunde zeigen, dass Trieb und Habit offenbar in ihrer Wirkung interagieren, also multiplikativ verknüpft sind. Bei geringer Triebstärke wächst die Verhaltensstärke mit der Anzahl der Lerndurchgänge langsamer als bei hoher Triebstärke.

Untersuchungen von Tolman und Honzik (1930) sowie Crespi (1942) zeigten jedoch im Widerspruch zu der Annahme, dass Triebreduktion der alleinige Motor des Lernens ist, dass Tiere auch ohne Triebreduktion lernten. Versuchstiere, die erst nach mehreren Tagen in der Zielkammer eines Labyrinths mit Futter belohnt wurden, zeigten nach der ersten Futtergabe schlagartig das „richtige" Verhalten. Da die Habitbildung nicht so schnell vonstattengehen konnte, musste man davon ausgehen, dass die Tiere bereits vorher gelernt hatten, sie aber das gelernte Verhalten nicht ausführten, weil der Anreiz dazu fehlte. Die Untersuchung von Crespi zeigte besonders deutlich die Rolle des Anreizes für die Verhaltensstärke. Crespi (1942) belohnte eine Gruppe von Versuchstieren durchgehend mit einer hohen Futtermenge. Bei einer zweiten Gruppe wurde die Belohnungsmenge nach einigen Durchgängen erheblich reduziert, während bei einer dritten Gruppe die Menge deutlich erhöht wurde. Die Befunde zeigen, dass die Verhaltensstärke, gemessen an der Laufgeschwindigkeit, nach einer Belohnungserhöhung drastisch ansteigt, während sie bei einer Reduktion der Belohnung drastisch abfällt. Für die Änderung der Verhaltensstärke ist also nicht die absolute Futtermenge entscheidend, sondern der Kontrast zu der vorangegangenen Belohnung.

Aufgrund der oben erwähnten Befunde revidierte Hull (1952) seine Theorie und integrierte den Anreiz (*K*) in seine Verhaltensformel $E = (D \times H \times K)$. Damit akzeptierte er, dass nicht nur Kräfte innerhalb des Organismus das Verhalten beeinflussen können, sondern auch situative Faktoren, wie die Qualität der Belohnung. Dieser Gedanke hat, wie wir oben gesehen haben, in der Motivationspsychologie bis heute Bestand.

Dieses Eingeständnis kommt auch der Sichtweise Kurt Lewins (1936) nahe, der in der Feldtheorie das Verhalten (*V*) als eine Funktion (*f*) von Person (*P*) und Umwelt (*U*) beschreibt ($V = f(P,U)$). Nach Lewin gibt es nicht nur Kräfte innerhalb des Individuums, die das Verhalten antreiben, sondern auch Kräfte in der Umwelt, die das Individuum entweder anziehen oder abstoßen können. Umweltgegebenheiten oder Objekte in der Umwelt erhalten dabei ihren Wert auch durch Faktoren innerhalb der Person, nämlich durch Bedürfnisse oder unerledigte Ziele. So wirkt, wie bereits erwähnt, ein trockenes Stück Brot auf eine hungrige Person stärker anziehend als auf eine satte Person. Lewin spricht in diesem Zusammenhang von **Valenz**, die sich aus der Bedürfnisspannung der Person und der Qualität des Zielobjekts zusammensetzt. Bedürfnisse und unerledigte Intentionen hat Lewin in seinem Personenmodell als gespannte Systeme bezeichnet, die nach Entspannung bzw. Spannungsausgleich streben. Zur Entspannung kommt es, wenn ein Bedürfnis oder ein unerledigtes Ziel eine Handlung in Gang gesetzt hat und so lange handlungsleitend bleibt, bis das Ziel erreicht bzw. das Bedürfnis befriedigt ist und sich so das System entspannt. Ist eine Entspannung aus irgendwelchen Gründen nicht möglich, kann die Spannung eines Bereichs auch in einen benachbarten Bereich diffundieren. Nachbarschaft der Bereiche bedeutet im Personenmodell Ähnlichkeit der Ziele. Zu einem Spannungsausgleich kann es also auch kommen, wenn ein Ziel das Verhalten bestimmt, das dem ursprünglichen Ziel ähnlich ist. Lewin spricht in diesem Fall von *Ersatzhandlung*.

In Lewins (1946) Umweltmodell werden Umweltkräfte angenommen, die auf die Person einwirken. Das Modell ist in Abb. 8.2 dargestellt. Wie das Personenmodell ist auch das Umweltmodell in Bereiche unterteilt, die allerdings hier eine andere Bedeutung haben. Ein Teil dieser Bereiche sind Zielbereiche, d. h. anzustrebende oder zu vermeidende Ereignisse oder Zustände. Die anderen Bereiche stellen die Handlungsmöglichkeiten dar, die eine bestimmte Person zur Erreichung oder Vermeidung der Ereignisse hat. Lewin postuliert innerhalb des Modells ein Kräftefeld, das bei einem Ziel mit positiver Valenz auf den Zielbereich hin und bei einem Ziel mit negativer Valenz davon weg organisiert ist und dem Verhalten damit Antrieb und Richtung gibt. Ist der Zielbereich positiv, bewirkt eine psychologische Kraft, dass sich die Person diesem Bereich nähert, d. h. Handlungen ausführt, die zur Zielerreichung dienen. Ist der Bereich negativ, bewirkt die Kraft, dass sich die Person vom Zielbereich entfernt. Das Modell kann nicht nur Antrieb und Richtung des Verhaltens beschreiben, sondern es trägt auch der Flexibilität

Zur Vertiefung 8.1

Konflikte – Wenn wir etwas begehren und gleichzeitig fürchten

Die meisten Menschen werden die Erfahrung gemacht haben, dass Ziele ambivalent sein können. Ambivalente Ziele sind nicht nur verlockend, sondern bergen gleichzeitig auch Nachteile oder Gefahren. Bei der Verfolgung dieser Ziele kann ein **Konflikt** entstehen, wenn die positiven, auf das Ziel gerichteten Kräfte etwa genauso stark sind wie die negativen, vom Ziel weg gerichteten Kräfte (Miller 1944). Lewin (1931) spricht von einem Aufsuchen-Meiden-Konflikt. Einen Aufsuchen-Meiden-Konflikt kann man auch beim Entenfüttern beobachten. Eine Ente wird z. B. durch ein Stück Brot angezogen, wagt sich aber aus Furcht vor den Menschen oft nicht nahe genug an das Futter heran, sondern bleibt in einem bestimmten Abstand davon stehen. An der Stelle, an der das Tier stehen bleibt und sich dem Futter nicht weiter nähert, ist die abstoßende Kraft, die von den Menschen ausgeht, genauso stark wie die anziehende Kraft, die vom Brot ausgeht. Wie kann man nun die Ente dazu bringen, sich dem Futter weiter zu nähern? Man könnte entweder die anziehende Kraft erhöhen, z. B. indem man die Menge des Futters erhöht. Oder man könnte die abstoßende Kraft reduzieren, indem man sich selbst weiter vom Futter entfernt.

Lewin hat außer dem Aufsuchen-Meiden-Konflikt noch zwei weitere Konflikte beschrieben, bei denen es ebenfalls um konkurrierende Feldkräfte geht. Der Aufsuchen-Aufsuchen-Konflikt ist dadurch gekennzeichnet, dass man von zwei Zielen gleich stark angezogen wird, aber nur eines von beiden verfolgen kann. Dies ist z. B. der Fall, wenn man sich bei der Berufswahl zwischen zwei gleich attraktiven Alternativen zu entscheiden hat. Beim Meiden-Meiden-Konflikt gehen von zwei möglichen zukünftigen Zuständen gleich starke abstoßende Kräfte aus, man kann aber nur einen von beiden vermeiden. Als dramatisches Beispiel hierfür kann man sich einen Hausbrand vorstellen, bei dem es nur die Möglichkeit gibt, im Haus zu bleiben und sich möglicherweise Brandverletzungen zuzuziehen oder aus dem Fenster zu springen und sich die Knochen zu brechen.

von Verhalten Rechnung. Es sieht nämlich vor, dass es meistens mehrere mögliche Wege zur Zielerreichung oder -vermeidung gibt. Die Stärke der psychologischen Kraft soll mit der psychologischen Entfernung der Person vom Zielbereich abnehmen. Die psychologische Entfernung ist z. B. davon abhängig, wie viele Handlungsschritte zur Zielerreichung notwendig sind und wie viele Hindernisse bei der Zielannäherung zu erwarten sind. Je weiter man psychologisch vom Zielbereich entfernt ist, desto schwächer soll die entsprechende anziehende bzw. abstoßende Kraft werden.

Ein wichtiger Begriff innerhalb der Feldtheorie ist die Valenz. Lewin hat, wie bereits erwähnt, die Valenz als Funktion des Bedürfnisses der Person und der Qualität des Zielobjekts konzipiert. Ist ein Bedürfnis befriedigt, verliert ein Ziel seine Valenz: Das Kräftefeld, das von dem Ziel ausgeht, wird aufgehoben und das Verhalten beendet. Lewin selbst nennt hier das Beispiel eines Briefkastens, der so lange positive Valenz besitzt, wie man die Intention hat, einen Brief einzuwerfen. Der Briefkasten verliert diese Valenz, sobald die Intention erledigt ist. Obwohl es nur wenige empirische Untersuchungen gegeben hat, sind einige Grundgedanken Lewins in der Motivationspsychologie bis heute aktuell. So kommt z. B. die oben beschriebene Auffassung, dass es auch von Variablen innerhalb der Person abhängt (z. B. den Motiven einer Person), ob ein Reiz oder Ereignis Anreizcharakter hat, dem Lewin'schen Valenzbegriff sehr nahe. Auch der Gedanke, Verhalten als ein Resultat anziehender und abstoßender Kräfte zu verstehen, findet sich in moderneren Ansätzen (z. B. in der Annäherungs- und Vermeidungsmotivationsforschung) wieder, die davon ausgehen, dass dem Verhalten ein appetitives und ein aversives Motivationssystem zugrunde liegen.

8.2.2 Erwartungswerttheorien

Erwartungswertmodelle gehen davon aus, dass Motivationstendenzen auf einem rationalen Kalkül von Erwartung und Wert basieren. **Erwartung** wird dabei als Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung definiert. Die Wertvariable bezieht sich auf die Attraktivität des angestrebten Zieles oder, wie Lewin es nennen würde, auf die Valenz. In den meisten Modellvarianten werden sowohl die Erwartung als auch der Wert als subjektive Variablen verstanden. Klassische Motivationstheorien gehen davon aus, dass die Motivation für solche Ziele am höchsten ist, für die das Produkt aus Erwartung und Wert maximal ist. Dies stellt gewissermaßen einen Kompromiss zwischen Erreichenswahrscheinlichkeit und Attraktivität dar. So werden wir z. B. hoch attraktive Ziele dann meistens nicht anstreben, wenn die Zielerreichung äußerst unwahrscheinlich ist. Eine Ausnahme stellt hier offenbar das Lottospielen dar. Dass aber auch Lottospieler in gewisser Weise einem Erwartung-mal-Wert-Modell folgen, sieht man daran, dass der Ansturm auf die Lottoannahmestellen viel höher ist, wenn sich im Jackpot mehrere Millionen Euro befinden, als wenn es nur 1 Mio. zu gewinnen gibt. Schneider und Schmalt (2000) weisen darauf hin, dass Erwartung und Wert nicht unbedingt bewusst repräsentiert sein müssen und dass zum Teil auch einige Verhaltensweisen bei Tieren durch Erwartungswertmodelle erklärt werden können.

Die bekannteste klar formalisierte Motivationstheorie, die auf dem Erwartungswertgedanken beruht, ist das *Risikowahlmodell* von Atkinson (1957). Das Modell war zunächst zur Vorhersage von Wahlen zwischen unterschiedlich schwierigen Aufgaben konzipiert. Es wurde aber später generell als Leistungsmotivationstheorie bezeichnet. Atkinson nahm wie Lewin an, dass Verhalten durch Person- und Situationsfaktoren determiniert ist. Er spaltete deshalb die Wertvariable seines Erwartung-mal-Wert-Modells in einen Personparameter (Motiv) und einen Situationsparameter (Anreiz) auf, die multiplikativ miteinander verknüpft sind. Ebenfalls in Anlehnung an Lewin ging Atkinson davon aus, dass Verhalten auf positive Gegebenheiten hin und von negativen Gegebenheiten weg gerichtet ist. Im Bereich der Leistungsmotivation bedeutet das, dass die Verhaltensstärke sowohl von einer erfolgsaufsuchenden (Te) als auch von einer misserfolgsmeidenden Tendenz (Tm) beeinflusst wird und dass sich die stärkere Tendenz im Verhalten durchsetzt. Atkinson hat die beiden Tendenzen in seinem Modell additiv miteinander verknüpft. Welche der beiden Tendenzen stärker ist, hängt im Risikowahlmodell allein vom Leistungsmotiv ab. Ist eine Person dispositionell stärker erfolgsmotiviert als misserfolgsmotiviert, wird das resultierende Verhalten aufsuchend sein. Überwiegt das

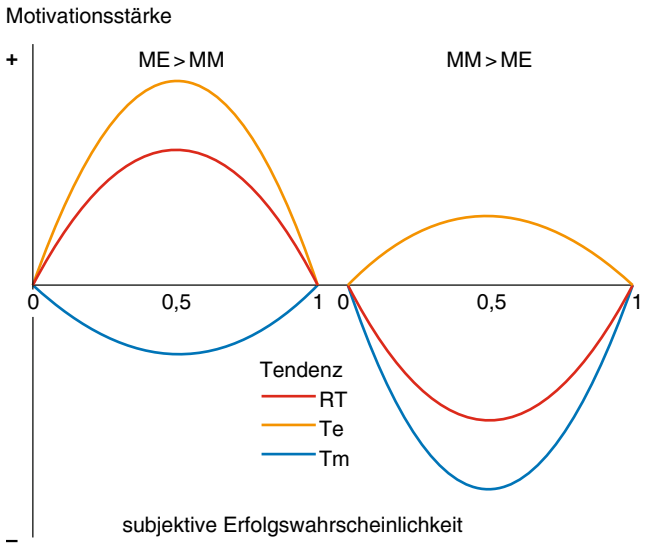


Abb. 8.3 Erfolgsaufsuchende Tendenzen (Te), misserfolgsmeidende Tendenzen (Tm) und resultierende Tendenzen (RT), die sich aus dem Risikowahlmodell ergeben. *Links* sind die Tendenzen für eine hypothetische Person dargestellt, deren Erfolgsmotiv (ME) stärker ist als das Misserfolgsmotiv (MM), und *rechts* für eine Person, bei der das Misserfolgsmotiv überwiegt. (Modifiziert nach Atkinson 1957; Heckhausen 1989)

misserfolgsmeidende Motiv, wird das Verhalten meidend sein. Fürchtet eine Person Misserfolg ebenso stark, wie sie Erfolg erhofft, wird es zu einem Aufsuchen-Meiden-Konflikt kommen (vgl. Lewin 1931; ▶ Zur Vertiefung 8.1).

Die Tendenz, Erfolg aufzusuchen (Te), setzt sich also im Risikowahlmodell multiplikativ aus dem Erfolgsmotiv (Me), dem Anreiz des Erfolgs (Ae) und der subjektiven Erfolgswahrscheinlichkeit (We) zusammen ($Te = Me \times Ae \times We$). Die Tendenz, Misserfolg zu meiden (Tm), setzt sich analog multiplikativ aus dem Misserfolgsmotiv (Mm), dem Anreiz des Misserfolgs (Am) und der subjektiven Misserfolgswahrscheinlichkeit (Wm) zusammen ($Tm = Mm \times Am \times Wm$). Die Summe der erfolgsaufsuchenden und der misserfolgsmeidenden Tendenz stellt die resultierende Tendenz (RT) dar. Die Verhaltensformel von Atkinson lautet dementsprechend: $RT = (Me \times Ae \times We) + (Mm \times Am \times Wm)$.

Dadurch, dass der Anreiz des Misserfolgs stets negativ ist und somit der gesamte rechte Ausdruck der Formel negativ wird, wird die misserfolgsmeidende Tendenz letztlich immer von der erfolgsaufsuchenden Tendenz subtrahiert. Atkinson (1957) gab genau an, wie die einzelnen Modellparameter bestimmt werden können. Das Erfolgsmotiv und das Misserfolgsmotiv sollten durch entsprechende Verfahren gemessen und die subjektive Erfolgswahrscheinlichkeit sollte erfragt werden. Alle anderen Modellparameter leiten sich aus der subjektiven Erfolgswahrscheinlichkeit (We) ab. Dabei nahm Atkinson an, dass der Erfolgsanreiz umso höher ist, je geringer die subjektive Erfolgswahrscheinlichkeit ist ($Ae = 1 - We$) – je schwieriger eine Aufgabe, desto eher kann man auf einen Erfolg stolz sein. Der Misserfolgsanreiz ist hingegen umso stärker negativ, je größer die subjektive Erfolgswahrscheinlichkeit ist ($Am = -We$) – schämen muss man sich vor allem dann, wenn man bei einer leichten Aufgabe versagt. Außerdem sollte die subjektive Misserfolgswahrscheinlichkeit sinken, wenn die Erfolgswahrscheinlichkeit steigt ($Wm = 1 - We$).

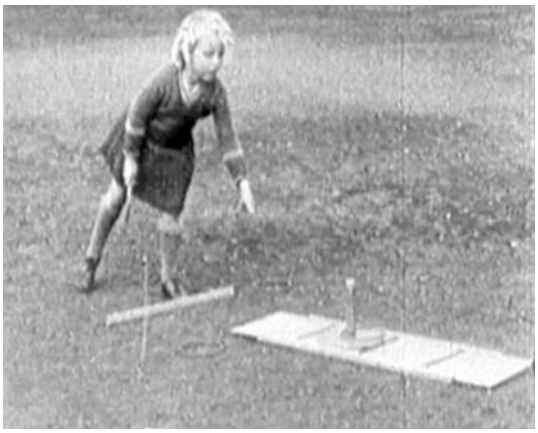


Abb. 8.4 Standbild aus einem Film zur Leistungsmotivation von Kurt Lewin. Wie in der Untersuchung von Atkinson und Litwin (1960) war die Aufgabe der Teilnehmer, Ringe aus verschiedenen Abständen über einen Pflock zu werfen

Aus der mathematischen Beziehung der einzelnen Modellparameter untereinander und deren Verknüpfung innerhalb des Modells ergeben sich die in Abb. 8.3 dargestellten Zusammenhänge zwischen der Erfolgswahrscheinlichkeit und der erfolgsaufsuchenden bzw. der misserfolgsmeidenden Tendenz einerseits und der resultierenden Tendenz andererseits. Die Vorhersagen Atkinsons haben sich nur selten bestätigen lassen. Misserfolgsmotivierte wählen zwar häufiger leichte und schwierige Aufgaben als Erfolgsmotivierte, sie bevorzugen aber insgesamt ebenfalls mittelschwierige Aufgaben (Zusammenfassung in Cooper 1983). Eine klassische Untersuchung dazu stammt von Atkinson und Litwin (1960). In dieser Untersuchung sollten die Probanden Ringe über einen Pflock werfen (Abb. 8.4). Die Wurfdistanzen konnten sie dabei selbst wählen. In Abb. 8.5 sind die prozentualen Häufigkeiten der gewählten Wurfdistanzen dargestellt.

Eine Modellerweiterung macht zum Teil (etwa hinsichtlich der Schwierigkeitspräferenz) die gleichen Vorhersagen wie das

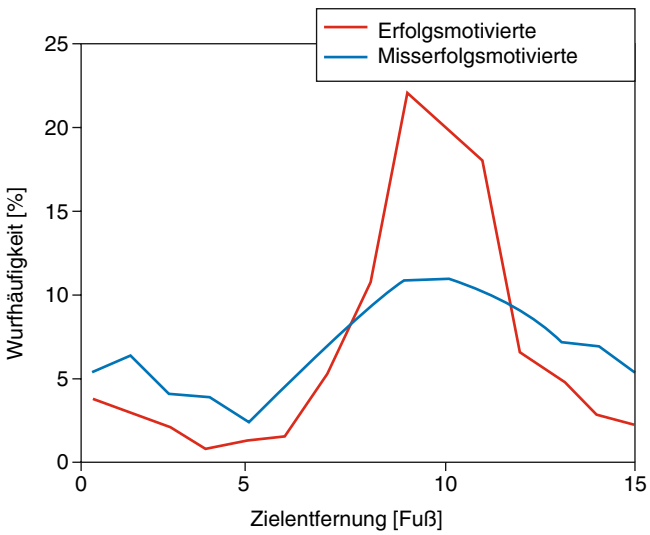


Abb. 8.5 In der Ringwurfuntersuchung von Atkinson und Litwin (1960) konnten die Probanden den Wurfabstand selbst wählen. Die Abbildung zeigt die prozentuale Häufigkeit, mit der erfolgsmotivierte und misserfolgsmotivierte Personen die verschiedenen Wurfabstände wählten

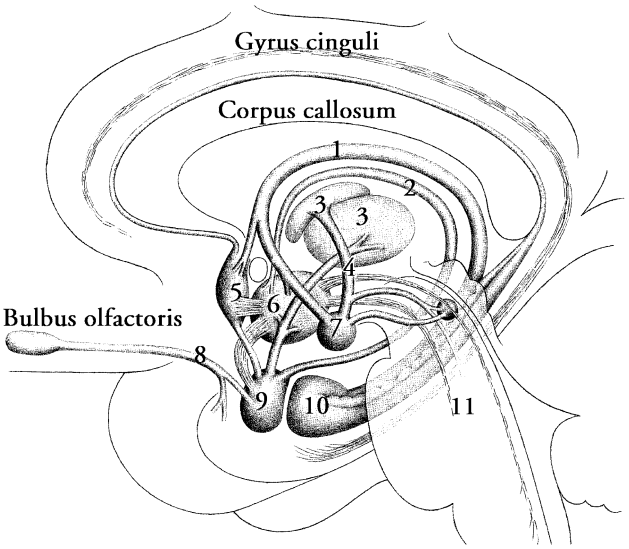


Abb. 8.6 Limbisches System. *1* = Fornix, *2* = Striae longitudinales, *3* = Thalamus, *4* = Tractus mamillothalamicus, *5* = Area septalis, *6* = Hypothalamus, *7* = Corpus mamillare, *8* = Tractus olfactorius, *9* = Amygdala, *10* = Hippocampusformation, *11* = mediales Vorderhirnbündel. (Modifiziert nach Drenckhahn und Zenker 1994)

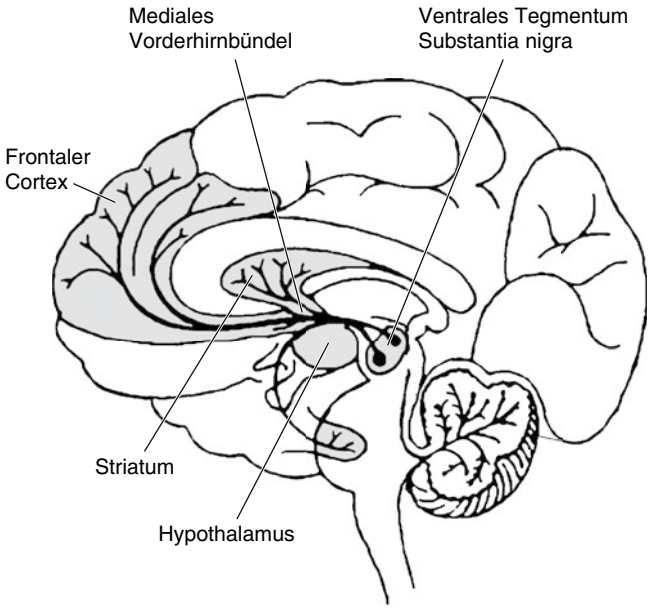


Abb. 8.7 Hauptprojektionsgebiete (grau unterlegt) dopaminerger Nervenfasern. (Modifiziert nach Iversen 1988)

Risikowahlmodell. Es handelt sich um den attributionstheoretischen Ansatz von Weiner (1974). Weiner nimmt an, dass der Anreiz von Erfolg und Misserfolg sowie Erfolgserwartungen bei gegebenen Aufgaben auch davon abhängt, auf welche Ursachen man Erfolg bzw. Misserfolg zurückführt. Der Erfolgsanreiz wie auch der negative Misserfolgsanreiz sollen stärker sein, wenn man internale Ursachen wie hohe oder mangelnde Begabung dafür verantwortlich macht. Die Stabilität der angenommenen Ursachen soll insbesondere die Erfolgserwartungen beeinflussen. Eine zeitstabile Ursachenzuschreibung für Misserfolge (mangelnde Begabung) führt z. B. zu niedrigen Erfolgserwartungen, während eine zeitstabile Ursache für Erfolge entsprechend mit hohen Erfolgserwartungen einhergeht.

8.3 Biologische Grundlagen der Motivation

In Motivationsprozesse sind sowohl stammesgeschichtlich alte als auch jüngere Teile des Gehirns eingebunden (Überblick in Schultheiss und Wirth 2010). Zu den phylogenetisch alten Teilen des Gehirns gehören der Hirnstamm (besonders das Mittelhirn), das Zwischenhirn und der Allocortex. Der Allocortex besteht aus den phylogenetisch ältesten Teilen der Hirnrinde. Dazu zählen das Riechhirn, das sich an der Basis des Großhirns befindet, der Hippocampus im Schläfenlappen und der Gyrus cinguli, der rechts und links parallel zum Balken, der Verbindung der beiden Hirnhälften, verläuft. Die genannten Strukturen gehören funktional zusammen, da sie offenbar an motivationalen und emotionalen Prozessen beteiligt sind. Sie werden zusammen mit dem Stirnhirn (besonders dem präfrontalen Cortex) als **limbisches System** bezeichnet (Abb. 8.6). In diesem System laufen Informationen über Reize aus der Umwelt ein und werden mit Rückmeldungen über den Zustand des Körpers integriert. Aufgrund seiner komplexen Verschaltungen kann das limbische System als eine durch Bedürfnisse modulierte Schaltstelle zwischen Umweltgegebenheiten und Verhalten gelten. Die Hauptaufgabe dieser Schaltstelle liegt in der Bewertung von Umweltreizen und der Antizipation belohnender und bestrafender Reize und damit in der Regulation aufsuchenden und meidenden Verhaltens.

Über den Hypothalamus und die Hypophyse werden zudem Hormone wie Östrogen, Testosteron, Vasopressin und Oxytocin im die Blutbahn freigesetzt, die an bindungs-, macht- und leistungsmotivierten Verhalten beteiligt sind (Schultheiss 2013). Auf die Hormone Testosteron, Vasopressin und Oxytocin werden wir in ▶ Abschn. 8.5 noch näher eingehen (vgl. auch Pinnow 2009).

Das der **Aufsuchenmotivation** zugrunde liegende Belohnungssystem konnte inzwischen recht genau identifiziert werden. Olds und Milner (1954) haben entdeckt, dass es für Ratten offenbar belohnend wirkt, wenn sie sich selbst im Bereich des medialen Vorderhirnbündels durch einen Tastendruck mit schwachen elektrischen Stromstößen reizen konnten. Im medialen Vorderhirnbündel – einem Faserstrang, der vom Hirnstamm durch den Hypothalamus bis zum Frontalhirn zieht – verlaufen Nervenfasern, deren Signale mithilfe der Monoamine **Dopamin** und Noradrenalin zur nächsten Zelle weitergeleitet werden. Läsionsstudien haben gezeigt, dass es nur die Reizung der Dopaminfasern ist, die Belohnungscharakter hat, und nicht etwa die Reizung von Noradrenalinfasern (Routtenberg 1987). Dopaminerge Fasern ziehen von der ventralen Haube (ventrales Tegmentum) und der schwarzen Substanz (Substantia nigra) im Mittelhirn über das mediale Vorderhirnbündel durch den Hypothalamus. Von dort aus verzweigen sie sich u. a. zum frontalen Cortex und zum **Nucleus accumbens**, einem Teil des Striatums, das zu den Basalganglien gehört (Abb. 8.7).

Der Nucleus accumbens scheint Teil eines physiologischen Systems zu sein, das Anreize codiert. Hier laufen motivational relevante Informationen aus verschiedenen limbischen Strukturen – z. B. aus der **Amygdala**, dem Hippocampus und dem präfrontalen Cortex – zusammen. Der Nucleus accumbens wird

durch diese Verbindungen über die Belohnungsqualitäten von Umweltreizen informiert und auch darüber, in welchem situativen Kontext eine Belohnung zu erwarten ist. Die Wahrnehmung von Belohnungsreizen führt im Allgemeinen zu einer erhöhten Dopaminausschüttung im Nucleus accumbens. Das Dopaminsystem spricht nicht nur auf ungelernte Belohnungen wie Nahrung an, sondern auch auf neutrale Reize und Reizkomplexe, die in der Vergangenheit mit Belohnungsreizen assoziiert worden sind. Nach Depue und Collins (1999) erlaubt die Beteiligung des Frontalcortex am dopaminergen Belohnungssystem darüber hinaus, dass mentale Repräsentationen von belohnungsrelevanten Reizen eine aufsuchende Motivation anregen. Diese vielfältigen Verbindungen ermöglichen es, dass Motivation sowohl durch die Wahrnehmung als auch durch die Antizipation von Belohnungen angeregt wird. Die Dopaminkonzentration im Nucleus accumbens kann daher als ein direktes physiologisches Korrelat der Intensität des antizipierten positiven Affektwechsels angesehen werden. Je größer die erwartete Belohnung, desto mehr Dopamin wird im Nucleus accumbens umgesetzt. Der Zusammenhang zwischen der Anreizstärke einer Belohnung und der dopaminergen Aktivität im Nucleus accumbens ist bidirektional. Einerseits führt die Wahrnehmung oder die Antizipation attraktiver Belohnungen zu einer erhöhten dopaminergen Aktivität. Zum anderen werden Umweltreize durch eine erhöhte dopaminerge Aktivität erst zu attraktiven Belohnungen.

Die Dopaminkonzentration im Nucleus accumbens ist entscheidend für die *Umsetzung von Motivation in Handlung* (Depue und Collins 1999). Sie spielt aber weniger eine Rolle für konsumatorisches als für instrumentelles Verhalten, das das Individuum näher an den belohnenden Reiz bringt. Eine erhöhte Dopaminkonzentration im Nucleus accumbens erleichtert die Initiierung zielgerichteter motorischer Aktivität und reguliert deren Geschwindigkeit und Intensität (Clarke und White 1987). Salamone et al. (2003) weisen darauf hin, dass eine verminderte Dopaminkonzentration zielgerichtetes Verhalten vor allem dann unwahrscheinlicher macht, wenn das Verhalten anstrengend oder aufwendig ist, weil etwa Hindernisse zu überwinden sind. Zusammenfassend ist der Nucleus accumbens also so etwas wie der Motor zielgerichteten Verhaltens. Wird er mit ausreichend Dopamin gespeist, dann energetisiert und bahnt er selbst gegen Widerstände Verhalten, das dazu dient, eine erwartete Belohnung zu erlangen.

Über die neurochemischen Prozesse, die für das aversive Motivationssystem relevant sind, ist bisher wenig bekannt. Es gibt jedoch deutliche Hinweise darauf, dass die Amygdala – eine paarig (d. h. links und rechts) in den Schläfenlappen angelegte Zellgruppe – mit ihren zahlreichen Projektionen im Zentrum eines Furchtsystems steht (Shi und Davis 1999; Davis 1992). Die Amygdala, die auch an appetitiven Motivationsprozessen beteiligt ist (Baxter und Murray 2002), ist für die Bewertung von Umweltreizen zuständig. Sie scheint stärker auf die affektiven als auf die sensorischen Qualitäten von Reizen anzusprechen. Bereits Klüver und Bucy (1937) haben gezeigt, dass Affen, denen diese Zellgruppe zusammen mit dem Temporallappen entfernt wurde, offenbar unfähig waren, eingehende Informationen zu bewerten. Sie konnten Essbares nicht mehr von Ungenießbarem und Freunde nicht mehr von Feinden unterscheiden. Die Amygdala ist allerdings nur zu einer recht groben Verarbeitung der eingehenden Informationen in der Lage und entscheidet im Zweifelsfall (und manchmal zu Unrecht), dass ein Reiz gefährlich ist.

Mit dem Frontalcortex sind auch phylogenetisch junge Teile des Gehirns an Motivationsprozessen beteiligt. So belegen inzwischen zahlreiche Studien, dass sich die frontalen Bereiche der beiden Großhirnhemisphären auf die Verarbeitung appetitiver bzw. aversiver Stimuli spezialisiert haben (Davidson 2004). Personen, denen appetitive Stimuli gezeigt werden, zeigen dabei stärkere linkshemisphärische als rechtshemisphärische frontale Aktivierung (linkshemisphärische Dominanz), während bei aversiven Stimuli die rechtshemisphärische Aktivierung stärker ist (rechtshemisphärische Dominanz). Außer bei basalen Motivationsvorgängen wie Annähern und Meiden spielt der Frontalcortex auch bei komplexeren Motivationsprozessen eine Rolle. So lässt sich z. B. im lateralen präfrontalen Cortex eine verstärkte Aktivierung verzeichnen, wenn komplexe Pläne in Verhalten umgesetzt werden müssen oder wenn impulsives Verhalten unterdrückt werden soll. Zu einer solchen Unterdrückung trägt u. a. der hemmende Einfluss des präfrontalen Cortex auf die Amygdala bei.

8.4 Implizite, explizite Motive und Motivinkongruenz

8.4.1 Die Geschichte der Unterscheidung in implizite und explizite Motive

In der Geschichte der Motivforschung sah man sich mit einer Tatsache konfrontiert, die zunächst als ein nicht unerhebliches messtechnisches Problem interpretiert wurde: Motivkennwerte, die über Verfahren wie den **Thematischen Auffassungstest (TAT)** (Auswertung von Geschichten, die über Bilder geschrieben wurden; ► Abschn. 8.4.4), gewonnen wurden, korrelierten nicht mit Kennwerten, die über den Selbstbericht mittels Fragebogen erfasst wurden. In einer Metaanalyse, die 49 Arbeiten mit insgesamt 1651 Probanden umfasst, ließ sich dieser fehlende Zusammenhang kürzlich nochmals eindrücklich bestätigen (Köllner und Schultheiss 2014). McClelland et al. (1989) interpretierten diese Nullkorrelation nicht als messmethodisches Problem, sondern als Hinweis auf die Existenz zweier separater Konstrukte, die nicht notwendigerweise korrelieren müssen. Sie unterscheiden ein implizites Motivationssystem (implizite Motive) von einem expliziten Motivationssystem (explizite Motive und Ziele) (vgl. auch Brunstein 2010). Dabei werden *implizite Motive* über indirekte Methoden, die die bewusste Selbstreflexion umgehen (wie TAT) erfasst, während die *expliziten Motive* direkt über Fragebogen gemessen werden können. Implizite Motive bilden die nicht notwendig bewusste affektive Basis aller Motivationsprozesse und lenken Verhalten, wie oben beschrieben, aufgrund von antizipierten Affektwechseln. Sie regulieren Intensität und Ausdauer zielgerichteten Verhaltens spontan – ohne eine bewusste Vornahme. Explizite Motive stellen das bewusst reflektierte motivationale Selbstbild einer Person dar, bilden also ab, wie eine Person sich selbst sieht und wie sie gerne sein möchte. Explizite Motive beeinflussen die Zielsetzung. **Ziele** sind nötig, um das recht abstrakte Selbstbild

(z. B. „Ich bin eine Person, der gute Leistung wichtig ist.“) in konkretes Verhalten zu übersetzen. So kann z. B. das Leistungsziel „Ich möchte beim 100-m-Lauf mindestens den dritten Platz machen.“ in konkretes Leistungshandeln, wie ein bestimmtes Trainingspensum, münden.

Das implizite und das explizite Motivationssystem fungieren unabhängig voneinander (McClelland et al. 1989). Als das in der menschlichen Entwicklungsgeschichte ältere der beiden Systeme ist das implizite System darauf spezialisiert, Verhalten im Hier und Jetzt zu regulieren und eine kurzfristige Optimierung der Affektbilanz anzustreben. Für eine mittel- bis langfristige Optimierung der Affektbilanz ist jedoch auch die Sicherung langfristiger und zum Teil abstrakter Ziele notwendig. Die Ausbildung eines Selbstkonzepts, zu dem unter anderem motivationale Selbstbilder (explizite Motive) zählen, trägt hierzu bei.

8.4.2 Unterscheidungsmerkmale impliziter und expliziter Motive

Wie in der menschlichen Entwicklungsgeschichte (Phylogenese), so entwickeln sich auch in der individuellen Entwicklungsgeschichte eines Menschen (Ontogenese) implizite Motive früher als explizite Motive (McClelland und Pilon 1983). Erstere entwickeln sich in der vorsprachlichen Kindheit auf der Grundlage affektiver Erfahrungen, beispielsweise erlebter Freude bei der Bewältigung einer entwicklungsgerechten herausfordernden Aufgabe (z. B. für das Leistungsmotiv: sich selbst oder einen Gegenstand durch Krabbeln oder Heranziehen zu bewegen). Explizite Motive basieren auf sozialen Normen und entwickeln sich später, wenn die Sprache und das damit verbundene Verständnis und die Kommunizierbarkeit von Erwartungen eine wichtige Rolle spielen. Ein Kind lernt beispielsweise durch die positive Zuwendung der Eltern bei leistungsbezogenem Verhalten dieses ebenso wertzuschätzen.

Implizite und explizite Motive unterscheiden sich auch hinsichtlich der relevanten Anreize. Implizite Motive sprechen auf tätigkeitsinhärente Anreize an, z. B. die Schwierigkeit und Komplexität einer Aufgabe, die es möglich machen, die eigene Leistung und den Kompetenzzuwachs zu bewerten (Leistungsmotiv), oder das Erleben von Geborgenheit bei einem vertrauten Gespräch mit Freunden (Anschlussmotiv). Explizite Motive sprechen hingegen auf sozial-evaluative Anreize an, z. B. die Demonstration von Leistung und die Anerkennung der eigenen Leistung durch andere (Leistungsmotiv) oder die Anzahl von Freunden in sozialen Netzwerken (Anschlussmotiv).

Implizite und explizite Motive unterscheiden sich auch darin, in welchem Verhalten sie sich äußern. Implizite Motive sagen operantes und explizite Motive respondentes Verhalten vorher (McClelland 1980). Operantes Verhalten betrifft eher langfristige Verhaltensweisen in offenen, durch die soziale Umwelt wenig strukturierten Situationen (z. B. langfristige Lebensausrichtung, Karriereentwicklung). Respondentes Verhalten meint bewusstreflektiertes Verhalten in klar strukturierten Situationen (z. B. Wahlverhalten) und ist eher eine Reaktion auf äußere Faktoren (z. B. Erwartungen des sozialen Umfeldes) (für empirische Evidenz vgl. Brunstein und Hoyer 2002).

8.4.3 Motivinkongruenz und seine Folgen

Die angenommene Unabhängigkeit des impliziten und expliziten Motivationssystems (McClelland et al. 1989) impliziert, dass beide Systeme mehr oder weniger stark überlappen können. Neuere Studien zeigen, dass es einen Unterschied macht, ob implizite und explizite Motive bzw. implizite Motive und Ziele *kongruent* oder *inkongruent* sind.

Hat man z. B. ein hohes explizites Machtmotiv, würde man möglicherweise eine Führungsposition anstreben, weil sie mit hohem Ansehen verbunden ist und gesellschaftlich wertgeschätzt wird. Ist aber gleichzeitig das implizite Machtmotiv niedrig, hat man höchstwahrscheinlich keine Freude daran, anderen Mensch Anweisungen zu geben oder im Fokus der Aufmerksamkeit zu stehen. Man müsste in diesem Fall Tätigkeiten ausführen, die für einen selbst nicht befriedigend oder sogar unangenehm sind.

Baumann et al. (2005) bezeichnen **Motivinkongruenz** als einen „hidden stressor“, also eine nicht unbedingt bewusste Quelle von Stress. Diese wirkt permanent, weil die Inkongruenz einen dauerhaften intrapsychischen Konflikt zwischen den unterschiedlichen Handlungs- und Erlebenstendenzen impliziter und expliziter Motive erzeugt. Dieser Stressor beeinträchtigt das Wohlbefinden ebenso wie andere Stressoren auch.

Ein weiterer Inkongruenztypus ist der zwischen impliziten Motiven und Zielen. Die Verfolgung motivkongruenter Ziele gelingt besser und ist meist auch erfolgreicher als die Verfolgung motivinkongruenter Ziele. Der Grund dafür ist, dass eine Vielzahl von Prozessen, welche die Zielverfolgung unterstützen (z. B. Aufmerksamkeitsausrichtung, Energetisierung und Lernen), automatisch in Gang gesetzt und gesteuert werden, wenn eine Tätigkeit oder ein Ziel durch ein implizites Motiv unterstützt wird. Nehmen wir z. B. das Ziel, erfolgreich eine Prüfung abzulegen, das etwa Anreize sowohl für das Leistungsmotiv (Kompetenzen erwerben) als auch für das Machtmotiv (andere übertreffen, Ansehen gewinnen) bietet. Personen, die über ein starkes Leistungs- oder Machtmotiv verfügen, sollten sich daher bei der Verfolgung dieses Zieles wacher fühlen, konzentrierter arbeiten und wichtige Strategien und Fakten rascher lernen als Personen, bei denen, statt eines dieser Motive, das Anschluss- oder Intimitätsmotiv stark ausgeprägt ist. Die Vorbereitung auf die Prüfung sollte leichter gelingen, weil Aufmerksamkeit und Energetisierung nicht bewusst reguliert werden müssen. Fehlt dagegen die Unterstützung durch ein implizites Motiv, dann müssen alle diese Prozesse willkürlich in Gang gesetzt werden, was volitionale Ressourcen mindert (Kehr 2004; ► Kap. 9) und im Erleben als Anstrengung und Unlust spürbar ist (Sokolowski 1996). Ziele, die nicht durch ein passendes Motiv gestützt werden, haben höchstens den Reiz, der von einer unerledigten Lohnsteuererklärung oder von einem Besuch beim Zahnarzt ausgeht.

Die Motiv-Ziel-Kongruenz wirkt nicht nur positiv auf die Zielumsetzung, sondern auch auf das Wohlbefinden. Fortschritte bei der Verfolgung eigener Anliegen äußern sich nur dann in positiven Affekten und einem Anstieg des subjektiven emotionalen Wohlbefindens, wenn diese Ziele mit der Motivstruktur einer Person kongruent sind (Brunstein et al. 1998).

Karrieresprünge, berufliche Selbstständigkeit oder sportliche Erfolge machen nicht alle Menschen gleichermaßen glücklich, sondern nur solche, die über ein starkes Macht- oder Leistungsmotiv verfügen. Menschen mit einem dominanten Anschlussmotiv verfolgen solche Ziele ebenfalls, fühlen sich aber nicht unbedingt besser, wenn sie diese dann verwirklichen. Aktuellere Studien fanden nachteilige Effekte der Motivinkongruenz für die allgemeine Lebenszufriedenheit (Hofer et al. 2006) und deckten Variablen auf, die den Einfluss der Motivinkongruenz auf das Wohlbefinden moderieren (Perfektionismus, Kontrollüberzeugung: Langan-Fox und Canty 2010; Anreize: Schüler 2010).

Eine entscheidende Frage in diesem Zusammenhang ist, warum sich manche Menschen an motivpassende und andere an unpassende Ziele binden. Dies scheint davon abzuhängen, welche Prozesse zu der Bildung eines Zieles geführt haben. Ziele können etwa allein aufgrund naiver Theorien oder quasirationaler Erwartungswertkalküle verfolgt werden („Ein Jurastudium erlaubt mir das Ergreifen eines sozial anerkannten Berufs und wird mir ein gehobenes Einkommen sichern"). Da ein solches rationales Abwägen die emotionalen Aspekte der Zielverfolgung und -verwirklichung außer Acht lässt, stimmen die auf diesem Weg gebildeten Ziele mit nur geringer Wahrscheinlichkeit mit den impliziten Motiven einer Person überein. Näher an Motiven sind dagegen Vorstellungen, wie sie in spontanen Fantasien und Tagträumen auftreten (Klinger 1990). Werden Ziele aufgrund solcher Fantasien gebildet („Straftäter ins Gefängnis zu schicken, wäre toll."), dann ist wahrscheinlich, dass ihre Verfolgung durch ein passendes implizites Motiv gestützt wird.

Thrash et al. (2007) identifizierten die Kompetenz, das eigene Körpergefühl gut wahrnehmen zu können („private body consciouness"), und eine geringe Ausprägung der Neigung zur Selbstüberwachung als Prädiktoren für Motivkongruenz. Schultheiss (2001) sieht die Ursache für Motivinkongruenz in einem „Übersetzungsproblem" zwischen dem auf Sprache basierenden expliziten Motivationssystem und dem affektbasierten und nonverbalen impliziten Motivationssystem (mangelnde „referenzielle Kompetenz").

Bedauerlicherweise gibt es bisher erst wenige Studien, die auf die Reduktion von Motivinkongruenz abzielen. Studien von Schultheiss (2001) weisen darauf hin, dass die bildhafte Vorstellung der Verfolgung und der Verwirklichung von Zielen eine Methode ist, die eine Synchronisierung von Motiven und Zielen erlaubt. In einem Experiment (Schultheiss und Brunstein 1999, Studie 2) sollten sich Teilnehmer vorstellen, einen Konkurrenten bei einem Computerspiel aus einer Rangliste zu werfen. Dieses Ziel ist im Wesentlichen mit machtthematischen Anreizen ausgestattet und sollte deshalb vor allem für Personen mit einem starken Machtmotiv attraktiv sein. Nur wenn sich die Teilnehmer dieser Studie die Konsequenzen einer Verwirklichung des Zieles bildhaft vorstellten (wie sie nach und nach die Rangliste nach oben steigen und schließlich den Erstplatzierten entthronen), dann strengten sich hoch machtmotivierte Teilnehmer bei dem Computerspiel mehr an als Teilnehmer mit einem niedrigen Machtmotiv.

8.4.4 Messung von Motiven

Da die soziogenen Motive aus der gegenwärtigen Sicht einerseits personenseitige Bestimmungsstücke der Motivation sind und andererseits als stabile Persönlichkeitseigenschaften gelten, in denen sich Menschen unterscheiden, liegt die Frage nahe, wie sich diese Persönlichkeitseigenschaften möglichst objektiv, reliabel und valide erfassen lassen.

Wie bereits erläutert, liegen impliziten und expliziten Motiven unterschiedliche Messmethoden zugrunde. Zur Messung expliziter Motive eignen sich Selbstberichte, wie beispielsweise Fragebogen, während implizite Motive indirekt erfasst werden.

Die indirekte Messung beruht auf der Annahme, dass eine Funktion impliziter Motive darin besteht, die Umwelt (oft unbewusst) nach motivkongruenten Anreizen abzusuchen und diesen Anreizen in der Wahrnehmung den Vorrang zu geben. Wie man die Welt wahrnimmt und welche Bedeutung man Situationen und Ereignissen zuschreibt, hängt wesentlich von der eigenen Motivstruktur ab. Verfahren zur Messung impliziter Motive machen sich diese Funktion zunutze, indem sie untersuchen, in welcher Weise eine Person mehrdeutige Lebenssituationen typischerweise auffasst bzw. interpretiert. Beispiele für solche indirekte Erfassungsmethoden sind die Bildgeschichtenübung (**Picture Story Exercise, PSE**) (ursprünglich: Thematischer Auffassungstest, TAT; Morgan und Murray 1935; Standardisierungsvorschlag des Messvorgehens von Schultheiss und Pang 2007) und der **Operante Motivtest (OMT)** (Kuhl und Scheffer 1999, 2012). Während die Probanden bei der Bildgeschichtenübung ganze Geschichten zu Bildern schreiben, antworten die Probanden beim OMT nur stichpunktartig auf zu den Bildern formulierten Fragen. Das **Multi-Motiv-Gitter (MMG)** (Sokolowski et al. 2000) vereint Merkmale von impliziten und expliziten Motivmessinstrumenten. Hier werden Bildvorlagen zur **Motivanregung** gegeben, und die Probanden entscheiden für auf die Bilder bezogene Aussagen, ob sie diese für zutreffend oder nicht zutreffend halten. ◘ Abb. 8.8 illustriert, wie jeweils eine Testseite dieser Messinstrumente aussieht.

Bei der Bildgeschichtenübung ist der Grundgedanke, dass sich die Motive der Testpersonen in den Geschichten als Motivthemen widerspiegeln. ◘ Tab. 8.1 illustriert am Beispiel eines häufig verwendeten Bildes (◘ Abb. 8.9), wie unterschiedlich die Geschichten zu ein und demselben Bild in Abhängigkeit von der Motivausprägung ausfallen können.

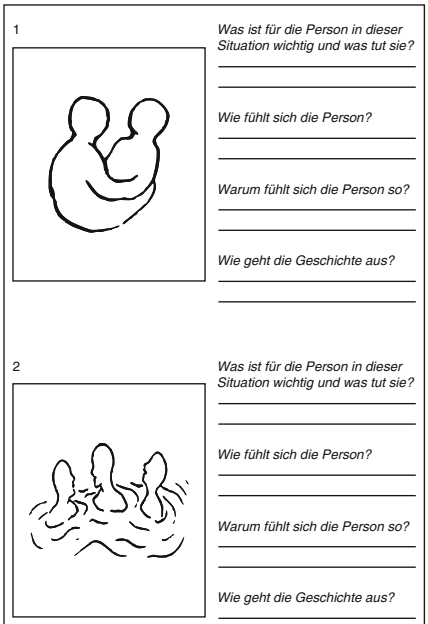
Die Auswertung des Textmaterials geschieht anhand von strengen Codierungsrichtlinien, zu denen beispielsweise das Verrechnungssystem von Winter (1994) und das OMT-spezifische Kategoriensystem (Kuhl und Scheffer 2012) zählen.

Explizite Motive werden häufig über Fragebogen erfasst, die die drei Motive Leistung, Macht und Anschluss gemeinsam erfassen können. Beispiele sind die Personality Research Form (PRF; deutsche Version von Stumpf et al. 1985) und die Unified Motive Scales (UMS) von Schönbrodt und Gerstenberg (2012). Examplarische Items sind in ◘ Tab. 8.2 dargestellt.

Zum expliziten Motivationssystem (McClelland et al. 1989; ▶ Abschn. 8.4.1) zählen auch Ziele, die beispielsweise von den Testpersonen frei erfragt und dann hinsichtlich wichtiger Zielmerkmale wie Zielbindung und Realisierbarkeit eingeschätzt

Picture Story Exercise

Operanter Motivtest



Multi-Motiv-Gitter

	Ja	Nein
Hier kann das eigene Ansehen verloren gehen		
Sich hierbei den Erfolg zutrauen		
SHier kann man leicht vom anderen zurückgewiesen werden		
Bei diesen Aufgaben mangelnde spezielle Fähigkeiten denken		
Die Macht Anderer befürchten		
Man fürchtet, den Anderen zu langweilen		

Abb. 8.8 Illustration dreier Messinstrumente zur Erfassung impliziter Motive. Es ist jeweils eine Testseite exemplarisch dargestellt (Abbildung links mit freundlicher Genehmigung von Oliver Schultheiss. Abbildung Mitte mit freundlicher Genehmigung von Julius Kuhl)

Tab. 8.1 Exemplarische TAT-Geschichten zu Abb. 8.9, die stark gesättigt sind mit Anschluss-/Intimitätsthematik, Machtthematik und Leistungsthematik. Aussagen, die aufgrund des Inhaltsschlüssels von Winter (1994) verrechnet werden, sind kursiv gesetzt

Anschluss/Intimität	Macht	Leistung
Die beiden Frauen auf dem Bild sind nicht nur Kommilitoninnen, sondern auch schon seit Jahren die *besten Freundinnen*. Sie kennen sich bereits seit der Grundschule, wo sie immer *alles zusammen gemacht* haben. Eine der beiden ist mit ihren Eltern weggezogen, und so *verloren sie sich für viele Jahre aus den Augen*, worüber beide *traurig* waren. Der Zufall wollte es, dass sie in derselben Stadt ein Chemiestudium aufnahmen. Als sie sich in der ersten Vorlesung wiedersahen, waren sie überrascht und *glücklich*.	Anna verspürte ein Grollen im Bauch. Nun ist sie doch dieser alten Schachtel *ausgeliefert* und muss sich von ihr prüfen lassen. Sie weiß, dass Dr. Müller sie *hasst* und genüsslich *durchfallen lassen* wird. Es ist ja auch kein Wunder. Anna unterhält schon seit Monaten eine Affäre mit dem Ehemann von Dr. Müller – einem *berühmten Fernsehstar* –, aber nicht aus Liebe, sondern um der miesen Kröte eins *auszuwischen*. Anna ahnt nicht, dass Dr. Müller längst dahinter gekommen ist und schon an dem Gift arbeitet, das Anna *umbringen* wird.	Dr. Maertens und ihre Assistentin überprüfen noch einmal ihre Ergebnisse, dann sind sie sich sicher: Das *jahrelange Arbeiten* hat sich gelohnt. *Als Erste* haben sie einen Impfstoff gegen AIDS synthetisieren können. Die vielen Entbehrungen und die *Rückschläge*, die sie in Kauf nehmen mussten, verlieren jetzt ihre Bedeutung. Wichtig ist nur, dass sie es geschafft haben. Sie sind *stolz* auf ihre Leistung

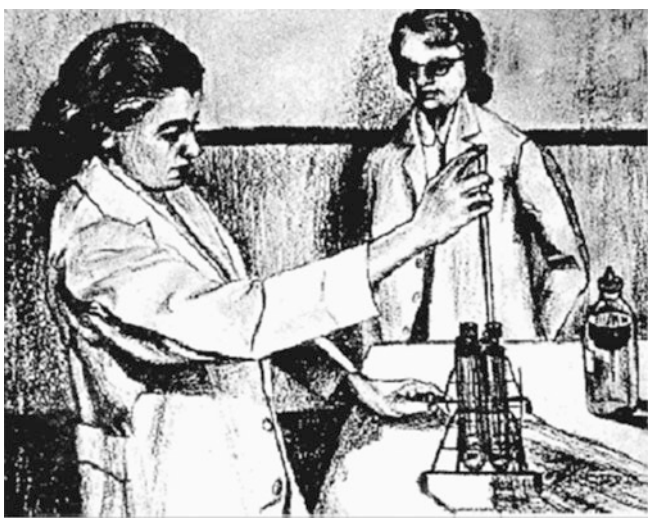


Abb. 8.9 Ein typisches Bild, wie es im Thematischen Auffassungstest (TAT) verwendet wird. Probanden werden aufgefordert, Fantasiegeschichten zu solchen und ähnlichen Bildern zu schreiben. Die Geschichten werden dann danach ausgewertet, wie häufig bestimmte Motivthemen angesprochen werden

Tab. 8.2 Itembeispiele für Personality Research Form (PRF) und Unified Motive Scales (UMS)

Messinstrument	Zu erfassende Motive und Beispielitems
PRF	*Leistung:* „Ich arbeite an Problemen weiter, bei denen andere schon aufgegeben haben." *Anschluss:* „Ich versuche, so oft wie möglich in Gesellschaft meiner Freunde zu sein." *Macht:* „Ich fühle mich in meinem Element, wenn es darum geht, andere zu leiten."
UMS	*Leistung:* „Ich fühle mich zu Arbeiten hingezogen, in denen ich die Möglichkeit habe, meine Fähigkeiten zu prüfen." *Anschluss:* „Zusammentreffen mit anderen Menschen machen mich glücklich." *Macht:* „Ich strebe nach Positionen, in denen ich Autorität habe."

werden (z. B. Brunstein 1993). Außerdem sollen mithilfe von Zielfragebögen vorgegebene Ziele nach der Wichtigkeit für das eigene Leben eingeschätzt werden (Pöhlmann und Brunstein 1997). Hinzu kommen motivspezifische Messinstrumente wie die Mehrabian-Skalen (Mehrabian 1970), die die Hoffnungs- und Furchtkomponente des Anschlussmotivs erfassen.

8.5 Motivklassen

Wenn man Motive wie oben beschrieben als „Bewertungsdispositionen für Inhaltsklassen von Zielen" definiert, liegt es nahe, solche Inhaltsklassen von Zielen näher zu beleuchten. Eine grobe Klassifikation ist die nach biogenen und soziogenen Motiven. Die Ziele der biogenen Motive sind grob gesagt die Selbst- und Arterhaltung bzw. die mit diesem Streben und der Zielerreichung verbundenen Emotionen. Zu den biogenen Motiven zählen Hunger, Durst und Sexualität. Trotz des gesicherten genetischen Fundaments spielen auch bei biogenen Motiven Lern- und Sozialisationsprozesse eine wichtige Rolle.

Man kann homöostatische und nichthomöostatische biogene Motivsysteme unterscheiden. Damit Zellen und Organe bei Mensch und Tier so funktionieren können, dass ein Überleben gesichert ist, müssen bestimmte Voraussetzungen geschaffen sein. So muss z. B. die Menge des Blutes oder die Elektrolytkonzentration im Blut auf einem bestimmten Niveau gehalten werden, das nur wenig variieren darf. Als homöostatisch werden solche Motivsysteme bezeichnet, die dazu führen, dass ein solches optimales Funktionsniveau aufrechterhalten wird. Zu den homöostatischen und für das individuelle Überleben unverzichtbaren Motivsystemen zählen Hunger und Durst. Hierbei ist der angestrebte Zielzustand einerseits die Aufhebung oder Vermeidung von negativen Affekten, die durch Nahrungs- bzw. Flüssigkeitsdeprivation verursacht werden, und andererseits die Erzeugung positiver Affekte, die mit dem Geschmack von Nahrungsmitteln und Getränken verbunden sind.

Merkmale von Nahrungsmitteln und Flüssigkeiten, die in besonderer Weise geeignet sind, entsprechende Defizite zu beheben, stellen die Anreize für diese Motivsysteme dar. Solche Merkmale sind vor allem Geschmack und Geruch, aber auch optische Qualitäten. Offenbar haben Menschen und zum Teil auch Tiere im Laufe der Evolution eine Präferenz für den Geschmack von Substanzen entwickelt, die die Aufnahme lebenswichtiger Energielieferanten, z. B. von Kohlehydraten und Fetten, fördert und die Aufnahme giftiger Substanzen weitgehend verhindern soll. Viele kohlehydrathaltige Lebensmittel schmecken süß, und Fette gelten als Geschmacksträger. Bereits neugeborene Kinder, die noch keine Lernerfahrung gemacht haben, bevorzugen offenbar süße Nahrungsmittel und zeigen deutlich aversive Reaktionen auf bittere Substanzen (Rozin 1976; Logue 1991). Auf dieser genetischen Basis können Individuen im Laufe ihrer Lerngeschichte Wissen darüber erwerben, welche Substanzen genießbar sind und welche nicht.

Sexualität gehört zu den nichthomöostatischen Motiven. Sie ist nicht notwendig für das individuelle Überleben, aber unerlässlich für die Weitergabe der eigenen Erbinformation. Der angestrebte Zielzustand bei der Sexualität ist das mit der sexuellen Betätigung einhergehende Lustempfinden. Einen vertiefenden Überblick über biogene Motive geben Schmalt und Langens (2009) sowie Pinnow (2009).

Neben den biogenen Motiven werden momentan in der Motivationsforschung vor allem drei soziogene Motive diskutiert, die man inzwischen auch als die Big Three bezeichnet. Natürlich gibt es darüber hinaus noch andere Motivklassen, z. B. Aggression, Neugier, Hilfe oder Autonomie. Im Folgenden werden jedoch nur die drei Motivklassen Anschluss/Intimität, Macht und Leistung näher erläutert. Informationen über andere Motivklassen finden sich u. a. ebenfalls bei Schmalt und Langens (2009).

8.5.1 Anschluss/Intimität

- **Phänomen und evolutionäre Wurzeln des Anschluss-/Intimitätsmotivs**

Der Wunsch nach positiven affektiven Beziehungen und das damit verbundene Erleben sozialer Eingebundenheit ist ein universelles menschliches Bedürfnis, und seine Befriedigung ist eine der wichtigsten Quellen für emotionales Wohlbefinden und Zufriedenheit (Buss 2000; Deci und Ryan 1985). Umgekehrt haben soziale Zurückweisung und Isolation eine Reihe negativer affektiver Konsequenzen, etwa Angst, Niedergeschlagenheit und ein niedriges Selbstwertgefühl (Baumeister und Tice 1990, Leary 2010). Es ist also kein Wunder, dass alle Menschen – wenn auch nicht in gleichem Maß – dazu motiviert sind, positive Beziehungen zu anderen Menschen aufzubauen, aufrechtzuerhalten oder wiederherzustellen und soziale Zurückweisungen zu vermeiden. Während das Anschlussmotiv überwiegend darauf abzielt, positive soziale Kontakte mit noch fremden oder wenig bekannten Personen zu erleben (z. B. gemeinsame Unternehmungen), zielt das Intimitätsmotiv (McAdams 1992) auf Beziehungsqualitäten, die sich eher als Liebe oder beste Freundschaften bezeichnen lassen (Sorgetragen und Kümmern). Die Bedürfnisse nach Anschluss und Intimität haben verschiedene evolutionäre Wurzeln (Eibl-Eibesfeldt 1997). Das Anschlussmotiv sichert die Bindung an eine soziale Gruppe, in der für unsere Vorfahren die Überlebenschancen höher waren (Eibl-Eibesfeldt 1997) denn als „Einzelkämpfer". Soziale Isolation und Trennung

von der Gruppe rufen bis heute bei allen in Gruppen lebenden Tierarten und auch beim Menschen, insbesondere bei Kindern, eine Stressreaktion hervor, die sich an einer erhöhten Aktivität des sympathischen Nervensystems und der Ausschüttung von Stresshormonen (Glucocorticoiden) messen lässt (Carter 1998).

Die evolutionäre Wurzel des Intimitätsmotivs liegt nach Eibl-Eibesfeldt (1997) hingegen in der Brutpflege. Die Aufzucht und die Sorge um den eigenen Nachwuchs gehen beim Menschen und bei den meisten Tieren mit einer Bindung der Eltern an den Nachwuchs und umgekehrt mit der Bindung des Nachwuchses an die Eltern einher. Auch nach Bowlbys (1958) bindungstheoretischem Ansatz sind die mit Zuwendung und Zurückweisung zu/von wichtigen Bezugspersonen verbundenen positiven bzw. negativen Emotionen phylogenetisch verankert. Es wird allgemein angenommen, dass die ganze Vielfalt menschlicher Variationen von Bindungen (z. B. Ehepartner, Freunde) seine evolutionäre Wurzel in der primären Bindung eines Neugeborenen an seine Eltern hat (Eibl-Eibesfeldt 1997).

Physiologische Grundlagen des Anschluss-/Intimitätsmotivs

Eine hohe Konzentration des Steroidhormons *Progesteron*, die vor allem in der Schwangerschaft und in der zweiten Hälfte des Menstruationszyklus vorliegt, scheint positiv mit dem Anschlussmotiv assoziiert zu sein. Frauen, die Progesteron enthaltende Ovulationshemmer einnehmen, zeigen ein höheres Anschlussmotiv als Frauen, die kein Progesteron zuführen (Schultheiss et al. 2003). Auch *Dopamin*, ein wichtiger Neurotransmitter des positiven Verstärkungssystems steht mit dem Anschlussmotiv in positiver Beziehung. Wird das implizite Anschlussmotiv durch einen Film angeregt, zeigt sich dies in einem Dopaminanstieg (McClelland 1989).

Noch deutlichere Zusammenhänge finden sich mit dem Neuropeptid **Oxytocin**. Prozesse sozialer Bindung scheinen durch Oxytocin moduliert zu werden (Insel 1997). Bereits vor mehr als 20 Jahren wurde Oxytocin als „Hormon der Mutterliebe" bezeichnet, weil es bei der Geburt und während des Stillens ausgeschüttet wird und zur Ausbildung der Bindung zwischen Mutter und Kind beiträgt. Bei Tieren wurde die Rolle des Oxytocins bei der Brutpflege experimentell nachgewiesen. Schafe, denen Oxytocin injiziert wird, bauen automatisch eine Bindung zu einem Lamm auf, das sich zur Zeit der Injektion in der Nähe befindet. Die Gabe von Oxytocinantagonisten blockiert dagegen den Aufbau einer Bindung zwischen einem Muttertier und ihrem neugeborenen Lamm. Tierstudien haben weiter ergeben, dass die Effekte von Oxytocin nicht allein auf mütterliches Verhalten beschränkt zu sein scheinen. Bei monogam lebenden Säugetieren wird Oxytocin auch während des Geschlechtsverkehrs ausgeschüttet und stärkt die Bindung an den Geschlechtspartner. Die Verabreichung eines Oxytocinantagonisten verhindert bei Wühlmäusen die Aufnahme einer Paarbeziehung, während eine Oxytocingabe diese fördert (Lim und Young 2006). Bei Primaten erhöht Oxytocin die Bereitschaft, bei anderen Gruppenmitgliedern Fellpflege (Grooming) vorzunehmen, was zu weiteren endogenen Ausschüttungen von Oxytocin führt. Beim Menschen hat Körperkontakt, z. B. nach Massagen, eine Ausschüttung von Oxytocin zur Folge (Uvnäs-Moberg 1998). Es liegt die Vermutung nahe, dass Oxytocin bei allen Formen positiver sozialer Interaktionen beteiligt ist und beim Menschen auch durch „symbolischen Körperkontakt", etwa ein gutes Gespräch und ein Gefühl von Gemeinsamkeit, verstärkt ausgeschüttet wird (Uvnäs-Moberg 1998).

Neuere Arbeiten zeigen ebenfalls eine erhöhte Oxytocinausschüttung, wenn sich Menschen bemühen, wichtige Sozialbeziehungen, z. B. Partnerschaften, wieder in zufriedenstellende Bahnen zu lenken (Taylor und Gonzaga 2007). Verabreicht man Oxytocin, in einer Studie von Kosfeld et al. (2005) z. B. über ein Nasenspray, führt dies zu vertrauensseligem Verhalten (in der Studie ging es um eine Geldinvestition). Die Ausschüttung von Oxytocin hat zudem einen deutlich beruhigenden Effekt. Es reduziert die Aktivität des sympathischen Nervensystems und hemmt die Ausschüttung von Stresshormonen.

Da die Halbwertszeit von Oxytocin nur Minuten beträgt, die physiologischen und behavioralen Konsequenzen von Oxytocininjektionen aber recht dauerhaft sind, kann angenommen werden, dass die Effekte von Oxytocin durch sekundäre Mechanismen vermittelt werden. Untersuchungen weisen darauf hin, dass Oxytocin die Ausschüttung körpereigener Opiate erhöht, die hierbei eine Rolle spielen könnten (Depue und Morrone-Strupinsky 2005). Tatsächlich zeigt eine ganze Reihe von Studien, dass positive soziale Interaktionen mit einer Ausschüttung körpereigener *Endorphine* (insbesondere Beta-Endorphin) einhergehen. Endorphine sind chemisch mit dem Suchtmittel Morphium (Heroin) verwandt und haben einen belohnenden Effekt. Beim Menschen führen sexuelle Aktivitäten, Mutter-Kind-Interaktionen und angenehmer Körperkontakt zu einer Ausschüttung von Endorphinen. Die Gabe eines Opioidantagonisten wie Naltrexon scheint die belohnenden Effekte sozialer Interaktionen aufzuheben. Frauen, denen Naltrexon verabreicht wurde, reduzierten (im Vergleich zu einer Placebokontrollgruppe) ihren Kontakt zu Freunden, verbrachten mehr Zeit alleine und berichteten insgesamt, dass ihnen soziale Interaktionen weniger angenehm waren (Jamner und Leigh 1999).

Ein Experiment von Depue und Morrone-Strupinksky (2005) konnte die Relevanz von Endorphinen für die Intimitätsmotivation nachweisen. Für das Experiment wurden Teilnehmerinnen ausgewählt, die entweder eine niedrige oder hohe Präferenz für enge und warmherzige Interaktionen mit anderen Menschen aufwiesen. Den Teilnehmerinnen wurde entweder ein Film gezeigt, der das Intimitätsmotiv anregt (es wurde eine glückliche heterosexuelle Partnerschaft porträtiert), oder sie sahen einen motivational neutralen Film (eine Reportage über den Regenwald). Eine Hälfte der Teilnehmerinnen bekam vor dem Film den Opioidantagonisten Naltrexon, die andere Hälfte ein Placebo. Das zentrale abhängige Maß war die Schmerzempfindlichkeit nach dem Film. Die Teilnehmerinnen setzten ihre Hand so lange einer Wärmequelle aus, bis die Schmerzempfindungen nicht mehr erträglich waren. Da Endorphine einen analgetischen (schmerzreduzierenden) Effekt haben, diente dieses Maß als indirekter Indikator für die Ausschüttung von Endorphinen. Bei welcher Bedingungskonstellation sollte sich nun eine erhöhte Unempfindlichkeit gegenüber Schmerzen zeigen? Wenn Endorphine die endokrinologische Grundlage intimitätsmotivierten Verhaltens bilden, dann sollten sie vermehrt vor allem bei Personen ausge-

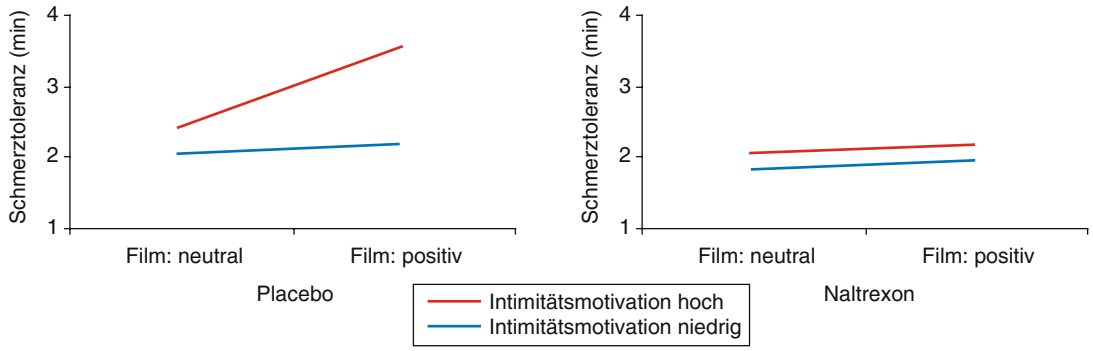


Abb. 8.10 Die Anregung des Intimitätsmotivs durch einen Film, der positive soziale Interaktionen porträtiert, führt – im Vergleich zu einer neutralen Kontrollbedingung – bei hoch intimitätsmotivierten Frauen zu erhöhter Schmerztoleranz. Die Tatsache, dass dieser Effekt verschwindet, wenn statt eines Placebos zuvor eine Opioidantagonist (Naltrexon) verabreicht wird, legt die Vermutung nahe, dass die Anregung des Intimitätsmotivs zu einer Ausschüttung von Endorphinen führt. (Nach Depue und Morrone-Strupinsky 2005)

schüttet werden, die über ein starkes Intimitätsmotiv verfügen und bei denen das Motiv auch angeregt wurde. Da Endorphine ihre analgetische Wirkung einbüßen, wenn zuvor ein Opioidantagonist wie Naltrexon gegeben wurde, sollte dieser Effekt nur in der Placebobedingung nachweisbar sein. Die Befunde standen in völliger Übereinstimmung mit dieser Argumentation (Abb. 8.10). Eine erhöhte Schmerztoleranz zeigte sich allein bei hoch intimitätsmotivierten Frauen, die den intimitätsthematischen Film gesehen und kein Naltrexon erhalten hatten. Ein starkes Intimitätsmotiv senkt also die Schmerzwahrnehmung.

Andersherum können das Streben nach positiven und das Vermeidenwollen negativer zwischenmenschlicher Erlebnisse aber auch Schmerzen verursachen. Werden Menschen aus sozialen Gruppen ausgeschlossen, ist ein Mittelhirnareal (anteriorer Gyrus cinguli) aktiviert, das auch bei körperlichen Schmerzen angesprochen wird (Eisenberger et al. 2003). Paracetamol (ein Schmerzmittel) kann die negativen Konsequenzen sozialer Zurückweisung senken, indem es vermutlich die Nervenzellenaktivität von mit affektivem und körperlichem Schmerz assoziierten Hirnregionen herabreguliert (deWall et al. 2010).

Korrelate des Anschluss-/Intimitätsmotivs

Zu den Verhaltenskorrelaten des *Anschlussmotivs* zählt beispielsweise, dass im Vergleich zu Personen mit einem schwachen Anschlussmotiv hoch anschlussmotivierte Personen mehr Zeit mit ihren Freunden verbringen, häufiger mit ihnen telefonieren, mehr Briefe schreiben, dass sie mehr Augenkontakt mit anderen aufnehmen und sich häufiger in Gesprächen mit anderen Personen finden. Wenn sie alleine sind, dann wünschen sie sich eher, mit anderen Personen zusammen zu sein (Boyatzis 1973; Lansing und Heyns 1959; McAdams und Constantian 1983). Sie nehmen Gesichter schneller wahr (Atkinson und Walker 1956) und lenken ihre Aufmerksamkeit automatisch auf freundliche und weg von ärgerlichen Gesichtern (Schultheiss und Hale 2007). Dass hoch Anschlussmotivierte nach zwischenmenschlicher Harmonie streben, drückt sich auch in ihrem Bestreben aus, Konflikte bei kompetitiven Aufgaben, bei Spielen, in Arbeitsgruppen und sogar bei politischen Entscheidungen zu vermeiden (z. B. Terhune 1968; McClelland 1975; Winter 1993).

Anschlussmotivierte sind jedoch in sozialen Situationen auch ängstlicher (Byrne 1961; Mussen und Jones 1957) und nicht immer beliebt (Atkinson et al. 1954; Shipley und Veroff 1952). Sie deuten das Verhalten sowohl fremder Personen als auch ihrer Lebenspartner rascher als Anzeichen einer intendierten Zurückweisung, sind in der Folge unzufriedener mit der Beziehung zu anderen Personen und erreichen deshalb in ihrem Bemühen um positive soziale Kontakte manchmal genau das Gegenteil von dem, was sie sich eigentlich wünschen. Auch führt das Setzen von anschlussthematischen Vermeidungszielen („Ich will nicht mehr allein sein“) paradoxerweise zu dem, was es zu vermeiden galt (Einsamkeit, Nichtakzeptanz in Gruppen) (Gable 2006). Die Harmoniebemühungen hoch Anschlussmotivierter können zudem durchaus in aggressive und übergriffige Verhaltensweisen umschlagen, wenn beispielsweise die Partnerschaft als bedroht erlebt wird (Mason und Blankenship 1987; Zurbriggen 2000).

Das Anschlussmotiv schlägt sich auch im Leistungsverhalten nieder, wenn anschlussthematische Anreize vorliegen. Sind hoch Anschlussmotivierten im Schulkontext die Interaktionspartner sympathisch, arbeiten sie am Arbeitsplatz in Gruppen, dürfen sie kooperativ statt kompetitiv handeln und kämpfen sie im Sport für ihr Team, zeigen sie sehr hohe Leistungen (z. B. Sorrentino und Sheppard 1978). Sie nehmen Managerpositionen in Organisationen ein, die sich durch flache Hierarchien kennzeichnen, in denen gleichberechtigtes und kooperatives Verhalten wichtiger als in stark hierarchisch organisierten Unternehmen ist (Litwin und Siebrecht 1967). Quirin et al. (2013) zeigen, dass hoch Anschlussmotivierten intuitive Urteile (darüber, ob Worte semantisch miteinander in Beziehung stehen) besser gelingen als schwach Anschlussmotivierten.

Ein weiteres erfreuliches Korrelat des Anschlussmotivs ist seine Assoziation mit Gesundheit. Personen mit starkem Anschlussmotiv werden mit geringerer Wahrscheinlichkeit krank als Personen mit schwacher Ausprägung des Anschlussmotivs (Jemmott 1987; McClelland und Jemmott 1980). Der mit dem Anschlussmotiv assoziierte niedrige diastolische Blutdruck (McClelland 1979) reduziert potenziell das Risiko für koronare Herzerkrankungen. Dadurch, dass die Anregung des Anschlussmotivs zur Ausschüttung von Immunglobin A führt (McClelland und Kirshnit 1988), birgt es zudem das Potenzial, über ein gestärktes Immunsystem das Krankheitsrisiko zu senken.

Personen mit einem starken *Intimitätsmotiv* empfinden beim Zusammensein mit anderen Menschen stärkere positive Emoti-

onen als niedrig Intimitätsmotivierte, lächeln ihre Gesprächspartner öfter an und zeigen mehr Blickkontakt. In Gesprächen mit Freunden nehmen sie eher die Rolle des Zuhörers ein und geben mehr von ihren Emotionen preis (McAdams und Constantian 1983; McAdams et al. 1984a, b). Zudem sind sie zufriedener in der Ehe und mit ihrem Leben, berichten über weniger Drogenprobleme, geringere Angst und weniger Depressionen (McAdams und Bryant 1987; McAdams und Vaillant 1982).

8.5.2 Macht und Dominanz

■ Phänomen und evolutionäre Wurzeln des Machtmotivs

Das Machtmotiv äußert sich in einem Bedürfnis nach Einfluss und Überlegenheit, nach Stärke, Visibilität und Dominanz. Menschen mit einem starken Machtmotiv streben danach, Konkurrenten auszustechen, sei es im Straßenverkehr, bei der Wahl zum Vorsitzenden des Ortsvereins einer politischen Partei oder eben beim Stocherkahnrennen (McClelland 1975). Sie wollen andere beeinflussen und lenken (z. B. als Führungskraft oder Lehrperson) oder sie beeindrucken (z. B. durch ein Luxusauto oder durch prestigereiche Positionen im Beruf). Machthandeln besteht im Grunde häufig darin, die Motivation anderer zu beeinflussen. Das unmittelbare Ziel machtmotivierten Verhaltens – Einfluss und Kontrolle – richtet sich darauf, den eigenen Status innerhalb formaler Hierarchien oder informeller Rangordnungen zu erhöhen. Das damit verbundene Gefühl der Stärke und Überlegenheit lässt sich aber nicht nur durch ungehemmtes machtmehrendes Verhalten erreichen („personal power" nach McClelland et al. 1972; z. B. Anhäufen von Prestigegütern, Vorteilnahme aus Schwächeren). Es lässt sich durchaus auch durch sozial erwünschtes Verhalten realisieren („social power" nach McClelland et al. 1972; z. B. Übernehmen von verantwortungsvollen beruflichen Positionen). Die Quellen, die es ermöglichen, Macht auszuüben, sind häufig auch durch explizite soziale Normen festgelegt, wie beispielsweise die legitimierte Macht, die Polizeibeamten bei der Festnahme von Straftätern zugestanden wird, und die Expertenmacht, der sich viele gerne unterwerfen, wenn die IT-Expertin das hartnäckige Hardwareproblem löst (weitere Machtquellen in French und Raven 1959).

Aus einer evolutionären Perspektive sichert ein hoher Status bzw. ein Platz in den oberen Rängen der sozialen Hierarchie eine ganze Reihe von Vorteilen. Im Tierreich wie beim Menschen gilt, dass ranghohe Individuen einen leichteren Zugang zu Ressourcen wie Nahrungsmitteln haben (Alcock 2013). In vielen (insbesondere polygamen oder polyandrischen) Tiergesellschaften ist der Rang ebenfalls mit dem Fortpflanzungserfolg eines Individuums korreliert (Cowlishaw und Dunbar 1991). Ein hoher Status erlaubt es Individuen zum einen, potenzielle Rivalen um mögliche Sexualpartner einfach zu verjagen; zum anderen macht der bessere Zugang zu Ressourcen ranghohe Individuen zu besonders attraktiven Partnern (Pérusse 1994). Der Zusammenhang zwischen Status und der Anzahl potenzieller Geschlechtspartner findet sich übrigens auch beim Menschen. In einer Studie, an der unverheiratete männliche Kanadier teilnahmen, ergaben sich deutliche Korrelationen zwischen dem jährlichen Einkommen (als Indikator für sozialen Status) und der Anzahl von Geschlechtspartnern im vorangegangenen Jahr, die allerdings besonders stark für Männer über dem 30. Lebensjahr ausfielen (Pérusse 1993). Hierzu passend fanden Hofer et al. (2010), dass das implizite Machtmotiv von Männern mit der Neigung, sich in sexuellen Aktivitäten ohne emotionale Bindung zu engagieren, korreliert ist. Dieser Zusammenhang ist jedoch durch Verantwortungsbewusstsein moderiert – ein gutes Beispiel dafür, dass die Ausdrucksformen machtmotivierten Strebens in weniger impulsives Verhalten kanalisiert werden können.

■ Physiologische Grundlagen des Machtmotivs

Inzwischen ist recht gut abgesichert, dass das Streben nach Dominanz bei Säugetieren und auch beim Menschen mit einer verstärkten Ausschüttung des Steroidhormons **Testosteron** einhergeht (Mazur und Booth 1998). Testosteron wird in den Keimdrüsen gebildet und ist das häufigste Androgen, das bei Männern in einer drei- bis zehnfach höheren Konzentration vorkommt als bei Frauen. Im Vergleich zu Männern mit einem niedrigen Testosteronspiegel neigen Männer mit einem hohen Testosteronspiegel zu dominantem und aggressivem Verhalten und zu Regel- und Gesetzesüberschreitungen; sie wirken auf andere Menschen dominant, weniger sympathisch und lächeln weniger; sie geraten häufiger in handgreifliche Auseinandersetzungen und haben früher und mehr sexuelle Kontakte; sind sie verheiratet, gehen sie häufiger außereheliche Affären ein und lassen sich mit größerer Wahrscheinlichkeit scheiden (Dabbs 1992, 1997; Julian und McKenry 1989; Mazur und Booth 1998). Bei Sportlern konnte gezeigt werden, dass deren Testosteronspiegel vor einem Wettkampf (einem ritualisierten Dominanzduell) ansteigt. Dieser Anstieg hat vermutlich die Funktion, die Spieler auf die Auseinandersetzung vorzubereiten und zu energetisieren. Nach dem Wettkampf steigt Testosteron bei Siegern an und fällt bei Verlierern ab. Eine erhöhte Testosteronkonzentration nach einem Sieg hat vermutlich einen bekräftigenden Effekt. Insgesamt gesehen scheinen die Effekte von Testosteron darauf zu konvergieren, insbesondere Männer auf sexuelle Kompetition und Fortpflanzung vorzubereiten, indem sie die Bereitschaft erhöhen, Dominanzduelle und wechselnde sexuelle Partnerschaften einzugehen.

Studien der Arbeitsgruppe um Schultheiss konnten eine direkte Verbindung zwischen dem Machtmotiv und Testosteronausschüttungen nachweisen (Schultheiss et al. 2005). In einer typischen Studie treten Probanden paarweise bei einer Geschicklichkeitsaufgabe gegeneinander an. Die Aufgabe besteht etwa darin, Zahlen aufsteigend bis zu einem festgelegten Kriterium miteinander zu verbinden. Siege und Niederlagen werden experimentell manipuliert, indem z. B. in acht von zehn Durchgängen ohne Wissen der Probanden die Aufgaben des „Siegers" objektiv leichter sind als die des Kontrahenten. Zur Ermittlung des Testosteronspiegels wurden zu Beginn des Experiments sowie nach der Aufgabe Speichelproben genommen und später analysiert. Die Studien (Zusammenfassung in Schultheiss et al. 2005) zeigten, dass Siege und Niederlagen vor allem bei hoch machtmotivierten Teilnehmern zu Veränderungen des Testosteronspiegels führten. Nach einem Sieg stieg der Testosteronspiegel bei hoch machtmotivierten Siegern an, bei einer Niederlage fiel er ab. Zusätzlich zeigte sich, dass hoch machtmotivierte Teilnehmer die Geschicklichkeitsaufgabe rascher lernten. Weitere Studien legen

nahe, dass Siege und Niederlagen bei hoch Machtmotivierten ebenfalls einen Effekt auf die Ausschüttung des Stresshormons Cortisol hatten. Hoch Machtmotivierte hatten nach einer Niederlage stark erhöhte Cortisolwerte; für sie schien eine Niederlage also besonders belastend zu sein. Nach einem Sieg schien sich das Cortisolniveau bei den hoch Machtmotivierten dagegen zu senken. Die physiologischen Prozesse, die bei machtmotiviertem Verhalten eine Rolle spielen, werden in Abb. 8.11 zusammengefasst. Für Frauen ließ sich der Zusammenhang zwischen Machtmotiv und Testosteron weniger deutlich aufzeigen. Erfolgreiches Machthandeln steht bei ihnen eher mit Östradiol in Zusammenhang (Stanton und Schultheiss 2007).

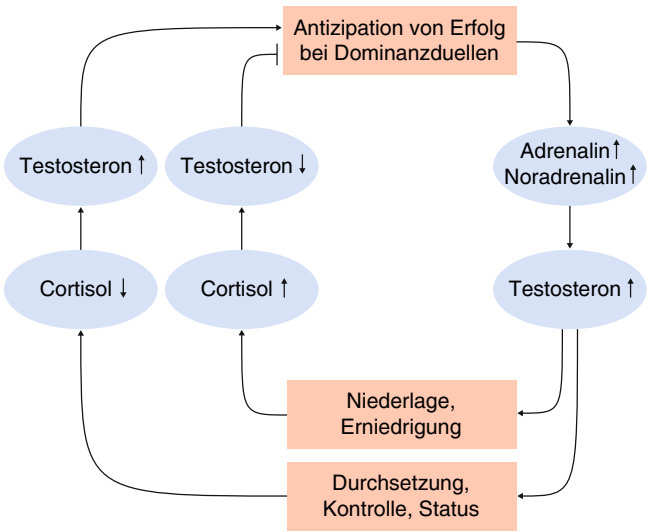


Abb. 8.11 Dominanz und Testosteron bei Männern mit einem starken ungehemmten Machtmotiv. Die Erwartung, ein Dominanzduell zu gewinnen, führt zu einer Ausschüttung der Catecholamine Adrenalin und Noradrenalin und einer antizipatorischen Ausschüttung von Testosteron. Durchsetzung und Kontrolle haben eine Reduktion des Stresshormons Cortisol und eine weitere Ausschüttung von Testosteron zur Folge, die verstärkend auf das zuvor gezeigte Verhalten wirkt. Niederlagen führen dagegen zu einem Ansteigen von Cortisol und in der Folge zu einer Reduktion der Testosteronausschüttung. (Nach Schultheiss 2007)

Korrelate des Machtmotivs

Männer mit einem hohen personalisierten Machtmotiv geraten, verglichen mit niedrig machtmotivierten Männern, häufiger in Streitereien und körperliche Auseinandersetzungen (meist mit anderen Männern). Ihren Status versuchen sie u. a. durch den Erwerb und die Zurschaustellung von Prestigeobjekten zu vergrößern; sie versuchen, andere durch risikoreiches Spielverhalten zu beeindrucken; sie machen früher ihre ersten sexuellen Erfahrungen. In Beziehungen zu Frauen neigen machtmotivierte Männer zu aggressiven Übergriffen, insbesondere dann, wenn sie Macht und Sexualität gleichsetzen (McClelland 1985; Stewart und Rubin 1976; Winter 1973, 1996; Zurbriggen 2000). Zudem neigen hoch machtmotivierte Männer zu übermäßigem Alkoholkonsum, vermutlich, um ihr latent hohes Stressniveau herabzuregulieren (McClelland et al. 1972). Männer, die diese impulsiven Verhaltensmuster zeigen, sind im Allgemeinen nicht besonders erfolgreich dabei, sich in der sozialen Hierarchie nach oben zu arbeiten (McClelland 1975; Winter 1991). Personen mit hoher *social power* zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Machtmotiv zwar hoch, aber gleichzeitig gehemmt ist (z. B. durch hohes Verantwortungsbewusstsein oder soziale Normen). Sie stellen die Macht häufig in den Dienst anderer Menschen und fühlen sich zu Berufen hingezogen, die ihnen eine Ausübung von Macht in Übereinstimmung mit gesellschaftlichen Werten erlaubt (z. B. Manager, Lehrer, Geistlicher, Wettkampfsportler oder Psychologe). Dabei sind sie auch meistens sehr erfolgreich. In einer Längsschnittstudie wurden z. B. die Karrieren von Angestellten der amerikanischen Telefongesellschaft AT&T über einen Zeitraum von 16 Jahren verfolgt (McClelland und Boyatzis 1982). Es zeigte sich, dass überwiegend Personen mit einem starken verantwortungsvollen Machtmotiv in die Chefetagen aufstiegen und zu erfolgreichen Managern wurden (Winter 1991). Macht, verantwortungsbewusst eingesetzt, kann gesellschaftlichen Erfolg durchaus fördern.

Neben dem Verhalten beeinflusst das Machtmotiv auch, wie die Umwelt wahrgenommen wird, wie auf sie reagiert wird und wie Informationen verarbeitet werden. Hoch Machtmotivierte zeigen eine stärkere Aktivierung bei machtthematischen Reden oder bei Machtanreizen in Computerspielen. Bei der Konfrontation mit einer dominanten Person (in einem Video) runzelten sie stärker die Stirn (operationalisiert über EMG) als Personen mit niedriger Ausprägung des Machtmotivs (Fodor et al. 2006). Sie zeigen bessere Erinnerungsleistungen für macht- als für andersthematische Inhalte (Woike 1995). Donhauser et al. (2015) haben zudem gezeigt, dass hoch machtmotivierte Personen emotionale Gesichtsausdrücke schneller erkennen als niedrig machtmotivierte Personen. Sie missinterpretieren allerdings dabei fröhliche Gesichter häufiger als ärgerliche.

Das Machtmotiv scheint eher negativ mit Gesundheit assoziiert zu sein. Ein chronisch gehemmtes Machtmotiv („power stress“ nach McClelland 1979) führt zu einer niedrigen Immunoglobin-A-Konzentration (vermittelt über dauerhafte Aktivierung des sympathischen Nervensystems und Ausschüttung von Noradrenalin und Adrenalin), die wiederum das Immunsystem schwächt. Insbesondere wenn sich belastende Lebensereignisse häufen, scheint ein gehemmtes Machtmotiv Menschen anfällig für gesundheitliche Beeinträchtigungen wie Bluthochdruck, Atemwegerkrankungen und möglicherweise auch Krebs zu machen (McClelland 1989).

8.5.3 Leistung

Phänomen und evolutionäre Wurzeln des Leistungsmotivs

Wenn man in der Alltagssprache sagt, dass eine Person hoch motiviert oder ehrgeizig ist, dann ist damit häufig das Leistungsmotiv gemeint. „Ehrgeiz“ ist dabei allerdings nicht das richtige Wort, denn einer hoch leistungsmotivierten Person geht es im engeren Sinne nicht um die Ehre. Das Streben nach Ruhm und Ehre hat eher etwas mit dem zuvor beschriebenen Machtmotiv als mit dem Leistungsmotiv zu tun. Hoch Leistungsmotivierte streben danach, einen bestimmten Leistungsstandard zu erreichen, etwas besonders gut zu machen oder ihre eigene Kompetenz zu

steigern. Das Leistungsmotiv wird nur in Situationen verhaltenswirksam, in denen Personen Handlungsergebnisse selbst herbeiführen und sich für die Ergebnisse verantwortlich fühlen können. Horowitz (1961, zit. nach McClelland 1985) fand etwa, dass hoch Leistungsmotivierte eher eine Leistungsaufgabe als ein Glücksspiel wählen, um Geld zu gewinnen. Der angestrebte Zielzustand sind beim Leistungsmotiv positive Emotionen, die aus der Tatsache resultieren, dass man sich selbst oder andere übertreffen konnte bzw. eine schwierige Aufgabe gemeistert oder ein Hindernis überwunden hat. McClelland et al. (1953) sprechen von einer erfolgreichen Auseinandersetzung mit einem Gütemaßstab. Dieser Gütemaßstab kann durch den Vergleich eines Leistungsergebnisses mit den Ergebnissen eigener früherer Leistung zustande kommen, aber man kann auch die Leistung anderer Personen zum Vergleich heranziehen. Bei einigen Aufgaben liegt der Gütemaßstab in der Sache selbst. Wenn es z. B. darum geht, ein Computerprogramm zu schreiben, dann ist man erfolgreich, wenn das fertige Programm so funktioniert, wie man es intendiert hat. Das Streben nach Erfolg ist nur eine Seite des Leistungsmotivs, denn Erfolg ist nicht der einzig mögliche Ausgang des Leistungshandelns. Leistungsaufgaben bergen auch immer das Risiko des Scheiterns. Während die aufsuchende Komponente des Leistungsmotivs auf den möglichen Erfolg gerichtet ist, zielt die meidende Komponente darauf ab, dem möglichen Misserfolg und den negativen Konsequenzen, die damit einhergehen, aus dem Weg zu gehen. Die aufsuchende Komponente wird als „Hoffnung auf Erfolg" oder Erfolgsmotiv und die meidende Komponente als „Furcht vor Misserfolg" oder Misserfolgsmotiv bezeichnet.

Man kann davon ausgehen, dass wie das Anschluss- und das Machtmotiv auch das Leistungsmotiv evolutionsbiologische Wurzeln hat. Nach White (1959) streben Menschen angeborenerweise danach, ihre Fähigkeiten zu erweitern. White führte in diesem Zusammenhang den Begriff „Kompetenzmotivation" ein. Einige Forscher sehen Parallelen zwischen dem Neugiermotiv und dem Leistungsmotiv und nehmen an, dass beide auf die gleichen evolutionsbiologischen Wurzeln zurückzuführen sind. Neugier- bzw. Explorationsverhalten ist auch bei Tieren zu beobachten. Dieses Verhalten dient dem Informationsgewinn und ist für die Erschließung neuer Nahrungsquellen bzw. für die Entdeckung von Gefahrenquellen funktional. Explorationsverhalten dürfte somit gerade dann überlebensdienlich sein, wenn sich die Bedingungen des Lebensraumes ändern. Beim Menschen ist anzunehmen, dass das Streben nach Kompetenzerweiterung und somit das Leistungsmotiv ihm dazu verholfen hat, die Ressourcen in seiner Umwelt umfassend auszuschöpfen (Bischof-Köhler 1985). Durch den Gebrauch von Werkzeugen und deren kontinuierliche Verbesserung standen den Menschen zunehmend bessere Möglichkeiten zur Nahrungsbeschaffung und zum eigenen Schutz zur Verfügung. Ohne das Leistungsmotiv wären die kulturelle Evolution und auch die Industrialisierung wahrscheinlich nicht möglich gewesen. McClelland (1985) fand in einer Reihe von Studien Hinweise darauf, dass in allen von ihm untersuchten Epochen ein positiver Zusammenhang zwischen der Stärke des kollektiven Leistungsmotivs einer Gesellschaft (ermittelt über die thematische Analyse von politischen Reden oder Kinderbüchern) und der Stärke des Wirtschaftswachstums bestand.

Neben der mittleren Aufgabenschwierigkeit stellt Rückmeldung über das Leistungsergebnis einen wichtigen Anreiz für das Leistungsmotiv dar. Rückmeldung ist die Grundlage für die Selbstbewertung. Sie ermöglicht es zu erkennen, ob ein Standard bzw. ein Ziel erreicht ist. Rückmeldungen können auch in Form einer Belohnung gegeben werden. Die Belohnung sollte nach Deci und Ryan (1991) informativ sein, d. h. etwas über die Güte der erbrachten Leistung aussagen, damit sie zu einer Anregung des Leistungsmotivs beitragen kann.

Physiologische Korrelate und Verhaltenskorrelate des Leistungsmotivs

Beim Leistungsmotiv ist die Suche nach speziellen neurophysiologischen Korrelaten der Motivanregung bisher wenig ergiebig gewesen. Es ließ sich zwar ein Zusammenhang zwischen der Anregung des Leistungsmotivs und der Ausschüttung des antidiuretischen Hormons **Vasopressin** nachweisen (McClelland 1995) – dieses Hormon ist auch an Gedächtnis- und Lernprozessen beteiligt. Eine so deutliche hormonelle Grundlage wie beim Anschluss- oder Machtmotiv scheint es aber für das Leistungsmotiv nicht zu geben.

Im Gegensatz zu den neurophysiologischen Korrelaten des Leistungsmotivs existiert zu den Verhaltenskorrelaten eine inzwischen kaum mehr zu überschauende Fülle an Studien. In den „Kindertagen" der Leistungsmotivationsforschung wurde dabei das Leistungsmotiv überwiegend projektiv gemessen und somit aus heutiger Sicht das implizite Motiv erfasst. Später hat man aus ökonomischen Gründen und aufgrund testtheoretischer Überlegungen überwiegend Fragebogen zur Motivmessung verwendet. Erst seit diskutiert wurde, dass Fragebogen andere Aspekte von Motiven erfassen als projektive Verfahren, finden sich in jüngerer Zeit wieder verstärkte Bemühungen, das Leistungsmotiv projektiv zu erfassen (Brunstein und Heckhausen 2010).

Das implizite, durch projektive Verfahren gemessene Leistungsmotiv wird durch andere Aspekte angeregt als das explizite. Ein hohes implizites Leistungsmotiv führt dann zu mehr Anstrengung, **Persistenz** und auch mehr Spaß bei der Bearbeitung von Aufgaben, wenn man das Ergebnis selbst kontrollieren kann. Glücksspiele sind also nicht geeignet. Zudem müssen die Aufgaben herausfordernd, d. h. gemessen an den eigenen Fähigkeiten weder zu schwierig noch zu leicht, sein. Nicht zuletzt müssen sie Informationen über den individuellen Leistungsstand erlauben. Dabei geht es eher darum, ob man sich selbst übertreffen kann und seine persönlichen Grenzen auszutesten, als darum zu versuchen, andere zu übertreffen. Deshalb ist sogenanntes individuelles (auf eigene Leistungsfortschritte bezogenes) Feedback für implizite Motive anregender als soziales Feedback, das sich an der durchschnittlichen Leistung einer Vergleichsgruppe orientiert.

Das explizite, durch Fragebogen gemessene Leistungsmotiv wird aktiviert, wenn die Situation es ermöglicht, eigene Fähigkeiten offen zu demonstrieren und sich mit Leistungen anderer zu vergleichen. Hier wird man also nicht von dem Wunsch geleitet, Informationen über seine eigene Leistungsfähigkeit zu gewinnen oder sich selbst zu übertreffen, sondern es geht darum, seine Fähigkeiten und Überlegenheit anderen gegenüber zu demonstrieren bzw. seine mangelnden Fähigkeiten zu verbergen.

Die untersuchten Verhaltenskorrelate zum Leistungsmotiv beziehen sich mal auf implizite und mal auf explizite Motive. Klassische Studien beschäftigen sich z. B. mit der Leistungsgüte bei Laboraufgaben, mit Schulleistung sowie mit Studien- und Berufserfolg. Zahlreiche Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich erfolgsmotivierte Personen realistische Ziele setzen und mittelschwierige Aufgaben bevorzugen, wie es durch das Risikowahlmodell von Atkinson (1957) vorhergesagt wird. Darüber hinaus neigen sie dazu, Erfolge ihrer eigenen Fähigkeit oder Anstrengung zuzuschreiben, für Misserfolge dagegen nur mangelnde Anstrengung, nicht jedoch mangelnde Fähigkeit verantwortlich zu machen (Zusammenfassung in Heckhausen et al. 1985). Die Präferenz erfolgsmotivierter Personen für mittelschwierige Aufgaben und ihre selbstwertdienliche Ursachenzuschreibung für Erfolg und Misserfolg sollen nach Heckhausen (1975) zu einer langfristigen Stabilisierung des Erfolgsmotivs führen.

Für misserfolgsmotivierte Personen sagt das Risikowahlmodell eine Bevorzugung sehr schwieriger oder sehr einfacher Aufgaben und eine Vermeidung mittelschwieriger Aufgaben vorher. Diese Vorhersage ließ sich allerdings nicht immer bestätigen. Oft findet man auch bei Misserfolgsmotivierten eine Präferenz für mittlere Schwierigkeitsgrade. Nach Schultheiss und Brunstein (2005) könnte ein Grund für die inkonsistente Befundlage zum Misserfolgsmotiv darin liegen, dass in unterschiedlichen Studien zur Erfassung dieses Motivs nur wenig vergleichbare Instrumente eingesetzt wurden. So hat man in einigen Studien den Test Anxiety Questionnaire (TAQ) (Mandler und Sarason 1952) verwendet – einen Fragebogen, der nach heutiger Auffassung das explizite Motiv erfasst, während in anderen Studien das implizite Misserfolgsmotiv projektiv mit dem TAT (Heckhausen 1963) gemessen wurde. Zudem scheinen unterschiedliche Motivmessverfahren zum Teil unterschiedliche Strategien zur Misserfolgsmeidung abzubilden. Misserfolg kann man zum einen aktiv vermeiden, indem man sich etwa besonders anstrengt, und zum anderen passiv, indem man z. B. herausfordernde Leistungssituationen möglichst vermeidet. Die misserfolgsmeidende Komponente im Risikowahlmodell ist als passive, leistungshemmende Vermeidung konzipiert. Vorausgesetzt die Vorhersagen des Modells treffen zu, sollte eine empirische Bestätigung dieser Vorhersagen am ehesten dann gelingen, wenn das eingesetzte Motivmessverfahren das passive Meidenmotiv erfasst.

Ob und wie sich Motive im Verhalten niederschlagen, hängt, wie bereits erwähnt, immer auch von situativen Bedingungen ab. So sollte z. B. eine leistungsmotivierte Person nur dann bessere Leistungen erzielen, wenn in der Situation geeignete Anreize vorhanden sind. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Situation es ermöglicht, Informationen über die eigene Fähigkeit zu bekommen. O'Connor et al. (1966) konnten zeigen, dass leistungsmotivierte Schüler in homogenen Klassen bessere Leistungen bringen als in heterogenen Klassen. Die Autoren nehmen an, dass der Leistungsvergleich mit Schülern, die eine ähnliche Leistung erbringen, einen stärkeren Anreiz darstellt als der Vergleich mit viel besseren oder viel schlechteren Schülern.

Für einen positiven Einfluss des Leistungsmotivs auf den Berufserfolg gibt es zahlreiche Belege. Nach Veroff (1982) sind hoch Leistungsmotivierte zufriedener mit ihrer beruflichen Stellung als niedrig Leistungsmotivierte und finden sie interessanter. Chusmir und Azevedo (1992) berichten über einen positiven Zusammenhang zwischen dem Leistungsmotiv der leitenden Geschäftsführer und der Umsatzsteigerung in 50 US-amerikanischen Firmen. Einen positiven Einfluss des Leistungsmotivs auf unternehmerische Aktivitäten hat Langens (2001) bei der Reanalyse von Daten aus einer Studie von McClelland und Winter (1969) gefunden. Es zeigte sich, dass hoch leistungsmotivierte indische Geschäftsleute ihre geschäftlichen Aktivitäten im positiven Sinne steigern konnten, wenn sie eigene für ihren Beruf relevante Eigenschaften für verbesserungswürdig hielten. In einer Längsschnittstudie von McClelland und Franz (1992) ist es gelungen, anhand des Leistungsmotivs bei Personen im Alter von 31 Jahren die Höhe des Einkommens zehn Jahre später vorherzusagen. Hoch Leistungsmotivierte haben insgesamt bessere Chancen, beruflich weiterzukommen. Allerdings ist das, wie McClelland und Boyatzis (1982) zeigen, nur bis zu einem bestimmten Grad der Fall. Um sehr hoch bewertete Karrierestufen zu erreichen, in denen Führungsaufgaben besonders relevant sind, bedarf es eher eines hohen Machtmotivs als eines hohen Leistungsmotivs.

8.6 Motivation durch Zielsetzung

Die oben beschriebenen Motivdispositionen sind grundlegende Bedürfnisse, bestimmte Ziele zu erreichen, die sich z. B. zu den genannten Inhaltsklassen Anschluss, Leistung und Macht zusammenfassen lassen. Diese Ziele sind, vor allem wenn sie Ausdruck impliziter Motive sind, häufig unbewusst und müssen nicht explizit gesetzt oder formuliert werden, um Verhalten zu leiten. Menschen setzen sich darüber hinaus aber auch bewusst Ziele, die dann mental repräsentiert und sprachlich kommunizierbar sind.

Ziele lassen sich nach verschiedenen Aspekten kategorisieren, z. B. nach ihrer Hierarchieebene, ihrem Abstraktionsgrad, ihrer Zeitperspektive, oder danach, ob sie darauf gerichtet sind, etwas zu erreichen, oder darauf, etwas zu verhindern. Bewusst gesetzte Ziele sind wie unbewusst verfolgte Ziele hierarchisch geordnet. Das bedeutet, dass das Erreichen von Zielen auf niedrigeren Hierarchieebenen dem Erreichen von Zielen auf höheren Ebenen dient. Übergeordnete Lebensziele (z. B. einen interessanten und einträglichen Beruf zu ergreifen) fächern sich so weit in hierarchisch niedrigere Ziele geringerer Komplexität (Bestehen einer Zwischenprüfung, Examensarbeit etc.) auf, bis es zur Formulierung konkreter Anliegen (Halten von Referaten, Literaturrecherche) kommt, die letztlich konkretes Verhalten in Gang setzen. Die mentale Repräsentation von Zielen und komplexen Handlungsplänen wird offenbar durch Strukturen im lateralen präfrontalen Cortex geleistet (► Kap. 9). Ziele können mit einem unterschiedlichen Grad an Selbstverpflichtung und Einsatzbereitschaft verfolgt werden. Die Dringlichkeit, mit der eine Person ein Ziel verfolgt und auch angesichts von Schwierigkeiten beibehält, wird als Zielbindung oder **Commitment** bezeichnet (Klinger 1975). Brunstein (1995) hat darauf hingewiesen, dass Menschen sich besonders an solche Ziele gebunden fühlen, die in ihrem Selbstkonzept verankert sind. Zum Beispiel werden Berufs- oder Karriereziele (Arzt, Manager, Wissenschaftler)

häufig nicht allein wegen des erwarteten Gehalts oder anderer messbarer Belohnungen angestrebt, sondern wegen der Identität, die mit dem Erreichen des Zieles erworben oder gefestigt wird (Gollwitzer 1987). Solche Identitätsziele sind oft so eng mit der eigenen Person verwachsen, dass der Gedanke, sie aufgeben zu müssen, für Menschen in der Regel mit negativen Emotionen verbunden ist.

Die Bindung an ein Ziel hat tiefgreifende Auswirkungen auf Inhalte und Strukturen kognitiver Prozesse: Wie man die Welt wahrnimmt, an welche Ereignisse man sich erinnert und welche Gedanken spontan im Bewusstsein auftauchen, hängt zu einem großen Teil davon ab, welche Ziele man momentan in seinem Leben verfolgt.

Die Bindung an ein Ziel hat ebenfalls Einfluss auf Gedächtnisprozesse. Sobald man sich an ein Ziel bindet, werden zielrelevante Informationen besser aus dem Gedächtnis abgerufen als für die Zielverfolgung irrelevante Inhalte. Der Intentionsüberlegenheitseffekt (► Kap. 9) zeigt, dass Gedächtnisinhalte, die mit einer unerledigten Absicht in Zusammenhang stehen, stärker aktiviert sind und damit rascher abgerufen werden als irrelevante Inhalte. Diese erhöhte Aktivierung zielbezogener Reize hat die Funktion, die Wiederaufnahme der Zielverfolgung z. B. nach Unterbrechungen oder Ablenkungen zu beschleunigen und das Ziel gegen alternative und weniger wichtige Ziele abzuschirmen.

Insgesamt erhöht die Bindung an ein Ziel die Wahrscheinlichkeit, dass mit dem Ziel in Zusammenhang stehende Gedanken und Vorstellungen auf die Bühne des Bewusstseins treten.

Auffällig ist, dass die hier beschriebenen Prozesse unwillkürlich ablaufen. Ziele verändern Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und Bewusstseinsprozesse, ohne dass Personen dies beabsichtigen und oft auch ohne dass die Veränderungen überhaupt bemerkt werden. Diese kognitiven Effekte der Zielbindung konvergieren darauf, eine Verwirklichung des Zieles voranzutreiben. Es ist daher wenig überraschend, dass das Commitment einer der besten Prädiktoren der Zielverwirklichung ist (Brunstein 1993). Nach Bandura (1989) beeinflussen Ziele Motivation und Handlung über Prozesse der Selbstbewertung. Eine motivierende Selbstbewertung soll nur dann zustande kommen, wenn ein Standard gesetzt und eine Rückmeldung darüber gegeben wird, ob und inwieweit der Standard erreicht ist. Die Selbstmotivation, wie Bandura es nennt, beruht sowohl auf einer Diskrepanzproduktion als auch auf einer Diskrepanzreduktion. Durch die Zielsetzung wird eine Diskrepanz zwischen einem Ist-Zustand und einem Soll-Zustand geschaffen, die dazu motiviert, diese Diskrepanz aufzuheben. Die Wirkung der Zielsetzung wird insbesondere durch die wahrgenommene **Selbstwirksamkeit** beeinflusst (Zusammenfassung in Bandura 1997). Diese bezieht sich auf die subjektive Einschätzung, dass die Zielverfolgung durch das eigene Verhalten beeinflusst werden kann (Gegenbeispiel: Glücksspiele) und dass man die zur Zielverwirklichung nötigen Handlungen selbst ausführen kann bzw. über die nötigen Fähigkeiten oder Erfahrungen verfügt (Beispiel: Prüfungen). Die Selbstwirksamkeit soll die Anstrengung und die Persistenz bei der Verfolgung von Zielen fördern. Die wahrgenommene Selbstwirksamkeit erhöht sich durch das erfolgreiche Verwirklichen von Unterzielen und führt in der Folge zu besseren Leistungen. In diesem Fall ist nicht mehr das übergeordnete Ziel der Motivator, sondern die Befriedigung, die dadurch entsteht, dass die Person die momentane Tätigkeit meistern kann.

Ob der in einem Ziel formulierte Soll-Zustand tatsächlich erreicht wurde, lässt sich umso leichter entscheiden, je spezifischer das Ziel formuliert wurde. Locke und Latham (1990) wiesen darauf hin, dass die Zielerreichung am erfolgreichsten ist, wenn man sich herausfordernde, vor allem aber konkrete Ziele setzt. Demnach ist z. B. das Ziel, beim 100-m-Lauf sein Bestes zu geben, ungünstiger, als sich auf eine bestimmte Zeit festzulegen. Dabei ist die Voraussetzung, dass die anvisierte Zeit gemessen an den persönlichen Möglichkeiten zwar herausfordernd, aber realistisch ist. Es gibt inzwischen eine überwältigende Fülle an Belegen für die Annahme Locke und Lathams (Zusammenfassung in Locke und Latham 2006).

Aus den obigen Ausführungen sollte klar geworden sein, dass die Wahrscheinlichkeit der Zielrealisierung von dem Grad der Bindung an ein Ziel sowie von der Zuversicht, es auch erreichen zu können, abhängt. Wie die Bindung an realisierbare Ziele gelingen kann, beschreibt Oettingen (2000) in ihrer Theorie der Fantasierealisierung. Dieser Theorie zufolge ist es der Zielbindung und somit auch der Zielerreichung förderlich, sich die positiven Konsequenzen der Zielerreichung und die möglichen Schwierigkeiten bei der Zielverwirklichung abwechselnd vor Augen zu halten. Durch dieses **mentale Kontrastieren** kann am ehesten gewährleistet werden, dass man sich realistische Ziele setzt, auf auftretende mögliche Schwierigkeiten bei der Zielverfolgung mental vorbereitet ist und notwendige Ressourcen zur Zielerreichung mobilisieren kann. Oettingen und Stephens (2009) berichten über positive Effekte dieser Strategie z. B. auf die Persistenz und Anstrengungsbereitschaft.

Ein weiterer für die Zielrealisierung wichtiger Aspekt ist der Grad der erlebten **Selbstbestimmung** bei der Verfolgung des Zieles. Das Ausmaß, in dem ein Ziel von einer Person selbst gewählt (Fußball spielen) oder von anderen Personen vorgegeben (Zimmer aufräumen) wurde, kann stark variieren. Ryan und Deci (2000; vgl. auch Deci und Ryan 1985, 1991) unterscheiden fünf Anlässe für die Verfolgung eines Zieles, die auf einem Kontinuum liegen, das von völliger Fremdbestimmung bis zu weitgehender Selbstbestimmung reicht. Am fremdbestimmten Pol des Kontinuums liegt *externale Kontrolle*. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass der Grund für die Verfolgung eines Zieles allein darin besteht, einer Bestrafung zu entgehen oder extrinsische Belohnungen zu erlangen. Von externaler Kontrolle würde man etwa dann sprechen, wenn ein Student sein Jurastudium ausschließlich wegen des erwarteten Verdiensts aufnimmt. Wird ein Ziel verfolgt, um Schuldgefühle und Angst zu vermeiden oder es anderen Menschen recht zu machen, dann sprechen Ryan und Deci von *Introjektion*. Ein Student kann sich etwa zu einem Jurastudium verpflichtet fühlen, weil sein Vater erwartet, dass er einmal seine Kanzlei übernimmt. *Identifikation* zeichnet sich dadurch aus, dass ein Ziel verfolgt wird, weil es den grundlegenden Werten und Überzeugungen einer Person entspricht. Ein Jurastudium kann etwa aus der Überzeugung aufgenommen werden, dass das Rechtssystem eine notwendige und sinnvolle Institution ist, zu deren Erfolg es sich lohnt beizutragen. *Integration* reicht weit in den selbstbestimmten Pol des Kontinuums und ist dadurch charakterisiert, dass ein Ziel in die eigene Lebensgeschichte und Persönlichkeit eingegliedert werden kann. Ein

Jurastudium kann z. B. die folgerichtige Fortsetzung eines schon lange andauernden Bemühens sein, sich als Strafverteidiger für die Schwachen und Benachteiligten einzusetzen. Schließlich können Ziele auch aus rein *intrinsischen Gründen* verfolgt werden, also etwa weil sie Spaß machen, Interesse wecken und den eigenen Bedürfnissen entsprechen.

Ob ein Ziel selbst- oder fremdbestimmt ist, macht einen deutlichen Unterschied für die Verfolgung dieses Zieles. Das Verfolgen selbstbestimmter Ziele weckt Interesse, macht Spaß und wird als Herausforderung gesehen. Menschen nehmen die Verfolgung selbstbestimmter Ziele nach Unterbrechungen spontan wieder auf, persistieren länger und sind insgesamt bei der Zielverwirklichung auch erfolgreicher (Deci und Ryan 1985, 1991; Sheldon und Elliot 1998, 1999). Sheldon und Elliot (1999) konnten zeigen, dass selbstbestimmte Ziele rascher verwirklicht werden, weil bei selbstbestimmten Zielen die Bereitschaft, Anstrengung in die Zielverfolgung zu investieren, größer ist als bei fremdbestimmten Zielen.

8.7 Anwendungsbeispiele

Motivinkongruenz – eine Ursache für ungesundes Essen

In einer Studienserie greifen Job et al. (2010) die theoretische Annahme auf, dass die Inkongruenz zwischen impliziten und expliziten Motiven eine Quelle von Stress darstellt („hidden stressor"-Hypothese nach Baumann et al. 2005; ▶ Abschn. 8.4.3). Sie argumentieren, dass Motivinkongruenz – genau wie andere Stressoren auch – das Essverhalten nachteilig beeinflussen sollten. Eine quasiexperimentelle Studie im Labor zeigte, dass die Interaktion zwischen dem impliziten Leistungsmotiv und der Bindung an ein Leistungsziel (Operationalisierung des expliziten Motivationssystems) die Anzahl ungesunder Snacks wie Schokolade, Kekse und Chips, welche die Probanden während einer nachfolgenden Aufgabe konsumieren durften, vorhersagte. Eine zweite korrelative Studie bestätigte und erweiterte das Befundmuster. Auch hier war die Motivinkongruenz mit ungesundem Essverhalten (z. B. Konsumieren ungesunder Nahrung, impulsivem Essen) assoziiert. Dieser Zusammenhang zeigte sich für das Leistungs- und Machtmotiv, nicht aber für das Anschlussmotiv. Diese Studie ist ein Beispiel dafür, wie weitreichend Motive und Motivinkongruenz das menschliche Verhalten und indirekt die Gesundheit beeinflussen können.

Macht und Krise

Winter (2002) fand auf der Grundlage inhaltsanalytischer Auswertungen von politischen Dokumenten, Präsidentschaftsreden, Schriftwechseln und weiteren historischen Materialien, dass ein hohes Vorkommen von machtthematischen Inhalten und ein niedriges Auftreten von anschlussthematischen Inhalten die Eskalation politischer Konflikte und kriegerischer Auseinandersetzung vorhersagen konnten. In einer Fortsetzung dieser Studien verglich der Autor Paare von Krisen, von denen eine friedlich gelöst wurde („Friedenskrisen") und die andere zu kriegerischen Auseinandersetzungen führte („Kriegskrisen") (z. B. Kubakrise 1961 vs. Schweinebuchtkrise 1962) (Winter 2007). Wie erwartet, fanden sich in den Kriegskrisen mehr machtthematische Inhalte in den Dokumenten als in den Friedenskrisen. Weitere Vorhersagevariablen waren die Verantwortlichkeit (als eine Form der prosozialen Macht) und der Umgang mit Komplexität (z. B. die Fähigkeit, mehrere alternative Perspektiven, beispielsweise politische Standpunkte, zu berücksichtigen). Die Befunde dieser Studie fielen zwar eher schwach aus, dennoch ist es erstaunlich, dass aus der Analyse schriftlicher Dokumente von Nationen abstrakte Motivkonstellationen ermittelt werden können, die ganz konkrete und gesellschaftlich hoch relevante Verhaltensweisen (z. B. Verhandlungen vs. kriegerisches Handeln) von Nationen vorhersagen können.

Motive und Partnerschaft

Nähe und Vertrautheit in Paarbeziehungen gelten als hoch erstrebenswertes Gut, das der Beziehung und auch dem Wohlbefinden und der Gesundheit des Einzelnen zuträglich ist. Jedoch streben Menschen auch nach Unabhängigkeit, persönlicher Selbstverwirklichung und effizienter Auseinandersetzung mit der Umwelt. Hagemeyer et al. (2015) bezeichnen diese Bestrebungen als gemeinschaftsbezogene („communal needs") und agentische Bedürfnisse („agentic needs"). Sie argumentieren gut nachvollziehbar, dass sich diese Bedürfnisse häufig entgegenstehen und zu Konflikten führen können. In ihren Studien testen die Autoren ein komplexes Set an Hypothesen, bei denen es im Kern um die Rolle agentischer Motive für die Beziehungsgüte unter bestimmten Bedingungen geht. Ein vereinfachter Teilaspekt dieser Studien ist im Folgenden dargestellt. Die Autoren untersuchten heterosexuelle Paare, die entweder zusammenleben – deren Partnerschaft sich somit durch eine hohe objektive Nähe auszeichnet – oder die ebenfalls in festen Beziehungen sind, aber in separaten Wohnungen leben (Living Apart Together, LAT). Agentische Motive wurden implizit mittels Bildgeschichtenübungen (▶ Abschn. 8.4.4) erhoben, die spezifisch die Erfassung beziehungsrelevanter Kennwerte erlaubt (Macht, Unabhängigkeit, Individualität in Paarbeziehungen; Partner-Related Agency and Communion Test, PACT; Hagemeyer und Neyer 2012). Die entsprechenden expliziten Motive wurden mittels eines Fragebogens erfasst. Die Erfassung verschiedener Facetten der Beziehungsqualität (allgemeine Zufriedenheit, sexuelle Aktivität und Interesse, Bindung) und Konflikte in der Partnerschaft (z. B. wegen Geld, Kommunikation) erfolgte ebenfalls mit Fragebogen. Die Autoren fanden wie vorhergesagt, dass eine hohe agentische Motivausprägung vor allem dann negative Auswirkungen auf die Beziehungsgüte hatte, wenn die Paare zusammenlebten, und weniger, wenn diese in getrennten Haushalten lebten. Wie der Titel des Artikels sagt, bedeutet bei hohen agentischen Motiven das Zusammenleben ein „too close", das sich negativ auf die Beziehung auswirkt.

8.8 Ausblick

Motive sind Niederschläge der evolutionären Anpassung des Menschen an seine Lebensumwelt; man kann gleichzeitig aber auch sagen, dass sich der Mensch die Welt nach seinen Bedürfnissen geformt hat. Der Einfluss von Motiven auf das kulturelle Leben ist nicht zu übersehen. Ohne das Anschlussmotiv gäbe es keine Gaststätten, keine Diskotheken, keine Familienfeste und keine Geburtstagsfeiern. Ohne das Machtmotiv gäbe es keine großen Sport-

veranstaltungen, keine Regierungen und keine Kirche. Gäbe es kein Leistungsmotiv, dann wären die technologische und kulturelle Entwicklung langsamer verlaufen; vielleicht würden Menschen noch in Höhlen leben. Alle großen Veränderungen im gesellschaftlichen Leben können nur dann Erfolg haben, wenn sie wie Schlüssel in das Schloss der Motivstruktur einer großen Mehrheit passen.

Die Technologieentwicklung schreitet immer schneller fort. Mit dieser Entwicklung verändern sich die Möglichkeiten und Wege, Motivziele zu erreichen, was sich leicht am Beispiel des Anschlussmotivs verdeutlichen lässt. Bereits heute muss man das Haus nicht mehr verlassen, wenn man Besorgungen zu machen hat. Man kann seine Einkäufe und Bankgeschäfte vom Computer aus erledigen, die Anzahl der Telearbeitsplätze nimmt zu, und auch die virtuelle Universität gewinnt zunehmend an Bedeutung. Der technologische Fortschritt macht es wahrscheinlich, dass die Anzahl konventioneller Sozialkontakte abnehmen wird. In Zukunft wird man andere Menschen daher weniger häufig als heute beim Studium, am Arbeitsplatz oder beim Einkaufen kennenlernen. Es entwickeln sich bereits neue Möglichkeiten, Sozialkontakte zu suchen und zu pflegen. So ermöglichen es uns z. B. SMS, E-Mail und Chats, über weite Entfernungen mit anderen Menschen Kontakte zu knüpfen. Menschen halten ihre Freunde mithilfe sozialer Netze wie Facebook oder WhatsApp über ihre Aktivitäten auf dem Laufenden. Immer mehr Paare finden sich über Onlineplattformen für Singles. Diese Art der Kontaktaufnahme unterscheidet sich von der konventionellen Art, andere Menschen kennenzulernen, in vielfältiger Weise. Es wird in Zukunft eine wichtige Aufgabe der Motivationsforschung sein, Motivationsprozesse unter diesen sich ändernden Anregungsbedingen zu untersuchen.

Dass Menschen besonders auf Situationen emotional reagieren, die ein Zusammensein mit anderen Menschen ermöglichen, ihnen Einfluss und Kontrolle sichern oder ihnen die Gelegenheit geben, etwas besser zu machen, liegt an unserer evolutionären Geschichte. Das gesamte Freizeitangebot ist ein Jahrmarkt, der menschliche Motive befriedigen hilft. Freizeit ist jedoch nur das halbe Leben. Wir haben ebenfalls angesprochen, dass Menschen zugunsten des Wohles der Gemeinschaft Ziele übernehmen müssen, die nicht von ihren Motiven gestützt werden. Ständig mehr oder weniger deutliche Kompromisse schließen zu müssen zwischen dem, was mit den eigenen Motiven in Einklang ist, und dem, was die Gemeinschaft erfordert, scheint ein grundlegendes Merkmal der menschlichen Existenz zu sein. Die Übereinstimmung impliziter Motive mit expliziten Motiven und Zielen ist in letzter Zeit zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt. Besonders die Folgen einer Inkongruenz zwischen den Systemen werden die Forscher auch in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit noch weiter beschäftigen. In diesen Themenbereich gehören auch Versuche, die Messung impliziter wie expliziter Motive zu optimieren.

8.9 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Motivationspsychologie beschäftigt sich mit zielgerichtetem Verhalten.
- Menschen und Tiere streben danach, ihr Wohlbefinden durch eine Optimierung der Affektbilanz zu optimieren, indem sie Ereignisse, die positive Affekte anregen, herbeizuführen, und Ereignisse, die negative Affekte anregen, zu verhindern suchen.
- Reize und Ereignisse erhalten durch die Affekte, die sie anregen oder ankündigen, Anreizcharakter.
- Motive sind Bewertungsdispositionen auf Seiten des Organismus. Sie haben Einfluss darauf, welche Reize und Ereignisse zu Anreizen werden und welche Zielzustände man anstrebt. Motive bestimmen, welche Aspekte der Umwelt man bevorzugt wahrnimmt, worauf man emotional reagiert und wodurch Verhalten aktiviert werden kann.
- Man kann grob zwischen biogenen Motiven wie Hunger oder Durst und soziogenen Motiven wie Anschluss, Macht und Leistung unterscheiden. Biogene Motive basieren eher auf biologischen Bedürfnissen, während soziogene Motive eher Persönlichkeitseigenschaften sind, die im Laufe der Sozialisation entstehen.
- Motive und Anreize sind eng aufeinander bezogen und machen gemeinsam die Motivation aus, die sich dann in der Richtung, der Intensität und der Dauer des Verhaltens niederschlägt.
- Man kann zwischen impliziten und expliziten Motiven unterscheiden. Implizite Motive sind (eher unbewusste) Bewertungsdispositionen, die in der frühen Kindheit entstehen. Sie sind nicht sprachgebunden und sprechen eher auf Tätigkeitsanreize an. Explizite Motive sind sprachbasiert und sprechen auf soziale Anreize an.
- Implizite Motive werden durch projektive Verfahren wie den TAT gemessen, während explizite Motive durch Fragebogen erfasst werden.
- Implizite und explizite Motivsysteme sind theoretisch unabhängig voneinander. Sie können übereinstimmen oder nicht übereinstimmen. Eine fehlende Übereinstimmung (Inkongruenz) ist häufig mit negativen Konsequenzen für Gesundheit und Wohlbefinden verbunden.
- In der Motivationsforschung werden zunehmend psychophysiologische und hormonelle Mechanismen untersucht, die dem Mechanismus der Affektantizipation zugrunde liegen.
- An motivationalen Prozessen sind besonders das Mittelhirn, das Zwischenhirn, phylogenetisch alte Teile der Großhirnrinde sowie das Stirnhirn als Teil des Neocortex beteiligt.
- Das limbische System bildet eine funktionale Einheit im Gehirn und kann als bewertende und aktivierende Schaltstelle zwischen Umweltgegebenheiten und Verhalten verstanden werden.
- Eine Anregung von Motiven durch passende Anreize aus der Umwelt führt zu einer erhöhten Dopaminausschüttung im Nucleus accumbens. Dadurch wird die Initiierung von Verhalten erleichtert. Für jedes Motivsystem konnten ein oder mehrere Hormone identifiziert werden, die aufgrund der Anregung des jeweiligen Motivs ausgeschüttet werden und den Nucleus accumbens aktivieren.

- Theorien, die sich mit Motivation durch Zielsetzung beschäftigen, haben zum Gegenstand, wie bewusste Ziele Handlungen organisieren und regulieren.
- Es macht einen Unterschied, ob ein Ziel selbst- oder fremdbestimmt ist. Das Verfolgen selbstbestimmter Ziele weckt im Gegensatz zu fremdbestimmten Zielen Interesse, macht Spaß und wird als Herausforderung gesehen.

Schlüsselbegriffe

Amygdala (*amygdala*) Paarig in den Schläfenlappen angelegte Zellgruppe, die an der Bewertung von Umweltereignissen beteiligt ist und im Zentrum eines Furcht- bzw. Meidensystems steht.

Anreiz (*incentive*) Derjenige Aspekt eines Zieles, der zu der Befriedigung eines Bedürfnisses oder eines Motivs beiträgt und das Ziel damit erstrebenswert macht.

Anschluss (*affiliation*) Streben nach Aufbau, Aufrechterhaltung oder Wiederherstellung freundschaftlicher Kontakte zu anderen Personen.

Aufsuchenmotivation (*approach motivation*) Ausrichtung von Verhalten auf einen positiv bewerteten Zustand.

Commitment (*commitment*) Zielbindung; Entschlossenheit, mit der ein Ziel verfolgt wird.

Dopamin (*dopamine*) Neurotransmitter, der (insbesondere im Nucleus accumbens) Prozesse der Verstärkung und Belohnung mediiert.

Erwartung (*expectancy*) Nicht notwendig bewusste, subjektive Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintreten wird.

Habit (*habit*) Gewohnheit, deren Stärke von der Anzahl ihrer Bekräftigungen abhängt.

Instinkt (*instinct*) Ungelerntes Verhaltensmuster, das von passenden Schlüsselreizen ausgelöst wird und dann starr abläuft.

Intimität (*intimacy*) Zustand wechselseitigen warmherzigen Austauschs zwischen mindestens zwei Personen.

Konflikt (*conflict*) Psychischer Zustand, der sich durch das gleichzeitige Bestehen von mindestens zwei gleich starken, aber entgegen gerichteten Verhaltenstendenzen auszeichnet.

Leistung (*achievement*) Streben nach Erfolg bei der Auseinandersetzung mit einem Gütemaßstab.

Limbisches System (*limbic system*) System von corticalen und subcorticalen Strukturen, die stark miteinander vernetzt sind. Es reguliert emotionale und motivationale Prozesse im Sinne einer Schaltstelle zwischen Wahrnehmung und Motorik.

Macht (*power*) Streben nach Dominanz, Einfluss und Kontrolle.

Mentales Kontrastieren (*mental contrasting*) Abwechselndes Nachdenken über Konsequenzen der Zielerreichung und die möglichen Schwierigkeiten bei der Zielverwirklichung.

Motiv (*motive*) Eigenschaft von Personen, auf Ziele einer bestimmten Thematik (etwa Anschluss, Macht oder Leistung) emotional anzusprechen.

Motivanregung (*motive arousal*) Prozess, in dem ein (situativer oder imaginierter) Anreiz auf ein passendes Motiv einer Person trifft und einen Zustand der Motivation hervorruft.

Motivation (*motivation*) Zustand zielgerichteten Verhaltens, der durch die Parameter Richtung, Intensität und Dauer beschrieben werden kann.

Motivinkongruenz (*motive incongruency*) Ausmaß der Nichtübereinstimmung zwischen impliziten und expliziten Motiven.

Multi-Motiv-Gitter (MMG) (*Multi-Motive Grid*) Semiprojektives Verfahren zur Erhebung von Motiven, bei dem die Probanden entscheiden müssen, ob bestimmte Aussagen zu vorgegebenen Bildern passen oder nicht.

Nucleus accumbens (*nucleus accumbens*) Zellstruktur, die zu den Basalganglien gehört und für die Initiierung von Handlungen verantwortlich ist. Sie steht im Zentrum eines aufsuchenden Motivationssystems.

Operanter Motivtest (OMT) (*operant motive test*) Test zur Messung impliziter Motive. Probanden antworten stichpunktartig auf zu Bildern formulierte Fragen.

Oxytocin (*oxytocin*) Neuropeptid, das im Hypothalamus synthetisiert wird und eine wesentliche Rolle bei der Regulation anschluss- und intimitätsmotivierten Verhaltens spielt.

Persistenz (*persistency*) Ausdauer bei der Zielverfolgung, insbesondere angesichts von Hindernissen und Widerständen.

Picture Story Exercise (PSE) (*picture story exercise*) Bildgeschichtenübung. Verfahren zur Erfassung impliziter Motive. Probanden schreiben wie beim Thematischen Auffassungstest (TAT) Geschichten zu vorgegebenen Bildern. Die Geschichten werden nach Motivthemen (z. B. Leistung, Macht, Anschluss) anhand von Kategoriensystemen ausgewertet. Von den Geschichten wird auf die Motivdispositionen der Probanden zurückgeschlossen.

Selbstbestimmung (*self-determination*) Ausmaß, in dem die Verfolgung eines Zieles als frei gewählt (*vs.* von anderen Personen vorgegeben) erlebt wird.

Selbstwirksamkeit (*self-efficacy*) Subjektive Einschätzung, dass man die Verfolgung und Verwirklichung von Zielen durch das eigene Verhalten beeinflussen kann.

Testosteron (*testosterone*) Primäres männliches Sexualhormon, das in den Keimdrüsen gebildet wird, aber auch zyklusabhängig schwankend bei Frauen nachweisbar ist. Es reguliert die Sexualität, beeinflusst das Streben nach Dominanz und ungehemmter Macht sowie aggressives Verhalten.

Thematischer Auffassungstest (TAT) (*Thematic Apperception Test*) Projektives Verfahren, das Auskunft über das Erleben und die Wahrnehmung und über implizite Motive von Probanden Aufschluss geben soll. Probanden schreiben Geschichten zu vorgegebenen Bildern. Zur Erfassung impliziter Motive wird der Test inzwischen als Picture Story Exercise (PSE) bezeichnet.

Trieb (*drive*) Aus physiologischen Mangelzuständen resultierender, unspezifischer Energetisierungszustand.

Valenz (*valence*) Durch Bedürfnisse oder Motive gewichteter Anreiz.

Vasopressin (*vasopressin*) Antidiuretisches Hormon, das die Aufmerksamkeit steigert und mit der Anregung des Leistungsmotivs in Zusammenhang gebracht werden konnte.

Ziel (*goal*) Ein mental repräsentierter, wertgeladener zukünftiger Zustand, der Verhalten reguliert und organisiert.

Weiterführende Literatur

Brandstätter, V., & Otto, J. H. (Hrsg.) (2009). *Handbuch der Allgemeinen Psychologie: Motivation und Emotion*. Göttingen: Hogrefe. (Gibt einen guten kurzen Überblick über relevante Konzepte der Emotions- und Motivationsforschung.)

Brandstätter, V., Schüler, J., Puca, R. M., & Lozo, L. (2013). *Motivation und Emotion*. Heidelberg: Springer. (Das Lehrbuch ist für Bachelorstudierende konzipiert. Es werden in Grundzügen die zentralen Themen der Motivations- und Emotionspsychologie behandelt.)

Heckhausen, J., & Heckhausen, H. (2010). *Motivation und Handeln* (4. Aufl.). Berlin: Springer Verlag. (Das Lehrbuch ist auch als Forscherhandbuch geeignet. Es gibt einen umfassenden und fundierten Überblick über die für die Motivationsforschung relevanten Themen. Hier werden auch historische Theorieentwicklungen ausführlich behandelt.)

McClelland, D. C. (1985). *Human motivation*. Cambridge, MA: Cambridge University. (Der Klassiker der Motivationslehrbücher. Hier geht es vor allem um implizite Motive.)

Pervin, L. A. (Hrsg.) (1989). *Goal concepts in personality and social psychology.* Hillsdale, N.J.: Erlbaum. (Zieltheorien und Zielsetzungstheorien sind die zentralen Themen dieses Buches. Es ist vor allem für diejenigen interessant, die sich für explizite Motivation interessieren.)

Schmalt, H.-D., & Langens, T. (2009). *Motivation* (4. vollst. überarb. u. erw. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer. (Das Buch gibt einen umfassenden Überblick über die Motivationspsychologie. Hier werden z.B. auch die biogenen Motive, Aggression und das sonst wenig beachtete Thema der „Neugiermotivation" ausführlich behandelt.)

Schultheiss, O., & Brunstein, J. (2010). *Implicit motives.* New York, NY: Oxford University Press. (In diesem Herausgeberband werden implizite Motive aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Thema „Motivkongruenz".)

Smith, C. P. (2009). *Motivation and personality: Handbook of thematic content analysis*. Cambridge: Cambridge University Press. (Ein Handbuch, in dem projektive Verfahren zur Motivmessung inklusive verschiedener Manuale zur motivthematischen Inhaltsanalyse dargestellt werden. Am Ende des Buches findet man Übungsmaterial für die Inhaltsanalysen.)

Wagner, H. (1999). *The psychobiology of human motivation*. London-New York: Routledge. (Dieses Buch gibt einen guten Überblick über die physiologischen Grundlagen der Motivation.)

Danksagung

Teile des Textes stammen von Thomas Langens, der Coautor des Kapitels in der ersten und zweiten Auflage war. Wir danken Marita Bojang für das Korrekturlesen des Manuskripts und die Erstellung der Literaturliste sowie Marina Stern für die Überarbeitung der Abbildungen.

Literatur

Alcock, J. (2013). *Animal behavior: An evolutionary approach* (10. Aufl.). Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Atkinson, J. W. (1957). Motivational determinants of risk-taking behavior. *Psychological Review*, *64*, 359–372.

Atkinson, J. W., & Litwin, G. H. (1960). Achievement motive and test anxiety conceived as motive to approach success and motive to avoid failure. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *60*, 52–63.

Atkinson, J. W., & Walker, E. L. (1956). The affiliation motive and perceptual sensitivity to faces. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *53*, 38–41.

Atkinson, J. W., Heynes, R. W., & Veroff, J. (1954). The effect of experimental arousal of the affiliation motive on thematic apperception. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *49*, 405–410.

Bandura, A. (1989). Self-regulation of motivation and action through internal standards and goal systems. In L. A. Pervin (Hrsg.), *Goal concepts in personality and social psychology* (S. 19–85). Hillsdale: Erlbaum.

Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York: W. H. Freeman and Co, Publishers.

Baumann, N., Kaschel, R., & Kuhl, J. (2005). Striving for unwanted goals: Stress-dependent discrepancies between explicit and implicit achievement motives reduce subjective well-being and increase psychosomatic symptoms. *Journal of Personality and Social Psychology*, *89*(5), 781–799.

Baumeister, R. F., & Tice, D. M. (1990). Anxiety and social exclusion. *Journal of Social and Clinical-Psychology*, *9*, 165–195.

Baxter, M. G., & Murray, E. A. (2002). The amygdala and reward. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*, 563–573.

Bischof-Köhler, D. (1985). Zur Phylogenese menschlicher Motivation. In L. H. Eckensberger, & E. D. Lantermann (Hrsg.), *Emotion und Reflexivität* (S. 3–47). München: Urban & Schwarzenberg.

Bowlby, J. (1958). The nature of the child's tie to his mother. *Interactional Journal of Psychoanalysis*, *39*, 350–373.

Boyatzis, R. E. (1973). Affiliation motivation. In D. C. McClelland, & R. S. Steele (Hrsg.), *Human motivation: A book of readings* (S. 252–276). Morristown: General Learning Press.

Brunstein, J. C. (1993). Personal goals and subjective well-being: A longitudinal study. *Journal of Personality and Social Psychology*, *65*, 1061–1070.

Brunstein, J. C. (1995). *Motivation nach Mißerfolg. Die Bedeutung von Commitment und Substitution*. Göttingen: Hogrefe.

Brunstein, J. C. (2010). Implizite und explizite Motive. In J. Heckhausen, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* (4. Aufl. S. 237–255). Berlin: Springer.

Brunstein, J. C., & Heckhausen, H. (2010). Leistungsmotivation. In J. Heckhausen, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* (4. Aufl. S. 145–192). Berlin: Springer.

Brunstein, J. C., & Hoyer, J. (2002). Implizites versus explizites Leistungsstreben: Befunde zur Unabhängigkeit zweier Motivationssysteme. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, *16*, 51–62.

Brunstein, J. C., Schultheiß, O. C., & Grässmann, R. (1998). Personal goals and emotional well-being: The moderating role of motive dispositions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *75*, 494–508.

Buss, D. M. (2000). The evolution of happiness. *American-Psychologist*, *55*(1), 15–23.

Byrne, D. (1961). Interpersonal attraction as a function of affiliation need and attitude similarity. *Human Relations*, *14*, 283–289.

Carter, C. S. (1998). Neuroendocrine perspectives on social attachment and love. *Psychoneuroendocrinology*, *23*(8), 779–818.

Chusmir, L. H., & Azevedo, A. (1992). Motivation needs of sampled Fortune-500 CEOs: Relations to organization outcomes. *Perceptual and Motor Skills*, *75*, 595–612.

Clarke, D., & White, F. (1987). D1 dopamine receptor – the search for a function. *Synapse*, *1*, 347–356.

Cooper, W. H. (1983). An achievement motivation nomological network. *Journal of Personality and Social Psychology*, *44*, 841–861.

Cowlishaw, G., & Dunbar, R. I. M. (1991). Dominance rank and mating success in male primates. *Animal Behaviour*, *41*, 1045–1056.

Crespi, L. P. (1942). Quantitative variation of incentive and performance in the white rat. *American Journal of Psychology*, *55*, 467–517.

Dabbs, J. M. (1992). Testosterone and occupational achievement. *Social Forces*, *70*(3), 813–824.

Dabbs, J. M. (1997). Testosterone, smiling, and facial appearance. *Journal of Nonverbal Behavior*, *21*(1), 45–55.

Davidson, R. J. (2004). What does the prefrontal cortex „do" in affect: Perspectives in frontal EEG asymmetry research. *Biological Psychology*, *67*, 219–234.

Davis, M. (1992). The role of the amygdala in fear and anxiety. *Annual Review of Neuroscience*, *15*, 353–375.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York: Plenum.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1991). A motivational approach to self: Integration in personality. In R. Dienstbier (Hrsg.), *Perspectives on motivation* Nebraska Symposium on Motivation, (Bd. 38, S. 237–288). Lincoln: University of Nebraska Press.

Depue, R. A., & Collins, P. F. (1999). Neurobiology of the structure of personality: Dopamine, facilitation of incentive motivation, and extraversion. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 491–569.

Depue, R. A., & Morrone-Strupinsky, J. V. (2005). A neurobehavioral model of affiliative bonding: Implications for conceptualizing a human trait of affiliation. *Behavioral and Brain Sciences*, *28*, 313–395.

DeWall, C. N., MacDonald, G., Webster, G. D., Masten, C., Baumeister, R. F., Powell, C., Combs, D., Schurtz, D. R., Stuillman, T. F., Tice, D. M., & Eisenberger, N. I. (2010). Acetaminophen reduces social pain: Behavioral and neural evidence. *Psychological Science*, *21*, 931–937. doi:10.1177/0956797610374741.

Donhauser, P. W., Rösch, A. G., & Schlutheiss, O. C. (2015). The implicit need for power predicts recognition speedfor dynamic changes in facial expressions of emotion. *Motivation and Emotion*, *39*, 714–721.

Drenckhahn, D., & Zenker, W. (1994). *Benninghoff: Anatomie*. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg.

Eibl-Eibesfeldt, I. (1997). *Die Biologie des menschlichen Verhaltens. Grundriß der Humanethologie*. München: Piper.

Eisenberger, N. I., Liebermann, M. D., & Williams, K. D. (2003). Does rejection hurt? An fMRI study of social exclusion. *Science*, *302*, 290–292.

Fodor, E. M., Wick, D. P., & Harsen, K. M. (2006). The power motive and affective response to assertiveness. *Journal of Research in Personality*, *40*, 598–610.

French, J. R. P., & Raven, B. H. (1959). The basis of social power. In D. Cartwright (Hrsg.), *Studies in social power* (S. 150–167). Ann Arbor: The University of Michigan.

Freud, S. (1915). *Triebe und Triebschicksale, Gesammelte Werke*. Bd. X. Frankfurt: Fischer.

Gable, S. L. (2006). Approach and avoidance social motives and goals. *Journal of Personality*, *74*(1), 175–222.

Gable, S. L., Reis, H. T., & Elliot, A. J. (2003). Evidence for bivariate systems: An empirical test of appetition and aversion across domains. *Journal of Research in Personality*, *37*, 349–372.

Gollwitzer, P. M. (1987). Suchen, Finden und Festigen der eigenen Identität: Unstillbare Zielintentionen. In H. Heckhausen, P. M. Gollwitzer, & F. E. Weinert (Hrsg.), *Jenseits des Rubikon: Der Wille in den Humanwissenschaften* (S. 176–189). Berlin: Springer.

Gröpel, P., & Kehr, H. M. (2014). Motivation and self-control: Implicit motives moderate the exertion of self-control in motive-related tasks. *Journal of Personality*, *82*(4), 317–328.

Hagemeyer, B., & Neyer, F. J. (2012). Assessing implicit motivational orientations in couple relationships: The Partner-Related Agency and Communion Test (PACT). *Psychological Assessment*, *24*, 114–128.

Hagemeyer, B., Schönbrodt, F., Neyer, F. J., Neberich, W., & Asendorpf, J. A. (2015). When „together" means „too close": Agency motives and relationship functioning in co-resident and living-apart-together couples. *Journal of Personality and Social Psychology*, *109*, 813–835.

Heckhausen, H. (1963). *Hoffnung und Furcht in der Leistungsmotivation*. Meisenheim: Anton Hain.

Heckhausen, H. (1975). Fear of failure as a self-reinforcing motive system. In G. Sarason, & C. Spielberger (Hrsg.), *Stress and anxiety* (Bd. II, S. 117–128). Washington, D.C.: Hemisphere.

Heckhausen, H. (1977). Motivation: Kognitionspsychologische Aufspaltung eines summarischen Konstrukts. *Psychologische Rundschau*, *28*, 175–189.

Heckhausen, H. (1989). *Motivation und Handeln* (2. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.

Heckhausen, H., Schmalt, H.-D., & Schneider, K. (1985). *Achievement motivation in perspective*. New York: Academic Press.

Hofer, J., Chasiotis, A., & Campos, D. (2006). Congruence between social values and implicit motives: Effects on life satisfaction across three cultures. *European Journal of Personality*, *20*, 305–324.

Hofer, J., Bond, M. H., Campos, D., & Li, M. (2010). The implicit power motive and sociosexuality in men and women: pancultural effects of responsibility. *Journal of Personality and Social Psychology*, *99*(2), 380–394.

Horowitz, R. A. N. (1961). *Achievement correlates and the executive role. Unpublished Bachelor of Arts thesis*. Department of Social Relations: Harvard University.

Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.

Hull, C. L. (1952). *A behavior system: An introduction to behavior theory concerning the individual organism*. New Haven: Yale University Press.

Insel, T. R. (1997). A neurobiological basis of social attachment. *American Journal of Psychiatry*, *154*(6), 726–735.

Iversen, L. L. (1988). Die Chemie der Signalübertragung. In *Gehirn und Nervensystem*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.

Jamner, L. D., & Leigh, H. (1999). Repressive/defensive coping, endogenous opioids, and health: How a life so perfect can make you sick. *Psychiatry Research*, *85*, 17–31.

Jemmott, J. B. (1987). Social motives and susceptibility to disease: Stalking individual differences in health risks. *Journal of Personality*, *55*, 267–298.

Job, V., Oertig, D., Brandstätter, V., & Allemand, M. (2010). Discrepancies between implicit and explicit motivation and unhealthy eating behavior. *Journal of Personality*, *78*(4), 1209–1238.

Julian, T., & McKenry, P. C. (1989). Relationship of testosterone to men's family functioning at mid-life: A research note. *Aggressive-Behavior*, *15*(4), 281–289.

Kehr, H. M. (2004). Implicit/explicit motive discrepancies and volitional depletion among managers. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *30*(3), 315–327.

Klinger, E. (1975). Consequences of commitment to and disengagement from incentives. *Psychological Review*, *82*, 1–25.

Klinger, E. (1990). *Daydreaming. Using waking fantasy and imagery for self-knowledge and creativity*. Los Angeles: Jeremy P. Tarcher.

Klüver, H., & Bucy, P. C. (1937). „Psychic blindness" and other symptoms following bilateral temporal lobectomy in rhesus monkeys. *American Journal of Physiology*, *119*, 352–353.

Köllner, M. G., & Schultheiss, O. C. (2014). Meta-analytic evidence of low convergence between implicit and explicit measures of the needs for achievement, affiliation, and power. *Frontiers in Psychology*, *5*(826). doi:10.3389/fpsyg.2014.00826.

Kosfeld, M., Heinrich, M., Zak, P. J., Fischbacher, U., & Fehr, E. (2005). Oxytocin increases trust in humans. *Nature*, *435*, 673–676.

Kuhl, J., & Scheffer, D. (1999). *Der operante Multi-Motive-Test (OMT): Manual*. : Osnabrück University.

Kuhl, J., & Scheffer, D. (2012). *Der operante Multi-Motiv-Test (OMT): Manual. Revidierte Fassung 2012*. : Osnabrück University.

Langan-Fox, J., & Canty, J. M. (2010). Implicit and self-attributed affiliation motive congruence and depression: The moderating role of perfectionism. *Personality and Individual Differences*, *49*, 600–605.

Langens, T. A. (2001). Predicting behavior change in Indian businessmen from a combination of need for achievement and self-discrepancy. *Journal of Research in Personality*, *35*, 339–352.

Lansing, J. B., & Heyns, R. W. (1959). Need affiliation and frequency of four types of communication. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *58*, 365–372.

Leary, M. R. (2010). Affiliation, acceptance, and belonging. In S. T. Fiske, D. T. Gilbert, & G. Lindzey (Hrsg.), *Handbook of Social Psychology* 5. Aufl. (Bd. 2, S. 864–897). New York: Wiley.

Lewin, K. (1931). *Die psychologische Situation bei Lohn und Strafe*. Leipzig: Hirzel.

Lewin, K. (1936). *Principles of topological psychology*. New York: McGraw-Hill.

Lewin, K. (1946). Behavior and development as a function of the total situation. In L. Carmichael (Hrsg.), *Manual of child psychology* (S. 791–844). Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons.

Lim, M. M., & Young, L. J. (2006). Neuropeptidergic regulation of affiliative behavior and social bonding in animals. *Hormones and Behavior*, *50*, 506–517.

Litwin, G. H., & Siebrecht, A. (1967). Integrators and entrepreneurs; their motivation and effect on management. *Hospital Progress*, *48*(9), 67–71.

Locke, E. A., & Latham, G. P. (1990). *A theory of goal setting and task performance*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Locke, E. A., & Latham, G. P. (2006). New directions in goal-setting theory. *Current Directions in Psychological Science*, *15*, 265–268.

Logue, A. W. (1991). *The psychology of eating and drinking: An introduction* (2. Aufl.). New York: W. H. Freeman and Co, Publishers.

Mandler, G., & Sarason, S. B. (1952). A study of anxiety and learning. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *47*, 166–173.

Mason, A., & Blankenship, V. (1987). Power and affiliation motivation, stress, and abuse in intimate relationship. *Journal of Personality and Social Psychology*, *52*, 203–210.

Mazur, & Booth, A. (1998). Testosterone and dominance in men. *Behavior and Brain Sciences*, *21*(3), 353–397.

McAdams, D. P. (1992). Experiences of intimacy and power: relationships between social motives and autobiographical memory. *Journal of Personality and Social Psychology*, *42*, 292–302.

McAdams, D. P., & Bryant, F. B. (1987). Intimacy motivation and subjective mental health in a nationwide sample. *Journal of Personality*, *55*(3), 395–413.

McAdams, D. P., & Constantian, C. A. (1983). Intimacy and affiliation motives in daily living: An experience sampling analysis. *Journal of Personality and Social Psychology*, *45*, 851–861.

McAdams, D. P., & Vaillant, G. E. (1982). Intimacy motivation and psychosocial adjustment: A longitudinal study. *Journal of Personality Assessment*, *46*, 586–593.

McAdams, D. P., Healy, S., & Krause, S. (1984a). Social motives and patterns of friendship. *Journal of Personality and Social Psychology*, *47*, 828–838.

McAdams, D. P., Jackson, R. J., & Kirshnit, C. (1984b). Looking, laughing, and smiling in dyads as a function of intimacy motivation and reciprocity. *Journal of Personality*, *52*(3), 261–273.

McClelland, D. C. (1975). *Power. The inner experience*. New York: Irvington.

McClelland, D. C. (1979). Inhibited power motivation and high blood pressure in men. *Journal of Abnormal Psychology*, *88*, 182–190.

McClelland, D. C. (1980). Motive dispositions. The merits of operant and respondent measures. In L. Wheeler (Hrsg.), *Review of personality and social psychology* (S. 10–41). Beverly Hills: Sage.

McClelland, D. C. (1985). *Human motivation*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.

McClelland, D. C. (1995). Achievement motivation in relation to achievement-related recall, performance, and urine flow, a marker associated with release of vasopressin. *Motivation and Emotion*, *19*(1), 59–76.

McClelland, D. C., & Boyatzis, R. E. (1982). The leadership motive pattern and long-term success in management. *Journal of Applied Psychology*, *67*, 737–743.

McClelland, D. C., & Franz, C. E. (1992). Motivational and other sources of work accomplishment in mid-life: A longitudinal study. *Journal of Personality*, *60*, 679–707.

McClelland, D. C., & Jemmott, J. B. (1980). Power motivation, stress and physical illness. Journal of Human Stress, 6, 6–15. McClelland, D.C. (1989). Motivational factors in health and disease. *American Psychologist*, *44*, 675–683.

McClelland, D. C., & Kirshnit, C. (1988). The effect of motivational arousal through films on salivary immunoglobinA. *Psychology and Health*, *2*, 31–52.

McClelland, D. C., & Pilon, D. A. (1983). Sources of adult motives in patterns of parent behavior in early childhood. *Journal of Personality and Social Psychology*, *44*, 564–574.

McClelland, D. C., & Winter, D. G. (1969). *Motivating economic achievement*. New York: Free Press.

McClelland, D. C., Atkinson, J. W., Clark, R. A., & Lowell, E. L. (1953). *The achievement motive*. New York: Appleton-Century-Crofts.

McClelland, D. C., Davis, W. N., Kalin, R., & Wanner, E. (1972). *The drinking man: Alcohol and human motivation*. New York: The Free Press.

McClelland, D. C., Koestner, R., & Weinberger, J. (1989). How do self-attributed and implicit motives differ? *Psychological Review*, *96*, 690–702.

McDougall, W. (1908). *An introduction to social psychology*. London: Methuen.

Mehrabian, A. (1970). The development and validation of measures of affiliative tendency and sensitivity to rejection. *Educational and Psychological Measurement*, *30*(2), 417–428.

Miller, N. E. (1944). An experimental investigation of acquired drives. *Psychological Bulletin*, *38*, 534–535.

Morgan, C. D., & Murray, H. A. (1935). A method for investigating fantasies: The Thematic Apperceptive Test. *Archives of Neurological Psychiatry*, *34*, 289–306.

Mussen, P. H., & Jones, M. C. (1957). Self-conceptions, motivations, and interpersonal attitudes of late- and early-maturing boys. *Child Development*, *28*, 243–256.

O'Connor, P. A., Atkinson, J. W., & Horner, M. (1966). Motivational implications of ability grouping in schools. In J. W. Atkinson, & N. T. Feather (Hrsg.), *A theory of achievement motivation*. New York: Wiley.

Oettingen, G. (2000). Expectancy effects on behavior depend on self-regulatory thought. *Social Cognition*, *18*, 101–129.

Oettingen, G., & Stephens, E. J. (2009). Fantasies and motivationally intelligent goal setting. In G. B. Moskowitz, & H. Grant (Hrsg.), *The psychology of goals* (S. 153–178). New York: Guilford Press.

Olds, B., & Milner, P. (1954). Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *47*, 419–427.

Perin, C. I. (1942). Behavioral potentiality as a joint function of the amount of training and the degree of hunger at the time of extinction. *Journal of Experimental Psychology*, *30*, 93–113.

Pérusse, D. (1993). Cultural and reproductive success in industrial societies: Testing the relationship at the proximate and ultimate levels. *Behavioral and Brain Sciences*, *16*(2), 267–322.

Pérusse, D. (1994). Mate choice in modern societies: Testing evolutionary hypotheses with behavioral data. *Human Nature*, *5*(3), 255–278.

Pinnow, M. (2009). Endokrinologische Korrelate von Motiven. In V. Brandstätter, & J. Otto (Hrsg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Motivation und Emotion* (S. 298–323). Göttigen: Hogrefe.

Pöhlmann, K., & Brunstein, J. C. (1997). GOALS: Ein Fragebogen zur Messung von Lebenszielen. *Diagnostica*, *43*, 63–79.

Quirin, M., Düsing, M., & Kuhl, J. (2013). Implicit affiliation motive predicts correct intuitive judgment. *Journal of Individual Differences*, *34*(1), 24–31. doi:10.1027/1614-0001/a000086.

Routtenberg (1987). *Belohnungssystem. Spektrum der Wissenschaft*. Heidelberg: Spektrum.

Rozin, P. (1976). Psychobiological and cultural determinants of food choice. In T. Silverstone (Hrsg.), *Appetite and food intake* (S. 285–312). Berlin: Dahlem Konferenzen.

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, *55*, 68–78.

Salamone, J. D., Correa, M., Mingote, S., & Weber, S. M. (2003). Nucleus accumbens dopamine and the regulation of effort in food-seeking behavior: Implications for studies of natural motivation, psychiatry, and drug abuse. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, *305*, 1–8.

Schmalt, H.-D., & Langens, T. (2009). *Motivation* (4. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.

Schneider, K., & Schmalt, H. D. (1994). *Motivation* (2. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.

Schneider, K., & Schmalt, H.-D. (2000). *Motivation* (3. Aufl.). Stuttgart, Berlin, Köln: Kohlhammer.

Schönbrodt, F. D., & Gerstenberg, F. X. R. (2012). An IRT analysis of motive questionnaires: The Unified Motive Scales. *Journal of Research in Personality*, *6*, 725–742. doi:10.1016/j.jrp.2012.08.010.

Schüler, J. (2010). Achievement incentives determine the effects of achievement-motive incongruence on flow experience. *Motivation and Emotion*, *34*, 2–14.

Schultheiss, O. C. (2001). An information processing account of implicit motive arousal. In L. M. Maehr, & P. Pintrich (Hrsg.), *Methodology in motivation research* Advances in motivation andachievement, (Bd. 12, S. 1–41). Greenwich, CT: JAI Press.

Schultheiss, O. C. (2007). A biobehavioral model of implicit power motivation arousal, reward and frustration. In E. Harmon-Jones, & P. Winkielman (Hrsg.), *Social neuroscience: Integrating biological and psychological explanations of social behaviour* (S. 176–196). New York: Guilford Press.

Schultheiss, O. C. (2013). The hormone correlates of implicit motives. *Social and Personality Psychology Compass*, *7*(1), 52–65.

Schultheiss, O. C., & Brunstein, J. C. (1999). Goal imagery: Bridging the gap between implicit motives and explicit goals. *Journal of Personality*, *67*, 1–38.

Schultheiss, O. C., & Brunstein, J. C. (2005). Implicit motive approach to competence. In A. J. Elliot, & C. S. Dweck (Hrsg.), *Handbook of competence and motivation* (S. 31–51). New York: Guilford.

Schultheiss, O. C., & Hale, J. A. (2007). Implicit motives modulate attentional orientation to facial expressions of emotion. *Motivation and Emotion*, *31*, 13–24.

Schultheiss, O. C., & Pang, J. C. (2007). Measuring implicit motives. In R. W. Robins, R. C. Fraley, & R. Krueger (Hrsg.), *Handbook research methods in personality psychology* (S. 322–344). New York: Guilford.

Schultheiss, O. C., & Wirth, M. M. (2010). Biopsychologische Aspekte der Motivation. In J. Heckhausen, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation and Handeln* (4. Aufl. S. 257–283). New York: Cambridge University Press.

Schultheiss, O. C., Dargel, A., & Rohde, W. (2003). Implicit motives and gonadal stereoid hormes: Effects of menstrual cycle phase, oral contraceptive use, and relationship status. *Hormones and Behavior*, *43*, 293–301.

Schultheiss, O. C., Wirth, M. M., Torges, C. M., Pang, J. S., Villacorta, M. A., & Welsh, K. M. (2005). Effects of implicit power motivation on men's and women's implicit learning and testosterone changes after social victory or defeat. *Journal of Personality and Social Psychology*, *88*(1), 174–188.

Sheldon, K. M., & Elliot, A. J. (1998). Not all Personal Goals are Personal: Comparing Autonomous and Controlled Reasons for Goals as Predictors of Effort and Attainment. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *24*(5), 546–557.

Sheldon, K. M., & Elliot, A. J. (1999). Goal striving, need satisfaction, and longitudinal well-being: The self-concordance model. *Journal of Personality and Social Psychology*, *76*, 482–497.

Shi, C., & Davis, M. (1999). Pain pathways involved in fear conditioning measured with fear-potentiated startle: Lesion studies. *Journal of Neuroscience*, *19*(1), 420–430.

Shipley, T. E., & Veroff, J. (1952). A projective measure of need for affiliation. *Journal of Experimental Psychology*, *43*, 349–356.

Sokolowski, K. (1996). Wille und Bewußtheit. In J. Kuhl, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation, Volition und Handlung* Enzyklopädie der Psychologie, Motivation und Emotion, (Bd. 4, S. 485–530). Göttingen: Hogrefe.

Sokolowski, K., Schmalt, H.-D., Langens, T., & Puca, R. M. (2000). Assessing achievement, affiliation, and power motives all at once – the Multi-Motive Grid (MMG). *Journal of Personality Assessment*, *74*, 126–145.

Sorrentino, R. M., & Sheppard, B. H. (1978). Effects of affiliation-related motives on swimmers in individual versus group competition: A field experiment. *Journal of Personality and Social Psychology*, *36*, 704–714.

Stanton, S. J., & Schultheiss, O. C. (2007). Basal and dynamic relationships between implicit power motivation and estradiol in women. *Hormones and Behavior*, *52*, 571–580.

Stewart, A. J., & Rubin, Z. (1976). The power motive in the dating couple. *Journal of Personality and Social Psychology*, *34*, 305–309.

Stumpf, H., Angleitner, A., Wieck, T., Jackson, D. N., & Beloch-Till, H. (1985). *Deutsche Personality Research Form (PRF). Göttingen*. Germany: Hogrefe.

Taylor, S. E., & Gonzaga, G. C. (2007). Affiliative responses to stress: A social neuroscience model. In E. Harmon-Jones, & P. Winkielman (Hrsg.), *Social neuroscience: Integrating biological explanations of social behavior* (S. 454–473). New York: Guilford Press.

Terhune, K. W. (1968). Motives, situation, and interpersonal conflict within prisoner's dilemma. *Journal of Personality and Social Psychology*, *8*, 1–24.

Thorndike, E. L. (1911). *Animal intelligence*. New York: Maxmillan.

Thrash, T. M., Elliot, A. J., & Schultheiss, O. C. (2007). Methodological and dispostional predictors of congruence between implicit and explicit need for achievement. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *7*, 961–974.

Tolman, E. C., & Honzik, C. N. (1930). Degrees of hunger, reward and nonreward, and maze learning in rats. *University of California Publications in Psychology*, *4*, 241–256.

Uvnäs-Moberg, K. (1998). Oxytocin may mediate the benefits of positive social interaction and emotions. *Psychoneuroendocrinology*, *23*(8), 819–835.

Veroff, J. (1982). Assertive motivations: Achievement versus power. In A. J. Stewart (Hrsg.), *Motivation and society* (S. 99–132). San Francisco: Jossey-Bass.

Weiner, B. (Hrsg.). (1974). *Cognitive views of human motivation*. New York: Academic Press.

White, R. W. (1959). Motivation reconsidered: The concept of competence. *Psychological Review*, *66*, 297–333.

Williams, S. B. (1938). Resistance to extinction as a function of the number of reinforcements. *Journal of Experimental Psychology*, *23*, 506–521.

Winter, D. G. (1973). *The power motive*. New York: The Free Press.

Winter, D. G. (1991). A motivational model of leadership: Predicting long-term management success from TAT measures of power motivation and responsibility. *Leadership-Quarterly*, *2*, 67–80.

Winter, D. G. (1993). Power, affiliation, and war: three tests of a motivational model. *Journal of Personality and Social Psychology*, *65*, 532–545.

Winter, D. G. (1994). *Manual for scoring motive imagery in running text. Unpublished instrument*. Ann Arbor: University of Michigan.

Winter, D. G. (1996). *Personality*. New York: McGraw-Hill.

Winter, D. G. (2002). Motivation and political leadership. In L. Valenty, & O. Feldman (Hrsg.), *Political leadership for the new century: Personality and behavior among American leaders* (S. 25–47). Westport, CT: Praeger.

Winter, D. G. (2007). The role of motivation, responsibility, and integrative complexity in crisis escalation: comparative studies on war and peace crises. *Journal of Personality and Social Psychology*, *92*(5), 920–937.

Woike, B. A. (1995). Most-memorable experiences: Evidence for a link between implicit and explicit motives and social cognitive processes in everyday life. *Journal of Personality and Social Psychology*, *68*, 1081–1091.

Woodworth, R. S. (1918). *Dynamic psychology*. New York: Columbia University Press.

Zurbriggen, E. L. (2000). Social motives and cognitive power-sex associations: Predictors of aggressive sexual behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, *78*(3), 559–581.

Volition und kognitive Kontrolle

Thomas Goschke

9.1 Einleitung: Gegenstand der Forschung zu Volition und kognitiver Kontrolle – 253

9.2 Kognitive Grundlagen willentlicher Handlungen: Vom Reflex zur Antizipation – 255

9.2.1 Entwicklungsstufen der Verhaltenssteuerung – 255

9.2.2 Besondere Funktionsmerkmale willentlicher Handlungen – 256

9.2.3 Grundlegende Kontrollprobleme bei der willentlichen Handlungssteuerung – 257

9.3 Kognitionspsychologische Ansätze: Automatische und kontrollierte Prozesse bei der intentionalen Handlungssteuerung – 259

9.3.1 Bewusste und unbewusste Steuerung willentlicher Handlungen – 259

9.3.2 Ein Modell der Interaktion automatischer und intentionaler Prozesse – 262

9.4 Volitionspsychologische Ansätze: Motivationskonflikte und Selbstkontrolle – 263

9.4.1 Zielselektion vs. Zielrealisierung – 264

9.4.2 Vom Wünschen zum Wollen: Das Rubikonmodell – 264

9.4.3 Handlungskontrolle: Abschirmung von Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen – 267

9.4.4 Empirische Evidenz für den Einfluss von Handlungskontrollstrategien und exekutiven Funktionen auf selbstkontrolliertes Verhalten – 268

9.4.5 Bedingungsfaktoren und Moderatoren der Mobilisierung von Selbstkontrolle – 271

9.4.6 Individuelle Unterschiede in der Selbstkontrolle: Lage- vs. Handlungsorientierung – 272

9.5 Kognitive Neurowissenschaft der willentlichen Handlungssteuerung: Neuronale Grundlagen der kognitiven Kontrolle – 274

9.5.1 Methodische Vorbemerkungen – 274

9.5.2 Kognitive Kontrollfunktionen des Präfrontalcortex – 277

9.5.3 Funktionelle Organisation des präfrontalen Cortex: Zentrale Exekutive oder multiple exekutive Systeme? – 287

9.5.4 Computationale Modelle der kognitiven Kontrolle – 291

9.5.5 Konfliktüberwachung und adaptive Regulation kognitiver Kontrolle – 293

9.6 Kontrolldilemmata und Metakontrollprobleme – 296

9.6.1 Kontrolldilemmata – 296

9.6.2 Metakontrollparameter – 298

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_9

9.6.3 Emotionale Modulation von Kontrollparametern – 298
9.6.4 Neuromodulation kognitiver Kontrolle – 299

9.7 Anwendungsbeispiele – 300

9.8 Ausblick – 303

9.9 Weiterführende Informationen – 303

Literatur – 308

Im Blickfang

Warum tun wir nicht immer das, was wir wollen?

Ein Spielsüchtiger schafft es nicht, seinen zwanghaften Drang zum exzessiven Glücksspiel zu kontrollieren, obwohl er sich der katastrophalen persönlichen Konsequenzen seines Verhaltens bewusst ist. Ein Schüler ist unfähig, sich auch nur für kurze Zeit auf eine Sache zu konzentrieren, wechselt in schneller Folge von einer zur nächsten Handlung und scheint bei der kleinsten Ablenkung zu vergessen, was er tun wollte. Man selbst findet sich mit einem Bier vor dem Fernseher wieder, obwohl man sich fest vorgenommen hatte, ins Sportstudio zu gehen. Was den Personen in diesen Beispielen gemeinsam ist, ist eine mehr oder weniger schwere Beeinträchtigung der Fähigkeit, die eigenen Handlungen, Gedanken und Gefühle an langfristigen oder übergeordneten Zielen auszurichten. Die Verfolgung persönlich bedeutsamer Ziele erfordert häufig Selbstkontrolle: die Fähigkeit, sich auf relevante Information zu konzentrieren und störende Reize auszublenden, konkurrierende Gewohnheiten oder emotionale Impulse zu unterdrücken und die Befriedigung momentaner Bedürfnisse zumindest zeitweise aufzuschieben. In unserer Alltagspsychologie sprechen wir davon, dass in solchen Situationen „Willensstärke" erforderlich ist, und wir bezeichnen Personen, die wider ihre eigenen Vorsätze momentanen Impulsen nachgeben, als „willensschwach".

Diese Begriffe sind allerdings kaum mehr als eine Beschreibung des beobachteten Verhaltens und erklären nicht, was es eigentlich bedeutet, über „Willensstärke" zu verfügen. Welche kognitiven Mechanismen liegen der Fähigkeit zugrunde, trotz Ablenkungen oder Versuchungen bei einer Sache zu bleiben? Wie werden Absichten gegen konkurrierende Gewohnheiten oder automatisierte Reaktionstendenzen „abgeschirmt"? Wovon hängt es ab, ob in einer konkreten Situation Selbstkontrolle mobilisiert wird, und warum gelingt dies manchen Menschen besser als anderen? Welche Gehirnsysteme vermitteln die Kontrolle willentlicher Handlungen und die flexible Anpassung des Verhaltens an übergeordnete Ziele? Wie kommt es zu Beeinträchtigungen der willentlichen Selbststeuerung? Dies sind einige der Fragen, die im Zentrum der Forschung zur Volition und kognitiven Kontrolle stehen und Thema dieses Kapitels sind. Die Ergebnisse dieser Forschung haben nicht nur wichtige Einsichten in die Mechanismen der willentlichen Handlungssteuerung geliefert, sondern sind auch von Bedeutung für das Verständnis von Beeinträchtigungen der Selbststeuerung bei zahlreichen psychischen Störungen wie z. B. Substanzgebrauchs-, Angst- oder Impulskontrollstörungen.

9.1 Einleitung: Gegenstand der Forschung zu Volition und kognitiver Kontrolle

Die Forschung zur Volition und kognitiven Kontrolle befasst sich mit den kognitiven und neuronalen Mechanismen, die zielgerichteten willentlichen Handlungen zugrunde liegen. Der Fokus liegt dabei auf Situationen, in denen automatisierte Routinehandlungen nicht hinreichen, um ein Ziel zu erreichen oder eine Aufgabe zu bewältigen, weil Verhaltensdispositionen und kognitive Prozesse auf neue Weise „konfiguriert" werden müssen oder weil Absichten in Konflikt mit starken Gewohnheiten, konkurrierenden Motivationstendenzen oder momentanen Bedürfnissen stehen.

Die Frage, wie willentliche Handlungen gesteuert werden, war bereits in den Anfängen der Experimentellen Psychologie Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts ein zentrales Forschungsthema, und es gab erste Versuche, die zugrunde liegenden Prozesse experimentell zu untersuchen (Ach 1910; historische Übersicht in Gundlach 1987; James 1890; Lewin 1926). Allerdings wurden willenspsychologische Fragen in der weiteren Geschichte der Psychologie über weite Strecken vernachlässigt, was zum Teil damit zu tun hat, dass der Volitionsbegriff oft mit der Idee eines freien Willens assoziiert und damit als unvereinbar mit einer naturwissenschaftlichen Erklärung menschlichen Verhaltens betrachtet wurde (► Zur Vertiefung 9.1). Erst in den 1970er und 1980er Jahren wurde das Thema der willentlichen Kontrolle von Handlungen und kognitiven Prozessen wieder systematischer aufgenommen. In der Kognitionspsychologie manifestierte sich dies in der einflussreichen Unterscheidung zwischen *automatischen (reizgesteuerten)* und *kontrollierten (intentionalen) Prozessen*, während man in der Motivationsforschung begann, sich neben *motivationalen Prozessen*, die der *Auswahl* von Zielen zugrunde liegen, verstärkt mit *volitionalen Prozessen* zu befassen, die die *Realisierung* von Absichten vermitteln. Nur wenig später wurde in der damals sich neu formierenden Kognitiven Neurowissenschaft die Frage nach den neuronalen Grundlagen der kognitiven Kontrolle willentlicher Handlungen zu einem zentralen Forschungsthema.

Die Mechanismen, die der willentlichen Handlungssteuerung zugrunde liegen, werden in diesen unterschiedlichen Forschungsfeldern mit teilweise unterschiedlichen Begriffen bezeichnet. So wird in der Kognitionspsychologie und Kognitiven Neurowissenschaft von **kognitiver Kontrolle** (Botvinick und Cohen 2014; Miller und Cohen 2001) oder **exekutiven Funktionen** (Diamond 2013) gesprochen, während in der Motivationspsychologie zumeist die Begriffe **Volition** oder Handlungskontrolle (Achtziger und Gollwitzer 2010; Kuhl 1996) verwendet werden. Trotz Unterschieden im Detail überlappen diese Konstrukte weitgehend in ihrer Bedeutung, insofern sie alle zur Bezeichnung von Mechanismen verwendet werden, die (1) die flexible Koordination sensorischer, emotionaler und motorischer Prozesse im Sinne übergeordneter Ziele und (2) die Realisierung von Absichten trotz konkurrierender Motivations- oder Reaktionstendenzen vermitteln (Kuhl 1996; Miller und Cohen 2001). Diese Mechanismen bilden die Grundlage flexiblen zielgerichteten Verhaltens und sind eine Voraussetzung für **Selbstkontrolle**, also der Fähigkeit, kurzfristigen Versuchungen zu widerstehen, Belohnungen aufzuschieben und impulsive Reaktionen zu unterdrücken, um das eigene Verhalten in Einklang mit langfristigen persönlichen Zielen, sozialen Normen oder moralischen Werten zu bringen (Hassin et al. 2010; Inzlicht et al. 2014; Kotabe und Hofmann 2015).

Die Forschung zur willentlichen Handlungssteuerung war lange Zeit durch die Annahme geprägt, dass es im Gehirn eine oberste Steuerinstanz (eine sogenannte **zentrale Exekutive**) geben müsse, die perzeptuelle, emotionale und motorische Systeme im Sinne übergeordneter Ziele koordiniert und kontrolliert. Da allerdings nicht näher spezifiziert wurde, welche kognitiven Mechanismen einem solchen Kontrollsystem zugrunde liegen, wurde zu Recht kritisiert, dass mit der zentralen Exekutive le-

Zur Vertiefung 9.1

Das philosophische Problem der Willensfreiheit

Befasst man sich mit dem Thema willentliche Handlungssteuerung, stößt man unweigerlich auf die Frage, ob sich willentliche Handlungen überhaupt naturwissenschaftlich erklären lassen und, wenn ja, wie es dann um die menschliche Willensfreiheit steht. Im Zentrum der Jahrhunderte währenden philosophischen Debatte um die Willensfreiheit steht dabei die Frage, ob die Annahme eines „freien Willens" mit der Annahme des Determinismus vereinbar ist (Goschke und Walter 2005; Kane 2011). Als Determinismus wird die These bezeichnet, dass jedes Ereignis (einschließlich unserer Entscheidungen und Handlungen) durch vorauslaufende Bedingungen in Verbindung mit den Naturgesetzen vollständig und eindeutig festgelegt ist (ausführliche Diskussion in Vihvelin 2013). Ob man Determinismus und Willensfreiheit für miteinander vereinbar hält oder nicht, hängt entscheidend davon ab, welche Bedingungen man an die Idee der Willensfreiheit knüpft.

Eine radikale Konzeption von Willensfreiheit, die in der Philosophie als *Libertarianismus* bezeichnet wird, geht davon aus, dass Personen nur dann über echte Willensfreiheit verfügen, wenn sie sich unter vollständig identischen Bedingungen auch *anders hätten entscheiden können*, als sie es faktisch taten (Bedingung der *alternativen Möglichkeiten*). Nach dieser Definition setzt Willensfreiheit also voraus, dass Personen *Letzturheber* ihrer Entscheidungen und Handlungen sind, d. h., sie müssen in der Lage sein, neue Kausalketten zu initiieren (z. B. eine Handlung in Gang zu setzen), ohne dass diese bereits durch vorauslaufende Ereignisse vollständig festgelegt sind (dies wird mitunter durch das Bild eines „unbewegten Bewegers" beschrieben). Die libertarianische Konzeption von Willensfreiheit wird allgemein als unvereinbar mit dem Determinismus angesehen (*Inkompatibilismus*). Da in einem deterministischen Universum jedes Ereignis durch in der Vergangenheit liegende Ereignisse in Verbindung mit den Naturgesetzen vollständig und eindeutig festgelegt ist und da wir weder die Vergangenheit noch die Naturgesetze ändern können, gibt es in einem deterministischen Universum weder alternative Möglichkeiten noch Letzturheberschaft (Inwagen 1983). Wer also den Determinismus für eine zutreffende Beschreibung der Welt hält, für den kann es Willensfreiheit im libertarianischen Sinn nicht geben; wer dagegen an libertarianische Willensfreiheit glaubt, muss annehmen, dass die Welt – oder zumindest einige unserer Entscheidungen und Handlungen – nicht vollständig determiniert ist. (Es ist wichtig zu sehen, dass es hier nicht darum geht, ob **Willenshandlungen** *vorhersagbar* sind, sondern darum, ob sie faktisch determiniert sind, wobei Ersteres nicht notwendig aus Letzterem folgt.)

So intuitiv plausibel das libertarianische Konzept von Willensfreiheit auf den ersten Blick sein mag, so schwerwiegend sind die Probleme, die es aufwirft. Das gravierendste Problem dieser Position besteht darin, dass indeterminierte Entscheidungen und Handlungen, die vollkommen unabhängig von jedweden vorauslaufenden Bedingungen sind, letztlich nichts anderes wären als *zufällige Ereignisse*, die in keinem kausalen Zusammenhang zu den Überzeugungen, Wünschen, Absichten und Lernerfahrungen der Person stünden. Die libertarianische Konzeption von Willensfreiheit lässt daher völlig im Unklaren, wie man Personen noch als *Urheber* ihrer Handlungen betrachten könnte. Einige Philosophen haben daraus den Schluss gezogen, dass es Willensfreiheit weder in einem deterministischen noch in einem indeterministischen Universum geben kann: Wäre der Determinismus wahr, gäbe es keine alternativen Möglichkeiten; wäre der Determinismus falsch, wären unsere Handlungen Zufallsereignisse (diese Position wird mitunter als *Impossibilismus* bezeichnet).

Auf der anderen Seite dieser Debatte stehen Vertreter des *Kompatibilismus*, die davon ausgehen, dass Willensfreiheit – wenn man sie nur richtig definiert – vereinbar mit der Annahme des Determinismus ist (Dennett 2003; Goschke 2006; Pauen 2006). Kompatibilisten zufolge sind Willenshandlungen weder indeterminiert, noch sind Personen Letzturheber ihrer Handlungen. Was Willenshandlungen (z. B. das absichtliche Heranwinken eines Taxis) von unwillkürlichen Reflexen (z. B. dem Zurückziehen der Hand von einer heißen Ofenplatte) unterscheide, sei nicht, dass Willenshandlungen indeterminiert sind, sondern vielmehr, *auf welche Weise* sie determiniert werden. Wie in ▶ Abschn. 9.2 dargestellt wird, sind Willenshandlungen im Unterschied zu Reflexen nicht vollständig durch die *unmittelbare Reizsituation* determiniert, sondern zu ihren Determinanten gehören die Ziele, Absichten und Motive der Person. Obwohl wir in einem deterministischen Universum unter identischen Bedingungen und bei exakt gleicher Lerngeschichte *nicht* anders handeln können, als wir es faktisch tun, und obwohl auch unsere Ziele, Absichten und Motive durch vorausgehende Ereignisse determiniert sind, sind nach kompatibilistischer Auffassung unsere Handlungen nichtsdestotrotz in dem Maß willentlich kontrolliert, in dem sie durch eben diese Ziele und Absichten (mit)bestimmt werden. Entsprechend können wir uns in dem Maß als Urheber unserer Handlungen betrachten, in dem diese von unseren Zielen und Absichten abhängen.

Ohne hier weiter auf die Debatte zwischen Kompatibilisten und Inkompatibilisten eingehen zu können (vgl. Kane 2011; Vihvelin 2013), lassen sich drei Schlussfolgerungen aus der philosophischen Diskussion ziehen, die auch für die psychologische Erforschung von Willenshandlungen relevant sind:

1. Die Frage nach der Vereinbarkeit von Willensfreiheit und Determinismus kann nicht empirisch (z. B. durch neurowissenschaftliche Experimente) geklärt werden, sondern es handelt sich um eine *begriffliche* Frage, deren Beantwortung davon abhängt, wie man Willensfreiheit definiert.
2. Die experimentelle Erforschung der willentlichen Handlungssteuerung macht nur im Rahmen einer kompatibilistischen Konzeption von Willensfreiheit Sinn (Goschke und Walter 2005; Prinz 2004). Wären Willenshandlungen tatsächlich in dem Sinn frei, dass sie durch keine kausalen Bedingungsfaktoren determiniert würden, wäre es völlig sinnlos, mittels experimenteller Bedingungsmanipulation nach ihren (nicht existenten) Determinanten und den zugrunde liegenden neurokognitiven Mechanismen zu suchen. Insofern lässt sich die These der Determiniertheit von Verhalten nicht durch neurowissenschaftliche Experimente belegen oder widerlegen, sondern sie ist eine *Bedingung der Möglichkeit* der experimentellen Erforschung von Willenshandlungen.
3. Willentlichkeit und Selbstkontrolle sind aus kompatibilistischer Sicht keine Alles-oder-nichts-Eigenschaften, sondern können als *graduell abstufbare Fähigkeiten* interpretiert werden, über die verschiedene Personen in unterschiedlichem Maß verfügen und die bei einer Person in verschiedenen Situationen oder Zuständen in unterschiedlichem Grad mobilisiert werden.

diglich ein Homunculus postuliert wurde, also ein intelligenter Agent in der Person, durch den nichts erklärt wird, sondern der lediglich ein Platzhalter für die noch unverstandenen und *zu erklärenden* Mechanismen der willentlichen Kontrolle darstellt. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden große Fortschritte in dem Bestreben gemacht, die fragwürdige Annahme einer zentralen Exekutive durch Modelle der kognitiven und neuronalen Mechanismen zu ersetzen, die willentlichen Handlungen zugrunde liegen. Dazu werden experimentalpsychologische Methoden, neurowissenschaftliche (z. B. bildgebende) Verfahren, Untersuchungen hirngeschädigter Patienten sowie Ansätze zur computationalen Modellierung kognitiver Prozesse (z. B. künstliche

Tab. 9.1 Ebenen der Verhaltenssteuerung

Reflexe und Instinkte	Angeborene Reaktionsprogramme, die in fixer Weise durch spezifische Auslösereize aktiviert werden und Anpassungen an invariante Umweltbedingungen darstellen
Bedingte Reflexe	Klassisch konditionierte Reaktionen, die durch Signalreize ausgelöst werden und den Organismus auf biologisch relevante unkonditionierte Reize vorbereiten
Gewohnheiten	Reiz-Reaktions-Assoziationen, die aufgrund belohnender oder bestrafender Verhaltenskonsequenzen durch modellfreies instrumentelles Lernen erworben werden
Zielgerichtetes Verhalten	Verhalten, das auf inneren Modellen der Relationen zwischen Reizen, Reaktionen und Konsequenzen beruht, die durch modellbasiertes instrumentelles Lernen erworben werden
Intentionale (willentliche) Handlungen	Zielgerichtetes Verhalten, das sich durch folgende besonderen Merkmale auszeichnet: *Zukunftsorientierung*: Antizipation langfristiger zukünftiger Ziele und Verhaltenskonsequenzen *Reizunabhängigkeit:* Handlungsselektion aufgrund mental repräsentierter Ziele *Sprachliche Repräsentation* von Absichten und Reaktionsregeln *Flexibilität:* Schnelle Umkonfigurierung und Anpassung von Reaktionsdispositionen an wechselnde Ziele oder Aufgaben *Hierarchische Struktur* von Zielen und Unterzielen *Handlungsplanung:* Generieren und mentales Durchspielen neuer Handlungssequenzen
Volition und Selbstkontrolle	Selbstregulatorische metakognitive Strategien, die die Verwirklichung von Absichten trotz konkurrierender Gewohnheiten und Motivationstendenzen fördern und auf folgenden kognitiven Fähigkeiten beruhen: *Bedürfnisantizipation:* Fähigkeit, eigene zukünftige Motivationszustände zu antizipieren *Metakognitives Wissen* über Strategien (z. B. Aufmerksamkeitskontrolle), mit denen die eigenen motivationalen und handlungssteuernden Prozesse beeinflusst werden können *Präventive Selbstverpflichtung:* Einschränkung eigener zukünftiger Handlungsspielräume, um zukünftige Versuchungen zu vermeiden oder die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, dass man einer Versuchung nachgibt

neuronale Netze) kombiniert. Im Folgenden soll ein Überblick über ausgewählte Bereiche dieser Forschung gegeben werden, wobei kognitions-, volitions- und neurowissenschaftliche Forschungsansätze zusammenhängend anhand von drei Leitfragen behandelt werden:

1. Was sind die kognitiven Grundlagen willentlicher (intentionaler) Handlungen, und wie interagieren intentionale und automatische Prozesse bei der Handlungssteuerung?
2. Welche Mechanismen liegen der Fähigkeit zugrunde, Absichten und Ziele gegen konkurrierende Gewohnheiten oder momentane Impulse abzuschirmen, und welche Faktoren bestimmen, ob und wann volitionale Strategien mobilisiert werden?
3. Welche neuronalen Systeme liegen kognitiven Kontrollfunktionen und selbstkontrolliertem Verhalten zugrunde?

9.2 Kognitive Grundlagen willentlicher Handlungen: Vom Reflex zur Antizipation

9.2.1 Entwicklungsstufen der Verhaltenssteuerung

Lebewesen müssen in jedem Moment entscheiden, was als Nächstes zu tun ist, d. h., sie müssen unter wechselnden und nur teilweise vorhersagbaren Umweltbedingungen Verhaltensweisen auswählen, die förderlich für ihr Überleben und ihre Fortpflanzung sind, und Zustände vermeiden, die mit negativen Konsequenzen verbunden sind. Im Verlauf der Evolution haben sich zunehmend komplexere kognitive Mechanismen und Kontrollsysteme zur Lösung des fundamentalen Problems der adaptiven Verhaltensselektion entwickelt, die zu einem immensen Zuwachs an Freiheitsgraden des Verhaltens und einer zunehmenden Unabhängigkeit des Verhaltens von der unmittelbaren Reizsituation und der aktuellen Bedürfnislage geführt haben (Tab. 9.1).

Bedingte Reflexe Während Reflexe es ermöglichen, schnell und ohne größeren kognitiven Verarbeitungsaufwand mit angeborenen Reaktionen auf Reize zu reagieren (z. B. der Lidschlussreflex, der das Auge vor Verletzungen schützt), bestand ein entscheidender Schritt in Richtung auf eine größere Verhaltensflexibilität in der Entwicklung der Fähigkeit, angeborene Reaktionsprogramme durch klassisches Konditionieren an neue Auslösereize zu knüpfen (▶ Kap. 10). Das klassische Konditionieren ist eine der phylogenetisch ältesten Formen des Lernens und ermöglicht es Lebewesen, Hinweisreize mit biologisch relevanten Reizen (z. B. Futter, Schmerz) zu assoziieren, sodass sie auf konditionierte Reize mit angeborenen Reaktionen antworten können, die den Organismus auf den nachfolgenden unkonditionierten Reiz vorbereiten.

Gewohnheiten Im Unterschied dazu bezeichnen Gewohnheiten (*habits*) Reiz-Reaktions-Assoziationen, die durch instrumentelles Konditionieren, speziell *modellfreies Verstärkungslernen*, erworben werden. Als „modellfrei" wird diese Form des Lernens bezeichnet, weil belohnende oder bestrafende Konsequenzen eines Verhaltens direkt zur Verstärkung oder Abschwächung von Reiz-Reaktions-Assoziationen führen, ohne dass das Lebewesen ein inneres Modell der Relationen zwischen Verhalten und Konsequenzen erwirbt (Dolan und Dayan 2013). Gewohnheiten ermöglichen es, mit geringem kognitivem Aufwand auf Reize zu reagieren, aber sie sind unflexibel und können nur durch Umlernen an neue Situationen oder Belohnungskontingenzen angepasst werden.

Zielgerichtetes Verhalten Im Unterschied zu Gewohnheiten beruht zielgerichtetes Verhalten auf Assoziationen zwischen Reaktionen und deren Konsequenzen, die durch *modellbasiertes Verstärkungslernen* erworben werden. Diese Form des instrumentellen Lernens führt zum Aufbau innerer Modelle der Relationen zwischen Reizen, Reaktionen und deren Konsequenzen (Dolan und Dayan 2013). Solche Modelle befähigen Lebewesen dazu, Erwartungen darüber zu bilden, welche Effekte eine Reaktion unter bestimmten Reizbedingungen haben wird, sodass Verhalten aufgrund der zu erwartenden Konsequenzen ausgewählt werden kann. Dass ein Verhalten in diesem Sinn zielgerichtet ist, kann daraus geschlossen werden, dass es sensitiv für eine Entwertung seiner Konsequenzen ist (*Verstärkerdevaluation*). Führt beispielsweise ein Tier ein Verhalten, von dem es gelernt hat, dass es die Gabe von Futter bewirkt, nicht mehr aus, wenn es gesättigt ist, spricht dies dafür, dass das Verhalten durch antizipierte Konsequenzen kontrolliert wird. Wird das Verhalten trotz einer Verstärkerdevaluation ausgeführt, handelt es sich vermutlich um eine Gewohnheit, die durch fixe Reiz-Reaktions-Assoziationen kontrolliert wird. Zielgerichtetes Verhalten ist mit höherem Verarbeitungsaufwand verbunden, hat aber den Vorteil, dass es schnell und flexibel an wechselnde Bedingungen angepasst werden kann.

9.2.2 Besondere Funktionsmerkmale willentlicher Handlungen

Im Unterschied zu einfachen Formen zielgerichteten Verhaltens, die auf Antizipationen unmittelbarer Verhaltenseffekte beruhen (z. B. wenn eine Laborratte lernt, dass das Drücken eines Hebels zur Gabe von Futter führt), zeichnet sich willentliche Handlungssteuerung beim Menschen durch eine Reihe funktionaler Besonderheiten aus. Dazu gehören insbesondere:

1. ein *erweiterter Zeithorizont*, der sich darin manifestiert, dass wir auch weit in Zukunft liegende Handlungskonsequenzen antizipieren können;
2. die Fähigkeit, zukünftige Bedürfnis- und Motivationszustände zu antizipieren;
3. die Fähigkeit, *hierarchisch strukturierte Handlungspläne* zu bilden sowie Intentionen und Verhaltensregeln *sprachlich zu repräsentieren*, was es ermöglicht, Verhaltensdispositionen schnell und flexibel umzukonfigurieren.

Handlungs-Effekt-Antizipationen und episodisches zukunftsbezogenes Denken Die Fähigkeit zur Antizipation von Handlungseffekten wurde bereits von William James (1890) und anderen Psychologen des 19. Jahrhunderts als entscheidende Voraussetzung für willentliches Handeln angesehen. James zufolge lernen wir von Geburt an, unsere Bewegungen mit den durch sie ausgelösten sensorischen Effekten zu assoziieren. Führen Bewegungen, die wir zunächst rein zufällig produzieren, systematisch zu bestimmten wahrnehmbaren Effekten, bilden sich Assoziationen zwischen den Bewegungen und ihren Effekten (z. B. dass das Drücken des Teddys ein Brummen auslöst). Aufgrund solcher Handlungs-Effekt-Assoziationen können Handlungen zielgerichtet ausgewählt werden, indem die mentale Repräsentation eines erwünschten Effekts (z. B. die Vorstellung des Brummens) eine Repräsentation der Handlung aktiviert, von der gelernt wurde, dass sie den gewünschten Effekt bewirkt (den Teddy drücken) (Elsner und Hommel 2001; Hoffmann 1993; Prinz et al. 2013; Waszak et al. 2012). Im Verlauf der Entwicklung lernen Menschen, nicht nur unmittelbare sensorische Handlungseffekte zu antizipieren, sondern Erwartungen über zunehmend weiter in der Zukunft liegende Folgen ihres Handelns sowie über deren Auswirkungen auf die eigene Bedürfnis- und Motivationslage zu bilden (z. B. dass ein erfolgreicher Studienabschluss die Chancen auf einen interessanten Beruf erhöht und das Erlangen des Wunschberufs positive Emotionen auslösen wird).

Von großer Bedeutung ist dabei das episodische Gedächtnis (▶ Kap. 12), da dieses nicht allein die Speicherung vergangener Erlebnisse in einem raumzeitlichen Kontext vermittelt, sondern uns die einzigartige Fähigkeit verleiht, zukünftige oder mögliche (kontrafaktische) Szenarien zu imaginieren (Schacter et al. 2012). Dies ermöglicht es, Handlungspläne vor ihrer Ausführung mental zu „simulieren" und Konsequenzen möglicher Handlungen in Bezug auf ihre Wünschbarkeit und Erreichbarkeit im Lichte langfristiger Ziele zu bewerten (◘ Abb. 9.1). Zusammengenommen bilden diese kognitiven Fähigkeiten die Grundlage einer genuin *zukunftsorientierten Handlungsauswahl*. Wir können damit *intentionale (willentliche) Handlungen* als Verhaltensweisen definieren, die auf die Erreichung von mental repräsentierten Zielzuständen gerichtet sind, wobei unter **Zielen** antizipierte und mit einer emotionalen Bewertung assoziierte Effekte eigener Handlungen verstanden werden. Mit dem Begriff **Absicht** oder *Intention* wird im Folgenden ein mentaler Zustand bezeichnet, in dem sich eine Person verbindlich darauf festgelegt hat, die Erreichung eines Zieles durch eigenes Handeln anstreben zu wollen. Diese Selbstverpflichtung (*commitment*) unterscheidet Absichten von unverbindlichen Wünschen.

Bedürfnisantizipation und Selbstkontrolle Menschen können allerdings nicht nur Effekte eigener Handlungen antizipieren, sondern sie sind auch in der Lage, Erwartungen über zukünftige Veränderungen ihrer eigenen *Bedürfnis-* und *Motivationslage* zu bilden (Dörner 1987). Während sich auch viele Tiere in dem Sinn zielgerichtet verhalten, dass sie sich beispielsweise von Durst angetrieben auf die Suche nach Wasser machen, reicht beim Menschen die bloße Vorstellung, dass man nach einer Bergwanderung an einem heißen Tag Durst haben wird, um das beschwerliche Tragen eines Wasserkanisters zu motivieren. Dies kann der Fall sein, obwohl man momentan gar nicht durstig und das Tragen des Wassers anstrengend ist und zusätzliche Energie kostet. In diesem nur scheinbar trivialen Alltagsbeispiel manifestiert sich eine höchst bemerkenswerte kognitive Leistung: die Fähigkeit, Verhalten an Zielen auszurichten, die nicht durch ein aktuell angeregtes, sondern ein lediglich antizipiertes *zukünftiges Bedürfnis* motiviert werden, und dabei sogar momentane Verschlechterungen der aktuellen Bedürfnislage in Kauf zu nehmen. Metakognitives Wissen über eigene zukünftige Motivationszustände ist eine wichtige Voraussetzung für das, was wir alltagssprachlich als Willensstärke oder Selbstkontrolle bezeichnen, also die Fähigkeit, momentane Bedürfnisse aufzuschieben und kurzfristigen Versuchungen zu widerstehen, um langfristige Ziele zu erreichen (z. B. wenn wir dem Verlangen nach einem Hambur-

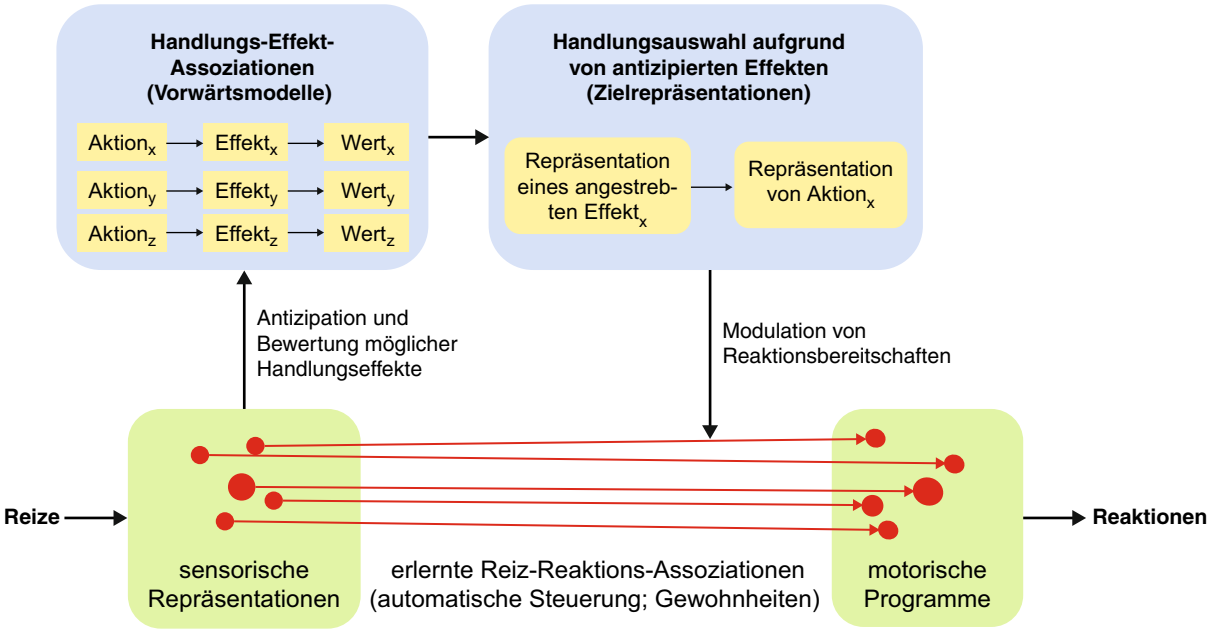


Abb. 9.1 Stark vereinfachtes schematisches Modell der willentlichen Handlungssteuerung. Im Unterschied zu direkten Reiz-Reaktions-Assoziationen und Gewohnheiten beruhen Willenshandlungen auf erlernten Assoziationen zwischen Handlungen und ihren wahrnehmbaren Effekten. Die Auswahl einer intendierten Handlung beruht darauf, dass die Antizipation eines angestrebten (positiv bewerteten) Effekts zur Aktivierung von Handlungsrepräsentationen führt, von denen gelernt wurde, dass sie den gewünschten Effekt unter den gegebenen Reizbedingungen bewirken

ger nicht nachgeben, sondern stattdessen einen Salat essen, um etwas für unsere langfristige Gesundheit zu tun).

Sprachliche Repräsentation von Zielen und Absichten und hierarchisch strukturierte Reaktionsregeln Von besonderer Bedeutung für die Flexibilität willentlicher Handlungen ist die Sprachfähigkeit. Mit der Sprache verfügen Menschen über ein Repräsentationssystem, in dem nahezu beliebige Instruktionen, Intentionen und Aufgabenregeln in einem symbolischen Format codiert und komplexe, hierarchisch strukturierte Handlungspläne mit multiplen Ober- und Unterzielen repräsentiert werden können. Dies ermöglicht es uns, Verhaltensdispositionen aufgrund von sprachlich repräsentierten Regeln schnell und flexibel auf neue Weise zu konfigurieren und mit einer nahezu unbegrenzten Zahl unterschiedlicher Reaktionen auf den gleichen Reiz zu reagieren (Cole et al. 2013a; Goschke 2003; Wolfensteller und Ruge 2012). Beispielsweise könnten Sie sich ohne Probleme vornehmen, auf ein Klopfen an der Wohnungstür nicht mit der eigentlich naheliegende Handlung (dem Öffnen der Tür) zu reagieren, sondern stattdessen zweimal den linken Arm zu heben, die Augen zu schließen oder ein Lied zu singen, obwohl diese Handlungen vermutlich nie mit dem Türklopfen assoziiert wurden. Insofern ist die Entwicklung des *inneren Sprechens*, bei der Kinder anfänglich extern erteilte Instruktionen zunehmend internalisieren, bis sie sich durch inneres Sprechen gleichsam selbst instruieren können, seit Langem als wichtiger Schritt in der Entwicklung der willentlichen Handlungssteuerung betrachtet worden (Luria 1961; Vygotski 1962). Neuere Untersuchungen belegen die Bedeutung des inneren Sprechens für die Entwicklung der Selbststeuerung (Winsler et al. 2009).

Zusammen bilden die genannten kognitiven Fähigkeiten die Grundlage dafür, dass willentliche Handlungen nicht vollständig durch die aktuelle Reiz- und Bedürfnissituation bestimmt werden, sondern dass Menschen auf die gleichen Reize sehr unterschiedlich reagieren können, je nachdem welches Ziel sie verfolgen (*Reizentbundenheit*), dass sie Verhalten an antizipierten zukünftigen Bedürfnissen ausrichten und momentane Bedürfnisse zurückstellen können (*Selbstkontrolle*) und dass sie neue Handlungssequenzen vor ihrer Ausführung versuchsweise „mental simulieren" können (*Planen und Probehandeln*).

9.2.3 Grundlegende Kontrollprobleme bei der willentlichen Handlungssteuerung

Mit der Evolution höherer kognitiver Fähigkeiten ging eine weitreichende Abkoppelung der Verhaltensselektion von der unmittelbaren Reizsituation einher, die sich in einer genuin *zukunftsorientierten Verhaltenssteuerung* manifestiert. Allerdings brachte dieser Zuwachs an Verhaltensflexibilität auch neue Kontrollprobleme mit sich. Je weniger das Verhalten durch fixe Reiz-Reaktions-Assoziationen festgelegt ist, je größer das Repertoire an möglichen Reaktionsalternativen ist, je mehr und je langfristigere Ziele gleichzeitig verfolgt werden, umso anfälliger wird die Verhaltenssteuerung für Interferenz und Konflikte und umso höher sind die kognitiven Anforderungen, die sich bei der Koordination von Zielen und der Kontrolle von Handlungen stellen. Besondere Kontrollprobleme entstehen insbesondere in Situationen, in denen

- automatisierte Gewohnheiten nicht genügen, um ein Ziel zu erreichen, sondern Verarbeitungssysteme und Verhaltensdispositionen auf neue Weise konfiguriert und an wechselnde Anforderungen angepasst werden müssen;

- Ziele und aufgabenrelevante Informationen aktiv aufrechterhalten und gegen störende Reize abgeschirmt werden müssen;
- intendierte Handlungen in Konflikt mit inkompatiblen automatisierten Reaktionen oder starken Gewohnheiten stehen;
- konkurrierende Motivationstendenzen unterdrückt und kurzfristigen Versuchungen widerstanden werden muss, um ein übergeordnetes Ziel zu erreichen;
- neue Handlungspläne generiert und multiple Ziele zeitlich koordiniert werden müssen.

Betrachten wir diese Kontrollprobleme im Einzelnen.

Flexible (Um-)Konfigurierung von Verhaltensdispositionen Intentionales Handeln setzt voraus, dass perzeptuelle, gedächtnisbezogene und motorische Prozesse auf spezifische (und oftmals neue) Weise konfiguriert und flexibel an wechselnde Ziele, Aufgaben und Kontextbedingungen angepasst werden. Selbst eine so einfache Aufgabe, wie auf hohe und tiefe Töne mit dem Drücken einer linken und rechten Taste zu antworten, erfordert es, dass die Aufmerksamkeit selektiv auf bestimmte Reizaspekte (in diesem Fall die Tonfrequenz) fokussiert wird und Reaktionen auf neue Weise an reizseitige Auslösebedingungen gekoppelt werden, d. h., es muss eine spezifische Art und Weise der Interaktion verschiedener Verarbeitungssysteme etabliert werden. Eine solche temporäre Konfiguration von Verarbeitungssystemen und Reaktionsdispositionen wird als *Aufgabeneinstellung* (*task-set*) bezeichnet.

Aufrechterhaltung und Abschirmung von Zielen und aufgabenrelevanten Informationen Bei vielen willentlichen Handlungen legt die aktuell verfügbare Reizinformation nicht eindeutig fest, wie auf einen Reiz zu reagieren ist, sondern es müssen zusätzlich Instruktionen, Aufgabenregeln oder Kontextinformationen berücksichtigt werden. Diese Informationen müssen aktiv im **Arbeitsgedächtnis** aufrechterhalten (D'Esposito und Postle 2014; ▶ Kap. 12) und gegen störende Reize abgeschirmt werden (z. B. wenn man an einem komplizierten Text arbeitet, während nebenan ein lautes Gespräch geführt wird).

Unterdrückung automatisierter Reaktionen und Gewohnheiten Viele Kontrollprobleme entstehen in Situationen, in denen die Realisierung einer Absicht dadurch erschwert wird, dass automatisierte Reaktionen oder starke Gewohnheiten aktiviert werden, die unvereinbar mit der eigentlich intendierten Handlung sind. Ein einfaches Beispiel dafür ist die klassische Farb-Wort-Interferenz-Aufgabe von Stroop (1935). In dieser Aufgabe sollen die Probanden die Farbe von Wörtern benennen, die ihrerseits Farben bezeichnen. Sind Farbe und Wortbedeutung inkongruent (z. B. das Wort „rot" in grüner Farbe), so führt dies zu verlängerten Reaktionszeiten und höheren Fehlerraten im Vergleich zu kongruenten Reizen, bei denen Farbe und Wortbedeutung übereinstimmen. Dieser Interferenzeffekt kann darauf zurückgeführt werden, dass das Farbbenennen sehr viel weniger geübt ist als das hochautomatisierte Lesen der Wörter, sodass es zu einem Reaktionskonflikt kommt. Um dennoch die weniger geübte („schwächere") Reaktion (Farbe benennen) ausführen zu können, muss also die Verarbeitung der relevanten Reizdimension (Farbe) selektiv verstärkt und/oder die Verarbeitung der irrelevanten Wortbedeutung gehemmt oder zumindest von der Reaktionsselektion abgekoppelt werden.

Unterdrückung konkurrierender Motivationstendenzen und emotionaler Impulse Eine weitere Form von Konflikten entsteht, wenn Ziele, die durch *antizipierte zukünftige Bedürfnisse* motiviert sind, im Widerspruch zu *aktuell angeregten Bedürfnissen* und den daraus resultierenden Motivationszuständen stehen (z. B. wenn bei einem Raucher das Ziel, langfristig gesund zu bleiben, in Konflikt mit dem starken Verlangen nach einer Zigarette steht). Solche Konflikte zeigen, dass mit der Evolution höherer kognitiver Fähigkeiten die weiter oben beschriebenen phylogenetisch älteren verhaltenssteuernden Systeme nicht ausgelöscht wurden. Vielmehr ist menschliches Verhalten das Ergebnis der Interaktion und Konkurrenz multipler Lern- und Kontrollsysteme, die auf teilweise separaten Netzwerken von Hirnregionen beruhen (Dolan und Dayan 2013; Kuhl und Goschke 1994a; Redish 2013). So können konditionierte Hinweisreize, die kurzfristige Belohnungen ankündigen, über ihre Effekte auf das mesolimbische Dopaminsystem (Berridge 2012; Schultz 2013) ein starkes Verlangen (*wanting*) auslösen (z. B. nach Essen, einer Droge oder einer Tätigkeit wie Glücksspiel), auch wenn dies im Widerspruch zu kognitiv repräsentierten Zielen steht (Berridge 2012). Ebenso können subcorticale Hirnregionen wie die Amygdala emotionale Vermeidungsreaktionen auslösen, die im Widerspruch zu einer kognitiven Situationseinschätzung stehen (etwa wenn man sich unwillkürlich vor einer Schlange in einem Terrarium erschrickt, obwohl man weiß, dass sie einem nicht gefährlich werden kann) (LeDoux 2012; ▶ Kap. 6). Da aktuelle Motivationszustände zunächst einen direkteren Einfluss auf die Reaktionsaktivierung haben als bloß vorgestellte zukünftige Bedürfnisse (was evolutionär betrachtet überlebenswichtig gewesen sein dürfte), bedarf es besonderer Kontrollprozesse, damit letztere handlungswirksam werden können (z. B. um eine notwendige Zahnarztbehandlung nicht immer wieder aufgrund übergroßer Angst aufzuschieben).

Handlungsplanung und Koordination multipler Ziele Viele alltägliche Ziele (z. B. erfolgreich ein Studium absolvieren) erfordern es, dass man neue Handlungssequenzen generiert und diese vor ihrer eigentlichen Ausführung versuchsweise im Sinne eines mentalen Probehandelns „durchspielt". Solche Handlungspläne sind zumeist hierarchisch organisiert und beinhalten multiple Ober- und Unterziele, deren zeitliche Abfolge koordiniert werden muss (Hacker 2014; Miller et al. 1960). Häufig müssen dabei Teilziele zunächst im Langzeitgedächtnis gespeichert werden, um dann später unter geeigneten Ausführungsbedingungen wieder aus dem Gedächtnis abgerufen zu werden (z. B. wenn man sich morgens vornimmt, am Nachmittag auf der Fahrt nach Hause eine wichtige Besorgung zu machen; **prospektives Gedächtnis**) (Goschke und Kuhl 1996; Kliegel et al. 2008).

Metakontrolle und das Stabilitäts-Flexibilitäts-Dilemma Betrachtet man die dargestellten Kontrollprobleme im Zusammenhang, wird deutlich, dass sie zum Teil *antagonistische Anforderungen* an

die Verhaltenssteuerung stellen. Während es einerseits notwendig ist, Absichten gegen konkurrierende Handlungstendenzen abzuschirmen und störende Reize auszublenden, um Interferenz zu vermeiden, ist es andererseits erforderlich, Reaktionsdispositionen flexibel an wechselnde Aufgabenanforderungen anzupassen und die Umwelt auf potenziell bedeutsame Information zu überwachen, selbst wenn diese Information nicht unmittelbar relevant für ein aktuelles Ziel ist. Man kann insofern von einem *Stabilitäts-Flexibilitäts-Dilemma* sprechen (Goschke 1996, 2003, 2013; Goschke und Bolte 2014): Ohne die Fähigkeit, Absichten aufrechtzuerhalten und gegen Störungen abzuschirmen, wären wir Spielball automatisierter Gewohnheiten und momentaner Impulse, unfähig, über längere Zeit bei einer Aufgabe zu bleiben. Ohne die Fähigkeit, Verhaltensdispositionen in Reaktion auf veränderte Bedingungen flexibel umzukonfigurieren, wäre unser Verhalten rigide und unflexibel. Dies wirft die zentrale, bislang aber nur wenig erforschte Frage auf, wie die Balance zwischen kognitiver Stabilität (Abschirmung von Zielen, zielgerichtete Aufmerksamkeitsfokussierung) und Flexibilität (Wechseln zwischen Zielen, breit verteilte Aufmerksamkeit) dynamisch reguliert und an wechselnde Anforderungen angepasst wird.

In den folgenden Abschnitten werden vor dem Hintergrund dieser grundlegenden Kontrollprobleme theoretische Modelle und empirische Befunde der Kognitions-, Volitions- und Neurowissenschaften zu kognitiven und volitionalen Kontrollprozessen dargestellt.

9.3 Kognitionspsychologische Ansätze: Automatische und kontrollierte Prozesse bei der intentionalen Handlungssteuerung

In diesem Abschnitt sollen einige grundlegende Funktionsprinzipien der intentionalen Handlungssteuerung beschrieben werden. Dabei wird die Frage im Zentrum stehen, welche Rolle Intentionen bei der Handlungssteuerung spielen und wie man sich die Interaktion intentionaler und automatischer Prozesse bei der Handlungssteuerung vorzustellen hat.

9.3.1 Bewusste und unbewusste Steuerung willentlicher Handlungen

Viele intentionale Handlungen können mit hinreichender Übung weitgehend ohne bewusste Kontrolle initiiert und ausgeführt werden, sofern keine weiteren Entscheidungs- oder Planungsprozesse notwendig sind, um einzelne Handlungsschritte auszuwählen oder Handlungsparameter festzulegen (▶ Zur Vertiefung 9.2). So kann ein erfahrener Autofahrer eine so komplexe Handlung wie ein Auto durch den Berufsverkehr zu steuern ausführen, ohne dass jede Teilhandlung (Bremsen, Gangwechseln etc.) bewusst geplant oder kontrolliert werden müsste. Ganz anders sieht dies aus, wenn man als ungeübter Fahrschüler das erste Mal durch eine Großstadt manövrieren soll: In diesem Fall scheint jede Teilhandlung der vollen Aufmerksamkeit und bewussten Kontrolle zu bedürfen.

In der Kognitionspsychologie hat man dieser Beobachtung durch eine Unterscheidung zwischen automatischen und kontrollierten Prozessen Rechnung getragen (▶ Kap. 5). Nach einer klassischen Definition von Posner und Snyder (1975) werden *automatische Prozesse* (1) obligatorisch durch Reize ausgelöst, (2) laufen unbewusst ab und (3) beanspruchen wenig oder keine Verarbeitungskapazität, während *kontrollierte Prozesse* (1) durch Intentionen gesteuert werden, (2) bewusst ablaufen und (3) begrenzte Verarbeitungskapazität beanspruchen. Allerdings wurde in der Folgezeit rasch deutlich, dass automatische und kontrollierte Prozesse keine strikte Dichotomie bilden, da die drei Kriterien dafür, ob ein Prozess automatisch oder kontrolliert ist, dissoziieren können (Logan 1989; Neumann 1984; Übersicht in Moors 2016). Insbesondere sind automatisch ablaufende Reaktionen keineswegs immer unabhängig von Intentionen, sondern werden häufig durch bewusste Absichten beeinflusst oder sind sogar durch diese bedingt. Auch wenn der Autofahrer in unserem Beispiel sein Fahrzeug weitgehend automatisch steuert, sind seine Handlungen nichtsdestotrotz durch die zuvor gefasste Absicht bedingt, an einen bestimmten Ort zu gelangen. Auch einzelne Handlungsschritte (z. B. das Initiieren eines Überholmanövers), die scheinbar automatisch durch bestimmte Reizbedingungen ausgelöst werden (z. B. ein Fahrzeug, das vor einem langsam fährt), sind nicht unabhängig von übergeordneten Intentionen: Während die Reizbedingungen ein Überholmanöver auslösen mögen, wenn die Person dringend zu einem wichtigen Termin kommen will, so wird dies mit geringerer Wahrscheinlichkeit der Fall sein, wenn sie die Absicht hat, entspannt die Landschaft zu genießen. Handlungen, die durch Reize ausgelöst werden (und nach dem Kriterium der Reizgesteuertheit als automatisch gelten müssten), können also dennoch von übergeordneten Absichten abhängen (und müssten damit eigentlich als kontrolliert betrachtet werden).

Im Einklang mit solchen Alltagsbeispielen haben Experimente zu subliminalen motorischen Priming-Effekten gezeigt, dass visuelle Reize, denen per Instruktion bestimmte Reaktionen zugeordnet wurden (z. B. auf ein Dreieck mit dem Drücken einer bestimmten Taste zu reagieren), sogar dann instruktionsgemäße Reaktionen aktivierten, wenn die Reize unterschwellig und maskiert dargeboten wurden und die Probanden sie bewusst nicht wahrnahmen (Ansorge und Neumann 2005; Kunde et al. 2003; Neumann und Klotz 1994; Überblick in Kiefer 2007). Diese Befunde sprechen gegen eine strikte Dichotomie von reizgesteuerten („automatischen") und intentionsabhängigen („kontrollierten") Reaktionen. Vielmehr werden durch Intentionen bestimmte Reaktionsdispositionen (z. B. beim Erscheinen einer Raute die linke Taste zu drücken) in erhöhte Bereitschaft versetzt, sodass in einer späteren Situation intentionsgemäße Reaktionen direkt aktiviert werden können, wenn die Reizinformation die in der Intention spezifizierten Auslösebedingungen erfüllt. Hommel (2000) hat solche Handlungen treffend als „vorbereitete Reflexe" (*prepared reflexes*) bezeichnet.

Zur Vertiefung 9.2

Werden willentliche Handlungen durch unbewusste Gehirnprozesse ausgelöst?

Dass zumindest einfache willentliche Handlungen unbewusst ausgelöst werden können, wird auch durch Befunde belegt, die der Neurophysiologe Benjamin Libet bereits in den 1980er Jahre in einem ebenso einflussreichen wie kontrovers diskutierten Experiment gewonnen hat (Libet et al. 1983). Libets Probanden beobachteten ein Zifferblatt mit einem rotierenden Punkt und sollten während einer Umdrehung (die 2,56 s dauerte) zu einem beliebigen Zeitpunkt einen Finger bewegen, wann immer sie den spontanen „Drang" dazu verspürten. Nach jeder Bewegung gaben die Probanden an, wo sich der Punkt auf dem Zifferblatt in dem Moment befunden hatte, als sie den bewussten Handlungsimpuls verspürten. Dieser Zeitpunkt lag im Mittel etwa 200 ms vor dem Beginn der Bewegung. Gleichzeitig leitete Libet von der Kopfoberfläche der Probanden das Elektroencephalogramm (EEG) ab und ermittelte daraus das sogenannte Bereitschaftspotenzial, eine negative Potenzialverschiebung, die vor einer Willkürbewegung auftritt und als neuronales Korrelat der Bewegungsvorbereitung interpretiert wurde. Bemerkenswerterweise begann das Bereitschaftspotenzial bereits ca. 350 ms *vor* dem Zeitpunkt, zu dem die Probanden nach eigener Angabe den bewussten Handlungsimpuls verspürt hatten (Abb. 9.2).

Dieser Befund wurde von Haggard und Eimer (1999) in einem Experiment repliziert, in dem Probanden zusätzlich entscheiden sollten, ob sie den linken oder rechten Finger bewegen wollten. Da das Bereitschaftspotenzial kurz vor einer Bewegung der linken oder rechten Hand über der jeweils kontralateralen Hirnhemisphäre stärker ausgeprägt ist, konnten *lateralisierte Bereitschaftspotenziale* bestimmt werden. Auch das lateralisierte Bereitschaftspotenzial, das die Vorbereitung einer *spezifischen Reaktion* anzeigt, begann einige hundert Millisekunden bevor die Probanden sich des Handlungsimpulses bewusst wurden. Weitere Evidenz stammt aus einer Studie (Fried et al. 2011), in der bei Patienten, denen wegen einer hirnchirurgischen Operation Tiefenelektroden implantiert worden waren, die Aktivität einzelner Neurone im medialen **präfontalen Cortex (PFC)** abgeleitet werden konnte, während die Patienten die Libet-Aufgabe ausführten. Dabei wurden im linken prä-supplementär-motorischen Areal, das an der Handlungsvorbereitung beteiligt ist, Neurone gefunden, die bereits mehrere Hundert Millisekunden vor dem bewussten Handlungsimpuls erhöhte Aktivität zeigten und aufgrund deren Aktivität die nachfolgende Entscheidung der Probanden überzufällig korrekt vorhergesagt werden konnte.

Libets Ergebnisse sind häufig als Beleg dafür interpretiert worden, dass bewusste Absichten gar keine kausale Rolle bei der Auslösung einfacher willentlicher Handlungen spielen, da die Vorbereitung der Handlung bereits durch unbewusste neuronale Prozesse in Gang gesetzt wird, noch bevor sich die Person ihres eigenen Handlungsimpulses bewusst wird. Während diese Interpretation heftige Diskussionen in der Psychologie, Neurowissenschaft und Philosophie ausgelöst hat (z. B. Sinnot-Armstrong und Nadel 2011), kann aus mehreren Gründen bezweifelt werden, dass aus Libets Ergebnissen ein so weitreichender Schluss gezogen werden kann. In methodischer Hinsicht ist u. a. kritisiert worden, dass es aufgrund der notwendigen Mittelung des EEG-Signals über viele Versuchsdurchgänge zu Schätzfehlern bei der Bestimmung der Latenz des Bereitschaftspotenzials kommen kann (Miller und Trevena 2002) und dass Bereitschaftspotenziale nicht die Vorbereitung einer Bewegung, sondern einen unspezifischen Zustand erhöhter Aufmerksamkeit oder Erregung anzeigen (Trevena und Miller 2010; Diskussion in Rösler 2005). Ferner ist bezweifelt worden, ob Probanden überhaupt in der Lage sind, den Zeitpunkt des bewussten Handlungsimpulses hinreichend genau einzuschätzen. So wurde gezeigt, dass die Zeiteinschätzungen der Probanden in der Libet-Aufgabe systematisch durch Ereignisse beeinflusst werden, die erst *nach* der Handlungsausführung auftreten (z. B. die Darbietung angeblicher Handlungseffekte) (Banks und Isham 2009). Dies könnte bedeuten, dass die Zeitschätzungen gar nicht auf einer direkten introspektiven Wahrnehmung des Handlungsimpulses beruhen, sondern dass die Probanden den Zeitpunkt dieses Impulses *nachträglich* daraus erschließen, wann sie meinen, die Handlung ausgeführt zu haben.

Selbst wenn man diese methodischen Einwände außer Acht lässt, folgt aus dem Befund, dass einfache Willkürhandlungen unbewusst ausgelöst werden können, nicht zwingend, dass Absichten keine kausale Rolle bei der Handlungssteuerung spielen. Zwar zeigen Libets Befunde, dass Absichten offenbar nicht die unmittelbaren (proximalen) Auslöser einzelner Willkürbewegungen sind. Dies ändert aber nichts daran, dass die Probanden ja nur deshalb ihren Finger bewegten, weil sie zu Beginn des Experiments entsprechend instruiert worden waren und beabsichtigten, dieser Instruktion Folge zu leisten. Durch diese (distale) Absicht wurde die Verhaltensdisposition, den Finger zu beliebigen Zeitpunkten zu bewegen, in erhöhte Bereitschaft versetzt. Dies führte vermutlich dazu, dass während des Experiments spontan auftretende Bewegungsimpulse (die normalerweise unterdrückt worden wären) mit höherer Wahrscheinlichkeit Zugang zur Motorik erhielten und scheinbar spontane Fingerbewegungen auslösten, ohne dass dazu vor jeder einzelnen Handlung nochmals eine bewusste Absicht hätte gefasst werden müssen. Insofern ist die Situation in Libets Experiment nicht grundsätzlich verschieden von der in Experimenten zum subliminalen motorischen Priming (s. oben), in denen instruktionsgemäße Reaktionen ebenfalls unbewusst durch geeignete Auslösebedingungen aktiviert wurden.

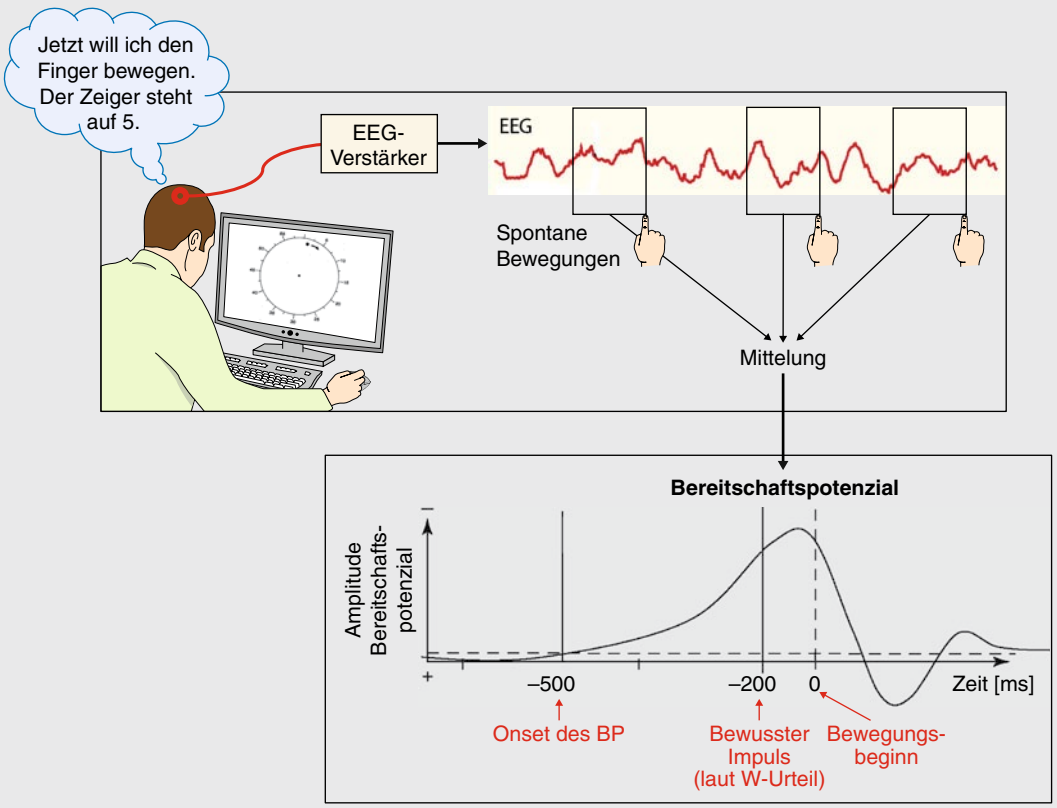
Diese Interpretation wird durch eine neuere Studie (Schurger et al. 2012) gestützt, in der Probanden während der Libet-Aufgabe neben den spontan initiierten Bewegungen auf mitunter zufällig eingestreute Töne hin so schnell wie möglich eine Taste drücken sollten. Es zeigte sich, dass das Bereitschaftspotenzial vor besonders schnellen Reaktionen auf die Töne größer war als vor langsamen Reaktionen. Dies passt zu der Annahme, dass es ständig spontane Fluktuationen der Aktivität in prämotorischen Cortexregionen gibt und motorische Reaktionen leichter und schneller initiiert werden können, wenn die spontane motorische Aktivierung bereits sehr hoch ist. Die selbstinitiierten Fingerbewegungen in der Libet-Aufgabe könnten also dadurch ausgelöst werden, dass spontane motorische Aktivierungen eine Schwelle überschreiten, wobei die Instruktion, zu zufälligen Zeitpunkten den Finger zu bewegen, vermutlich diese Schwelle senkt und/oder eine tonische Inhibition aufhebt, durch die normalweise verhindert wird, dass jede spontane motorische Aktivierung eine Bewegung auslöst.

Es kann also festgehalten werden, dass Libets Befunde nicht zeigen, dass Absichten keine kausale Rolle bei der Handlungssteuerung spielen, sondern lediglich dafür sprechen, dass Absichten keine *unmittelbaren Auslöser* einzelner willentlicher Bewegungen sind. Vielmehr besteht die Wirkung von Absichten darin, selektiv bestimmte Reaktionsdispositionen in Bereitschaft zu versetzen und dadurch zu modulieren, welche Reaktionen mit höherer Wahrscheinlichkeit unter bestimmten Reizbedingungen aktiviert werden (Goschke et al. 2008; Goschke und Walter 2005). Dies entspricht einer Konzeption von Absichten, wie sie bereits in der klassischen Willenspsychologie von Ach (1910) vertreten wurde, der Absichten als **determinierende Tendenzen** betrachtete, die über längere Zeit bestimmte Bedingungs-Aktions-Verknüpfungen in Bereitschaft versetzen, ohne dass die Intention selbst bewusst bleiben müsste.

Ein faszinierender neuer Zugang zu den neuronalen Grundlagen von Intentionen wird durch multivariate Analyseverfahren für Daten aus Untersuchungen mit der funktionellen Kernspintomografie (fMRI) (▶ Kap. 2)

Zur Vertiefung 9.2 (*Fortsetzung*)

eröffnet. Bei diesen Multi-Voxel-Pattern-Analysen wird mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens untersucht, ob räumliche *Muster* im fMRI-Signal, die über mehrere benachbarte Volumenelemente (Voxel) in einer Hirnregion verteilt sind, Informationen über bestimmte mentale Inhalte enthalten. Dazu wird zunächst ein Klassifikationsalgorithmus trainiert, neuronale Aktivierungsmuster zu diskriminieren, die verschiedenen mentalen Inhalten (z. B. Vorstellungen von Häusern vs. von Lebewesen) entsprechen. Anschließend wird geprüft, ob der Algorithmus neue Muster überzufällig korrekt zuordnen kann (Haynes 2015). Mit diesen Methoden ist es in der Tat gelungen, aufgrund von Aktivitätsmustern im präfrontalen Cortex (▶ Abschn. 9.5) überzufällig korrekt zu erschließen, ob ein Proband die Absicht hatte, zwei nachfolgende Zahlen zu addieren oder zu subtrahieren (Haynes et al. 2007). In einem weiteren Experiment bearbeiten Probanden eine Libet-analoge Aufgabe, in der sie eine von zwei frei wählbaren Tasten drücken sollten, wann immer sie den spontanen Impuls dazu verspürten. Es zeigte sich, dass bereits mehrere Sekunden vor dem Zeitpunkt, zu dem die Probanden nach eigener Angabe die Entscheidung für das Drücken einer der Tasten bewusst gefällt hatten, aufgrund von Aktivierungsmustern im anterioren präfrontalen Cortex signifikant besser als nach Zufall vorhergesagt werden konnte, wie sich die Probanden entscheiden würden (Soon et al. 2008) (◘ Abb. 9.3). Obwohl die Vorhersagegüte aufgrund der derzeitigen Grenzen der Methode weit davon entfernt waren, die Entscheidungen perfekt vorherzusagen, ist dieses Ergebnis bemerkenswert, da es bedeuten könnte, dass einfache Handlungsabsichten auf neuronaler Ebene noch deutlich früher vor dem Zeitpunkt des Bewusstwerdens des Handlungsimpulses gebildet werden, als es Libets Ergebnisse vermuten ließen.



◘ **Abb. 9.2** Ablauf und schematische Darstellung der Ergebnisse von Libet et al. (1983). Die Probanden bewegten einen Finger, wann immer sie den spontanen „Drang" dazu verspürten. Die über das Bereitschaftspotenzial (BP) gemessene neuronale Vorbereitung der Bewegung in motorischen Hirnregionen begann bei spontanen Bewegungen im Mittel etwa 500 ms vor dem Beginn der Bewegung. Der von den Probanden anhand einer Uhr eingeschätzte Zeitpunkt, zu dem ihnen die Bewegungsabsicht bewusst wurde (von Libet als W-Urteil bezeichnet), lag ca. 200 ms nach dem Beginn des BP. (Teilweise adaptiert von Haggard 2008; mit freundl. Genehmigung von © Nature Publishing Group. All Rights Reserved)

Zur Vertiefung 9.2 (*Fortsetzung*)

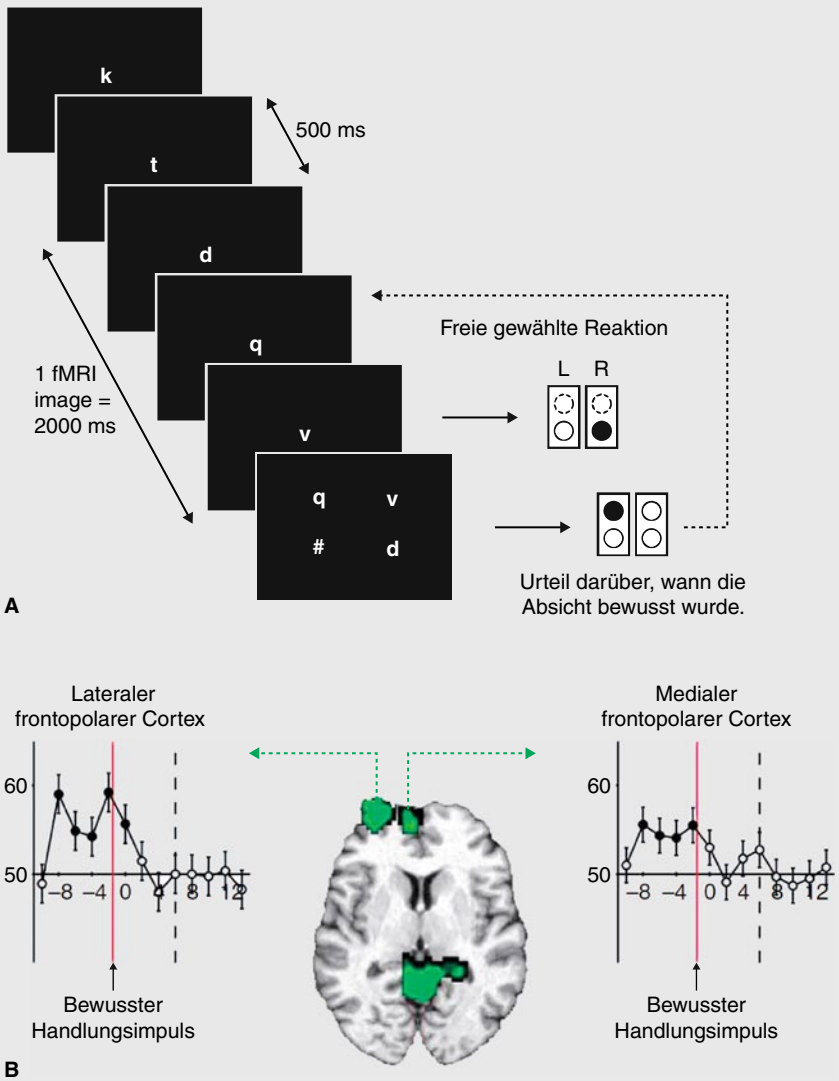


Abb. 9.3 Ablauf und Ergebnisse des Experiments von Soon et al. (2008). **A** Probanden sahen eine längere Serie von Buchstaben und sollten zu einem beliebigen Zeitpunkt spontan die Entscheidung treffen, eine linke (*L*) oder rechte (*R*) Taste zu drücken. Ein nachfolgender Bildschirm zeigte die zuvor dargebotenen Buchstaben, und die Probanden sollten angeben, welcher Buchstabe dargeboten worden war, als sie ihre bewusste Entscheidung getroffen hatten. **B** Räumliche Multi-Voxel-Aktivierungsmuster in Regionen des frontopolaren Cortex (*grün* markiert) enthielten Informationen, aus denen bereits mehrere Sekunden vor der bewussten Entscheidung überzufällig korrekt vorhergesagt werden konnte, wie die Probanden sich entscheiden würden (der früheste Zeitpunkt, zu dem die Entscheidungen nach Angabe der Probanden bewusst wurden, wird durch die *rote vertikale Linie* angezeigt). Die Abbildung zeigt für jeden Zeitpunkt, mit welcher Genauigkeit (Zufallsniveau = 50 %) die Entscheidung vorhergesagt werden konnte. (Adaptiert nach Soon et al. 2008; mit freundl. Genehmigung von © Nature Publishing Group. All Rights Reserved)

9

9.3.2 Ein Modell der Interaktion automatischer und intentionaler Prozesse

Während die bisher dargestellten Befunde dafür sprechen, dass intentionale Handlungen unter bestimmten Bedingungen automatisch durch Reize ausgelöst werden können, stößt die automatische Handlungssteuerung an ihre Grenzen, wenn die Reizinformation nicht eindeutig festlegt, welche Reaktion auszuführen ist, oder wenn in einer Situation inkompatible Reaktionstendenzen aktiviert werden (wie z. B. in der beschriebenen Stroop-Aufgabe). Ein einflussreiches Modell des Zusammenspiels automatischer und kontrollierter Prozesse, mit dem erklärt werden soll, wie beabsichtigte Handlungen trotz starker konkurrierender Reaktionstendenzen ausgeführt werden können, stammt von dem Kognitionspsychologen Don Norman und dem Neuropsychologen Tim Shallice (1986) (Abb. 9.4). Das Modell, das Grundlage vieler nachfolgender Theorien war, beruht auf der Annahme, dass motorische Handlungen ebenso wie kognitive Operationen auf erlernten, im Langzeitgedächtnis gespeicherten Bedingungs-Aktions-Regeln (*Schemata*) beruhen. Automatische Steuerung beruht darauf, dass Schemata aktiviert werden, wenn ihre Auslösebedingungen (*trigger conditions*) erfüllt sind (z. B. eine rote Ampel das Schema „Bremsen" aktiviert). Abstraktere Schemata (z. B. Auto starten) können untergeordnete Schemata (z. B. Kupplung treten, Zündschlüssel umdrehen, Gang einlegen, Gas geben) aktivieren, bis die Ebene einfacher motorischer Programme erreicht ist. Ein Schema wird umso stärker aktiviert, je besser seine Auslösebedingungen erfüllt sind, je häufiger es in der Vergangenheit aktiviert wurde und je weniger Zeit seit seiner letzten Aktivierung verstrichen ist. Konflikte zwischen inkompatiblen Schemata (wenn z. B. eine gelbe Ampel gleichzeitig die Schemata für „Bremsen" und „Durchstarten" aktiviert) werden durch laterale Inhibition gelöst, d. h., inkompatible Schemata hemmen sich wechselseitig, sodass in der Regel das am stärksten aktivierte Schema den Wettstreit gewinnt.

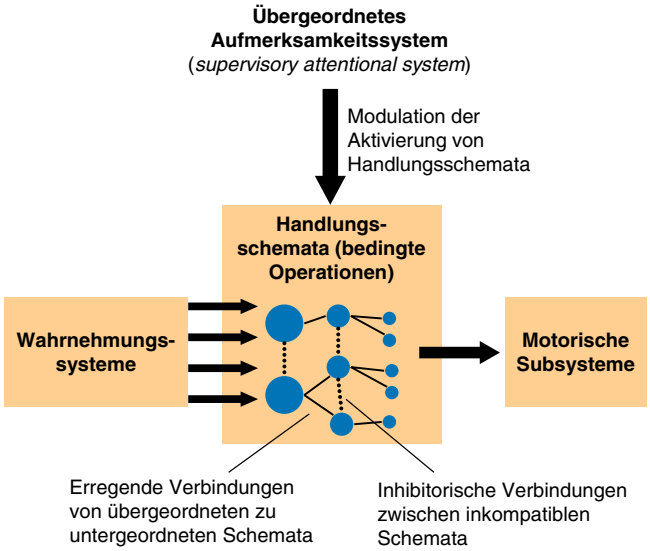


Abb. 9.4 Das Modell automatischer und willentlicher Handlungskontrolle von Norman und Shallice (1986)

Würde die Handlungssteuerung ausschließlich auf der reizbedingten Aktivierung und lateralen Inhibition gespeicherter Schemata beruhen, wäre das System ein Sklave seiner Gewohnheiten, d. h., das Verhalten würde stets durch das Schema kontrolliert, das am stärksten durch einen aktuellen Reiz aktiviert wird oder in der Vergangenheit am häufigsten in einer ähnlichen Situation aktiviert wurde. Das Modell wäre also z. B. nicht in der Lage, auf inkongruente Reize in der Stroop-Aufgabe korrekt zu reagieren, da das in der Vergangenheit viel häufiger verwendete Schema für das Wortlesen stets stärker durch den Reiz aktiviert würde als das Schema für das Farbbenennen. Um zu erklären, wie das eigentlich „schwächere" Farbbenennungsschema dennoch den Wettstreit mit dem „stärkeren" Wortleseschema gewinnen kann, postulieren Norman und Shallice ein **übergeordnetes Aufmerksamkeitssystem** (*supervisory attentional system*; SAS), das die Aktivierung von Schemata, die kongruent mit einem aktuellen Ziel sind, zusätzlich verstärkt. Kognitive Kontrolle beruht also im Modell darauf, dass der Wettstreit zwischen konkurrierenden **Handlungsschemata** durch das SAS so moduliert wird, dass zielkonforme Schemata mit höherer Priorität aktiviert werden – dieses Prinzip des **modulierten Wettstreits** wird in der Aufmerksamkeitsforschung als *biased competition* bezeichnet (Desimone und Duncan 1995). Im Folgenden werden wir den Begriff „Top-down-Modulation" verwenden, um den Einfluss „höherer" kognitiver Inhalte (z. B. Ziele, Intentionen oder Aufgabenregeln) auf die Reizverarbeitung und Reaktionsselektion zu bezeichnen.

Das SAS-Modell bietet eine einfache Erklärung für alltägliche Handlungsfehler. Empirische Analysen haben gezeigt, dass Handlungsfehler gehäuft in Situationen auftreten, in denen die Aufmerksamkeit kurzzeitig abgelenkt war und gleichzeitig starke reizseitige Auslöser für Gewohnheitshandlungen vorhanden waren (Reason 1984). Ein Beispiel ist jener Busfahrer, der sich am Wochenende während der Fahrt zum Einkaufszentrum intensiv mit seiner Frau unterhält und mit seinem PKW an der vertrauten Bushaltestelle anhält und vergeblich den Schalter zum Öffnen der Fahrgasttüren sucht. Im SAS-Modell werden solche Handlungsfehler darauf zurückgeführt, dass die Schemaselektion nicht hinreichend durch das SAS moduliert wird, sondern primär durch reizseitige Auslösebedingungen bestimmt wird, sodass nicht beabsichtigte Gewohnheitshandlungen ausgelöst werden können.

Das SAS-Modell war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer Theorie der Mechanismen, die der Interaktion automatischer und intentionaler Prozesse bei der Handlungssteuerung zugrunde liegen. Insbesondere die Annahme, dass intentionale Kontrolle auf der Top-down-Modulation konkurrierender Handlungsschemata beruht, findet sich in weiterentwickelter Form auch in vielen aktuellen Modellen der kognitiven Kontrolle (Botvinick und Cohen 2014) (▶ Abschn. 9.5.4). Allerdings weist das SAS-Modell aus heutiger Sicht auch eine Reihe von Einschränkungen auf. Zum einen ist davon auszugehen, dass kognitive Kontrolle nicht auf einem einheitlichen Aufmerksamkeitssystem beruht, sondern durch Netzwerke von funktional spezialisierten und neuroanatomisch separierbaren Systemen vermittelt wird (▶ Abschn. 9.5). Ferner ist kritisch anzumerken, dass das Modell die Frage unbeantwortet lässt, woher das übergeordnete Aufmerksamkeitssystem eigentlich „weiß", wann es in die Schemaselektion eingreifen und welche Schemata es selektiv verstärken sollte. Insofern wurde mit dem SAS immer noch ein unerklärter Homunculus postuliert, und wir werden in ▶ Abschn. 9.5.5 neuere Modelle kennenlernen, die die Regulation kognitiver Kontrolle erklären sollen, ohne dass dazu ein übergeordnetes Kontrollsystem angenommen werden müsste.

9.4 Volitionspsychologische Ansätze: Motivationskonflikte und Selbstkontrolle

Im Unterschied zu einfachen Reaktionskonflikten, wie wir sie am Beispiel der Stroop-Interferenz diskutiert haben, entstehen in Alltagssituationen häufig Konflikte, wenn langfristige Ziele, die auf die Befriedigung antizipierter *zukünftiger Bedürfnisse* gerichtet sind, in Widerspruch zu aktuellen Motivationstendenzen stehen, die durch unmittelbare Anreize angeregt werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn das Ziel, langfristig schlank und gesund zu bleiben, in Konflikt mit dem starken Verlangen nach einem kalorienreichen Dessert steht oder wenn eine Person aus akuter Angst einen wichtigen Besuch beim Zahnarzt immer wieder aufschiebt. Solche Konflikte werden als **intertemporale Entscheidungskonflikte** bezeichnet, da man zwischen einer kleineren, sofort verfügbaren und einer größeren, aber erst später zu erlangenden Belohnung wählen oder weil man kurzfristige Kosten in Kauf nehmen muss, um ein langfristiges Ziel zu erreichen. Solche Konflikte treten im Alltag häufig auf, wie eine Studie zeigt, in der von einer größeren Zahl von Probanden eine Woche lang Erlebnisstichproben per Smartphone erhoben wurden (Hofmann et al. 2012). Die Probanden wurden zu zufälligen Zeiten aufgefordert, in eine Fragebogen-App einzugeben, ob sie gerade ein Verlangen oder Bedürfnis verspürten (z. B. nach Essen, Shopping, Medienkonsum, Sex, Schlaf, Freizeitaktivitäten, Rauchen) und ob dieses Bedürfnis in Konflikt mit übergeordneten oder langfristigen Zielen stand. Knapp die Hälfte der etwa 8000 erfassten Bedürfnisse wurden als leicht bis sehr konflikthaltig eingeschätzt, und bei etwa der Hälfte der konflikthaltigen Bedürfnisse gaben die Probanden an, der Versuchung nachgegeben zu haben.

9.4.1 Zielselektion vs. Zielrealisierung

Grundsätzlich gibt es zwei mögliche Erklärungen dafür, warum Menschen Absichten nicht in die Tat umsetzen oder Handlungen ausführen, die nach eigener Aussage in Widerspruch zu wichtigen persönlichen Zielen stehen. Zum einen könnte dies an einem Mangel an Motivation liegen, d. h., die Person könnte einer Selbsttäuschung unterliegen, insofern ihr das zugrunde liegende Ziel in Wahrheit weniger wichtig ist, als sie selbst meint, und sie deshalb zu wenig motiviert ist, um zieldienliche Handlungen zu initiieren. Im Unterschied dazu führen volitionstheoretische Ansätze die Tatsache, dass Menschen trotz Einsicht in die negativen Konsequenzen mitunter kurzfristigen Versuchungen nachgeben, darauf zurück, dass sie nicht über die erforderlichen Fähigkeiten zur Selbstkontrolle verfügen oder an sich vorhandene Kontrollfähigkeiten in Konfliktsituationen nicht in ausreichendem Maß mobilisieren. Volitionstheorien beruhen damit auf einer grundlegenden Unterscheidung zwischen *motivationalen* und *volitionalen Prozessen*. Als motivational werden Prozesse bezeichnet, die der *Auswahl* von Zielen aufgrund einer Abwägungen von deren Wünschbarkeit und Erreichbarkeit zugrunde liegen, wie es in Erwartungswerttheorien des Entscheidungsverhaltens beschrieben wird (▶ Kap. 8). Demgegenüber sollen volitionale Prozesse die *Realisierung* von Absichten unterstützen, insbesondere wenn diese gegen konkurrierende Gewohnheiten oder Motivationstendenzen durchgesetzt werden müssen.

Julius Kuhl (1983) hat in den 1980er Jahren als einer der Ersten darauf hingewiesen, dass die Motivationspsychologie lange Zeit nahezu ausschließlich auf das Problem der *Zielselektion* fokussiert war, wohingegen Probleme der *Zielrealisierung* – also die Frage, welche Prozesse der Aufrechterhaltung und Verwirklichung von Absichten zugrunde liegen – weitgehend vernachlässigt wurde. Ausgehend von dieser Kritik entwickelte Kuhl eine *Handlungskontrolltheorie*, in deren Zentrum eine Reihe von Handlungskontrollstrategien stehen, die die Realisierung von Absichten in Konfliktsituationen unterstützen sollen (Kuhl 1983, 1985, 1996). Kuhl hat seine Handlungskontrolltheorie später in eine allgemeine Theorie der *Persönlichkeits-System-Interaktionen* (*PSI-Theorie*) integriert, in der individuelle Unterschiede in der Emotionsregulation und weitere Moderatorvariablen spezifiziert werden, von denen es abhängt, wie effizient Personen Kontrollstrategien mobilisieren (Kuhl 2000, 2001). Eine zweite einflussreiche Volitionstheorie, deren Entwicklung ebenfalls in die 1980er Jahre zurückreicht, ist das *Rubikonmodell der Handlungsphasen* von Heckhausen und Gollwitzer (Achtziger und Gollwitzer 2010; Gollwitzer 2012; Heckhausen 1989). In dieser Theorie wird die Unterscheidung zwischen Zielselektion und Zielrealisierung in ein Modell sequenzieller Handlungsphasen integriert, die durch qualitativ unterschiedliche kognitive Einstellungen (sogenannte **Bewusstseinslagen**) charakterisiert sind. Volitionstheorien haben einen engen Bezug zu neueren Modellen der Selbstkontrolle, wie sie in der sozialen Kognitionsforschung entwickelt wurden (Hassin et al. 2010; Inzlicht et al. 2014; Kotabe und Hofmann 2015). Im Folgenden werden diese Ansätze und ausgewählte empirische Befunde im Zusammenhang dargestellt.

9.4.2 Vom Wünschen zum Wollen: Das Rubikonmodell

Handlungsphasen und Bewusstseinslagen

Im Rubikonmodell werden Handlungen idealtypisch als Abfolge von vier Phasen des Abwägens, Planens, Handeln und Bewertens beschrieben (◘ Abb. 9.5). Jede **Handlungsphase** stellt spezifische Anforderungen an die Handlungssteuerung und soll mit qualitativ unterschiedlichen Formen der Informationsverarbeitung assoziiert sein. Während beim Abwägen alternativer Ziele ein *realitätsorientierter* Verarbeitungsmodus vorherrschen soll, sei die Verarbeitung nach der Festlegung auf eine verbindliche Absicht *realisierungsorientiert* und darauf gerichtet, die Verwirklichung der Absicht zu fördern. Dementsprechend soll der Name des Modells zum Ausdruck bringen, dass der Übergang vom Abwägen (Zielselektion) zum Planen (Zielrealisierung) psychologisch ähnlich tiefgreifend ist wie im Jahr 49 v. Chr. Cäsars Entschluss, nach einer längeren Phase des Zweifelns mit seinen Legionen den Rubikon genannten Fluss zu überschreiten und damit einen Bürgerkrieg auszulösen.

Abwägen (prädezisionale Motivationsphase) Da Menschen nicht all ihre Wünsche realisieren können, müssen sie entscheiden, welche sie wirklich in die Tat umsetzen wollen. In der Phase des Abwägens werden alternative Ziele bezüglich ihrer subjektiven Erreichbarkeit und Wünschbarkeit gegeneinander abgewogen, wie es in Erwartungswerttheorien der Motivation beschrieben wird. Das Abwägen kommt zum Abschluss, wenn die Person eine verbindliche Absicht (*Zielintention*) bildet.

Planen (präaktionale Volitionsphase) Oftmals können Absichten nicht sofort in die Tat umgesetzt werden, sondern es muss auf eine geeignete Ausführungsgelegenheit gewartet werden oder es sind Planungsprozesse notwendig. In der Phase des Planens wird die Abfolge einzelner Handlungsschritte festgelegt, und es werden unter Umständen Vorsätze (**Implementierungsintentionen**) gebildet, die spezifizieren, bei welcher konkreten Gelegenheit welche Handlungen ausgeführt und wie mögliche Schwierigkeiten überwunden werden sollen.

Handeln (aktionale Volitionsphase) Mit der Initiierung zieldienlicher Handlungen beginnt die eigentliche Handlungsphase, in der die Absicht durch eine Sequenz von Handlungsschritten realisiert wird. Treten dabei unerwartete Schwierigkeiten auf, etwa weil Handlungspläne an veränderte Bedingungen angepasst werden müssen oder konkurrierende Motivationstendenzen angeregt werden, soll es zu einer Steigerung der Anstrengung kommen, und es werden volitionale Kontrollprozesse mobilisiert, um die Absicht trotz der Widerstände zu realisieren.

Bewerten (postaktionale Motivationsphase) Nach Beendigung einer Handlung kann sich eine Phase des Bewertens anschließen, in der die erzielten Resultate mit dem ursprünglichen Ziel verglichen werden. Ist das Ziel nicht oder nur teilweise erreicht worden, kann es je nach Einschätzung der Ursachen des Misserfolgs zur Bildung neuer Handlungspläne, zur Modifikation des

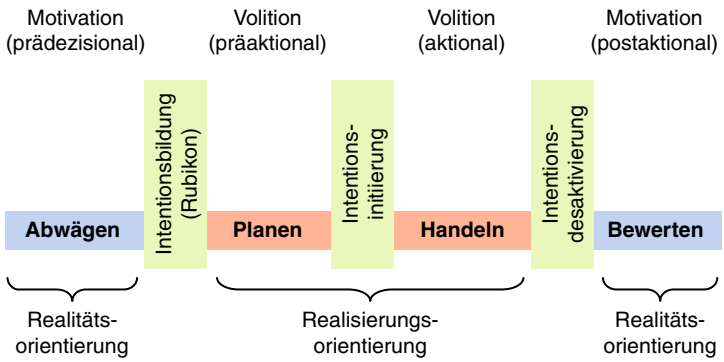


Abb. 9.5 Das Rubikonmodell der Handlungsphasen. (Nach Heckhausen 1989)

Anspruchsniveaus oder zur Ablösung von einem als unerreichbar erkannten Ziel kommen.

Die Handlungsphasen des Abwägens und Bewertens werden als *motivational* bezeichnet, da es in ihnen um die Einschätzung der Wünschbarkeit und Erreichbarkeit von Zielen geht. Dagegen werden Planen und Handeln als *volitionale* Phasen bezeichnet, da es in ihnen um die Realisierung von Absichten geht. Motivationale und volitionale Handlungsphasen sollen jeweils mit spezifischen kognitiven Einstellungen – den Bewusstseinslagen – einhergehen, die sich durch qualitativ unterschiedliche Formen der Informationsverarbeitung auszeichnen.

Abwägende Bewusstseinslage Um aus der Vielzahl möglicher Ziele eine möglichst rationale Auswahl treffen zu können, dominiert dem Rubikonmodell zufolge während des Abwägens eine *realitätsorientierte kognitive Orientierung*, die durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- *Offenheit der Verarbeitung:* Die kognitive Verarbeitung ist offen für ein breites Spektrum alternativer Ziele und entscheidungsrelevanter Informationen.
- *Fokus auf entscheidungsrelevante Informationen:* Aufmerksamkeit und Denken sind auf Informationen über die Wünschbarkeit und Realisierbarkeit von Zielen gerichtet.
- *Unparteiische Verarbeitung:* Informationen über positive und negative Anreize von Handlungsalternativen werden möglichst unparteiisch verarbeitet, und die Erreichbarkeit von Zielen wird realistisch eingeschätzt.

Planende Bewusstseinslage In der Planungsphase wird festgelegt, wann und wie das Ziel erreicht werden soll, und notwendige Handlungsschritte und geeignete Ausführungsgelegenheiten müssen spezifiziert werden. Dies wird durch eine *realisierungsorientierte kognitive Orientierung* unterstützt, die durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- *Selektivität der Verarbeitung:* Die Aufmerksamkeit ist auf die Realisierung der gewählten Absicht fokussiert, während irrelevante Reize ausgeblendet werden, um nicht von der Zielverfolgung abgelenkt zu werden.
- *Fokus auf realisierungsbezogene Inhalte:* Es werden bevorzugt Informationen encodiert, die relevant für die Realisierung der Absicht sind wie z. B. günstige Gelegenheiten für die Ausführung notwendiger Handlungen, wohingegen Gedanken an alternative Ziele und deren Anreize möglichst ausgeblendet werden.
- *Parteiische Verarbeitung:* Die Wünschbarkeit und Erreichbarkeit des gewählten Zieles wird eher optimistisch eingeschätzt, um die Selbstverpflichtung auf das Ziel beim Auftreten von Schwierigkeiten nicht voreilig zu gefährden.

Empirische Evidenz für die Effekte von Bewusstseinslagen

Empirische Belege für die Unterscheidung zwischen abwägender und planender Bewusstseinslage stammen aus Experimenten, in denen zunächst unterschiedliche Bewusstseinslagen induziert und im Anschluss daran deren Auswirkungen auf verschiedene Aspekte der Informationsverarbeitung untersucht wurden (Übersicht in Achtziger und Gollwitzer 2010; Gollwitzer 2012).

Abruf phasenkongruenter Informationen aus dem Gedächtnis In einer der ersten Überprüfungen des Modells wurde gezeigt, dass Personen in einer abwägenden Bewusstseinslage bevorzugt Informationen aus dem Gedächtnis abrufen, die sich auf die Wünschbarkeit und Erreichbarkeit von Zielen beziehen, während Personen in der planenden Bewusstseinslage eher Informationen abrufen, die sich auf die Verwirklichung von Zielen beziehen (Gollwitzer et al. 1990). Dazu wurden zunächst Bewusstseinslagen induziert, indem Probanden entweder über ein ungelöstes persönliches Entscheidungsproblem sowie die Vor- und Nachteile der Handlungsalternativen nachdenken (*abwägende Bewusstseinslage*) oder aber konkrete Handlungsschritte auflisten sollten, die sie ausführen müssten, wenn sie sich bereits für eine Alternative entschieden hätten (*planende Bewusstseinslage*). Anschließend sollten die Probanden Märchen ergänzen, die jeweils an einer kritischen Stelle abbrachen. Obwohl insgesamt deutlich mehr planungs- als abwägungsbezogene Inhalte produziert wurden, zeigte sich die erwartete Wechselwirkung: Probanden in der planenden Bewusstseinslage produzierten im Vergleich zu abwägenden Personen mehr Inhalte, die beschrieben, wie der Protagonist des Märchens ein Ziel erreichen kann, während abwägende Probanden geringfügig mehr Gedanken produzierten, die Gründe für oder gegen ein Ziel betrafen. In einem zweiten Experiment wurden Probanden, die in eine abwägende oder planende Bewusstseinslage versetzt worden waren, Porträts von Personen dargeboten, die angeblich über eine persönliche Entscheidung nachdachten. Zusammen mit jedem Porträt wurden

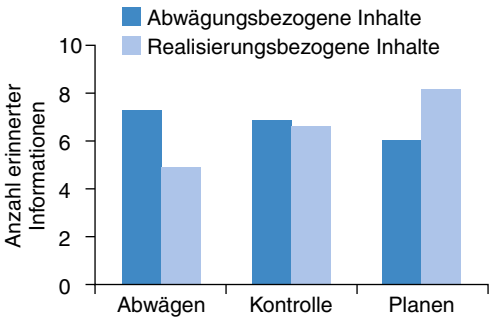


Abb. 9.6 Anzahl abwägungs- und realisierungsbezogener Inhalte, die in der abwägenden und der planenden Bewusstseinslage erinnert wurden. (Nach Daten aus Gollwitzer et al. 1990, Exp. 2)

zwei Argumente für und gegen die fiktive Entscheidung sowie zwei realisierungsbezogene Gedanken gezeigt. In einem späteren Gedächtnistest erinnerten Probanden in einer abwägenden Bewusstseinslage mehr entscheidungs- als planungsbezogene Inhalte, während es bei Probanden in der planenden Bewusstseinslage umgekehrt war (Abb. 9.6).

Offenheit der Informationsaufnahme In einem weiteren Experiment (Fujita et al. 2007) wurde untersucht, ob in der abwägenden Bewusstseinslage die Aufmerksamkeit breiter verteilt ist als in der planenden Bewusstseinslage. Die Probanden bearbeiteten einen Konzentrationstest, in dem mitunter aufgabenirrelevante Wörter dargeboten wurden. In einem unerwarteten Rekognitionstest zeigten Personen, die man vor der Aufgabe in eine abwägende Bewusstseinslage versetzt hatte, bessere Erinnerungsleistungen für die inzidentellen Wörter als Personen in der planenden Bewusstseinslage. Dies spricht dafür, dass in der abwägenden Bewusstseinslage die Aufmerksamkeit breiter verteilt war, sodass auch aufgabenirrelevante Informationen mit encodiert wurden.

Parteilichkeit der Informationsverarbeitung Gollwitzer und Kinney (1989) untersuchten Effekte von Bewusstseinslagen auf Einschätzungen der eigenen Kontrolle. Dazu ließen sie ihre Probanden eine Kontingenzlernaufgabe bearbeiten, in der sie einschätzen sollten, in welchem Maß sie durch das Drücken oder Nichtdrücken einer Taste beeinflussen konnten, ob ein Licht aufleuchtete oder nicht. Tatsächlich leuchtete das Licht völlig unabhängig davon, ob die Taste gedrückt wurde oder nicht, in einem bestimmten Prozentsatz der Durchgänge auf. Obwohl die Probanden also objektiv keinen Einfluss auf das Licht hatten, schätzten sie in der planenden Bewusstseinslage ihre Kontrolle signifikant höher ein als Probanden in der abwägenden Bewusstseinslage.

Implementierungsintentionen

Zusätzlich zu einer realisierungsorientierten Bewusstseinslage wird Gollwitzer zufolge die Verwirklichung von Absichten insbesondere durch die Bildung von *Implementierungsintentionen* unterstützt (Achtziger und Gollwitzer 2010; Gollwitzer 1999). Während *Zielintentionen* angestrebte Handlungsziele repräsentieren (z. B. „Ich will die Prüfung bestehen"), spezifizieren Implementierungsintentionen, unter welchen Bedingungen welche konkreten Handlungen ausgeführt werden sollen (z. B. „Wenn ich am Mittwoch vom Sport komme, arbeite ich das nächste Kapitel des Lehrbuchs durch"). Die Wirksamkeit von Implementierungsintentionen wurde in einer beeindruckenden Zahl von Studien demonstriert. Eine Metaanalyse dieser Studien (Gollwitzer und Sheeran 2006) ergab, dass Implementierungsintentionen mittelgroße bis starke Effekte auf die Zielverfolgung haben und die Initiierung zieldienlicher Handlungen (Brandstätter et al. 2001) und die Abschirmung von Zielen gegen unerwünschte Einflüsse (Achtziger et al. 2008) fördern. Als Beispiel mag eine der ersten Studien zur Wirksamkeit von Implementierungsintentionen dienen (Gollwitzer und Brandstätter 1997), in der Probanden sich vornehmen sollten, einen vom Versuchsleiter erteilten Auftrag oder ein persönliches Vorhaben während der Weihnachtsferien zu erledigen. Probanden, die eine Implementierungsintention gebildet hatten (z. B. „Nach dem Mittagessen am ersten Feiertag werde ich den Bericht schreiben"), realisierten ihre Vorhaben signifikant häufiger als Probanden, die lediglich eine Zielintention gebildet hatten.

Ähnliche Effekte wurden in anderen Alltagskontexten demonstriert, z. B. hinsichtlich der verbesserten Teilnahme an Vorsorgeuntersuchungen (Sheeran und Orbell 2000). Darüber hinaus konnte in Laborexperimenten in einer Reaktionszeitaufgabe gezeigt werden, dass Implementierungsintentionen korrekte Reaktionen beschleunigten und Interferenz durch störende Informationen reduzierten (Cohen et al. 2008). Positive Effekte von Implementierungsintentionen wurden auch bei Kindern mit einer Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung (ADHS) nachgewiesen, die durch Ablenkbarkeit, Impulsivität und motorische Überaktivität charakterisiert ist (Gawrilow und Gollwitzer 2008). Jungen im Alter von acht bis 14 Jahren mit und ohne ADHS bearbeiteten eine Stoppsignalaufgabe, in der sie in Go-Durchgängen so schnell wie möglich auf Bilder mit einem Tastendruck reagieren sollten, während in mitunter eingestreuten Stoppdurchgängen ein Ton signalisierte, dass sie ihre Reaktion unterdrücken sollten. Probanden in der ADHS-Gruppe, die eine Implementierungsintention gebildet hatten („Wenn ich einen Ton höre, dann werde ich keine Taste drücken!") gelang es signifikant häufiger, die Reaktion zu unterdrücken, als Probanden, die nur eine Zielintention gebildet hatten. Dies war der Fall, obwohl die ADHS-Probanden in der Implementierungsintentionsgruppe in den Go-Durchgängen sogar schneller reagierten als die Probanden in der Zielintentionsgruppe.

Welche Mechanismen liegen den Effekten von Implementierungsintentionen zugrunde? Zum einen wird vermutet, dass Implementierungsintentionen bewirken, dass eine Repräsentation der Ausführungsbedingungen der beabsichtigten Handlung im Gedächtnis hochaktiviert bleibt, sodass diese mit höherer Wahrscheinlichkeit im richtigen Moment registriert werden. Zum Zweiten wird angenommen, dass Implementierungsintentionen eine assoziative Verbindung zwischen konkreten Ausführungsgelegenheiten und intendierten Handlungen etablieren und dadurch ähnliche Effekte auf die Handlungssteuerung haben, wie sie sonst nur als Folge von häufiger Übung und Gewohnheitsbildung auftreten (Gollwitzer 1999; Parks-Stamm et al. 2007). Durch die Kopplung einer beabsichtigten Handlung an eine spezifische Ausführungsgelegenheit wird die Handlungsinitiierung gewissermaßen an die Umwelt „delegiert", sodass die Handlung

direkt durch geeignete Reizbedingungen ausgelöst wird. Dafür spricht auch, dass die Effekte von Implementierungsintentionen unabhängig davon zu sein scheinen, wie stark die kognitive Kapazität der Probanden durch eine simultan auszuführende Zusatzaufgabe belastet wird (Brandstätter et al. 2001). Zudem wurden Effekte von Implementierungsintentionen auch bei Patienten mit Frontalhirnverletzungen gefunden, obwohl diese beeinträchtigte Leistungen in komplexen Entscheidungs- und Planungsaufgaben zeigten (Lengfelder und Gollwitzer 2001). Implementierungsintentionen funktionieren also offenbar nach ähnlichen Prinzipien, wie es ▶ Abschn. 9.3.1 im Zusammenhang mit dem Konzept des „vorbereiteten Reflexes" beschrieben wurde, das ebenfalls den Umstand beschreibt, dass intentionsgemäße Reaktionen automatisch durch Reize aktiviert werden können, sofern die Intention eindeutig spezifiziert, unter welchen Reizbedingungen die Reaktion auszuführen ist (Neumann und Klotz 1994; Hommel 2000). Allerdings scheinen die Effekte von Implementierungsintentionen nicht völlig unabhängig von der übergeordneten Zielintention zu sein, aus der sie abgeleitet werden. So wurde gezeigt, dass Implementierungsintentionen die Zielverfolgung insbesondere dann fördern, wenn die übergeordnete Zielintention gleichzeitig aktiviert ist und die Probanden entschlossen sind, viel Anstrengung zu investieren, um das Ziel zu erreichen (Sheeran et al. 2005).

▪ Kritische Würdigung und offene Fragen

Die durch das Rubikonmodell angeregte Forschung hat zahlreiche Belege dafür erbracht, dass Abwägen und Planen mit unterschiedlichen Bewusstseinslagen einhergehen, die sich in Bezug auf die kognitiven Inhalte, die Offenheit und die Parteilichkeit der Informationsverarbeitung unterscheiden. Diese Befunde sind insofern bemerkenswert, als dass Bewusstseinslagen die Verarbeitung von Informationen in Aufgaben beeinflussten, die selbst in keinem inhaltlichen Bezug zu den Entscheidungs- oder Planungsproblemen standen, mit denen die Bewusstseinslagen induziert wurden. Natürlich wirft das Konzept der Bewusstseinslagen auch offene Fragen auf. Erstens wird noch genauer zu klären sein, welche kognitiven Mechanismen den Effekten von Bewusstseinslagen auf die Informationsverarbeitung zugrunde liegen. Zweitens ist relativ wenig erforscht worden, ob und wie Effekte von Bewusstseinslagen durch individuelle Unterschiede moderiert werden. Beispielsweise gibt es Hinweise darauf, dass Bewusstseinslageneffekte bei Personen mit einem stark ausgeprägten Leistungsmotiv (Puca 2001) oder geringer sozialer Ängstlichkeit (Hiemisch et al. 2002) stärker ausfallen als bei misserfolgsmotivierten oder hochängstlichen Personen (vgl. auch Achtziger und Gollwitzer 2010). Theoretisch am wichtigsten ist allerdings die Frage, wie strikt die Rubikonmetapher zu interpretieren ist. So erfordert adaptive Handlungssteuerung in einer sich kontinuierlich verändernden Umwelt eine dynamische, kontextabhängige Balance zwischen beharrlicher Zielverfolgung (**Persistenz**) und kognitiver Flexibilität. Während es einerseits zur Erreichung langfristiger Ziele notwendig ist, Absichten gegen störende Reize und konkurrierende Reaktionen abzuschirmen, muss auf der anderen Seite die Umwelt kontinuierlich auf potenziell bedeutsame Reize überwacht werden, die unter Umständen erfordern, eine Absicht aufzugeben und auf ein anderes Ziel zu wechseln (Goschke 1996, 2003, 2013; Goschke und Bolte 2014; ▶ Abschn. 8.6). Im Lichte dieses Persistenz-Flexibilitäts-Dilemmas wäre es nicht adaptiv, wenn eine Person nach der Festlegung auf ein Ziel so extrem realisierungsorientiert wäre, dass sie signifikante Änderungen in der Umwelt oder der eigenen Bedürfnislage komplett ausblenden würde, um die Realisierung der Absicht nicht zu gefährden. Aus dieser Perspektive stellt sich die Frage, ob eine realisierungsorientierte Bewusstseinslage und die Bildung von Implementierungsintentionen neben ihren nachweislichen positiven Auswirkungen auf die Zielverfolgung auch Kosten verursachen können (z. B. weil man allzu rigide bei der Verfolgung eines Zieles perseveriert und unter Umständen günstige Gelegenheiten für alternative und potenziell aussichtsreichere Ziele übersieht). In der Tat gibt es erste Hinweise darauf, dass Implementierungsintentionen dazu führen können, dass Absichten nach ihrer Erledigung nicht vollständig deaktiviert werden und Personen fälschlicherweise eine vormals beabsichtigte Handlung nochmals ausführen, wenn die assoziierten Auslösereize erscheinen (Bugg et al. 2013; vgl. aber Achtziger und Gollwitzer 2010).

9.4.3 Handlungskontrolle: Abschirmung von Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen

Die Wiederaufnahme volitionspsychologischer Themen wurde in der Motivationsforschung maßgeblich durch Kuhls Handlungskontrolltheorie angeregt (Kuhl 1983, 1996, 2010; Kuhl und Goschke 1994a). Im Zentrum dieser Theorie stehen **Handlungskontrollstrategien**, deren Funktion darin besteht, Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen abzuschirmen und selbstkontrolliertes Verhalten zu unterstützen. Die Theorie beruht auf zwei zentralen Annahmen. Zum einen geht Kuhl davon aus, dass Absichten, die mit einer subjektiven Selbstverpflichtung (*commitment*) verbunden sind, im Unterschied zu unverbindlichen Wünschen besondere funktionale Eigenschaften haben. Insbesondere sollen Repräsentationen unerledigter Absichten im Gedächtnis in einem Zustand erhöhter Aktivierung persistieren und daher mit höherer Priorität ins Arbeitsgedächtnis gelangen als unverbindliche Wünsche (▶ Zur Vertiefung 9.3). Zweitens geht Kuhl in Anknüpfung an Ansätze der älteren Willenspsychologie – speziell das von Ach formulierte „Schwierigkeitsgesetz der Motivation" (Ach 1910, 1935) – davon aus, dass unter Bedingungen, unter denen die Realisierung einer Absicht durch konkurrierende Motivationstendenzen erschwert oder gefährdet ist, Handlungskontrollstrategien aktiviert werden, um die Realisierung der Absicht zu unterstützen. Ob und wie effizient volitionale Strategien in Konfliktsituationen mobilisiert werden, hängt dabei von weiteren Einflussfaktoren (▶ Abschn. 9.4.5) und persönlichen Dispositionen (▶ Abschn. 9.4.6) ab, auf die später noch eingegangen wird.

Handlungskontrollstrategien lassen sich in präventive und interventionelle Strategien einteilen (Hofmann und Kotabe 2012). *Präventive Strategien* sind darauf gerichtet, Motivationskonflikte möglichst vor ihrer Entstehung zu vermeiden. Demgegenüber sollen *interventionelle Strategien* helfen, in einer bereits einge-

tretenen Konfliktsituation Absichten gegen ablenkende Reize, konkurrierende Reaktionen oder störende Emotionen abzuschirmen.

Umweltkontrolle und präventive Selbstverpflichtung Eine der wichtigsten präventiven Selbstkontrollstrategien ist von Kuhl (1983) als Umweltkontrolle bezeichnet worden. Diese Strategie besteht darin, Bedingungen in der Umwelt herzustellen, die es weniger wahrscheinlich machen, dass man bei der Verfolgung einer Absicht abgelenkt oder in Versuchung geführt wird. Verfügt eine Person über metakognitives Wissen darüber, welche Motivationszustände bei ihr in bestimmten Situationen ausgelöst werden, kann sie dieses Wissen nutzen, um ihre Umgebung so zu gestalten, dass diese möglichst keine Ablenkungen oder Versuchungsquellen beinhalten. Ein Beispiel dafür wäre eine Person, die eine Diät befolgen möchte und von sich weiß, dass es ihr spät nachts besonders schwer fällt, der Versuchung zu widerstehen, Schokolade zu essen. Hat diese Person gelernt, dass es ihr leichter fällt, der Versuchung zu widerstehen, wenn keine Schokolade im Haus ist, kann sie dieses metakognitive Wissen nutzen, um tagsüber im Supermarkt (wenn das Verlangen noch nicht so stark ist) keine Schokolade zu kaufen. Natürlich könnte die Person des Nachts immer noch zu einer Tankstelle fahren, um sich Schokolade zu besorgen, aber sie hat Bedingungen geschaffen, die das unerwünschte Verhalten zumindest mit höheren Kosten und Anstrengungen verknüpfen. Umweltkontrolle ist ein Beispiel für das, was in der Selbstkontrollforschung als **präventive Selbstverpflichtung** (*precommitment*) bezeichnet wird (Hofmann und Kotabe 2012; Pezzulo und Rigoli 2011). Präventive Selbstverpflichtungen bestehen darin, dass man die eigenen zukünftigen Handlungsoptionen so einschränkt, dass es unmöglich oder zumindest weniger wahrscheinlich wird, dass man einer Versuchung nachgeben kann. Das klassische literarische Beispiel dafür ist Homers Odysseus, der sich von seinen Gefährten an den Mast seines Schiffes fesseln ließ, um nicht durch den verführerischen Gesang der Sirenen dazu verleitet zu werden, sein Schiff in den Abgrund zu lenken. In der bereits erwähnten Studie zur Erfassung von alltäglichen Selbstkontrollkonflikten von Hofmann et al. (2012) zeigte sich interessanterweise, dass Personen, die laut Fragebogen eine hohe dispositionelle Selbstkontrolle aufwiesen, im Alltag weniger motivationale Konflikte berichteten und seltener Versuchungen widerstehen mussten. Dies könnte bedeuten, dass es selbstkontrollierten Personen besonders gut gelingt, Situationen zu vermeiden, in denen starke konfliktträchtige Bedürfnisse entstehen, und sie daher im Mittel weniger Selbstkontrolle mobilisieren müssen als Personen, die keine präventiven Selbstverpflichtungen eingehen.

Aufmerksamkeitskontrolle Die wohl wichtigste interventionelle Selbstkontrollstrategie besteht darin, die Aufmerksamkeit auf solche Informationen zu fokussieren, die förderlich für die Realisierung der Absicht sind, und ablenkende Reize auszublenden (Kuhl 1983). Aufmerksamkeitskontrolle wurde schon von William James (1890, Bd. 2, S. 561) als eine der grundlegendsten volitionalen Funktionen betrachtet, und in kognitionspsychologischen Theorien wie dem in ▶ Abschn. 9.3.2 dargestellten SAS-Modell von Norman und Shallice (1986) wird die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf aufgabenrelevante Informationen als zentraler Mechanismus der kognitiven Kontrolle betrachtet.

Motivationskontrolle Auch eine weitere, von Kuhl (1983) als Motivationskontrolle bezeichnete Strategie kann als eine Form der Aufmerksamkeitskontrolle interpretiert werden. Motivationskontrolle besteht darin, dass man sich die positiven Anreize, die mit der Erreichung eines langfristigen Zieles verbunden sind, besonders lebhaft vorstellt, während man Anreize kurzfristiger Belohnungen möglichst auszublenden versucht. In ▶ Abschn. 9.4.4 werden wir sehen, dass bereits relativ einfache Strategien zur Fokussierung der Aufmerksamkeit auf langfristige motivationale Anreize selbstkontrollierte Entscheidungen fördern können.

Emotionskontrolle Diese Strategie besteht darin, sich in einen Emotionszustand zu versetzen, der förderlich für die Realisierung einer Absicht ist, oder störende Emotionen herabzuregulieren. Emotionskontrolle spielt u. a. eine wichtige Rolle bei der Misserfolgsbewältigung. Gelingt es einer Person nach Misserfolg nicht, die dadurch ausgelösten negativen Gefühle und Gedanken abzustellen, ist es schwierig für sie, neue Handlungen zu initiieren oder sich auf eine anstehende Aufgabe zu konzentrieren (Koole und Kuhl 2008; Kuhl 1981; Quirin et al. 2011).

9.4.4 Empirische Evidenz für den Einfluss von Handlungskontrollstrategien und exekutiven Funktionen auf selbstkontrolliertes Verhalten

Empirische Belege für die Effektivität von Handlungskontrollstrategien stammen u. a. aus Experimenten zum Einfluss der Aufmerksamkeitskontrolle auf das Entscheidungsverhalten. Ein Beispiel ist eine Studie, in der Probanden zwischen Nahrungsmitteln wählen sollten, von denen sie einige als sehr schmackhaft, aber ungesund, und andere als sehr gesund, aber wenig schmackhaft eingeschätzt hatten (Hare et al. 2011). Wurden die Probanden vor ihren Entscheidungen durch einen Hinweisreiz instruiert, ihre Aufmerksamkeit auf die langfristigen gesundheitlichen Folgen des Verzehrs zu richten, so wählten sie signifikant häufiger gesunde, aber wenig schmackhafte Nahrungsmittel. Wurde dagegen die Aufmerksamkeit auf den Geschmack gelenkt, wählten die Probanden häufiger leckere, aber ungesunde Nahrungsmittel. Analoge Ergebnisse zeigten sich bei Rauchern, deren Verlangen nach einer Zigarette beim Anschauen von Fotos von Zigaretten signifikant reduziert wurde, wenn sie instruiert wurden, ihre Aufmerksamkeit auf die negativen langfristigen gesundheitlichen Konsequenzen (statt die kurzfristigen positiven Effekte) des Nikotinkonsums zu lenken (Kober et al. 2010).

Hofmann und Kollegen (Hofmann et al. 2009, 2008) untersuchten, inwieweit individuelle Unterschiede in kognitiven Kontrollkompetenzen moderieren, ob Personen eher selbstkontrollierte oder impulsive Entscheidungen treffen. Probanden sollten in einem fingierten Produkttest die Schmackhaftigkeit von Süßigkeiten einschätzen, wobei die eigentlich interessierende

Zur Vertiefung 9.3

Das Gedächtnis für unerledigte Absichten

Eine zentrale Annahme von Volitionstheorien wie Kuhls Modell der Handlungskontrolle (Kuhl und Goschke 1994b) besagt, dass Absichten, also Ziele, die mit einer subjektiven Selbstverpflichtung (*commitment*) verbunden sind, im Vergleich zu unverbindlichen Wünschen besondere funktionale Eigenschaften haben. Insbesondere sollen Repräsentationen unerledigter Absichten im Langzeitgedächtnis in einem Zustand erhöhter Aktivierung persistieren, sodass sie besonders leicht abgerufen werden können und mit hoher Priorität ins Arbeitsgedächtnis gelangen. Bereits Lewin (1926) hatte unerledigte Absichten als „persistierende Spannungssysteme" beschrieben, und seine Mitarbeiterin Zeigarnik (1927) konnte zeigen, dass Probanden, die bei der Bearbeitung einer Serie einfacher Aufgaben bei der Hälfte der Aufgaben vor der Vollendung unterbrochen wurden, in einem späteren unerwarteten Gedächtnistest fast doppelt so viele unerledigte wie erledigte Handlungen erinnerten (**Zeigarnik-Effekt**). Diese Experimente wurden später allerdings kritisiert, da alternative Erklärungen für den Zeigarnik-Effekt nicht ausgeschlossen werden konnten und der Effekt in nachfolgenden Studien nicht immer repliziert wurde (kritische Übersicht in Bergen 1968).

Ein alternativer Ansatz zur Untersuchung der Aktivierung absichtsbezogener Gedächtnisinhalte ist das Absichtsaufschubparadigma (Goschke und Kuhl 1993, 1996). Dabei sollten die Probanden zunächst Beschreibungen zweier kurzer Handlungssequenzen („Skripts") auswendig lernen (z. B. einen Schreibtisch aufräumen und einen Tisch decken). Danach wurden die Probanden instruiert, dass sie *eines* der beiden Skripts zu einem späteren Zeitpunkt selbst ausführen sollten, d. h., es wurde eine entsprechende Absicht induziert. In einem anschließenden Rekognitionstest zeigte sich, dass Wörter aus dem später auszuführenden Skript signifikant schneller wiedererkannt wurden als Wörter aus dem gleich gut gelernten, aber nicht auszuführenden Kontrollskript (Abb. 9.7). Wurden die Probanden instruiert, die Ausführung des kritischen Skripts lediglich zu beobachten, zeigte sich kein solcher Effekt. Dieser **Absichtsüberlegenheitseffekt** (*intention superiority effect*) wurde sowohl unter Laborbedingungen als auch mit alltagsnahen Absichten repliziert (Cohen et al. 2011; Dockree und Ellis 2001; Freeman und Ellis 2003; Marsh et al. 1998, 1999; Maylor et al. 2001; Meilan 2008) und steht im Einklang mit der Annahme, dass absichtsbezogene Inhalte im Langzeitgedächtnis höher aktiviert sind als nicht absichtsbezogene Inhalte. Die Funktion dieser erhöhten Aktivierung kann darin gesehen werden, dass unerledigte Absichten häufiger spontan ins Bewusstsein treten, was besonders in Situationen, in denen eine Absicht ohne äußere Hinweisreize initiiert werden muss (z. B. nach 20 min den Kuchen aus dem Ofen nehmen) oder die Gefahr von Ablenkungen groß ist, die Wahrscheinlichkeit erhöhen sollte, den richtigen Moment nicht zu verpassen.

Was aber geschieht mit der Repräsentation von Absichten, nachdem sie erledigt sind? Experimente, in denen Nachwirkungen erledigter Absichten untersucht wurden, haben zu uneinheitlichen Ergebnissen geführt. Auf der einen Seite haben Experimente, in denen das Absichtsaufschubparadigma verwendet wurde, gezeigt, dass Wörter, die sich auf eine *erledigte* Absicht bezogen, in einer lexikalen Entscheidungsaufgabe *längere* Reaktionszeiten produzierten als neutrale Wörter (Marsh et al. 1998) (Abb. 9.7). Dies spricht dafür, dass Repräsentationen von Absichten nach ihrer Erledigung inhibiert werden, was insofern adaptiv ist, als dass es Interferenz zwischen kürzlich ausgeführten und neuen Aufgaben reduziert (Förster et al. 2005; Mayr und Keele 2000).

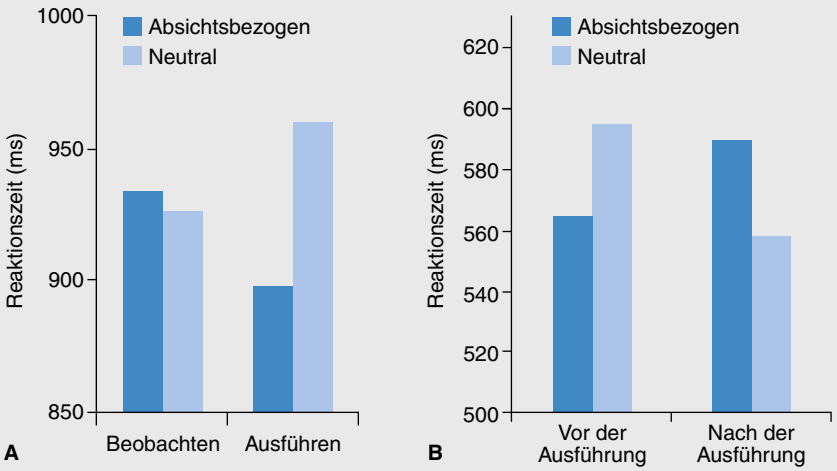


Abb. 9.7 **A** Reaktionszeiten in einem Rekognitionstest für absichtsbezogene und neutrale Wörter in der Ausführen- und Beobachtenbedingung vor der Erledigung der Absicht (nach Daten aus Goschke und Kuhl 1993, Exp. 1). Absichtsbezogene Wörter führten in der Ausführenbedingung (nicht aber in der Beobachtenbedingung) zu signifikant schnelleren Reaktionszeiten als neutrale Reize (*Absichtsüberlegenheitseffekt*). **B** Reaktionszeiten in einer lexikalischen Entscheidungsaufgabe für absichtsbezogene und neutrale Wörter vor und nach der Erledigung der Absicht (nach Daten aus Marsh et al. 1998). Absichtsbezogene Wörter führten vor der Erledigung der Absicht zu schnelleren Reaktionszeiten als neutrale Wörter, produzierten aber nach der Absichtserledigung längere Reaktionszeiten

Zur Vertiefung 9.3 (*Fortsetzung*)

Auf der anderen Seite haben neuere Studien gezeigt, dass erledigte Absichten keineswegs immer sofort deaktiviert werden, sondern das Verhalten in einer nachfolgenden Aufgabe beeinflussen können. In diesen Experimenten sollten Probanden kontinuierlich eine Hauptaufgabe bearbeiten (Zahlen als gerade oder ungerade klassifizieren) und gleichzeitig eine einfache Absicht ausführen, die darin bestand, eine bestimmte Taste drücken, wenn in der Hauptaufgabe ein prospektiver Gedächtnisreiz erschien (z. B. eine Zahl, die sich von den anderen Zahlen durch einen abweichenden Schrifttyp unterschied). Vor jedem Versuchsblock wurde den Probanden mitgeteilt, dass die bisherige Absicht erledigt sei und sie nicht länger auf die prospektiven Gedächtnisreize aus dem vorhergehenden Block reagieren, sondern stattdessen auf einen neuen prospektiven Gedächtnisreiz (z. B. eine Zahl in einer anderen Farbe) reagieren sollten. Im folgenden Block wurden dennoch hin und wieder (die nun irrelevanten und zu ignorierenden) prospektiven Gedächtnisreize aus dem vorhergehenden Block dargeboten. Dies führte zu signifikant verlängerten Reaktionszeiten in der Hauptaufgabe (Walser et al. 2012; Walser et al. 2014). Im Gegensatz zur Annahme, dass Absichten nach ihrer Ausführung inhibiert werden, sprechen diese Befunde dafür, dass die Reiz-Reaktions-Verknüpfungen erledigter Absichten noch für eine gewisse Zeit verhaltenswirksam bleiben und mit einer nachfolgenden Aufgabe interferieren können. Dafür sprechen auch die Ergebnisse einer prospektiven Gedächtnisstudie, in der die Hirnaktivierung der Probanden mittels fMRI erfasst wurde (Beck et al. 2014). Dabei zeigte sich, dass auch nach der Erledigung einer Absicht die nicht länger relevanten prospektiven Gedächtnisreize Aktivierungen in Hirnregionen auslösten, die mit reizgesteuerter Aufmerksamkeitsanziehung und dem Abruf aus dem episodischen Gedächtnis in Verbindung gebracht werden. Dies deutet darauf hin, dass die Verknüpfung zwischen den prospektiven Gedächtnisreizen und der Absichtsrepräsentation nicht vollständig deaktiviert war, sondern die prospektiven Gedächtnisreize nach wie vor den Abruf der eigentlich erledigten Absicht aus dem Gedächtnis auslösten.

Da in Experimenten, in denen Evidenz für die Inhibition erledigter Absichten gefunden wurde, und in Experimenten, die eher für persistierende Nachwirkungen erledigter Absichten sprechen, sehr unterschiedliche Aufgaben verwendet wurden, ist zurzeit noch ungeklärt, wie man diese diskrepanten Befunde erklären kann. Es ist daher ein Ziel der aktuellen Forschung zu untersuchen, von welchen Randbedingungen es abhängt, ob Absichten nach ihrer Ausführung inhibiert werden oder ob sie persistieren und weiterhin verhaltenswirksam bleiben.

9

abhängige Variable die Menge an konsumierten Süßigkeiten war. Zuvor hatte man mit einem impliziten Assoziationstest (Greenwald et al. 1998) die emotionalen Einstellungen der Probanden zu Süßigkeiten gemessen und per Fragebogen erfasst, wie wichtig den Probanden das Ziel war, den Konsum von Süßigkeiten einzuschränken. Als Indikator für kognitive Kontrollkompetenzen wurde die Arbeitsgedächtniskapazität mit einer Aufgabe erfasst, in der die Probanden Informationen im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten mussten, während sie gleichzeitig einfache Rechenaufgaben lösen mussten. Es zeigte sich, dass bei Probanden mit geringer Arbeitsgedächtniskapazität die implizite emotionale Einstellung zu Süßigkeiten einen starken Effekt auf die Menge konsumierter Süßigkeiten hatte (d. h., je positiver die Einstellung war, umso mehr Süßigkeiten aßen die Probanden). Dagegen hatte das explizite Ziel, weniger Süßigkeiten zu essen, bei Probanden mit niedriger Arbeitsgedächtniskapazität keinen Effekt auf den Konsum. Bei Probanden mit hoher Arbeitsgedächtniskapazität war es umgekehrt: Bei diesen wurde der Süßigkeitskonsum durch das explizite Ziel bestimmt, weniger Süßigkeiten zu essen, während die implizite affektive Einstellung keinen Effekt auf den Konsum hatte (◘ Abb. 9.8). Analoge Effekte zeigten sich auch für andere Arten von Selbstkontrollkonflikten und wenn statt der Arbeitsgedächtniskapazität die Fähigkeit zur Reaktionsinhibition als Moderatorvariable verwendet wurde. Diese Befunde sprechen dafür, dass gut ausgeprägte kognitive Kontrollfähigkeiten den relativen Einfluss automatischer emotionaler Einstellungen auf das Verhalten reduzieren und den Einfluss expliziter Selbstkontrollziele verstärken.

Längsschnittliche Studien haben gezeigt, dass Selbstkontrollkompetenzen von Kindern im Vorschulalter über bemerkenswerte lange Zeiträume spätere Indikatoren der Selbstkontrolle vorhersagen. Ausgangspunkt waren klassische Experimente zum **Belohnungsaufschub** von Walter Mischel. Dabei wurden Vorschulkinder vor die Entscheidung gestellt, ob sie sofort eine kleinere Belohnung (z. B. eine kleine Süßigkeit) essen oder auf eine größere Belohnung (z. B. eine größere oder attraktivere Süßigkeit) warten wollten, wobei sie das Warten jederzeit unterbrechen konnten, dann aber nur die kleinere Belohnung erhielten (Mischel et al. 1972). Kinder, die über effektive Selbstkontrollstrategien verfügten und z. B. während des Wartens ihre Aufmerksamkeit von der Süßigkeit ablenkten, gelang es in der Regel, länger zu warten. Kinder mit einer hohen Fähigkeit zum Belohnungsaufschub zeigten zehn Jahre später im Mittel bessere schulische Leistungen, waren sozial kompetenter, sprachlich versierter und konzentrierter bei einer Sache, neigten mehr zum Vorausplanen und konnten besser mit Frustration und Stress umgehen (Mischel et al. 1988). Diese Maße korrelierten insbesondere mit der Wartezeit in einer Bedingung, in der die Süßigkeit sichtbar gewesen war (starke Versuchung) und die Kinder keine explizite Selbstkontrollinstruktion erhalten hatten (selbstinitiierte Kontrolle).

In einer neueren Studie (Casey et al. 2011) wurde darüber hinaus gefunden, dass Probanden, die als Kinder weniger lange auf eine Belohnung gewartet hatten, vier Jahrzehnte später eine schlechtere Reaktionsinhibition in einer Go/NoGo-Aufgabe zeigten, in der sie auf Gesichter eines Geschlechts so schnell wie möglich mit einem Tastendruck reagieren, aber Reaktionen auf Gesichter des anderen Geschlechts unterdrücken sollten. fMRI-Messungen zeigten außerdem, dass Probanden, die als Kinder weniger gut in der Lage waren, Belohnungen aufzuschieben, eine geringere Aktivierung im rechten inferioren Präfrontalcortex zeigten, der eine zentrale Rolle bei der Reaktionsinhibition spielt (Aron et al. 2014) (▶ Abschn. 9.5.2). Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass die Fähigkeit zum Belohnungsaufschub über bemerkenswert lange Zeiträume mit individuellen Unterschieden in behavioralen und neuronalen Indikatoren inhibitorischer Kontrolle korreliert.

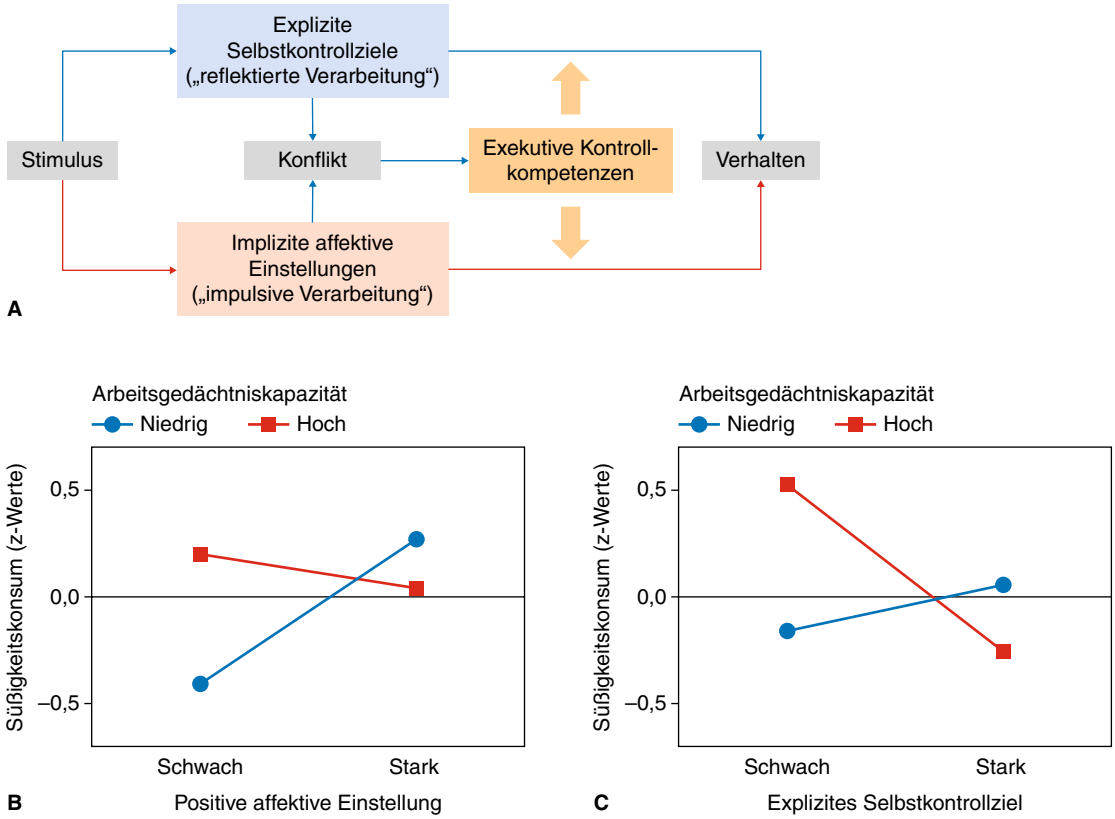


Abb. 9.8 **A** Zwei-Prozess-Modell der Selbstkontrolle, dem zufolge exekutive Kontrollkompetenzen den relativen Einfluss expliziter Ziele und impliziter affektiver Einstellungen auf das Verhalten moderieren. **B** Moderierender Effekt der Arbeitsgedächtniskapazität auf den Einfluss automatischer affektiver Einstellungen auf den Süßigkeitskonsum. **C** Moderierender Effekt der Arbeitsgedächtniskapazität auf den Einfluss expliziter Selbstkontrollziele auf den Süßigkeitskonsum. (Aus Hofmann et al. 2008; mit freundl. Genehmigung von © American Psychological Association. All Rights Reserved)

9.4.5 Bedingungsfaktoren und Moderatoren der Mobilisierung von Selbstkontrolle

Dass eine Person über gute Selbstkontrollkompetenzen verfügt, heißt nicht notwendigerweise, dass sie diese Kompetenzen in einer Konfliktsituation auch tatsächlich einsetzen wird, sondern dies hängt von einer ganzen Reihe weiterer situativer und personenseitiger Faktoren ab. Zunächst setzt der intentionale Einsatz von Selbstkontrollstrategien voraus, dass die Person über das entsprechende *metakognitive Wissen* verfügt. Um beispielsweise eine Strategie wie die von Kuhl (1983) beschriebene Umweltkontrolle effektiv einsetzen zu können, muss eine Person in der Lage sein, valide einzuschätzen, in welchen Situationen Motivationskonflikte entstehen können und welche Maßnahmen geeignet sind, Versuchungssituationen zu vermeiden oder die eigenen zukünftigen Handlungsspielräume durch präventive Selbstverpflichtungen so einzuschränken, dass das Risiko, einer Versuchung nachzugeben, vermindert wird.

Ein weiterer Faktor, der die intentionale Mobilisierung von Selbstkontrollstrategien bestimmt, ist die *Kontrollmotivation*, die von Einschätzungen der Erfolgswahrscheinlichkeit und des subjektiven Nutzens der Selbstkontrolle abhängt. Bereits Kuhl (1983) hat in seiner Handlungskontrolltheorie postuliert, dass Personen in einer Konfliktsituation Handlungskontrollstrategien nur dann mobilisieren, wenn sie ihre Kontrollkompetenz als hinreichend hoch einschätzen und davon ausgehen, dass sie einen Selbstkontrollkonflikt prinzipiell bewältigen können (vgl. auch Kotabe und Hofmann 2015). Darüber hinaus sprechen neuere Befunde dafür, dass kognitive Kontrolle psychologische Kosten mit sich bringt, die sich darin manifestieren, dass sie von den meisten Personen als subjektiv anstrengend oder sogar aversiv erlebt wird. Lässt man Personen zwischen Aufgaben wählen, so vermeiden viele Probanden Aufgaben, die erhöhte kognitive Kontrolle erfordern (Kool et al. 2010). Dies hat zu der Annahme geführt, dass die Mobilisierung von Selbstkontrollstrategien auf einer Kosten-Nutzen-Analyse beruht, bei der Personen den erwarteten Gewinn gegen die intrinsischen Kosten der Kontrolle abwägen (Botvinick und Braver 2015). Im Einklang mit dieser Annahme wurde gezeigt, dass leistungskontingente Belohnungen zu einer verstärkten Mobilisierung kognitiver Kontrolle führen und mit einer verstärkten Aktivierung u. a. von präfrontalen Hirnregionen einhergehen, die an kognitiven Kontrollprozessen beteiligt sind (▶ Abschn. 9.5) (Chiew und Braver 2014; Frober und Dreisbach 2014; Locke und Braver 2008).

Neben solchen Faktoren wird die Mobilisierung von kognitiven Kontrollprozessen durch *psychischen Stress* moduliert. Aus Tierexperimenten ist seit Langem bekannt, dass unkontrollierbarer Stress und die damit verbundene Ausschüttung von Stresshormonen (Cortisol) und Neuromodulatoren (Dopamin, Noradrenalin) die neuronale Verarbeitung im präfrontalen Cortex beeinträchtigten kann (Überblick in Arnsten 2009). Dies kann sich in einer schlechteren Abschirmung von aufgabenrelevan-

Tab. 9.2 Formen der Lage- und Handlungsorientierung mit Beispiel-Items aus dem Handlungskontrollfragebogen

	Lageorientierung	Handlungsorientierung	Beispiel-Item
Ausführungs-bezogen (prospektiv)	Zögern – Ausführungshemmung – Übermäßige Aufrechterhaltung von Absichtsrepräsentationen – Mangelnde Mobilisierung positiven Affekts	Initiative – Initiierung intendierter Handlungen – Situationsgemäße Deaktivierung von Absichtsrepräsentationen – Mobilisierung positiven Affekts	Wenn ich etwas Wichtiges oder Unangenehmes zu erledigen habe, dann – kann es eine Weile dauern, bis ich mich dazu aufraffe; – lege ich meist sofort los
Misserfolgs-bezogen	Präokkupation – Grübeln über Misserfolge – Beeinträchtigte Bewältigung negativen Affekts – Selbsthemmung	Ablösung – Ablösen von unerreichten Zielen – Aktive Herabregulierung negativen Affekts – Selbstbestimmtheit	Wenn ich etwas Wertvolles verloren habe und jede Suche vergeblich war, dann – kann ich mich schlecht auf etwas anderes konzentrieren; – denke ich nicht mehr lange darüber nach

ten Informationen im Arbeitsgedächtnis sowie in Beeinträchtigungen bei der Koordination multipler Ziele und der flexiblen Anpassung der Zielabschirmung an wechselnde Anforderungen manifestieren (Plessow et al. 2011, 2012a, b). In einer rezenten Studie wurde darüber hinaus direkte Evidenz dafür gefunden, dass Stress die Selbstkontrolle vermindern kann (Maier et al. 2015). Probanden sollten zwischen mehr oder weniger gesunden und unterschiedlich schmackhaften Nahrungsmitteln wählen. Die Probanden in der Stressgruppe mussten ihre Hand 3 min lang in Eiswasser tauchen und wurden dabei von der Versuchsleiterin bewertet. Anschließend sollten die Probanden zwischen schmackhaften, aber ungesunden, oder gesunden, aber weniger schmackhaften Speisen auswählen. Die gestressten Probanden gewichteten den Geschmack der Nahrungsmittel stärker und wählten häufiger leckere, aber ungesunde Speisen als die nicht gestressten Probanden. Wie fMRI-Messungen zeigten, spiegelte sich dies auf neuronaler Ebene darin, dass bei gestressten Probanden die funktionale Konnektivität zwischen dem ventromedialen Präfrontalcortex, der an der Repräsentation des subjektiven Wertes von Entscheidungsoptionen beteiligt ist (▶ Abschn. 9.5.2), und Regionen im Striatum, die den unmittelbaren Belohnungswert des Geschmacks codierten, erhöht war. Dies könnte erklären, warum Geschmacksattribute bei den gestressten Probanden einen stärkeren Einfluss auf die Entscheidungen hatten. Dagegen zeigten die gestressten Probanden eine verminderte Konnektivität zwischen dem dorsolateralen Präfrontalcortex, der an kognitiven Kontrollfunktionen und der Inhibition unerwünschter Reaktionen beteiligt ist, und dem ventromedialen Präfrontalcortex, was den reduzierten Einfluss langfristiger Gesundheitsziele auf die Entscheidungen erklären könnte.

9.4.6 Individuelle Unterschiede in der Selbstkontrolle: Lage- vs. Handlungsorientierung

Eine zentrale Annahme in Kuhls Theorie der Handlungskontrolle besagt, dass die Mobilisierung und Effektivität von Handlungskontrollstrategien davon abhängen, in welchem *Kontrollzustand* sich eine Person befindet. Die meisten von uns kennen Zustände, in denen es einem leichtfällt, Absichten in die Tat umzusetzen, während man sich zu anderen Zeiten wie gelähmt fühlt und es einem schwerfällt, selbst einfache Handlungen zu initiieren. Kuhl (1994, 1996) bezeichnet den Zustand, in dem die Initiierung beabsichtigter Handlungen und die Mobilisierung von Handlungskontrollstrategien gebahnt sind, als **Handlungsorientierung**, und den Zustand, in dem beides beeinträchtigt ist, als **Lageorientierung**. Die Wahrscheinlichkeit, in den einen oder anderen Zustand zu gelangen, ist das Ergebnis einer Interaktion von situativen Bedingungen und persönlichen Dispositionen. Personen mit einer Disposition zur Lageorientierung sollen insbesondere bei emotionalen Belastungen, unkontrollierbarem Stress oder wiederholten Misserfolgserfahrungen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit in einen lageorientierten Zustand kommen. Zur Messung der Disposition zur Lage- und Handlungsorientierung wurde ein Fragebogen entwickelt, der zwischen *prospektiver*, *misserfolgsbezogener* und *ausführungsbezogener* Lage- und Handlungsorientierung differenziert (Tab. 9.2). Insbesondere die beiden erstgenannten Skalen sind in einer großen Zahl von experimentellen und anwendungsorientierten Studien validiert worden (Übersicht in Diefendorff et al. 2000; Kuhl 2010; Kuhl und Beckmann 1994).

Generell sollen sich Personen mit einer Disposition zur *prospektiven* Lageorientierung dadurch auszeichnen, dass sie zum Zögern neigen und Schwierigkeiten haben, beabsichtigte Handlungen zu initiieren, sich nur schwer verbindlich auf ein Ziel festlegen und Absichten aufschieben, obwohl ihre Gedanken häufig um unerledigte Absichten kreisen. Im Einklang damit wurde u. a. gezeigt, dass Personen mit einer Disposition zur prospektiven Lageorientierung im Vergleich zu handlungsorientierten Personen ihre Absichten seltener in die Tat umsetzten (Kuhl 1982), länger bei einer langweiligen Tätigkeit perseverierten (Kuhl und Beckmann 1994), Absichten häufiger aufschoben (Blunt 1998) und unsicherer in ihren Entscheidungen waren (Stiensmeier-Pelster 1994). Unterschiede in der Mobilisierung kognitive Kontrolle zwischen lage- und handlungsorientierten Personen treten dabei insbesondere unter erhöhter kognitiver Belastung zutage. Beispielsweise zeigten Lageorientierte in einer Stroop-Aufgabe nur dann eine schlechtere Mobilisierung kognitiver Kontrolle als Handlungsorientierte, wenn die Probanden bereits sehr lange an der Aufgabe gearbeitet oder zuvor eine schwierige Arbeitsgedächtnisaufgabe ausgeführt hatten (Jostmann und Koole 2007). Auch Defizite bei der Initiie-

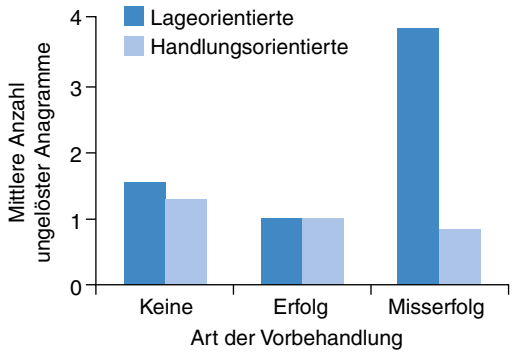


Abb. 9.9 Anzahl nicht gelöster Anagramme in Abhängigkeit von der Vorbehandlung und der Persönlichkeitsdisposition zur Lageorientierung. (Adaptiert nach Kuhl und Weiß 1994)

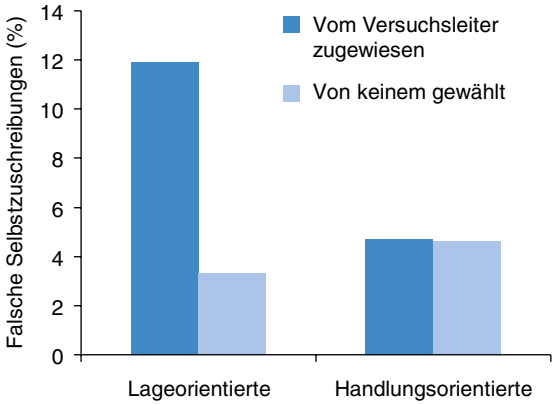


Abb. 9.10 Anzahl von Handlungen, die lage- und handlungsorientierte Probanden in einem Gedächtnistest fälschlich als selbst gewählt klassifizierten, obwohl sie ursprünglich vom Versuchsleiter bzw. von keinem der beiden ausgewählt worden waren. (Nach Daten aus Kuhl und Kazén 1994; mit freundl. Genehmigung von © American Psychological Association. All Rights Reserved)

rung intendierter Handlungen bei Lageorientierten zeigten sich insbesondere unter Bedingungen erhöhter kognitiver Belastung und reduziertem positivem Affekt (Kazén et al. 2008).

Misserfolgsbezogene Lageorientierung bezeichnet einen Zustand, in dem die Aufmerksamkeit auf negative emotionale Erlebnisse fokussiert ist und es der Person schwerfällt, Gedanken abzuschalten, die um Misserfolge oder unrealistische Ziele kreisen. Beispielsweise zeigten lageorientierte Personen nach wiederholten Misserfolgserfahrungen stärkere Leistungsbeeinträchtigungen in einer neuen Aufgabe als handlungsorientierte Personen, obwohl sie nach eigener Aussage ebenso motiviert und zuversichtlich waren, die neue Aufgabe zu meistern, wie die Handlungsorientierten (Kuhl und Weiß 1994) (Abb. 9.9). Kuhl zufolge erhöht misserfolgsbezogene Lageorientierung das Risiko, in einen Zustand *funktionaler Hilflosigkeit* zu kommen, weil es der Person nicht gelingt, negative Gefühle und misserfolgsbezogene Gedanken abzuschalten, und sie sich daher trotz hoher Motivation nur schwer auf eine neue Aufgabe konzentrieren kann. In einer neueren Studie wurde zudem gezeigt, dass misserfolgsbezogene Lageorientierung mit einer verminderten Mobilisierung kognitiver Kontrolle unmittelbar nach Reaktionskonflikten assoziiert war (Fischer et al. 2015). Während handlungsorientierte Probanden auf Reaktionskonflikte in einer Reaktionszeitaufgabe mit einer verstärkten Mobilisierung kognitiver Kontrolle reagierten, war dies umso weniger der Fall, je lageorientierter Probanden waren.

Kuhl (2000, 2010) hat das Konzept der Lage- und Handlungsorientierung inzwischen in eine umfassende Theorie der Persönlichkeits-System-Interaktionen (PSI-Theorie) integriert, in der es eng mit individuellen Unterschieden in der Regulation von Emotionen verknüpft wird. Eine erste *Affektmodulationshypothese* der Theorie besagt, dass eine Erhöhung von positivem Affekt die Initiierung zielgerichteter Handlungen bahnt, während eine Reduktion positiven Affekts die Umsetzung von Intentionen in konkrete Handlungen erschwert. Dahinter steht die Annahme, dass eine Reduktion positiven Affekts signalisiert, dass bei der Zielverfolgung Probleme aufgetreten sind und die Handlungsausführung zugunsten von Planungs- und Problemlöseprozessen zurückgestellt werden sollte. Merkmale der prospektiven Lageorientierung wie mangelnde Initiative, Unentschiedenheit und Zögern werden darauf zurückgeführt, dass es lageorientierten Personen schwerfällt, positiven Affekt zu mobilisieren. Im Einklang damit fanden Koole und Jostmann (2004), dass prospektiv handlungsorientierte Personen nach der Konfrontation mit einer selbstwertbelastenden Situation ihre Aufmerksamkeit bevorzugt auf positive emotionale Reize richteten, während sich kein solcher Effekt bei den lageorientierten Probanden fand. Darüber hinaus soll eine mangelnde Mobilisierung von positivem Affekt zu einem Zustand führen, in dem Repräsentationen unerledigter Absichten zwar aktiv im Gedächtnis aufrechterhalten werden, ihre Ausführung aber gehemmt wird. Dies steht im Einklang mit dem Befund, dass bei Lageorientierten unerledigte Absichten zwar in einem hochaktivierten Zustand im Gedächtnis persistierten, sie aber dennoch häufiger vergaßen, eine Absicht (den Versuchsleiter am Ende des Experiments an etwas zu erinnern) im richtigen Moment auszuführen (Kuhl und Goschke 1994b).

Eine zweite Affektmodulationshypothese der PSI-Theorie besagt, dass eine mangelnde Fähigkeit zur Herabregulierung negativen Affekts bei misserfolgsbezogener Lageorientierung damit einhergeht, dass der Zugang zu eigenen Bedürfnissen und Motiven gehemmt und das Verhalten stärker durch externe Instruktionen oder Verpflichtungen bestimmt wird. Im Einklang damit haben Kuhl und Kazén (1994; Kazén et al. 2003) zeigen können, dass Personen mit einer Disposition zur misserfolgsbezogenen Lageorientierung Ziele, die ihnen von einer fremden Person zugewiesen wurden, in einem späteren Gedächtnistest im Vergleich zu handlungsorientierten Probanden häufiger fälschlich als selbstgewählt klassifizierten (Abb. 9.10). Diese erhöhte Neigung zu falschen Selbstzuschreibungen zeigte sich besonders deutlich in trauriger Stimmung (Baumann und Kuhl 2003) oder unter akutem Stress (Baumann et al. 2005). Das passt zu der Annahme der PSI-Theorie, dass Lageorientierte aufgrund einer mangelnden Herabregulierung negativer Affekte schlechteren Zugang zu eigenen Motiven haben und daher externe Aufgaben nicht hinreichend auf ihre Kompatibilität mit eigenen Motiven prüfen.

Die PSI-Theorie ist einer der derzeit ambitioniertesten Ansätze, um das Zusammenspiel kognitiver Prozesse, Emotionen und Persönlichkeitsdispositionen bei der Handlungskontrolle

aus einer integrativen Perspektive zu erklären. Die Theorie zeichnet sich zudem dadurch aus, dass neben positiven Aspekten der Selbstkontrolle auch mögliche psychische Kosten einer übermäßigen Selbstkontrolle thematisiert werden. Auch wenn es für die Erreichung langfristiger Ziele oder die Erfüllung sozialer Normen häufig notwendig ist, Absichten gegen kurzfristige Versuchungen abzuschirmen und momentane Bedürfnisse aufzuschieben, können übermäßige Selbstkontrolle und die chronische Unterdrückung eigener Motive und Bedürfnisse negative psychische Konsequenzen haben (Baumann et al. 2005). Kuhl (1996, 2010) hat vor diesem Hintergrund zwischen zwei Arten von Kontrolle unterschieden:

- *Selbstkontrolle* in einem engeren Sinn des Wortes bezeichnet eine Form der kognitiven Kontrolle, bei der Bedürfnisse und Motive, die im Widerspruch zu kognitiv repräsentierten Absichten stehen, unterdrückt werden.
- *Selbstregulation* dagegen ist durch einen dynamischen Ausgleich zwischen impliziten Motiven und expliziten Zielen charakterisiert.

Beide Formen der Kontrolle haben komplementäre Vor- und Nachteile, sodass sich ihre Adaptivität nur unter Berücksichtigung der Anforderungen der jeweiligen Situation und ihrer langfristigen Konsequenzen beurteilen lässt.

9.5 Kognitive Neurowissenschaft der willentlichen Handlungssteuerung: Neuronale Grundlagen der kognitiven Kontrolle

In Bezug auf die Frage welche Hirnstrukturen und neuronalen Mechanismen kognitiven Kontrollprozessen zugrunde liegen, wird seit über 100 Jahren vermutet, dass der Präfrontalcortex (▶ Zur Vertiefung 9.4) an höheren kognitiven Funktionen wie Problemlösen, Planen und der Ausrichtung des Verhaltens an Zielen und sozialen Regeln beteiligt ist. Diese Vermutung stützte sich zunächst auf neuropsychologische Beobachtungen von Patienten mit Frontalhirnläsionen, bei denen grundlegende sensorische und motorische Funktionen und die Ausführung von Routinehandlungen meist weitgehend intakt bleiben, die aber oft große Probleme bei der Planung und Ausführung nicht automatisierter Alltagshandlungen und der Anpassung des Verhaltens an wechselnde Aufgabenanforderungen haben (Luria 1973; Stuss und Knight 2013). Diese Beeinträchtigungen wurden als **dysexekutives Syndrom** bezeichnet (Baddeley 2012), und dem Präfrontalcortex wurde die Funktion einer zentralen Exekutive zugeschrieben, die perzeptuelle, kognitive und motorische Prozesse im Sinne übergeordneter Ziele koordiniert und kontrolliert. Diese Annahme trägt allerdings wenig zum Verständnis kognitiver Kontrolle bei, solange nicht spezifiziert wird, *wie* – d. h. kraft welcher neuronalen und computationalen Mechanismen – der Präfrontalcortex die ihm zugeschriebenen Kontrollfunktionen realisiert. Die Vorstellung eines zentralen Kontrollsystems ist auch insofern fragwürdig, als dass der Präfrontalcortex kein einheitliches System ist, sondern verschiedene präfrontale Regionen unterschiedliche Kontrollfunktionen vermitteln. Zudem ist der Präfrontalcortex selbst in ein komplexes Netzwerk corticaler und subcorticaler Hirnsysteme eingebunden und wird durch diese Systeme in seiner Funktionsweise nicht weniger beeinflusst, als er seinerseits Prozesse in diesen Systemen moduliert. Insofern werden kognitive und volitionale Kontrollprozesse auch nicht ausschließlich durch präfrontale Strukturen vermittelt, sondern beruhen auf Interaktionen weit verteilter (frontaler und nichtfrontaler) Hirnsysteme.

9.5.1 Methodische Vorbemerkungen

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde eine nahezu unüberschaubare Zahl von Studien durchgeführt, in denen experimentalpsychologische Methoden mit funktionellen bildgebenden Verfahren oder Untersuchungen hirngeschädigter Patienten kombiniert wurden, um die Funktionen des Präfrontalcortex und die neuronalen Mechanismen kognitiver Kontrolle zu entschlüsseln (rezente Sammlung von Überblicksartikeln in Stuss und Knight 2013). Bevor ein Überblick über exemplarische Ergebnisse dieser Forschung gegeben wird, ist es wichtig, sich eine Reihe methodischer Herausforderungen und Einschränkungen bewusst zu machen.

Messung kognitiver Kontrollfunktionen In Bezug auf die Aufgaben, die zur Messung kognitiver Kontrollfunktionen verwendet werden, ist zu beachten, dass diese keine „prozessreinen" Maße für einzelne Kontrollfunktionen liefern, sondern in der Regel mehrere kognitive Leistungen in unterschiedlicher Gewichtung beanspruchen. Konfirmatorische Faktoranalysen von Aufgabenbatterien zur Messung kognitiver Kontrollfunktionen haben gezeigt, dass sich die Interkorrelationen zwischen den Leistungsparametern der Aufgaben recht gut durch Modelle mit drei latenten (nicht direkt beobachtbaren) Variablen beschreiben lassen (Friedman et al. 2008; Miyake et al. 2000). Die erste Variable ist als *Einstellungswechsel* (*set shifting*) interpretiert worden und wird mit Aufgaben erfasst, in denen Probanden schnell zwischen verschiedenen Reaktionsregeln oder kognitiven Einstellungen wechseln müssen (▶ Abschn. 9.5.2).

Die zweite Variable ist als *Updating* bezeichnet worden und wird mit Aufgaben erfasst, die die Aufrechterhaltung, Überwachung und Aktualisierung von Informationen im Arbeitsgedächtnis erfordern. Ein Beispiel dafür sind sogenannte **N-Back-Aufgaben**, in denen Probanden eine Serie von Reizen dargeboten wird und sie jeweils signalisieren sollen, ob der aktuelle Reiz identisch mit dem Reiz ist, der ein, zwei oder drei Durchgänge zuvor dargeboten wurde.

Die dritte Variable ist als *Inhibition* interpretiert worden und wird mit Aufgaben erfasst, in denen dominante Reaktionen unterdrückt werden müssen wie z. B. Go/NoGo-, Stoppsignal- und Stroop-Aufgaben. In Go/NoGo-Aufgaben sollen die Probanden in den meisten Versuchsdurchgängen so schnell wie möglich auf Zielreize (z. B. die Buchstaben Q, P und T) reagieren (Go-Durchgänge), aber auf einen relativ selten erscheinenden NoGo-Reiz (z. B. X) *nicht* reagieren. In der Stoppsignalaufgabe müssen Probanden ebenfalls in den meisten Durchgängen so schnell wie möglich mit einem Tastendruck auf Reize reagieren, außer in zu-

fällig eingestreuten Stoppdurchgängen, in denen ein Stoppsignal kurz nach dem Reiz der Person signalisiert, dass sie die Reaktion unterdrücken soll. Die Reaktionsunterdrückung ist dabei umso schwieriger, je kürzer das Zeitintervall zwischen dem Reiz und dem Stoppsignal ist (Logan 1994).

Obwohl die drei latenten Variablen meist als separierbare Komponenten kognitiver Kontrolle interpretiert werden, sind sie untereinander moderat korreliert. Dies deutet darauf hin, dass es neben spezifischen auch generelle Kontrollfunktionen gibt, die in allen exekutiven Aufgaben beansprucht werden. In neueren Studien wurde in der Tat gefunden, dass der Inhibitionsfaktor keine über einen generellen Faktor hinausgehende Varianz erklärt, sodass neuere Modelle neben einem Generalfaktor für exekutive Kontrolle nur noch Shifting und Updating als latente Variablen beinhalten (Friedman et al. 2008; Miyake und Friedman 2012). Die Autoren vermuten, dass der generelle Faktor die Fähigkeit spiegelt, Ziele und aufgabenrelevante Information aktiv aufrechtzuhalten, und dass die Inhibition irrelevanter Reaktionen ein Nebeneffekt der Top-down-Modulation der Verarbeitung durch aktiv gehaltene Zielrepräsentationen ist.

Interpretation von Läsionsstudien In Bezug auf Studien mit hirngeschädigten Patienten ist zu beachten, dass aus einer Beeinträchtigung einer bestimmten kognitiven Funktion nach der Verletzung einer Hirnstruktur nicht notwendigerweise geschlossen werden kann, dass die geschädigte Struktur der anatomische Ort ist, an dem die Funktion im gesunden Gehirn lokalisiert ist. Vielmehr kann die Beeinträchtigung auch daraus resultieren, dass Regionen, mit denen die geschädigte Region verknüpft ist, nicht mehr normal arbeiten. (Um eine etwas krude Analogie zu bemühen: Aus der Beobachtung, dass bei einem Fernseher das Abschneiden des Steckers zum Ausfall von Bild und Ton führt, kann man auch nicht schließen, dass die Funktionen der Bild- und Tonerzeugung im Stecker lokalisiert sind.) Für die Lokalisation kognitiver Kontrollfunktionen sind *funktionale Dissoziationen* von besonderer Bedeutung, bei denen je nach Ort einer Läsion unterschiedliche Kontrollfunktionen beeinträchtigt sind. Der stärkste Beleg für funktionale Spezialisierungen sind Doppeldissoziationen, die vorliegen, wenn eine Läsion in einer Region X die Leistung in einer Aufgabe A beeinträchtigt, aber die Aufgabe B intakt lässt, während eine Läsion in einer anderen Region Y den umgekehrten Effekt hat.

Einschränkungen funktioneller Bildgebungsverfahren Bildgebende Verfahren wie die fMRI ermöglichen es, hämodynamische Korrelate der neuronalen Aktivität (z. B. den Oxygenierungsgrad des Blutes) mit relativ hoher räumlicher Auflösung während der Bearbeitung kognitiver Aufgaben zu registrieren (Einführung in Huettel et al. 2014). Da die zugrunde liegenden hämodynamischen Prozesse mit einer Verzögerung von einigen Sekunden auf Veränderungen der neuronalen Aktivität folgen, ist die zeitliche Auflösung dieser Methoden begrenzt. Zwar ist es bis zu einem gewissen Grad möglich, durch entsprechende Analysemethoden und die Verwendung schneller ereigniskorrelierter Designs neu-

Zur Vertiefung 9.4

Funktionelle Anatomie des Frontalcortex

Das Frontalhirn umfasst beim Menschen etwa ein Drittel der Großhirnrinde und gehört zu den phylogenetisch jüngsten und in der Ontogenese am spätesten ausreifenden Hirnregionen. Es wird nach hinten durch den zentralen Sulcus vom Parietallappen und nach unten durch den lateralen Sulcus vom Temporallappen abgegrenzt. Der am weitesten posterior gelegene Teil des Frontallappens umfasst den Motorcortex, davor befinden sich die sekundären motorischen Areale (prämotorischer Cortex und supplementär-motorisches Areal, SMA; Brodmann-Areal [BA] 6), das frontale Augenfeld (BA 8) und das Broca-Areal. Die anterior davon gelegenen Regionen werden als *präfrontaler Cortex* bezeichnet, der in einen lateralen, medialen und orbitalen Bereich unterteilt werden kann (◘ Abb. 9.11). Die *laterale Oberfläche* des Präfrontalcortex umfasst den dorsolateralen (BA 9 und BA 46) und ventrolateralen Präfrontalcortex (BA 44 und 45 sowie superiore Teile von BA 47) sowie die inferiorfrontale Kreuzungsregion an der Grenze zwischen dem inferioren frontalen Sulcus und dem inferioren präzentralen Sulcus (Kreuzung von BA8a, BA6 und BA44). Der *orbitofrontale Cortex* (OFC) umfasst den unteren Teil des Präfrontalcortex, der sich hinter der oberen Wand der Augenhöhlen (Orbitae) befindet (BA 11 bis 14 und Teile von BA 47). Der am weitesten anterior gelegene Teil des Präfrontalcortex (BA 10) wird als rostraler Präfrontalcortex oder als frontopolarer Cortex bezeichnet. Die *mediale Oberfläche* des Präfrontalcortex umfasst zum einen den dorsal gelegenen medialen frontalen Gyrus und zum anderen den *ventromedialen Präfrontalcortex* (inferiore Teile von Areal 47 und mediale Teile der Areale 9 bis 12). Ebenfalls im medialen Frontalhirn befindet sich der *anteriore cinguläre Cortex* (ACC; BA 24, 25 und 32). Der ACC umfasst einen dorsalen Abschnitt (dACC) mit starken Verbindungen zum dorsolateralen Präfrontalcortex, zum Parietalcortex sowie zu supplementär-motorischen und prä-supplementär-motorischen Regionen, und einen rostralen Abschnitt (rACC) mit Verbindungen u. a. zu limbischen Regionen und zum orbitofrontalen Cortex.

Der laterale präfrontale Cortex besitzt Verbindungen zu den meisten posterioren Assoziationsfeldern des Temporal- und Parietalcortex, in denen visuelle, somatosensorische, auditorische und multimodale Repräsentationen verarbeitet werden. Der dorsolaterale Präfrontalcortex hat zudem Verbindungen zu corticalen und subcorticalen motorischen Systemen wie dem SMA, dem Prä-SMA, dem prämotorischen Cortex, dem frontalen Augenfeld und den Basalganglien. Der orbitofrontale Cortex und mediale präfrontale Regionen haben demgegenüber enge Verbindungen zu Regionen des limbischen Systems wie der Amygdala, dem cingulären Cortex, dem Hypothalamus, dem Hippocampus und dem Striatum, die an der Verarbeitung von Emotionen, Motivation und Belohnungen sowie an Lern- und Gedächtnisfunktionen beteiligt sind. Allerdings ist diese Unterscheidung zwischen lateralen und medialen präfrontalen Regionen nicht zu strikt zu nehmen, da auch der laterale Präfrontalcortex durch affektive und motivationale Systeme beeinflusst wird. Viele der Verbindungen des Präfrontalcortex mit anderen Hirnregionen sind reziprok, d. h., es gibt efferente Verbindungen vom präfrontalen Cortex zu den meisten Regionen, aus denen er afferente Signale erhält. Darüber hinaus sind Regionen innerhalb des Präfrontalcortex untereinander hochvernetzt. Der Präfrontalcortex befindet sich damit in einer ausgezeichneten anatomischen Position, um Informationen über äußere Reize und innere (emotionale und motivationale) Zustände zu integrieren und die Verarbeitung in einer Vielzahl corticaler und subcorticaler Systeme zu modulieren.

Zur Vertiefung 9.4 (*Fortsetzung*)

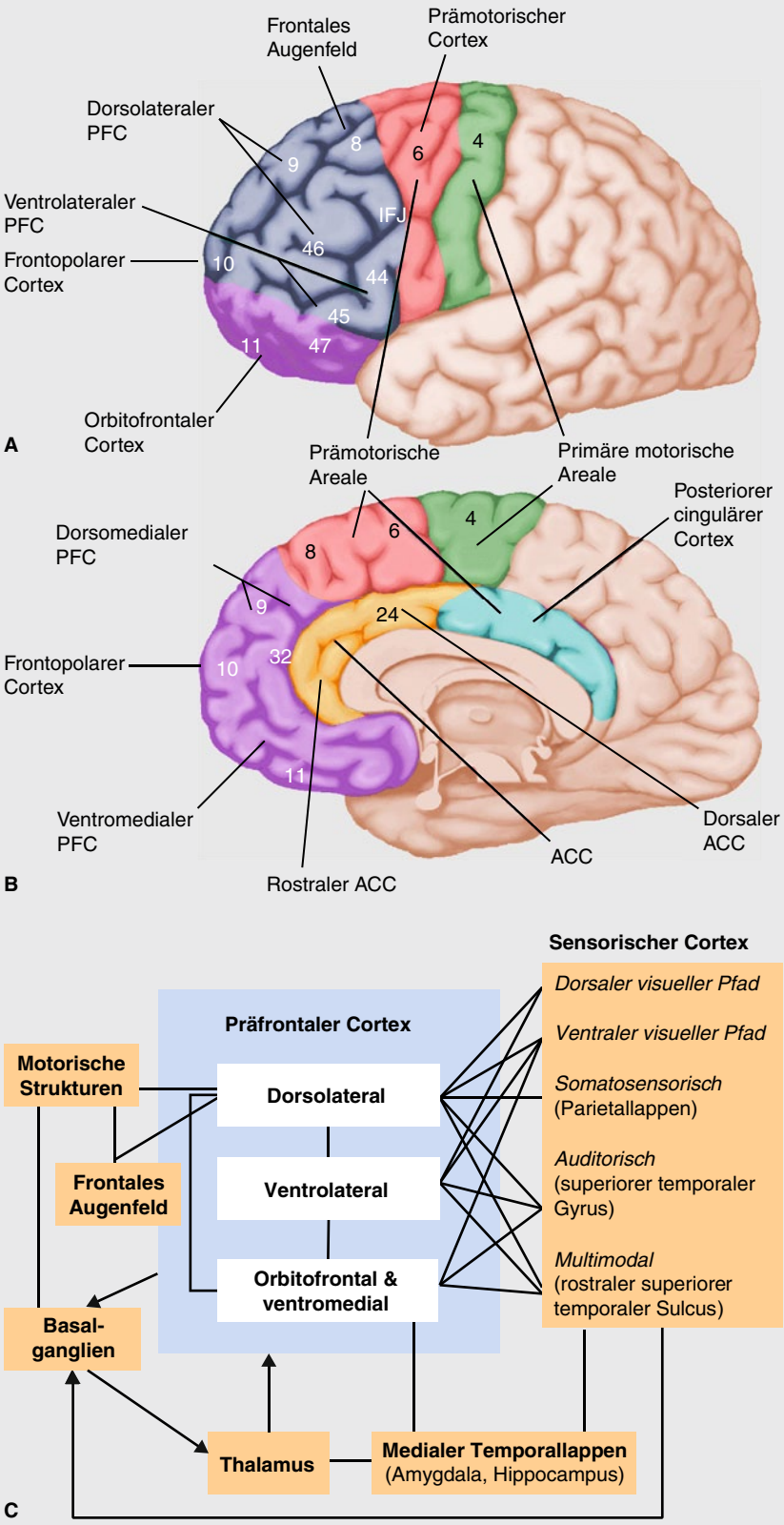


Abb. 9.11 **A** Teilregionen des Frontalhirns (laterale Ansicht). **B** Teilregionen des Frontalhirns (mediale Ansicht). **C** Schematische Darstellung wichtiger Verbindungen des präfrontalen Cortex (*PFC*) mit anderen Hirnregionen. (Adaptiert nach Miller und Cohen 2001; mit freundl. Genehmigung von © Annual Reviews. All Rights Reserved)

ronale Aktivität, die durch schnell aufeinanderfolgende Prozesse ausgelöst wird (z. B. die Verarbeitung eines Hinweisreizes und des nachfolgenden imperativen Reizes) zu separieren. Allerdings führen die dafür erforderlichen Designanpassungen häufig dazu, dass die Natur der untersuchten Prozesse verändert wird (z. B. weil aufeinanderfolgende Reize durch variable Interstimulusintervalle separiert werden müssen). Um zu ermitteln, welche Hirnregionen an einer kognitiven Funktion beteiligt sind, wird häufig eine *Subtraktionsmethode* verwendet, bei der die Hirnaktivität in einer Experimentalbedingung mit der in einer Kontrollbedingung verglichen wird (z. B. könnte man in der Stroop-Aufgabe die Hirnaktivität in inkongruenten und kongruenten Durchgängen vergleichen, um zu ermitteln, welche Regionen durch einen Reaktionskonflikt aktiviert werden). Dies setzt allerdings voraus, dass sich die zwei Bedingungen *ausschließlich* in dem interessierenden Prozess unterscheiden, was keineswegs immer der Fall ist, da das Hinzufügen eines Prozesses andere Prozesse verändern kann, sodass die einfache Subtraktionslogik nicht mehr anwendbar ist. Eine Alternative sind *parametrische Designs*, bei denen man eine unabhängige Variable (z. B. die Stärke eines Reaktionskonflikts) in mehreren Stufen variiert und nach Hirnregionen sucht, deren Aktivierung mit der unabhängigen Variablen korreliert.

Von rapide wachsender Bedeutung sind ferner Methoden, mit denen man versucht, aus statistischen Abhängigkeiten zwischen neuronalen Aktivierungen in verschiedenen Hirnregionen auf deren *funktionelle Konnektivität* und Interaktion zu schließen. Ebenfalls zunehmende Bedeutung haben sog. Multi-Voxel-Pattern-Analysen, bei denen man mit Methoden des maschinellen Lernens untersucht, ob über mehrere Voxel verteilte räumliche *Muster* im fMRI-Signal Informationen über mentale Inhalte enthalten (Haynes 2015) (s. Beispiel in ► Zur Vertiefung 9.2).

9.5.2 Kognitive Kontrollfunktionen des Präfrontalcortex

Das Gehirn ist ein massiv parallel arbeitendes System, in dem kontinuierlich eine Vielzahl von Informationen in spezialisierten Teilsystemen (z. B. für die visuelle Objekterkennung, das Sprachverstehen, die Bewegungssteuerung) verarbeitet wird. Innerhalb dieses parallel verteilten Systems werden dem Präfrontalcortex eine Reihe spezieller Funktionen zugeschrieben, die die Grundlage kognitiver Kontrolle und flexibler willentlicher Handlungen bilden (Goschke 2013; Hazy et al. 2007; Miller und Cohen 2001):

1. *Flexible Aktualisierung neuronaler Repräsentationen von Zielen, Aufgabenregeln und Kontextinformationen.* Diese Funktion bildet die Grundlage dafür, dass kognitive Einstellungen und Verhaltensdispositionen flexibel umkonfiguriert und an wechselnde Ziele und Kontexte angepasst werden können.
2. *Aktive Aufrechterhaltung und Abschirmung aufgabenrelevanter Informationen und deren Abschirmung gegen störende Reize.* Diese Funktion ist die Voraussetzung dafür, dass die Reaktionsselektion nicht ausschließlich durch aktuelle äußere Reize, sondern durch innere Repräsentationen von Aufgabenregeln und weiteren Kontextinformationen bestimmt wird.
3. *Top-down-Modulation:* Drittens wird dem Präfrontalcortex die Funktion zugeschrieben, die Verarbeitung in perzeptuellen, motorischen, emotionalen und motivationalen Verarbeitungssystemen top-down im Sinne aktiv gehaltener Ziele zu modulieren. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass aufgabenrelevante Informationen mit Priorität verarbeitet und zielkonforme Reaktionen trotz konkurrierender Reaktionstendenzen ausgeführt werden können.
4. *Hierarchische Handlungsorganisation, Koordination multipler Ziele und zukunftsorientierte Handlungsplanung.* Speziell anterioren Regionen des Präfrontalcortex wird eine Rolle bei der Koordination abstrakter, hierarchisch strukturierter und zeitlich weiter in die Zukunft erstreckter Ziele und Pläne sowie beim Einsatz metakognitiver Strategien zugeschrieben.

Ausgehend von diesen vier grundlegenden Funktionen wird in den folgenden Abschnitten ein Überblick über ausgewählte Befunde aus neuropsychologischen Studien und funktionellen Bildgebungsexperimenten zur Rolle des Präfrontalcortex bei der Handlungssteuerung gegeben. Vor dem Hintergrund der in ► Abschn. 9.2.3 dargestellten kognitiven Kontrollproblemen werden folgende Aspekte kognitiver Kontrolle behandelt:

- Flexible (Um-)Konfigurierung von Verhaltensdispositionen und kognitiven Einstellungen.
- Aktive Aufrechterhaltung aufgabenrelevanter Informationen und Top-down-Modulation der Aufmerksamkeit.
- Top-down-Modulation motorischer Systeme: Reaktionsinhibition.
- Top-down-Modulation affektiver Systeme: Emotionsregulation.
- Top-down-Modulation motivationaler Bewertungssysteme: Intertemporale Entscheidungskonflikte und Selbstkontrolle.
- Handlungsplanung, Koordination multipler Ziele und zukunftsorientiertes Denken.

▪ Flexible (Um-)Konfigurierung von Verhaltensdispositionen und kognitiven Einstellungen

Ein herausragendes Merkmal der willentlichen Handlungssteuerung ist die Fähigkeit von Menschen, Verhaltensdispositionen sehr schnell aufgrund verbaler oder symbolischer Instruktionen auf neue Weise zu konfigurieren und kognitive Einstellungen flexibel an wechselnde Ziele und Aufgaben anzupassen.

Instruktionsbasiertes Lernen und Anwenden neuer Reaktionsregeln Die Frage, welche neuronalen Systeme der Fähigkeit zugrunde liegen, aufgrund verbaler Instruktionen schnell neue Aufgabenregeln zu lernen und anzuwenden, hat erst in den letzten Jahren verstärkt Aufmerksamkeit auf sich gezogen (Übersicht in Cole et al. 2013a; Wolfensteller und Ruge 2012). Die bislang vorliegenden Befunde sprechen dafür, dass die Kontrolle von Verhalten durch Regeln, die spezifizieren, mit welchen Reaktionen auf Reize zu reagieren ist, um bestimmte Effekte zu erzielen, auf einem corticostriatalen Netzwerk beruht, das präfrontale und parietale Cortexregionen sowie Teile der Basalganglien (insbesondere das sogenannte assoziative Striatum mit dem Nucleus caudatus und Teilen des Putamens) umfasst. Der Erwerb neuer Aufgabenregeln geht dabei mit bemerkenswert schnellen Ver-

änderungen in den beteiligten neuronalen Systemen einher. Um diese Veränderungen zu untersuchen, ließen Ruge und Wolfensteller (2010) in einer fMRI-Studie Probanden zunächst Aufgabenregeln lernen, die vier visuellen Reizen zwei manuelle Reaktionen zuordneten. Anschließend sollten die Probanden gemäß der Regeln auf die in zufälliger Abfolge dargebotenen Reize reagieren, wobei jeder Reiz insgesamt achtmal wiederholt wurde. Die Probanden führten mehrere Versuchsblöcke mit jeweils neuen Aufgabenregeln aus, sodass über alle Blöcke hinweg analysiert werden konnte, mit welchen Veränderungen der Hirnaktivität die wiederholte Anwendung der gleichen Regel assoziiert war. Dabei zeigte sich, dass die allerersten Anwendungen einer neuen Regel mit Aktivierungen insbesondere im lateralen Präfrontalcortex einhergingen. Interessanterweise kam es bereits nach wenigen wiederholten Anwendungen der gleichen Regel zu einer zunehmenden Beteiligung prämotorischer Cortexregionen und des anterioren Striatums in den Basalganglien. Das Lernen neuer Verhaltensregeln war zudem mit einer zunehmenden funktionellen Konnektivität zwischen diesen Regionen und dem lateralen präfrontalen Cortex assoziiert (Ruge und Wolfensteller 2013). Zusammen mit weiteren Befunden (Ruge und Wolfensteller 2015) spricht dies dafür, dass die initiale Encodierung und Implementierung neuer symbolischer Aufgabenregeln über den lateralen Präfrontalcortex vermittelt werden. Bereits nach wenigen Übungsdurchgängen kommt es dann zu einer zunehmenden Einbindung prämotorischer Cortexregionen (die konkrete Reiz-Reaktions-Assoziationen repräsentieren) sowie von Teilen der Basalganglien (insbesondere Regionen, die auch am instrumentellen Verstärkungslernen beteiligt sind).

Beeinträchtigte kognitive Flexibilität bei Frontalhirnpatienten Die Bedeutung des präfrontalen Cortex für die flexible regelbasierte Handlungssteuerung wird auch dadurch belegt, dass Patienten mit Frontalhirnverletzungen häufig Anzeichen einer beeinträchtigten kognitiven Flexibilität zeigen. Dies manifestiert sich in einer mangelnden Anpassung an wechselnde Aufgabenanforderungen und einer Neigung zur **Perseveration**, also der Tendenz, an einer einmal verwendeten Verhaltensregel festzuhalten, selbst wenn diese nicht länger relevant ist. Ein klassischer neuropsychologischer Test zur Messung der kognitiven Flexibilität ist der **Wisconsin-Kartensortiertest** (Milner 1963) (Abb. 9.12). Dabei sollen Probanden Karten mit verschiedenen Symbolen nach einem ihnen zunächst unbekannten Kriterium sortieren (Farbe, Form oder Anzahl). Die Probanden erhalten nach jeder Zuordnung eine Rückmeldung darüber, ob die Karte korrekt sortiert wurde oder nicht. Hat der Proband eine festgelegte Zahl von Karten nacheinander korrekt sortiert, wird das Kriterium gewechselt, ohne dass dies dem Probanden mitgeteilt wird. Patienten mit Läsionen im dorsolateralen Präfrontalcortex machen dabei häufig *Perseverationsfehler*, d. h., sie bleiben nach dem Wechsel des Sortierkriteriums trotz wiederholter Fehlerrückmeldungen bei dem vormals korrekten Sortierkriterium.

Kognitive Mechanismen des Aufgabenwechsels Da die Kartensortieraufgabe mehrere kognitive Anforderungen beinhaltet (z. B. zwischen Sortierregeln zu wechseln, die vormals relevante Regel zu inhibieren, Fehlerrückmeldungen zu nutzen), erlaubt

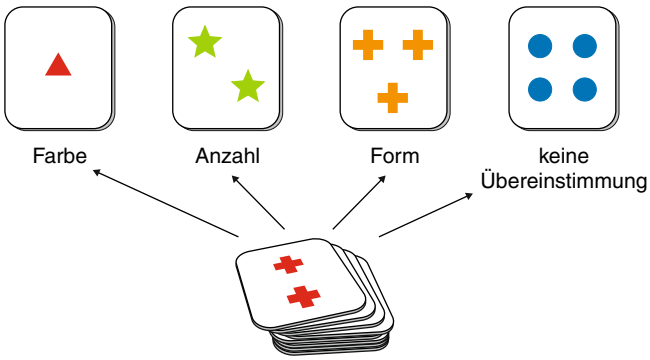


Abb. 9.12 Der Wisconsin-Kartensortiertest

sie nur begrenzt Rückschlüsse darauf, welche dieser Funktionen durch Schädigungen des präfrontalen Cortex beeinträchtigt werden. Genaueren Aufschluss über die Prozesse, die dem flexiblen Wechsel kognitiver Einstellungen zugrunde liegen, ermöglicht das Paradigma des *Aufgabenwechsels* (*task switching*), bei dem Probanden in schneller Folge zwischen zwei oder mehreren Aufgaben wechseln sollen (Übersicht in Kiesel et al. 2010; Koch et al. 2010; Vandierendonck et al. 2010). Beispielsweise können Probanden instruiert werden, für eine Liste von Zahlen abwechselnd zu beurteilen, ob die aktuelle Zahl gerade oder ungerade ist oder ob sie größer oder kleiner als 5 ist.

In anderen Varianten wechseln die Aufgaben jeweils nach einer konstanten Zahl von Durchgängen (z. B. AABBAABB; *alternating runs paradigm*) (Rogers und Monsell 1995), oder aber die Abfolge der Aufgaben ist zufällig und ein Hinweisreiz (*task cue*) vor jedem Reiz signalisiert, welche Aufgabe im aktuellen Durchgang auszuführen ist (*task cueing paradigm*) (Meiran et al. 2000). Das Wechseln zwischen zwei Aufgaben geht im Vergleich zur Wiederholung der gleichen Aufgabe mit verlängerten Reaktionszeiten und einer höheren Fehlerrate einher (**Wechselkosten**; *switch costs*) (z. B. Allport et al. 1994; Goschke 2000; Meiran et al. 2000; Rogers und Monsell 1995) (Abb. 9.13). Diese Wechselkosten spiegeln eine Reihe unterschiedlicher Prozesse und Einflussfaktoren.

Zunächst muss beim Aufgabenwechsel eine Repräsentation der neuen Aufgabe abgerufen werden, die u. a. spezifiziert, auf welche Reizmerkmale geantwortet werden soll. Dies gilt insbesondere, wenn auf die gleichen Reize in verschiedenen Aufgaben unterschiedlich reagiert werden muss (z. B. wenn Objekte mal nach ihrer Farbe und mal nach ihrer Form kategorisiert werden müssen). Der Abruf einer neuen Aufgabenrepräsentation kann im Prinzip bereits vor dem Erscheinen des imperativen Reizes stattfinden, was sich darin zeigt, dass Wechselkosten signifikant kleiner ausfallen, wenn Probanden zwischen dem Aufgabenhinweis und dem imperativen Reiz genügend Zeit haben, um sich aktiv auf die neue Aufgabe vorzubereiten (Goschke 2000; Meiran et al. 2000; Rogers und Monsell 1995). Dass diese aktive Vorbereitung tatsächlich den Abruf einer verbalen Aufgabenrepräsentation umfasst, wird dadurch belegt, dass Wechselkosten deutlich reduziert werden, wenn Probanden während des Vorbereitungsintervalls die neue Aufgabe verbalisieren sollen (z. B. indem sie „Farbe“ oder „Form“ sagen). Wurden sie dagegen durch eine verbale Störaufgabe (z. B. Wochentage aufsagen) daran gehin-

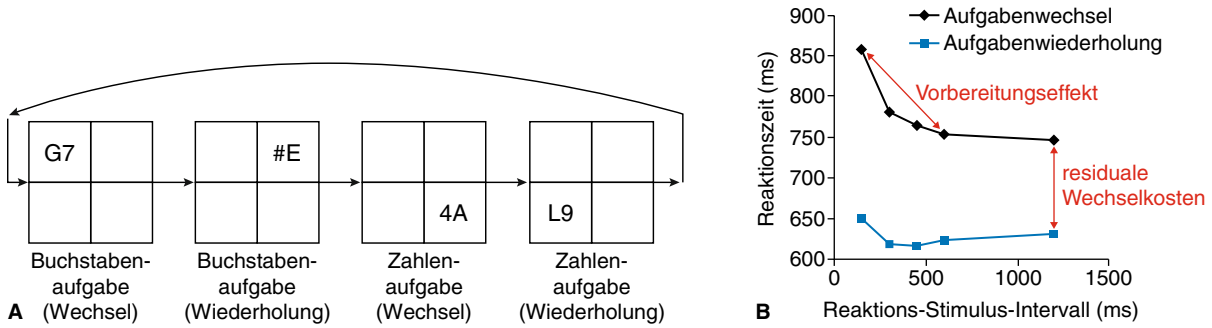


Abb. 9.13 **A** Beispiel für eine Variante des Aufgabenwechselparadigmas. Probanden sollen entweder Zahlen als gerade vs. ungerade oder Buchstaben als Konsonant vs. Vokal klassifizieren, wobei die Aufgabe nach jedem zweiten Durchgang wechselt. Die Position der Reize rotiert in vorhersagbarer Abfolge und signalisiert die jeweils auszuführende Aufgabe. **B** Typisches Muster von Reaktionszeiten für Aufgabenwechsel und Wiederholungen in Abhängigkeit davon, wie viel Zeit die Probanden zwischen der letzten Reaktion und dem nächsten Reiz haben, um sich auf die nächste Aufgabe vorzubereiten. Bei längeren Vorbereitungsintervallen sind die Wechselkosten reduziert, aber es zeigen sich immer noch residuale Kosten. (Adaptiert nach Monsell 2003; mit freundl. Genehmigung von © Elsevier. All Rights Reserved)

dert, die neue Aufgabe zu verbalisieren, waren die Wechselkosten deutlich höher und unterschieden sich nicht mehr von einer Bedingung ohne Vorbereitungszeit (Emerson und Miyake 2003; Goschke 2000; Miyake et al. 2004) (Abb. 9.14). Dies spricht dafür, dass Personen sich bei einem Aufgabenwechsel über inneres Sprechen gleichsam selbst instruieren, was bei einer Aufgabenwiederholung nicht in gleichem Maß erforderlich ist. Nachdem eine verbale Aufgabenrepräsentation abgerufen wurde, müssen im nächsten Schritt aufgabenrelevante Reiz-Reaktions-Assoziationen in Bereitschaft versetzt werden (z. B. „Wenn das Objekt rot ist, dann drücke die linke Taste"), d. h., es muss eine neue *Aufgabeneinstellung* (*task-set*) etabliert werden.

Neuronale Korrelate des Aufgabenwechsels Auf neuronaler Ebene gehen diese Prozesse beim Aufgabenwechsel mit Aktivierungen in einem weit verteilten frontoparietalen Netzwerk einher, das dorsolaterale und inferiore Regionen des Präfrontalcortex, den ACC, das prä-supplementär-motorische Areal und Teile des Parietalcortex einschließt (Überblick in Ruge et al. 2013). Dieses Netzwerk wird häufig als *kognitives Kontrollnetzwerk* bezeichnet, da es in vielen Aufgaben aktiviert wird, die kognitive Kontrolle erfordern. Eine Region, die speziell mit der Selektion und dem Abruf von Aufgabenregeln in Verbindung gebracht wird (Derrfuss et al. 2005), ist die inferiore frontale Kreuzungsregion (*inferior frontal junction*) (BA 44/6) an der Grenze zwischen inferiorem frontalen und inferiorem präzentralen Sulcus (Abb. 9.11). Diese Region wird besonders dann aktiviert, wenn es bei einem Aufgabenwechsel notwendig ist, neue Aufgabenregeln abzurufen, um die korrekte Reaktion auszuwählen (Crone et al. 2006). Die inferiore frontale Kreuzungsregion liegt benachbart zum Broca-Areal, das am verbalen Arbeitsgedächtnis und inneren Sprechen beteiligt ist und in dem ebenfalls beim Aufgabenwechsel erhöhte Aktivierung beobachtet wurde (Gruber et al. 2006), was zur oben erwähnten Rolle verbaler Selbstinstruktionen beim Aufgabenwechsel passt. Die eigentliche Implementierung der konkreten Reiz-Reaktions-Regeln einer Aufgabe wird dagegen eher mit Aktivierungen im superioren Parietalcortex und dorsolateralen Präfrontalcortex in Verbindung gebracht (Kim et al. 2011; Richter und Yeung 2014), wobei der Parietalcortex insbesondere das Wechseln des Aufmerksamkeitsfokus vermittelt, wenn in verschiedenen Aufgaben auf unterschiedliche Orte, Reizmerkmale oder Reizkategorien reagiert werden muss.

Interessanterweise sind Unterschiede in der Hirnaktivierung zwischen Aufgabenwechseln und -wiederholungen oft nur quantitativ, d. h., beim Aufgabenwechsel werden keine anderen Regionen aktiviert als bei Aufgabenwiederholungen, sondern die gleichen oder sehr ähnliche Regionen werden lediglich stärker aktiviert (Richter und Yeung 2014; Ruge et al. 2013). Eine Erklärung dafür könnte sein, dass bei Aufgabenwechseln und Wiederholungen keine qualitativ anderen Prozesse ablaufen, sondern die gleichen Prozesse (z. B. die Encodierung einer Aufgabenrepräsentation ins Arbeitsgedächtnis) beim Aufgabenwechsel lediglich mit mehr Verarbeitungsaufwand verbunden sind als bei einer Aufgabenwiederholung (Kiesel et al. 2010; Ruge et al. 2013).

Die bislang diskutierten Vorbereitungs- und Umkonfigurierungsprozesse können allerdings die Wechselkosten nicht vollständig erklären. So bleiben in der Regel selbst dann noch signifikante Wechselkosten bestehen, wenn die Probanden eigentlich genügend Zeit hätten, sich vor dem Reiz auf die neue Aufgabe vorzubereiten (Allport et al. 1994; Goschke 2000; Rogers und Monsell 1995). In diesen sogenannten *residualen* Wechselkosten spiegeln sich vermutlich Effekte *proaktiver Interferenz*. Proaktive Interferenz kann daraus resultieren, dass nach einem Aufgabenwechsel die Reiz-Reaktions-Regeln der zuvor ausgeführten Aufgabe nicht vollständig deaktiviert wurden (Allport et al. 1994; Goschke 2000; Wylie und Allport 2000) oder dass der neue imperative Reiz den Abruf konkurrierender Reiz-Reaktions-Regeln der zuvor ausgeführten, aber aktuell irrelevanten Aufgabe auslöst (Waszak et al. 2003). Im Einklang damit konnte gezeigt werden, dass Wechselkosten umso größer sind, je stärker nach einem Aufgabenwechsel Hirnregionen aktiviert sind, die an der Ausführung der zuvor ausgeführten, aber aktuell irrelevanten Aufgabe beteiligt sind (Yeung et al. 2006). Dies spricht dafür, dass residuale Wechselkosten zu einem maßgeblichen Teil die Perseveration vormals relevanter Aufgabeneinstellungen spiegeln.

Aufgabenabhängige Umkonfigurierung neuronaler Konnektivitätsmuster Die flexible Anpassung an wechselnde Aufgaben erfordert nicht nur den Abruf relevanter Reiz-Reaktions-Regeln, sondern zumeist muss auch die Art und Weise, in der neuronale

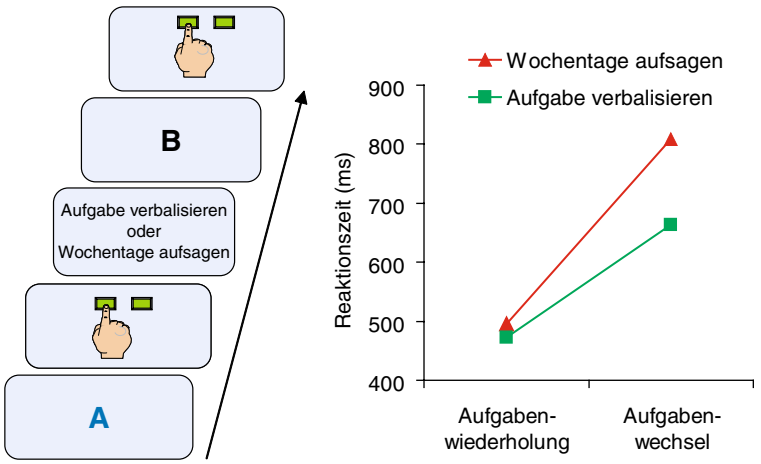


Abb. 9.14 Effekt der Aufgabenverbalisierung auf den Aufgabenwechsel im Experiment von Goschke (2000, Exp. 2). Probanden sollten entweder abwechselnd auf die Farbe oder Identität von Buchstaben reagieren oder wiederholt die gleiche Aufgabe ausführen. Während des 1,5 s langen Reaktions-Stimulus-Intervalls sollten sie entweder die nächste Aufgabe laut aussprechen oder aber Wochentage aufsagen, wodurch die Aufgabenverbalisierung unterbunden wurde

Systeme interagieren, aufgabenabhängig konfiguriert werden. Dies spiegelt sich in aufgabenabhängigen Veränderungen funktioneller Konnektivitätsmuster. Sollten Probanden beispielsweise zwischen Klassifikationsregeln wechseln (Zahlen als gerade oder ungerade vs. als größer oder kleiner als 5 klassifizieren), so zeigte die inferiore frontale Kreuzungsregion eine erhöhte funktionelle Konnektivität mit dem anterioren Präfrontalcortex, der an der Repräsentation abstrakter Aufgabenregeln beteiligt ist. Sollten die Probanden dagegen die Reaktionshand wechseln, zeigte sich eine verstärkte Konnektivität mit dem Motorcortex (Stelzel et al. 2011). Eine umfangreiche Analyse aufgabenspezifischer Konnektivitätsmuster zwischen einer großen Zahl von Hirnregionen zeigte, dass das frontoparietale Kontrollnetzwerk die Region war, deren funktionelle Konnektivitäten mit anderen Hirnregionen am stärksten in Abhängigkeit von der jeweils auszuführenden Aufgabe variierten (Cole et al. 2013b). Dies spricht dafür, dass das frontoparietale Kontrollnetzwerk ein zentrales „Drehkreuz" (*hub*) darstellt, das mit einer großen Zahl anderer Hirnregionen in jeweils aufgabenspezifischer Weise interagiert.

Aktive Aufrechterhaltung aufgabenrelevanten Informationen und Top-down-Modulation der Aufmerksamkeit

Ebenso wichtig wie die Fähigkeit zur schnellen Umkonfiguration kognitiver Einstellungen sind für die willentliche Handlungssteuerung die Aufrechterhaltung und Abschirmung von aufgabenrelevanten Informationen gegen Störungen. Patienten mit Läsionen im lateralen Präfrontalcortex zeigen häufig eine beeinträchtigte Fähigkeit zur Aufrechterhaltung von Informationen, insbesondere wenn diese gegen Störreize abgeschirmt werden müssen. Ein Beispiel dafür ist eine Studie (Chao und Knight 1998), in der Patienten mit Läsionen im dorsolateralen Präfrontalcortex und Kontrollprobanden zu Beginn jedes Versuchsdurchgangs ein Geräusch (z. B. Hundegebell) dargeboten wurde und sie einige Sekunden später entscheiden sollten, ob ein zweites Geräusch identisch mit dem ersten Geräusch war oder nicht. Während sich die Frontalhirnpatienten in ihrer Leistung nicht von den Kontrollpersonen unterschieden, wenn während des Warteintervalls keine anderen Reize dargeboten wurden, machten sie deutlich mehr Fehler, wenn zwischen dem ersten und dem zweiten Reiz irrelevante Töne dargeboten wurden (Abb. 9.15).

Im Einklang damit wurde in Bildgebungsstudien erhöhte Aktivität im lateralen Präfrontalcortex gefunden, wenn Probanden aufgabenrelevante Informationen im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten und gegen störende Information abschirmen mussten. Sollten sich Probanden beispielsweise Gesichter einprägen und nach einem Warteintervall entscheiden, ob ein Testgesicht identisch mit einem der zuvor eingeprägten Gesichter war, zeigte sich während des Warteintervalls Aktivierung im lateralen Präfrontalcortex, die mit der Zahl von aufrechtzuerhaltenden Gesichtern zunahm (Druzgal und D'Esposito 2003). Darüber hinaus war in weiteren Studien die Aktivierung im lateralen Präfrontalcortex mit der effektiven Abschirmung gegen Störreizen korreliert (Übersicht in D'Esposito und Postle 2014).

Weitere Belege für die Rolle des präfrontalen Cortex bei der Aufrechterhaltung aufgabenrelevanter Information stammen aus neurophysiologischen Studien, in denen die Aktivität einzelner Nervenzellen im Präfrontalcortex von Affen mit Mikroelektroden abgeleitet wurde, während sie verzögerte Reaktionsaufgaben (*delayed response tasks*) ausführten. Dabei beobachtet der Affe zu Beginn eines Durchgangs beispielsweise, wie Futter unter einem von zwei Objekten platziert wird. Nach einer Delay-Phase, während der die Objekte nicht sichtbar sind, erhält das Tier die Futterbelohnung, wenn es das Objekt auswählt, unter dem zuvor das Futter versteckt wurde (Fuster und Alexander 1971). In einer anderen Variante der Aufgabe wird dem Affen ein visueller Hinweisreiz links oder rechts von einem Fixationspunkt gezeigt, und er muss nach einer Delay-Phase eine Sakkade zu dem Ort ausführen, an dem sich zuvor der Hinweisreiz befand (Funahashi et al. 1989). Entscheidend ist, dass das relevante Objekt bzw. der Zielort in jedem Durchgang zufällig bestimmt wird, sodass der Affe eine Repräsentation des Hinweisreizes aufrechterhalten muss, um die korrekte (belohnte) Reaktion auszuführen.

In klassischen Einzelzellableitungsstudien, die in den 1970er Jahren durchgeführt wurden, fand man Neurone im Präfrontalcortex, die während der Delay-Phase dauerhaft eine erhöhte Feuerungsrate zeigten (aber weder auf den Hinweisreiz noch auf den Vergleichsreiz mit erhöhter Aktivität antworteten) (Fuster und Alexander 1971; Kubota 1971). Nachfolgende Studien zeigten, dass präfrontale Neurone – im Unterschied zu ebenfalls abgeleiteten Neuronen im Temporalcortex – ihre Aktivität auch dann aufrechterhielten, wenn während des Delays Störreize dargebo-

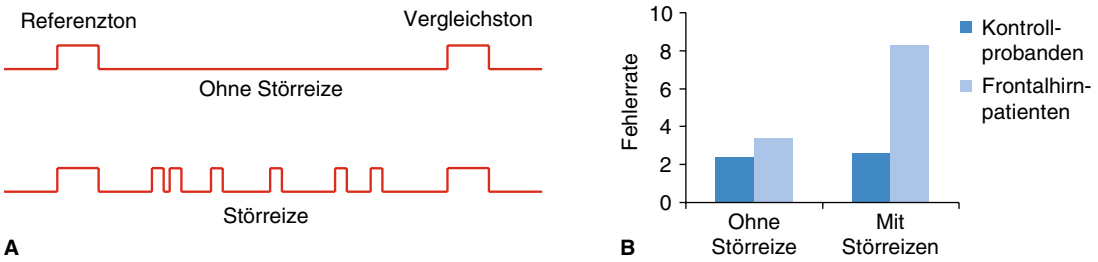


Abb. 9.15 **A** Zeitverzögerte Vergleichsaufgabe im Experiment von Chao und Knight (1998). **B** Fehlerraten für Patienten mit Läsionen des dorsolateralen Präfrontalcortex und Kontrollpersonen. (Nach Daten aus Chao und Knight 1998)

ten wurden (Miller et al. 1996). Darüber hinaus konnte bei präfrontalen Neuronen ein aufgabenabhängiges Feuerungsverhalten nachgewiesen werden. Dazu wurden Affen trainiert, in verschiedenen Aufgaben die gleichen Reize und Reaktionen nach jeweils anderen Regeln zu verknüpfen (z. B. auf bestimmte Objekte eine Sakkade nach links oder rechts bzw. eine Sakkade zu dem Reiz ausführen, der identisch mit einem zuvor dargebotenen Hinweisreiz war). Ein Teil der abgeleiteten Neurone im lateralen Präfrontalcortex reagierte nur dann mit erhöhter Aktivität auf den Hinweisreiz, wenn eine ganz bestimmte Aufgabe auszuführen war, was bedeuten könnte, dass diese Neurone nicht bestimmte Reize oder Reaktionen, sondern *Reiz-Reaktions-Regeln* codieren (Wallis et al. 2001).

Während die Delay-Aktivität präfrontaler Neurone die Vermutung nahelegt, dass die aufrechtzuhaltenden Informationen (z. B. aufgabenrelevante Merkmale eines Objekts) im Präfrontalcortex repräsentiert werden, sprechen neuere Befunde eher für eine *sensorische Rekrutierungshypothese* (*sensory recruitment*) (D'Esposito und Postle 2014; Gazzaley und Nobre 2012). Nach dieser Hypothese werden im präfrontalen Cortex nicht die sensorischen Informationen selbst, sondern abstrakte Aufgabenrepräsentationen aktiv gehalten, durch die die neuronale Verarbeitung in posterioren Hirnregionen top-down dahingehend moduliert wird, dass aufgabenrelevante Informationen mit höherer Priorität verarbeitet werden. Die eigentliche Aufrechterhaltung aufgabenrelevanter Orte, Objekte oder Objektmerkmale findet also in den gleichen posterioren Cortexregionen statt, die auch an der Verarbeitung der jeweiligen Informationen in der Wahrnehmung beteiligt sind. Im Einklang mit dieser Hypothese haben Multi-Voxel-Muster-Analysen von fMRI-Daten gezeigt, dass während der Aufrechterhaltung von visuellen Reizmerkmalen (z. B. Farbe oder Orientierung) neuronale Aktivierungsmuster im visuellen Cortex Informationen über die jeweils aktiv gehaltenen Reizmerkmale enthielten (Harrison und Tong 2009; Serences et al. 2009), wohingegen Aktivierungsmuster im Präfrontal- und Parietalcortex Informationen über die jeweiligen Aufgabeninstruktion enthielten (Riggall und Postle 2012). Wie bereits von Norman und Shallice (1986) in ihrem SAS-Modell angenommen wurde (▶ Abschn. 9.3.2), kann man also die zielgerichtete Top-down-Modulation sensorischer Systeme als eine Fokussierung der nach innen gerichteten Aufmerksamkeit auf aufgabenrelevante Reizrepräsentationen interpretieren (Desimone und Duncan 1995).

Weitere Belege für die aufgabenabhängige Top-down-Modulation posteriorer Hirnregionen stammen aus einer fMRI-Studie (z. B. Gazzaley et al. 2005), in der Probanden in jedem Versuchsdurchgang zwei Gesichter und zwei Landschaften sahen. Wenn die Probanden instruiert wurden, sich die Gesichter zu merken, zeigten sich im Vergleich zu einer Bedingung, in der Gesichter nur passiv betrachtet werden sollten, eine stärkere Hirnaktivität in einer Region im Gyrus fusiformis des Temporallappens, die an der Verarbeitung von Gesichtern beteiligt ist. Gleichzeitig zeigte sich eine reduzierte Aktivierung in einer Region im parahippocampalen Gyrus, die an der Verarbeitung von Landschaften beteiligt ist (Abb. 9.16). Sollten die Probanden dagegen die Landschaften behalten, zeigte sich das umgekehrte Muster von aufgabenabhängigen Modulationen der Aktivierung in den beiden Regionen.

Direkte Evidenz, dass der laterale präfrontale Cortex eine *kausale* Rolle bei der aufgabenabhängigen Top-down-Modulation sensorischer Repräsentationen spielt, stammt aus einer weiteren Studie, in der die Funktion des präfrontalen Cortex mithilfe der repetitiven transkraniellen Magnetstimulation (rTMS) temporär gestört wurde (Zanto et al. 2011). Die Probanden sahen Punktwolken, die unterschiedliche Farben hatten und sich in unterschiedliche Richtungen bewegten. Die Probanden sollten sich entweder die Farben oder die Bewegungsrichtungen merken und nach einer achtsekündigen Delay-Phase entscheiden, ob ein Testreiz mit einem der zuvor encodierten Reize in Bezug auf das relevante Merkmal übereinstimmte. Im Verhalten zeigte sich, dass eine Störung der rechten inferioren frontalen Kreuzungsregion durch die rTMS selektiv die Aufrechterhaltung der Farbinformation beeinträchtigte (Abb. 9.17). Darüber hinaus hatte die rTMS einen Effekt auf die P1-Komponente in den ebenfalls erfassten ereigniskorrelierten Potenzialen. In der Kontrollbedingung ohne rTMS war die P1-Komponente über dem visuellen Cortex größer, wenn die Probanden die Farbinformation beachten sollten als in der Bedingung, in der sie Farbe ignorieren sollten. Dieser P1-Effekt spiegelt also die Top-down-Modulation visueller Repräsentationen durch die Farbaufgabe. Nach der rTMS über der inferioren frontalen Kreuzungsregion war diese aufgabenabhängige Modulation der P1-Komponente signifikant reduziert. Außerdem zeigten Probanden, bei denen diese rTMS-induzierte Reduktion der aufgabenabhängigen P1-Modulation größer war, auch eine größere Verschlechterung in der Arbeitsgedächtnisleistung. Zusammengenommen sprechen diese Ergebnisse dafür, dass Regionen im lateralen Präfrontalcortex eine kausale Rolle bei der aufgabenabhängigen Top-down-Modulation perzeptueller Systeme spielen.

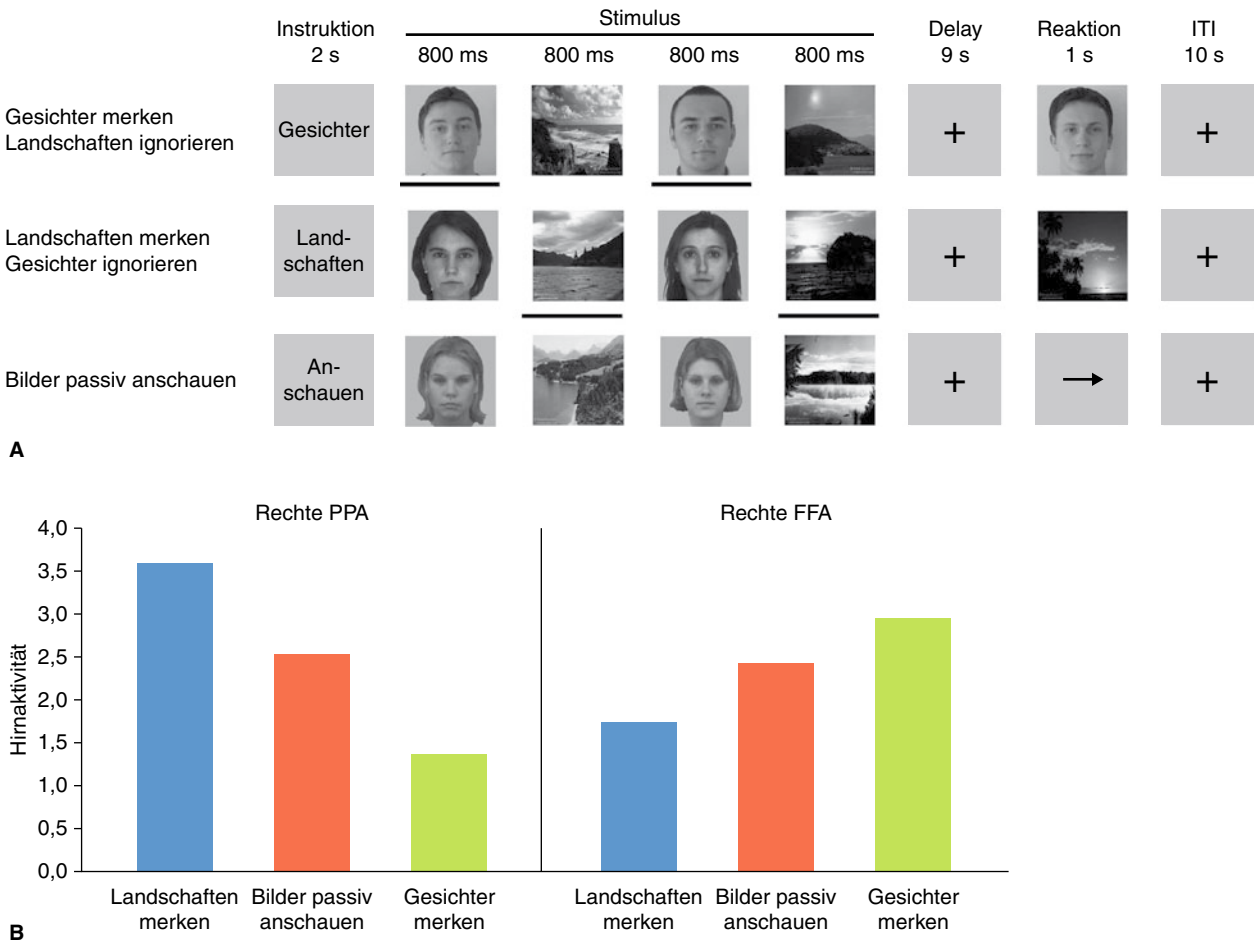


Abb. 9.16 Modulation der mittels fMRI gemessenen Aktivität im rechten parahippocampalen Gyrus (*parahippocampal place area* PPA) und im Gyrus fusiformis (*fusiform face area* FFA) durch Aufgabenziele. **A** Probanden sollten sich entweder Landschaften oder Gesichter merken und im Arbeitsgedächtnis aufrechthalten (und Reize der jeweils anderen Kategorie ignorieren) oder die Reize nur passiv betrachten. (Adaptiert nach Gazzaley et al. 2005; mit freundl. Genehmigung von © MIT Press Journals. All Rights Reserved). **B** Im Vergleich zur passiven Betrachtungsbedingung führte die Aufgabe, eine Reizkategorie aktiv im Arbeitsgedächtnis aufrechtzuerhalten, zu stärkerer Aktivierung in der Hirnregion, die an der Verarbeitung der aufgabenrelevanten Reize beteiligt war und zu reduzierter Aktivierung in der Hirnregion, die an der Verarbeitung der zu ignorierenden Reize beteiligt war. (Nach Daten aus Gazzaley et al. 2005)

Top-down-Modulation motorischer Systeme: Reaktionsinhibition

Wie die Modulation perzeptueller Systeme kann auch die Unterdrückung unerwünschter automatisierter oder gewohnheitsmäßiger Reaktionen als eine Form von Top-down-Modulation – in diesem Fall motorischer Systeme – durch aktive Zielrepräsentationen interpretiert werden. Bei Patienten mit Frontalhirnverletzungen lassen sich häufig eine mangelnde Unterdrückung automatisierter Reaktionen und eine erhöhte Reizabhängigkeit des Verhaltens beobachten. Besonders eindrücklich zeigt sich dies bei dem vom französischen Neurologen Lhermitte (1983) beschriebenen „Benutzungsverhalten" (*utilisation behavior*). Wurden den Patienten Alltagsgegenstände gezeigt, so führten sie scheinbar automatisch Routinehandlungen mit den Objekten aus (z. B. ein Glas Wasser trinken, eine Brille aufsetzen), obwohl sie dazu nicht aufgefordert oder sogar explizit instruiert wurden, etwas anderes zu tun (Shallice et al. 1989). Offenbar waren die Patienten nicht mehr in der Lage, Gewohnheitshandlungen zu unterdrücken, die mit den Objekten assoziiert waren, weshalb dieses Verhalten auch als Umweltabhängigkeitssyndrom (*environmental dependency syndrome*) bezeichnet wird.

Experimentell wird Reaktionsinhibition meist mit Go/NoGo- und Stoppsignalaufgaben untersucht (▶ Abschn. 9.5.1). Läsions- und Bildgebungsstudien mit diesen Aufgaben sprechen übereinstimmend dafür, dass an der Reaktionsinhibition insbesondere der rechte inferiore Frontalcortex beteiligt ist, der zusammen mit weiteren Regionen wie dem prä-supplementär-motorischen Areal und Strukturen in den Basalganglien (insbesondere dem Nucleus subthalamicus) die Hemmung bereits in Gang gesetzter motorischer Reaktionen sowie die Erhöhung der Schwelle für motorische Reaktionen vermittelt (Aron et al. 2014). Interessanterweise haben neuere Studien (Berkman et al. 2011; Lopez et al. 2014) erste Belege dafür erbracht, dass die neuronalen Systeme, die an der Inhibition einfacher motorischer Reaktionen beteiligt sind, auch relevant für die Impulskontrolle in alltäglichen und klinischen Kontexten sind (▶ Abschn. 9.7).

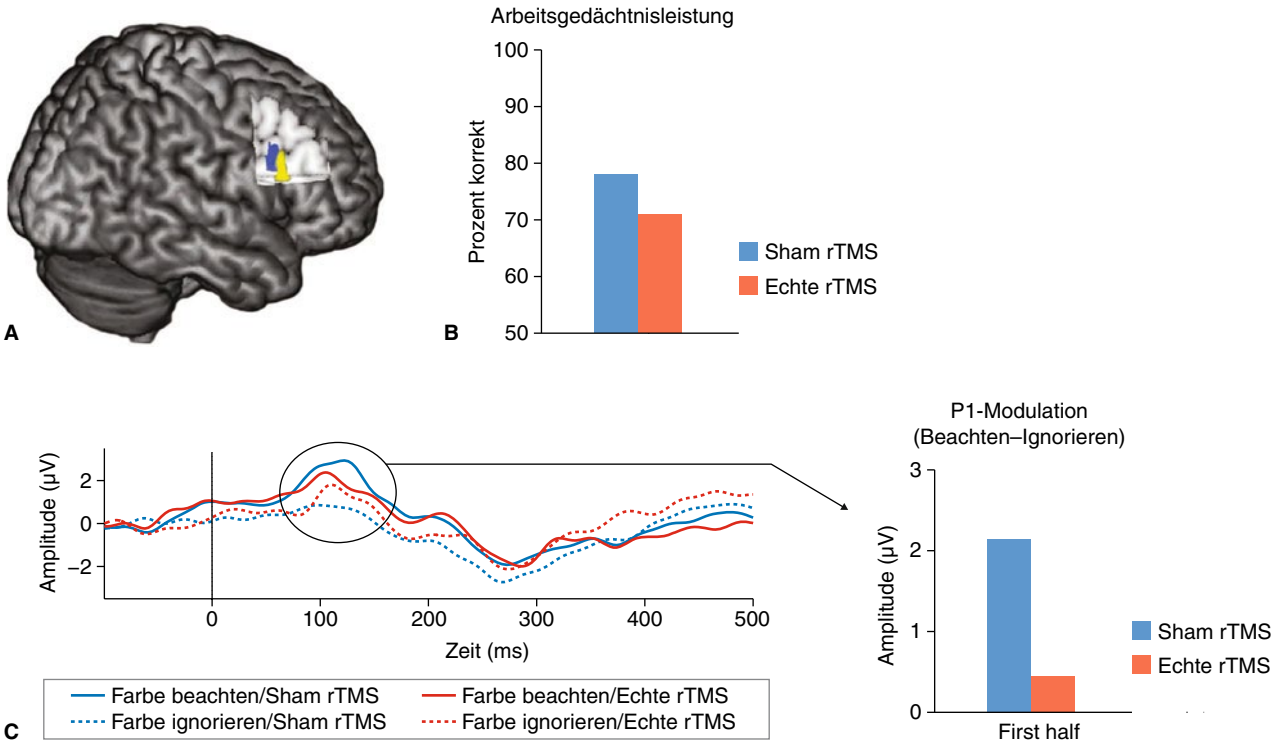


Abb. 9.17 Ergebnisse der Studie von Zanto et al. (2011) zur kausalen Rolle des lateralen Präfrontalcortex bei der Top-down-Modulation der visuellen Informationsverarbeitung. Probanden sollten sich entweder die Farbe einer Punktwolke merken (und die Bewegung der Punkte ignorieren) oder die Bewegungsrichtung der Punkte merken (und deren Farbe ignorieren). **A** Inferiore frontale Kreuzungsregion (*inferior frontal junction*, IFJ), über der die rTMS-Stimulation erfolgte. **B** Beeinträchtigte Aufrechterhaltung der Farbinformation nach der rTMS- im Vergleich zur Placebo-(Sham)-Stimulation. **C** Ereigniskorrelierte Potenziale über visuellen Cortexregionen. In der Kontrollbedingung (Sham-Stimulation) führte das Beachten der Farbe im Vergleich zum Ignorieren der Farbe zu einer größeren P1-Komponente im ereigniskorrelierten Potenzial. Im Block direkt nach der rTMS-Stimulation über der *rechten* inferioren Kreuzungsregion war diese aufgabenabhängige Top-down-Modulation der P1-Komponente signifikant reduziert. (Adaptiert nach Zanto et al. 2011; mit freundl. Genehmigung von © Nature Publishing Group. All Rights Reserved)

Top-down-Modulation affektiver Systeme: Emotionsregulation

Eine dritte Form der Top-down-Modulation ist die Regulation emotionaler Reaktionen. Während Emotionen überlebenswichtige Reaktionssysteme sind, können unkontrollierte emotionale Reaktionen auch nachteilige Konsequenzen haben (etwa wenn ein Wutausbruch eine Person zu einer Tat verleitet, die sie nachträglich bereut). Unter dem Begriff der Emotionsregulation werden Strategien zusammengefasst, mit denen die Intensität, Qualität oder der Ausdruck eigener Emotionen beeinflusst werden soll (Etkin et al. 2015; Gross 2013). Diese Strategien können darin bestehen, dass man den mimischen Ausdruck einer Emotion unterdrückt, die Aufmerksamkeit von emotionsauslösenden Reizen ablenkt oder die Bedeutung emotionaler Reize kognitiv uminterpretiert. Bildgebungsstudien haben gezeigt, dass kognitive Umbewertungen emotionaler Reize (*reappraisal*) mit Aktivierungen im frontoparietalen Kontrollnetzwerk einhergehen, während gleichzeitig je nach Instruktion eine Herab- oder Heraufregulierung der Aktivierung in emotionsrelevanten Regionen wie der Amygdala und der Insula zu beobachten ist (Übersicht in Buhle et al. 2014; Gross 2013). Sollten Probanden z. B. negative emotionale Reaktionen auf aversive emotionale Bilder (z. B. Unfallopfer) durch eine kognitive Uminterpretation herunterregulieren, zeigte sich im Vergleich zum Zulassen der Emotion eine reduzierte Amygdalaaktivität bei gleichzeitig erhöhter Aktivität in lateralen und medialen Regionen des Präfrontalcortex (Ochsner et al. 2002; Walter et al. 2009). Analog dazu führte die Herabregulierung sexueller Erregung männlicher Probanden beim Anschauen erotischer Filmclips im Vergleich zu einer Kontrollbedingung zu reduzierten Aktivierungen in limbischen Hirnregionen (rechte Amygdala, rechter anteriorer temporaler Pol und Hypothalamus), die an emotionalen und physiologischen Erregungsreaktionen beteiligt sind, wohingegen sich eine erhöhte Aktivierung im rechten superioren Frontalhirn und ACC zeigte (Beauregard et al. 2001).

Der Einfluss des lateralen Präfrontalcortex auf emotionsrelevante Hirnregionen wie die Amygdala ist dabei indirekt und wird vermutlich über Regionen im medialen Frontalhirn, speziell den rACC und den ventromedialen Präfrontalcortex, vermittelt (Etkin et al. 2015). Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass der Einfluss von präfrontalen Kontrollregionen auf die Amygdala auch über eine Modulation von Repräsentationen der Bedeutung emotionaler Reize im lateralen Temporalcortex vermittelt sein könnte. So zeigte eine Metanalyse einer größeren Zahl von Bildgebungsstudien, dass kognitive Umbewertungen häufig sowohl mit Aktivierungen in kognitiven Kontrollregionen als auch im lateralen Temporalcortex einhergingen (Buhle et al. 2014).

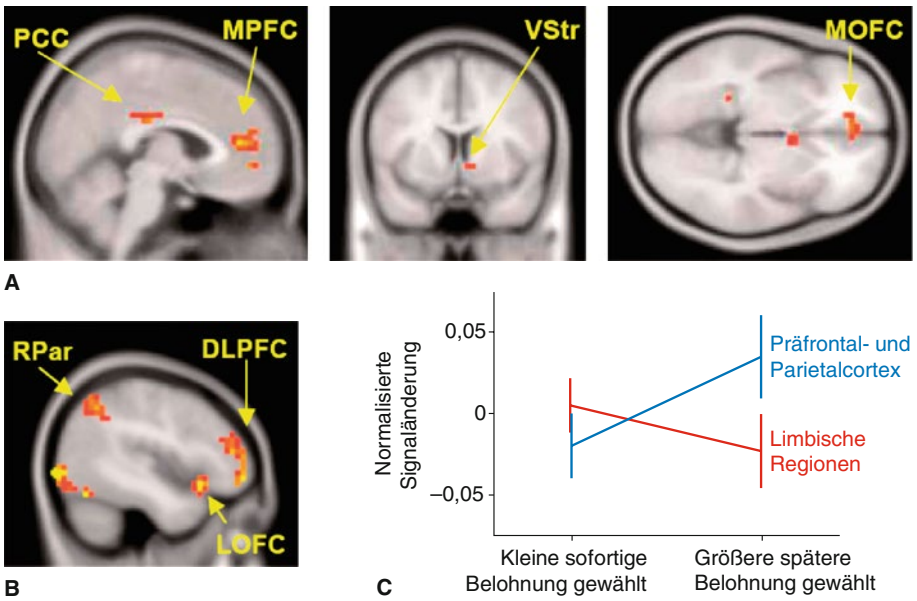


Abb. 9.18 Ergebnisse der fMRI-Studie zu intertemporalen Entscheidungen von McClure et al. (2004). **A** Wenn Probanden zwischen Geldbeträgen auswählten, von denen einer unmittelbar verfügbar war, ging dies mit erhöhter Aktivierung im medialen Präfrontalcortex (*MPFC*) und in „limbischen" Hirnregionen einher, die an der Verarbeitung von Belohnungen beteiligt sind (ventrales Striatum, VStr; medialer orbitofrontaler Cortex *MOFC*; posteriorer cingulärer Cortex *PCC*). **B** Dagegen wurden Regionen im dorsolateralen Präfrontalcortex (*DLPFC*), lateralen orbitofrontalen Cortex (*LOFC*) und Parietalcortex (*RPar*) unabhängig von der zeitlichen Verzögerung der Belohnung aktiviert. **C** Wählten Probanden eine größere spätere Belohnung, wurden präfrontale und parietale Cortexregionen relativ stärker aktiviert als limbische Regionen. (Adaptiert nach McClure et al. 2004; mit freundl. Genehmigung von © The American Association for the Advancement of Science)

9

Top-down-Modulation motivationaler Bewertungssysteme: Intertemporale Entscheidungskonflikte und Selbstkontrolle

Die letzte Form der Top-down-Modulation, die hier betrachtet werden soll, betrifft die Mechanismen der Selbstkontrolle bei Konflikten zwischen langfristigen Zielen und unmittelbaren motivationalen Anreizen, wie sie im Zusammenhang mit volitionspsychologischen Theorien diskutiert wurden (▶ Abschn. 9.4).

Zeitliche Abwertung und Präferenzumkehrungen Um neuronale Korrelate der Selbstkontrolle zu untersuchen, hat man *intertemporale Entscheidungsaufgaben* eingesetzt, in denen Probanden Entscheidungen zwischen kleineren, früher verfügbaren und größeren, aber erst später verfügbaren Belohnungen treffen sollen (z. B. zwischen der Option, 10 Euro sofort zu erhalten oder 12 Euro in einem Monat zu bekommen). Höhe und Zeitpunkt der Belohnungen werden dabei systematisch variiert. Um die Verbindlichkeit der Entscheidungen zu erhöhen, wird häufig nach Zufall eine der Entscheidungen der Probanden ausgewählt und nach dem Experiment tatsächlich realisiert. Aus Verhaltensstudien ist bekannt, dass Probanden den subjektiven Wert von Belohnungen umso stärker abwerten, je weiter in der Zukunft sie liegen (zeitliche Diskontierung; *delay discounting*). Darüber hinaus kommt es zu **Präferenzumkehrungen** (*preference reversals*), die sich darin manifestieren, dass eine Person eine größere spätere gegenüber einer kleineren früheren Belohnung präferiert, solange beide Belohnungen in der Zukunft liegen, die gleiche Person aber die kleinere Belohnung wählt, wenn diese sofort verfügbar ist (Ainslie 2005; Kable 2014; Loewenstein et al. 2008). Ein Beispiel wäre eine Person, die sich für 10 Euro in 50 Wochen statt für 8 Euro in 49 Wochen entscheidet, aber 8 Euro heute 10 Euro in einer Woche vorzieht.

Zwei-Systeme-Modelle Präferenzumkehrungen verletzen bestimmte normative Rationalitätsstandards klassischer ökonomischer Entscheidungstheorien und werden häufig als Ausdruck impulsiven Verhaltens interpretiert. Ein alltägliches Beispiel wäre eine Person, die das Ziel, in sechs Monaten 2 kg abgenommen zu haben, als wertvoller einschätzt als die Option, in vier Wochen bei einem Geschäftsessen ein kalorienreiches Dessert zu verspeisen, sich aber am Abend beim besagten Dinner dennoch für das Tiramisu entscheidet. Nach einer einflussreichen Hypothese spiegeln solche Präferenzumkehrungen die Konkurrenz zweier separater Bewertungssysteme. Während ein „impulsives" System emotionale Reaktionen auf sofortige Belohnungen generiert und zukünftige Belohnungen sehr stark abwertet, soll ein „deliberatives" oder „reflektiertes" System Antizipationen zukünftiger Belohnungen vermitteln und zukünftige Anreize wenig oder gar nicht abwerten (Loewenstein et al. 2008; Strack und Deutsch 2004). Um diese Zwei-Systeme-Hypothese zu überprüfen, haben McClure et al. (2004) in einer fMRI-Studie Probanden Entscheidungen zwischen unterschiedlich großen Geldbeträgen treffen lassen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten (sofort, nach zwei, vier oder sechs Wochen) verfügbar waren. Dabei zeigte sich, dass während der Entscheidungen Hirnregionen wie das ventrale Striatum und der mediale orbitofrontale Cortex, die an der Verarbeitung von Belohnungen beteiligt sind und starke Verbindungen zu dopaminergen Systemen im Mittelhirn haben, insbesondere bei Entscheidungen aktiviert wurden, bei denen eine der beiden Belohnungen sofort verfügbar war. Im Unterschied dazu wurden kognitive Kontrollregionen wie der dorsolaterale Präfrontalcortex und der posteriore Parietalcortex unabhängig davon aktiviert, ob die Entscheidungen sofortige oder verzögerte Belohnungen beinhalteten (◘ Abb. 9.18). Darüber hinaus war die Aktivierung in frontoparietalen Kontrollregionen größer als die in den Belohnungsregionen, wenn sich Probanden für einen größeren später verfügbaren Betrag entschieden, während sich in Durchgängen, in denen sich die Probanden für den kleineren sofort verfügbaren Geldbetrag entschieden, ein Trend in umgekehrter Richtung zu beobachten war.

Selbstkontrolle als Modulation eines einheitlichen Wertsignals Obwohl diese Ergebnisse auf den ersten Blick überzeugende Evidenz für die Annahme zweier separater Bewertungs-

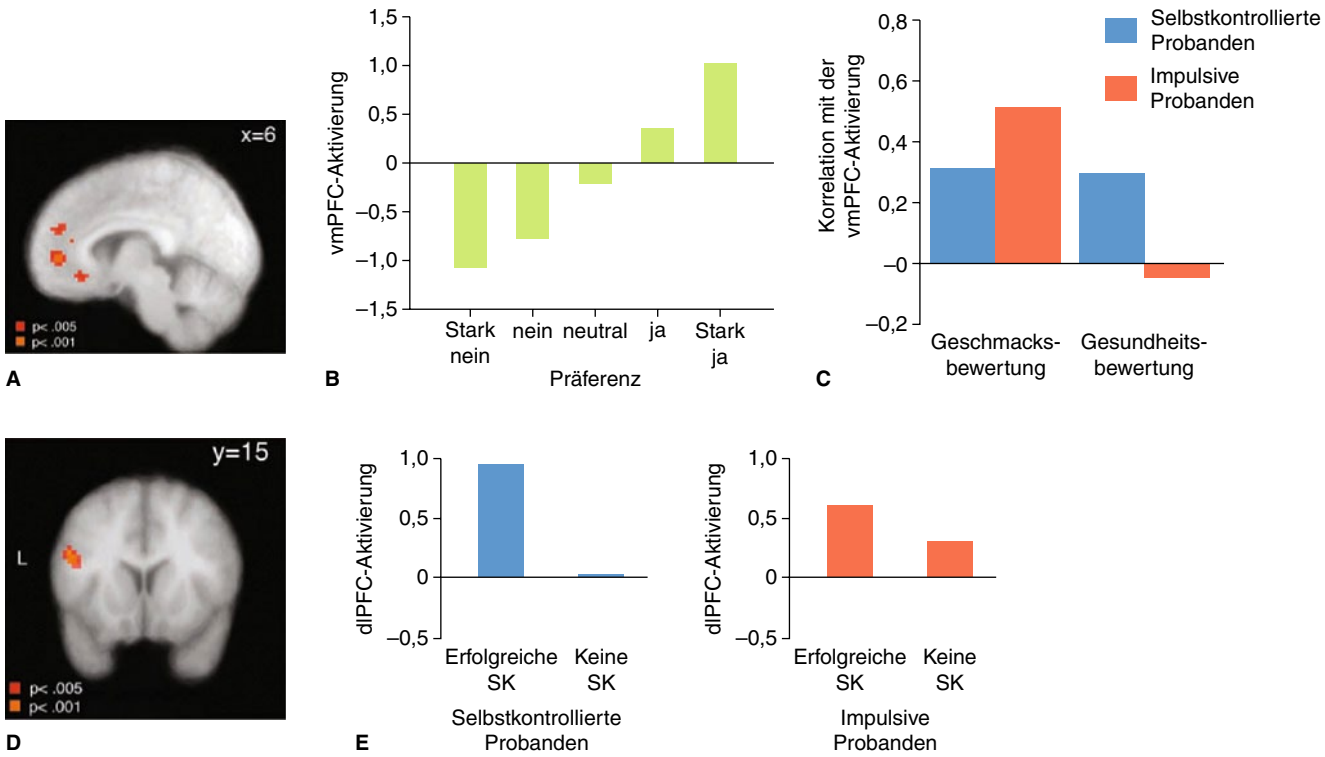


Abb. 9.19 Ergebnisse der fMRI-Studie von Hare et al. (2009), in der Probanden zwischen Nahrungsmitteln wählen sollten, die sie mehr oder weniger lecker fanden und als gesund oder ungesund eingeschätzt hatten. **A** Regionen im ventromedialen Präfrontalcortex, in denen die Hirnaktivierung positiv mit der Präferenz für Nahrungsmittel korreliert war und in denen vermutlich der subjektive Wert der Nahrungsmittel repräsentiert wird. **B** Positive Korrelation zwischen der subjektiven Präferenz für Nahrungsmittel und Aktivierung im ventromedialen Präfrontalcortex (*vmPFC*). **C** Korrelation der subjektiven Einschätzungen der Schmackhaftigkeit und des Gesundheitswerts der Nahrungsmittel und der vmPFC-Aktivität. Bei selbstkontrollierten Probanden korrelierte die vmPFC-Aktivität sowohl mit der subjektiven Schmackhaftigkeit und der Gesundheitseinschätzung, während bei impulsiven Probanden die vmPFC-Aktivierung nur mit der Schmackhaftigkeit korrelierte. **D** Region im *linken* (*L*) dorsolateralen PFC (*dlPFC*), in der die Aktivierung bei selbstkontrollierten Entscheidungen für selbstkontrollierte Probanden größer war als für impulsive Probanden. **E** Beide Probandengruppen zeigten stärkere Aktivierung im dlPFC in Durchgängen, in denen sie erfolgreich Selbstkontrolle (*SK*) ausübten als in Durchgängen, in denen sie keine selbstkontrollierten Entscheidungen trafen. (Adaptiert nach Hare et al. 2009; mit freundl. Genehmigung von © The American Association for the Advancement of Science. All Rights Reserved)

systeme darstellen, wird dies durch neuere Ergebnisse in Zweifel gezogen, die dafür sprechen, dass Entscheidungen auf *einem einheitlichen* neuronalen Wertsignal beruhen (Peters und Büchel 2010). So fanden Kable und Glimcher (2007), dass fMRI-Aktivierungen in Regionen, die von McClure et al. (2004) zum „impulsiven" System gezählt wurden (ventromedialer Präfrontalcortex, posteriorer cingulärer Cortex und ventrales Striatum) mit dem subjektiven Wert sofortiger als auch verzögerter Belohnungen korrelierten. Zudem gab es keine Hinweise darauf, dass sofortige Belohnungen mit einer überproportional starken Aktivierung in diesen Hirnregionen einhergehen, was ebenfalls gegen die Annahme spricht, dass diese Regionen ein „impulsives System" darstellen, das selektiv auf sofortige Belohnungen reagiert.

Ein alternatives Modell der Selbstkontrolle beruht auf der Annahme, dass selbstkontrollierte Entscheidungen nicht auf der Unterdrückung eines impulsiven Systems beruhen, sondern darauf, dass ein einheitliches neuronales Bewertungssignal in hinreichendem Maß durch antizipierte langfristige Verhaltenskonsequenzen moduliert wird. Evidenz für dieses Modell stammt aus einer Studie (Hare et al. 2009), in der Probanden, die eine Diät machten, eine Serie von Entscheidungen über Nahrungsmittel treffen sollten. Dabei sollten sie jeweils eine Wahl treffen zwischen einem Referenzitem, dessen Geschmack und Gesundheitswert sie zuvor als mittelmäßig eingeschätzt hatten, und einem zweiten Nahrungsmittel, dessen Schmackhaftigkeit und Gesundheitswert von Durchgang zur Durchgang variierten. Die Probanden wurden post hoc als selbstkontrolliert klassifiziert, wenn sie sich überwiegend für gesunde Nahrungsmittel entschieden hatten, auch wenn sie diese wenig schmackhaft fanden, während sie als impulsiv klassifiziert wurden, wenn sie überwiegend leckere Nahrungsmittel gewählt hatten, selbst wenn sie diese für ungesund hielten. Die Auswertung der fMRI-Daten zeigte zunächst, dass die Aktivierung im ventromedialen Präfrontalcortex mit dem subjektiven Wert der Nahrungsmittel korreliert war, d. h., je stärker ein Nahrungsmittel präferiert wurde, umso stärker war die Aktivierung im ventromedialen Präfrontalcortex (Abb. 9.19). Dies steht im Einklang mit der Annahme, dass in dieser Hirnregion der subjektive Wert von Entscheidungsoptionen repräsentiert wird und dieses Wertsignal direkt die Präferenzen im Verhalten der Probanden bestimmt. Der entscheidende Befund war allerdings, dass dieses neuronale Wertsignal bei selbstkontrollierten Probanden sowohl mit der subjektiven Schmackhaftigkeit als auch dem Gesundheitswert der Nahrungsmittel korrelierte, wohingegen die Aktivierung im ventromedialen Präfrontalcortex bei impulsiven Probanden lediglich mit der

Schmackhaftigkeit, nicht aber mit dem Gesundheitswert korreliert war. Selbstkontrollierte Entscheidungen beruhten also darauf, dass die neuronale Repräsentation des subjektiven Wertes der Nahrungsmittel durch die langfristigen (gesundheitlichen) Konsequenzen der Entscheidung moduliert wurde. Dies steht im Einklang mit den bereits erwähnten Befunden, dass eine Fokussierung der Aufmerksamkeit auf langfristige Konsequenzen zu mehr selbstkontrollierten Entscheidungen führte (Hare et al. 2011) und den Einfluss kurzfristiger Belohnungsanreize reduzierte (Kober et al. 2010).

Dass auch an dieser Form der Top-down-Modulation von Bewertungssignalen der dorsolaterale Präfrontalcortex beteiligt ist, wird dadurch belegt, dass er in der Studie von Hare et al. (2009) bei selbstkontrollierten im Vergleich zu impulsiven Entscheidungen stärker aktiviert war. Im Einklang damit zeigte eine andere Studie, dass eine temporäre Störung der neuronalen Verarbeitung im linken dorsolateralen Präfontalcortex mittels rTMS dazu führte, dass Probanden in einer intertemporalen Entscheidungsaufgabe eine stärkere Präferenz für sofortige Belohnungen sowie eine höhere Neigung zu Präferenzumkehrungen zeigten (Figner et al. 2010).

Handlungsplanung, Koordination multipler Ziele und zukunftsorientiertes Denken

Einige der komplexesten kognitiven Kontrollanforderungen stellen sich in Situationen, in denen neue Handlungssequenzen generiert und hierarchisch organisierte Tätigkeiten mit multiplen Ober- und Unterzielen zeitlich koordiniert werden müssen (Hacker 2014). Diese Funktionen werden insbesondere mit dem frontopolaren Cortex in Verbindung gebracht, der den am weitesten anterioren Teil des Präfrontalcortex bezeichnet und eine der Regionen ist, deren Volumen relativ zum Gesamtgehirn beim Menschen im Vergleich zu anderen Primaten in der Evolution am stärksten zugenommen hat. Der frontopolare Cortex gehört zu den bislang am wenigsten verstandenen Hirnregionen, wenngleich in den letzten Jahren deutliche Fortschritte bei der Entschlüsselung seiner Funktionen gemacht wurden. So haben fMRI-Studien gezeigt, dass der frontopolare Präfrontalcortex aktiviert wird, wenn multiple Aufgaben koordiniert werden müssen (Multitasking) (Burgess et al. 2000), wenn während der Ausführung einer Aufgabe die Ausführungsbedingungen für eine später auszuführende Absicht überwacht werden müssen (prospektives Gedächtnis) (Burgess et al. 2011) oder wenn Oberziele aufrechterhalten werden müssen, während Teilziele abgearbeitet werden (Koechlin et al. 1999). Darüber hinaus ist der frontopolare Cortex an kontrafaktischem Denken beteiligt und repräsentiert Konsequenzen von Handlungen, die man hätte ausführen können, aber nicht ausgeführt hat (Boorman et al. 2009). Frontopolare Aktivierung wurde ferner gefunden, wenn Personen zwischen abstrakten Strategien wechselten, z. B. wenn sie von Handlungen, die sich in der Vergangenheit bewährt hatten (*Exploitation*) auf das probeweise Ausführen neuer Handlungsoptionen (*Exploration*) wechseln (Daw et al. 2006).

Handlungsplanung Unter Planen versteht man das Generieren neuer Handlungssequenzen durch die versuchsweise Neukombination von Teilhandlungen und die „mentale Simulation" solcher Sequenzen vor ihrer eigentlichen Ausführung im Sinne eines inneren Probehandelns (▶ Kap. 18). Patienten mit Frontalhirnschädigungen zeigen häufig beeinträchtigte Planungsprozesse. So beschreibt der Neuropsychologe Luria (1966) in seinen klassischen Untersuchungen Fälle von Frontalhirnpatienten, die Handlungssequenzen nicht mehr in geordneter Folge strukturieren konnten, relevante Handlungsschritte ausließen oder falsche eingefügten. Ein verbreiteter neuropsychologischer Test zur Untersuchung von Planungsprozessen ist der von Shallice (1982) entwickelte *Turm von London* (◘ Abb. 9.20). Die Probanden sollen dabei auf drei Stäben aufgereihte Kugeln so umarrangieren, dass eine vorgegebene Zielkonfiguration hergestellt wird, wobei stets nur eine Kugel bewegt werden darf und immer erst eine Kugel auf einem Stab bewegt werden muss, bevor die nächste Kugel verschoben werden darf. Die Aufgabe erfordert es, eine Abfolge von Operationen und Unterzielen so zu organisieren, dass das übergeordnete Ziel erreicht wird. Patienten mit Läsionen im linken Präfrontalcortex zeigten im Vergleich zu Kontrollprobanden insbesondere bei Aufgaben mit hohem Planungsaufwand längere Lösungszeiten, benötigten eine größere Anzahl von Zügen und verstießen häufiger gegen die Regeln der Aufgabe (Carlin et al. 2000; Owen et al. 1990; Shallice 1982). Funktionelle Bildgebungsstudien bei gesunden Probanden haben gezeigt, dass die Hirnaktivität im dorsolateralen Präfrontalcortex sowie insbesondere im frontopolaren Cortex (BA 10) mit zunehmender Planungsschwierigkeit (d. h. der Zahl der zur Zielerreichung notwendigen Züge) anstieg (Heuvel et al. 2003).

Koordination multipler Ziele Viele alltägliche Tätigkeiten (man denke z. B. an die Zubereitung eines 4-Gänge-Menüs, das Absolvieren eines Studiums oder die Planung einer Urlaubsreise) beinhalten multiple Unterziele und Teilaufgaben, die in eine zeitliche Abfolge gebracht und bezüglich ihrer Wichtigkeit, Dringlichkeit und Schwierigkeit geordnet werden müssen. Häufig muss ein Oberziel aufrechterhalten werden, während gleichzeitig Unterziele abgearbeitet werden, oder es müssen Teilaufgaben zugunsten einer momentan wichtigeren Tätigkeit unterbrochen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgenommen werden (Burgess et al. 2000). Um solche Anforderungen zu untersuchen, haben Shallice und Burgess (1991) Aufgaben entwickelt, die ökologisch valider sein sollen als Standardtests für exekutive Funktionen. Im *Multiple Errands Test* sollen Frontalhirnpatienten unter Beachtung einer Reihe von Regeln mehrere Erledigungen in einem Einkaufszentrum machen (z. B. herausfinden, welches am Vortag der kälteste Ort in England war, und dem Versuchsleiter eine Postkarte mit dieser Information schicken). Es zeigte sich, dass die Patienten häufig einzelne Aufgaben nicht ausführten, durch irrelevante Reize von ihren Zielen abgelenkt wurden und gegen die vorgegebenen Regeln verstießen, obwohl sie diese verbalisieren konnten. Eine weitere Aufgabe ist der *Six Elements Test* (Shallice und Burgess 1991), bei dem die Probanden 15 min Zeit haben, um drei Aufgaben mit jeweils zwei Teilaufgaben zu bearbeiten (z. B. zwei Sets von Rechenaufgaben lösen, zwei Wegbeschreibungen geben). Zusätzlich werden die Probanden instruiert, dass sie nicht zwei Teilaufgaben aus dem gleichen Set nacheinander bearbeiten dürfen und dass frühere Aufgaben innerhalb eines Aufgabensets mehr Punkte einbringen als spätere Aufgaben. Die optimale Strategie besteht

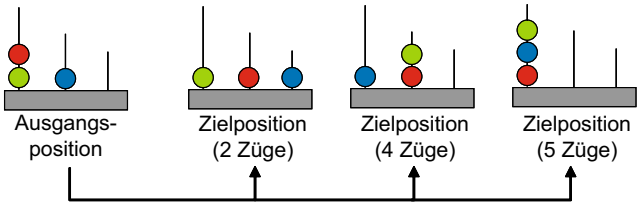


Abb. 9.20 Die Turm-von-London-Aufgabe zur Messung von Planungsprozessen mit drei Schwierigkeitsstufen, bei denen 2, 4 oder 5 Züge erforderlich sind, um die Ausgangs- in die Zielposition zu transformieren

also darin, von selbst nach einiger Zeit auf eine andere Aufgabe zu wechseln. Während die Patienten keine Schwierigkeiten mit den einzelnen Aufgaben hatten, blieben sie häufig zu lange bei einer Aufgabe, wechselten zu selten oder verbrachten viel Zeit damit, sich Notizen zu machen, die sie später aber nie verwendeten. Diese Beeinträchtigungen traten interessanterweise auf, obwohl die Patienten normale Leistungen in Intelligenz- und Standardtests zur Erfassung exekutiver Funktionen aufwiesen, was zeigt, dass Probleme bei der Koordination multipler Ziele nach Frontalhirnläsionen in Standardtests nicht unbedingt sichtbar werden. Dass speziell der frontopolare Cortex an der Koordination multipler Aufgaben (Multitasking) beteiligt ist, wird dadurch belegt, dass Patienten mit frontopolaren Läsionen (nicht aber Patienten mit Frontalhirnläsionen außerhalb des frontopolaren Cortex) in einer „Hotelaufgabe" beeinträchtigt waren, die wie der *Six Elements Test* verlangt, dass man eine begrenzte verfügbare Zeit auf verschiedene Tätigkeiten aufteilt und dabei übergeordnete Regeln im Blick behält (Roca et al. 2011). Im Einklang damit wurde der frontopolare Cortex in Bildgebungsstudien speziell in Aufgaben aktiviert, in denen Probanden ein übergeordnetes Ziel aufrechterhalten mussten, während sie gleichzeitig Unterziele abarbeiten mussten (Braver und Bongiolatti 2002; Koechlin et al. 1999).

Prospektives Gedächtnis Ähnliche Koordinationsprobleme stellen sich beim *prospektiven Gedächtnis* für Absichten, die erst zu einem späteren Zeitpunkt oder in Reaktion auf geeignete Auslösebedingungen auszuführen sind (z. B. wenn man sich morgens vornimmt, nach der Arbeit eine wichtige Besorgung zu machen) (Kliegel et al. 2008). Im Labor wird das prospektive Gedächtnis mit Aufgaben untersucht, in denen Probanden kontinuierlich eine Aufgabe bearbeiten (z. B. Wörter als belebt oder unbelebt klassifizieren) und gleichzeitig instruiert werden, auf selten auftretende prospektive Gedächtnisreize eine einfache Handlung auszuführen (z. B. eine bestimmte Taste zu drücken, wenn ein ganz bestimmtes Wort oder ein Wort in einer anderen Farbe erscheint). Prospektive Gedächtnisaufgaben gehen mit Aktivierungen in einer ganzen Reihe von Hirnregionen, insbesondere aber auch im rostrolateralen frontopolaren Cortex einher (Burgess et al. 2011). Der rostrolaterale Präfrontalcortex scheint dabei speziell an der Überwachung der Auslösebedingungen einer prospektiven Absicht während der gleichzeitigen Bearbeitung einer Primäraufgabe beteiligt zu sein. So zeigte sich in einem prospektiven Gedächtnisexperiment erhöhte Aktivierung im rostrolateralen Präfrontalcortex nur so lange, wie Probanden auf prospektive Gedächtnisreize reagieren sollten, wohingegen diese Aktivierung sehr schnell wieder verschwand, sobald die Absicht erledigt war und die Probanden nicht länger auf prospektive Gedächtnisreize reagieren mussten (Beck et al. 2014).

Präventive Selbstverpflichtung Eine Gemeinsamkeit vieler Aufgaben, in denen der frontopolare Cortex aktiviert wird, besteht darin, dass sie zukunftsorientiertes Denken erfordern (z. B. das mentale Durchspielen möglicher Handlungspläne oder das Imaginieren möglicher zukünftiger Szenarien) (Burgess et al. 2011). Interessanterweise gibt es erste Hinweise darauf, dass der frontopolare Cortex auch relevant für präventive Selbstverpflichtungen ist, die wir im Zusammenhang mit volitionalen Selbstkontrollstrategien diskutiert hatten (▶ Abschn. 9.4.3). Diese Strategie erfordert es, aufgrund von metakognitivem Wissen über die eigenen zukünftigen Motivationszustände Bedingungen zu schaffen, die es unmöglich oder zumindest weniger wahrscheinlich machen, später in eine Versuchungssituation zu kommen. Um die neuronalen Korrelate präventiver Selbstverpflichtungen zu untersuchen, haben Crockett et al. (2013) Probanden in einer fMRI-Studie zwischen kleinen sofortigen Belohnungen (Anschauen eines als mäßig attraktiv eingeschätzten erotischen Fotos) und größeren späteren Belohnungen (Anschauen eines hochattraktiven Bildes nach einer Wartephase) wählen lassen. In einer Selbstverpflichtungsbedingung konnten Probanden, die sich für das Warten auf die attraktivere spätere Belohnung entschieden hatten, zusätzlich wählen, ob sie während des Warteintervalls weiterhin die Option haben wollten, sich doch noch um zu entscheiden und sofort ein weniger attraktives Bilder anzuschauen, oder ob diese Option ausgeschlossen sein sollte (Letzteres entspricht einer präventiven Selbstverpflichtung). Präventive Selbstverpflichtungen gingen im Vergleich zu nichtbindenden Entscheidungen spezifisch mit Aktivierung im lateralen frontopolaren Cortex einher. Dies stützt die Vermutung, dass der frontopolare Cortex insbesondere für Selbstkontrollstrategien relevant ist, die auf metakognitivem Wissen und kontrafaktischem Denken beruhen (z. B. wenn man sich vorstellt, in welchen Situationen die Realisierung einer Absicht durch Versuchungen gefährdet werden könnte und wie man die eigenen zukünftigen Handlungsoptionen so einschränken kann, dass Versuchungen vermieden werden).

9.5.3 Funktionelle Organisation des präfrontalen Cortex: Zentrale Exekutive oder multiple exekutive Systeme?

Die bisher diskutierten Befunde belegen, dass der Präfrontalcortex – im Zusammenspiel mit zahlreichen anderen Hirnregionen – an einem breiten Spektrum kognitiver Kontrollfunktionen beteiligt ist. Dies wirft die Frage auf, inwieweit der präfrontale Cortex *domänenspezifisch* organisiert ist und sich unterschiedliche Kontrollfunktionen separaten Regionen zuordnen lassen oder ob alle Kontrollfunktionen auf einem *domänenunspezifischen* Kontrollnetzwerk beruhen.

▪ Die Hypothese eines multifunktionellen Netzwerks

Evidenz für die These eines domänenunspezifischen Kontrollnetzwerks wurde von Duncan und Owen (2000) auf der Basis einer Metaanalyse von Bildgebungsstudien zu kognitiven Kon-

trollfunktionen vorgelegt. Diese Analyse zeigte, dass Aufgaben, die unterschiedliche Kontrollfunktionen wie Reaktionsinhibition, Ausführung neuer Handlungen oder Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis beanspruchen, alle mit Aktivierungen in einem ähnlichen Netzwerk einhergingen, das den dorsolateralen und ventrolateralen Präfrontalcortex, Regionen im Parietalcortex, den dACC, das prä-supplementärmotorische Areal, die anteriore Insel (und zum Teil auch den rostrolateralen Präfrontalcortex) umfasste. Auch eine neuere Metaanalyse von 193 funktionellen Bildgebungsstudien (Niendam et al., 2012) zeigte, dass verschiedene kognitive Kontrollfunktionen wie Reaktionsinhibition, Wechseln kognitiver Einstellungen, aktive Aufrechterhaltung relevanter Informationen und Handlungsplanung mit einem ähnlichen Muster von Aktivierungen im Präfrontalcortex, dACC, und Parietalcortex assoziiert waren. Duncan zufolge bilden diese Regionen ein **multifunktionelles Netzwerk** (*multiple demand network*), das in einem breiten Spektrum von Aufgaben flexible Handlungssteuerung, die Koordination von Teilhandlungen im Sinne übergeordneter Ziele und die Anpassung von Verarbeitungsmodulen an wechselnde Anforderungen vermitteln soll (Duncan 2010). Dieses Netzwerk soll zugleich die Grundlage für fluide Intelligenz und das Lösen neuer, nichtroutinisierter Probleme bilden.

9

Funktionale Spezialisierungen innerhalb des Präfrontalcortex

Allerdings schließt die These eines multifunktionalen Netzwerks nicht aus, dass es funktionale Spezialisierungen innerhalb des Präfrontalcortex gibt. So könnte die Tatsache, dass verschiedene Aufgaben überlappende Hirnregionen aktivieren, auch den Umstand spiegeln, dass es kognitive Funktionen gibt, die in allen untersuchten Aufgaben benötigt werden (z. B. die Top-down-Modulation von Verarbeitungsmodulen durch aktiv gehaltene Aufgabenregeln). Zudem beanspruchen Aufgaben, die kognitive Kontrolle erfordern, meist mehrere Kontrollfunktionen, sodass die Tatsache, dass sie ein ähnliches Netzwerk von Hirnregionen aktivieren, durchaus damit vereinbar ist, dass Teile dieses Netzwerks spezifische Funktionen vermitteln.

In der Tat sprechen *funktionale Dissoziationen*, bei denen je nach Ort einer Läsion im Präfrontalcortex unterschiedliche Kontrollfunktionen beeinträchtigt sind, zumindest für eine gewisse funktionale Spezialisierung. So gibt es auf einer groben anatomischen Ebene gute Belege für Dissoziationen zwischen lateralen und orbitofrontalen bzw. ventromedialen Regionen des Präfrontalcortex. Während Läsionen lateraler präfrontaler Regionen zu Beeinträchtigungen kognitiver Funktionen wie der aktiven Aufrechterhaltung von Informationen und dem flexiblen Aufgabenwechsel führen, gehen Verletzungen orbitofrontaler und ventromedialer Regionen des Präfrontalcortex mit einer beeinträchtigten Kontrolle emotionaler Impulse, einer mangelnden Ausrichtung des Verhaltens an antizipierten Belohnungen oder Bestrafungen sowie Schwierigkeiten beim Umlernen von Belohnungskontingenzen einher (Szczepanski und Knight 2014). Im Einklang damit konnten in einer Studie mit über 300 Patienten mit fokalen Hirnläsionen (Gläscher et al. 2012) aufgrund einer Zuordnung von Beeinträchtigungen in diversen Aufgaben zu Läsionsorten zwei anatomische Netzwerke separiert werden. Das eine Netzwerk vermittelt primär kognitive Kontrollfunktionen (Reaktionsinhibition, Konfliktüberwachung und Einstellungswechsel) und umfasst den dorsolateralen Präfrontalcortex und den ACC, während das andere Netzwerk mit wertbasierten Entscheidungen assoziiert ist und orbitofrontale, ventromediale und frontopolare Bereiche des Präfrontalcortex umfasst. Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass es in Bezug auf spezifischere Kontrollfunktionen vergleichsweise wenige Belege für echte Doppeldissoziationen gibt, bei denen Läsionen in zwei präfrontalen Regionen zu einem umgekehrten Muster beeinträchtigter und intakter Funktionen führen. Dies dürfte der Tatsache geschuldet sein, dass oftmals Patienten mit großen und heterogenen Läsionen untersucht wurden und komplexe Aufgaben verwendet wurden, die mehrere kognitive Funktionen beanspruchen (Szczepanski und Knight 2014).

Neben den Ergebnissen neuropsychologischer Studien sprechen auch funktionelle Bildgebungsstudien und Metaanalysen solcher Studien für ein gewisses Maß an funktionellen Spezialisierungen innerhalb des Präfrontalcortex (◘ Tab. 9.3):

- Aktivierungen im *linken ventrolateralen Präfrontalcortex* wurden u. a. gefunden, wenn Aufgabenregeln abgerufen und aktualisiert, irrelevante Regeln unterdrückt und aufgabenrelevante Informationen im Arbeitsgedächtnis aufrechterhalten werden müssen (D'Esposito et al. 1998; D'Esposito und Postle 2014).
- Aktivierung im *linken dorsolateralen Präfrontalcortex* wurde u. a. gefunden, wenn Reaktionen ausgewählt werden müssen, die nicht eindeutig durch äußere Reize festgelegt werden, wenn sensorische oder motorische Systeme durch aktiv gehaltene Ziele moduliert werden müssen und wenn Informationen im Arbeitsgedächtnis aktiv manipuliert werden (z. B. in N-Back-Aufgaben) (D'Esposito et al. 1998).
- Aktivierung im *rechten inferioren Präfrontalcortex* wurde u. a. in Aufgaben beobachtet, die die Unterdrückung motorischer Reaktionen erfordern (Aron et al. 2014).
- Aktivierung im *frontopolaren Cortex* wurde beobachtet, wenn Aufgaben das Planen von Handlungssequenzen, die Koordination multipler Ziele, die Implementierung abstrakter Aufgabenregeln, kontrafaktisches oder zukunftsorientiertes Denken oder metakognitive Entscheidungen über abstrakte Strategien erfordern (z. B. Koechlin et al. 2003; Badre und d'Esposito 2007).
- Aktivierung im *rACC* wurde u. a. bei der willentlichen Regulation negativer Emotionen beobachtet (Etkin et al. 2015; Gross 2013).
- Aktivierung im *dACC* wurde im Zusammenhang mit der Überwachung von Konflikten, Fehlern und negativem Feedback sowie der Prädiktion der Kosten kognitiver Kontrolle beobachtet (Botvinick et al. 2001; Kerns et al 2004).

Während diese Resultate für eine gewisse funktionale Spezialisierung innerhalb des Präfrontalcortex sprechen, sollten sie nicht als Beleg für eine Eins-zu-eins-Zuordnung von kognitiven Kontrollfunktionen zu bestimmten Hirnregionen interpretiert werden. Viele der genannten Hirnregionen sind an mehr als einer

Tab. 9.3 Kognitive Kontrollfunktionen, Aufgaben zur ihrer Messung und vermutlich beteiligte Hirnregionen (nur ein Teil der jeweils relevanten Regionen ist aufgelistet)

Kontrollfunktion	Beispiele für Aufgaben	Relevante Hirnregionen
Flexibles Wechseln zwischen Aufgaben und Reaktionsregeln	Wisconsin-Kartensortiertest Aufgabenwechsel	Linker dlPFC; vlPFC; Teile des Parietalcortex
Aktive Aufrechterhaltung von aufgabenrelevanten Informationen und aufgabenabhängige Top-down-Modulation	Delay-Aufgaben Arbeitsgedächtnisaufgaben N-Back-Aufgaben	vlPFC (Abruf und Aufrechterhaltung von Aufgabenregeln); dlPFC (aktive Manipulation von Informationen im Arbeitsgedächtnis und Top-down-Modulation); posteriorer Parietalcortex
Unterdrückung automatisierter Reaktionen	Go/NoGo-Aufgabe Stoppsignalaufgabe Stroop-Test Flankierreizaufgabe	Rechter inferiorer lateraler PFC; dlPFC; prä-supplementär-motorisches Areal
Willentliche Emotionsregulation	Modifikation emotionaler Reaktionen auf Bilder oder Filme mittels kognitiver Umbewertung, Distanzierung, Aufmerksamkeitsablenkung oder Unterdrückung des Emotionsausdrucks	Rechter lateraler PFC; rostraler ACC; ventromedialer PFC
Handlungsplanung, Koordination multipler Ziele und zukunftsorientiertes Denken	Turm von London Multiple Errands Test Six Elements Test Doppelaufgaben Prospektives Gedächtnis	Frontopolarer Cortex; dlPFC
Konflikt- und Fehlerüberwachung; Einschätzung von Kosten und Nutzen kognitiver Kontrolle	Konfliktadaptationseffekte in Interferenzaufgaben (z. B. Stroop- oder Flankierreizaufgaben)	Dorsaler ACC

PFC Präfrontalcortex, *dlPFC* dorsolateraler Präfrontalcortex, *vlPFC* ventrolateraler Präfrontalcortex, *OFC* orbitofrontaler Cortex, *ACC* anteriorer cingulärer Cortex

Funktion beteiligt und zudem untereinander hochvernetzt, was dafür spricht, dass die kognitive Kontrolle willentlicher Handlungen auf verteilten Netzwerken von Hirnregionen beruht, deren Interaktion dynamisch und aufgabenabhängig variiert (Calhoun et al. 2014; Cole et al. 2013b).

Hierarchische Organisation des Präfrontalcortex

Eine andere Perspektive auf die Frage der funktionalen Spezialisierung im Präfrontalcortex wird durch Befunde eröffnet, die dafür sprechen, dass der laterale Präfrontalcortex durch eine hierarchische Organisation charakterisiert ist, die sich anatomisch entlang einer Achse von caudalen (posterioren) zu rostralen (anterioren) Regionen entfaltet. Dies hat zu der Hypothese geführt, dass rostrale, weiter anterior gelegene Regionen des lateralen Präfrontalcortex an der Verarbeitung abstrakter Inhalte und komplexerer Aufgabenregeln (Badre und D'Esposito 2009) sowie an der Kontrolle durch übergeordnete oder längerfristige Ziele beteiligt sind (Koechlin und Summerfield 2007), während caudale, weiter posterior gelegene Frontalhirnregionen konkretere Inhalte verarbeiten und die Kontrolle untergeordneter oder kurzfristigerer Handlungsziele vermitteln. Koechlin und Summerfield (2007) haben ein *Kaskadenmodell* vorgeschlagen, in dem sie vier Ebenen der Handlungskontrolle unterscheiden (Abb. 9.21):

1. *Sensorische Kontrolle* beruht auf einfachen Reiz-Reaktions-Assoziationen (z. B. wenn Probanden mit einem linken oder rechten Tastendruck anzeigen sollen, ob ein Kreis grün oder rot ist).
2. Bei *kontextueller Kontrolle* hängt die Auswahl einer Reaktion zusätzlich von Kontextrepräsentationen ab (z. B. wenn Probanden rote Buchstaben danach klassifizieren sollen, ob sie groß oder klein geschrieben sind, und grüne Buchstaben danach, ob es sich um Konsonanten oder Vokale handelt, wobei die Farbe als Kontextreiz dient).
3. Bei *episodischer Kontrolle* wechseln die Assoziationen zwischen Kontextreizen und Aufgabenregeln von Block zu Block (z. B. wenn die Zuordnung der Farben Rot und Grün zu den beiden Klassifikationsdimensionen „groß vs. klein" und „Vokal vs. Konsonant" in jedem Block wechselt).
4. *Verzweigungskontrolle* (*branching control*) beinhaltet Handlungspläne, bei denen ein Ziel eine Zeitlang aufrechterhalten werden muss, währenddessen zunächst Unterziele abgearbeitet werden.

Um ihr Modell zu überprüfen, bearbeiteten Probanden in einer fMRI-Studie (Koechlin et al. 2003) drei Aufgaben, die unterschiedlich komplexe Reiz-Reaktions-Regeln beinhalteten, die den drei ersten Kontrollebenen des Kaskadenmodells entsprachen. Im Einklang mit dem Modell war sensorische Kontrolle mit Aktivierungen im caudalen lateralen Frontalcortex (BA 6) assoziiert, kontextuelle Kontrolle mit Aktivierungen in weiter rostralen Regionen (BA 44 und BA 45) und episodische Kontrolle

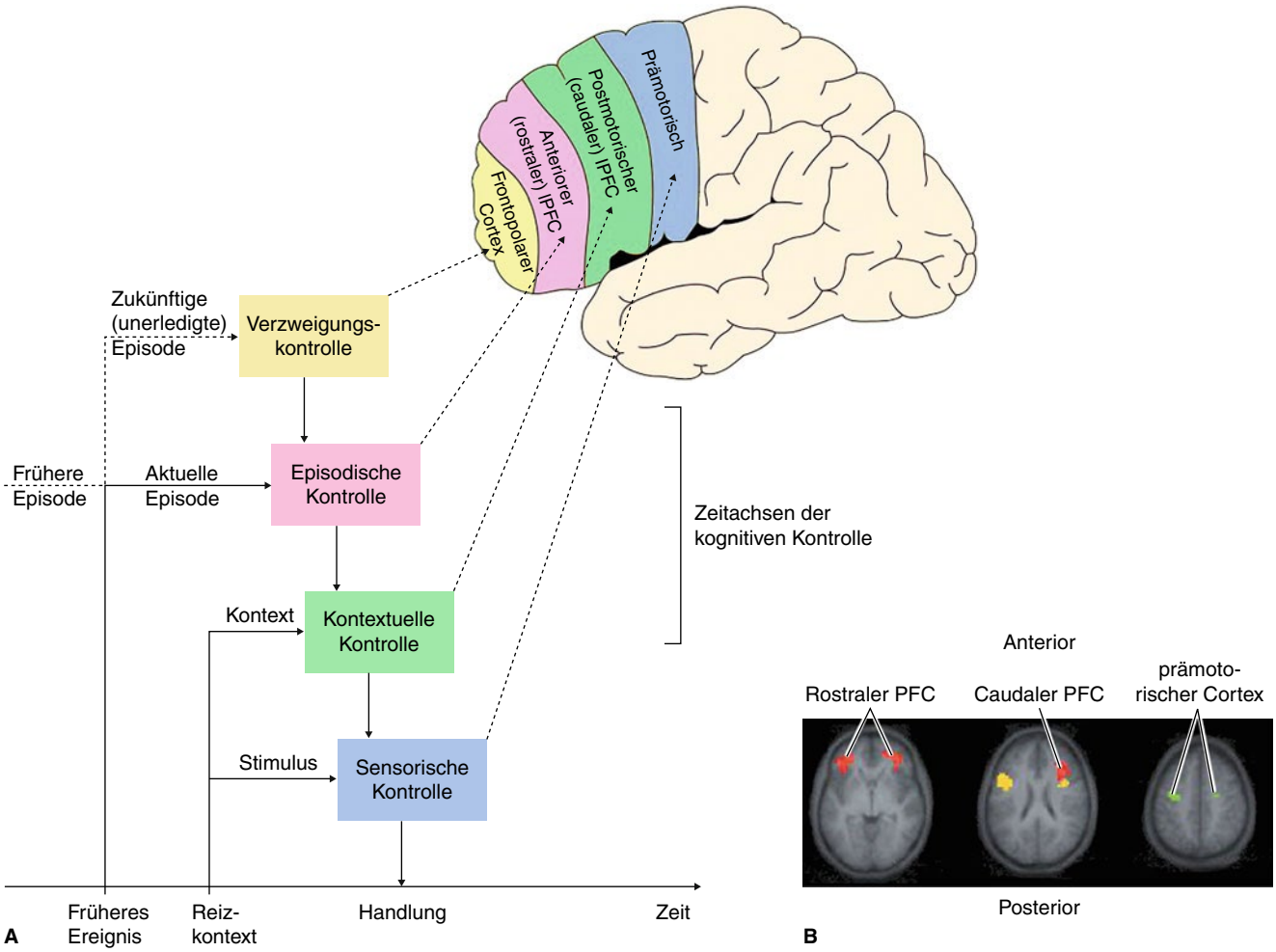


Abb. 9.21 **A** Kaskadenmodell des Präfrontalcortex. (Adaptiert nach Koechlin und Summerfield 2007; mit freundl. Genehmigung von © Elsevier. All Rights Reserved). **B** Ergebnisse der fMRI-Studie von Koechlin et al. (2003), in der sich mit zunehmender Aufgabenkomplexität Aktivierungen entlang einer Achse von posterioren (rostralen) zu anterioren (caudalen) Regionen zeigten. Aktivierung im prämotorischen Cortex (*grün*) war mit der Anzahl von Reiz-Reaktions-Zuordnungen in einer Aufgabe assoziiert. Aktivierung im caudalen lateralen PFC (*gelb*) war assoziiert mit den kontextuellen Anforderungen der Aufgabe (z. B. wenn die Regel, nach der auf Reize reagiert werden sollte, von deren Farbe abhing). Aktivierung im rostralen PFC (*rot*) zeigte sich, wenn die Aufgabeninstruktion von einem Block zum nächsten variierte (z. B. wenn die Reiz-Reaktions-Zuordnungen eines Blocks im nächsten Block umgekehrt wurden). (Adaptiert nach Koechlin et al. 2003; mit freundl. Genehmigung von © The American Association for the Advancement of Science. All Rights Reserved).

mit Aktivierungen in noch weiter rostral gelegenen Regionen (BA 46).

Weitere Evidenz für das Kaskadenmodell stammt aus einer Studie mit Patienten mit fokalen Hirnläsionen (Azuar et al. 2014). Dabei zeigte sich, dass Läsionen des prämotorischen Cortex (BA 6) alle drei Kontrollebenen und Läsionen caudaler präfrontaler Regionen (BA 45) die kontextuelle und episodische Kontrolle beeinträchtigen, während Läsionen der am weitesten rostralen Regionen (BA 45, 46 und 47) nur die episodische Kontrolle beeinträchtigen (analoge Befunde in Badre et al. 2009). Dies spricht dafür, dass Kontrollprozesse auf höheren Ebenen, die auf abstrakten und zeitlich weit gespannten Zielen beruhen und anteriore präfrontale Regionen beanspruchen, die funktionale Integrität von posterioren frontalen Regionen voraussetzen und deren Verarbeitung modulieren. Dagegen können Kontrollprozesse auf niedrigeren Ebenen offenbar unabhängig von der Integrität höherer Kontrollebenen, die über anteriore präfrontale Regionen vermittelt werden, operieren.

Bislang nicht abschließend geklärt ist die genaue Natur der vermuteten hierarchischen Organisation des Präfrontalcortex. Im Kaskadenmodell wird die rostrocaudale Achse primär im Sinne einer Hierarchie zeitlich zunehmend weiter gespannter Aufgabenkontexte interpretiert, die von der Reaktionsselektion aufgrund unmittelbar vorhandener Reize bis zur Kontrolle von Handlungen durch zeitlich weit gespannte Ziele reicht. Einer alternativen Hypothese zufolge handelt es sich eher um eine Hierarchie zunehmend abstrakterer und komplexerer Aufgabenregeln, die von einfachen Reiz-Reaktions-Zuordnungen zu Regeln höherer Ordnung reichen, die festlegen, welche untergeordneten Regeln anzuwenden sind. Auch für diese These gibt es Belege aus einer fMRI-Studie (Badre und D'Esposito 2007), in der umso weiter anterior gelegene Regionen des Präfrontalcortex aktiviert wurden, je komplexer die Aufgabenregeln waren. Auch Multi-Voxel-Muster-Analysen sprechen dafür, dass weiter anterior gelegene Regionen des Präfrontalcortex zunehmend abstraktere Aufgabenregeln repräsentieren (Nee und Brown 2012). Unab-

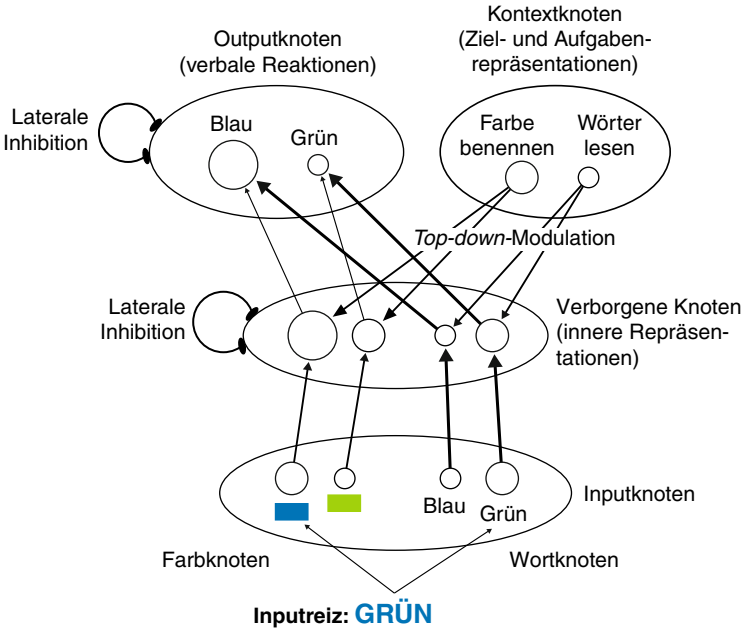


Abb. 9.22 Schematische Darstellung des konnektionistischen Modells der Stroop-Aufgabe von Cohen et al. (1990). *Kreise* stehen für Verarbeitungseinheiten (*Knoten*), die vereinfachte Modelle von Neuronen repräsentieren; die Größe der Kreise symbolisiert, wie stark ein Knoten aktuell aktiviert ist. *Linien* stellen assoziative Verknüpfungen (Konnektionen) zwischen den Knoten dar. Konnektionen zwischen Wort- und Outputknoten sind stärker als die zwischen Farb- und Outputknoten, da das Lesen automatisierter ist als das Farbbenennen. Kontextknoten repräsentieren die momentan aktivierte Aufgabe und erhöhen top-down die Sensitivität der verborgenen Knoten in der aufgabenrelevanten Verarbeitungsbahn. Ohne diese Top-down-Modulation würde der inkongruente Inputreiz aufgrund der stärkeren Verbindungen in der Wortbahn die falsche Reaktion („*grün*") aktivieren

hängig von den konzeptuellen Differenzen der beiden Modelle stellen diese Befunde konvergierende Evidenz für die generelle Hypothese einer hierarchischen Organisation des lateralen präfrontalen Cortex dar.

9.5.4 Computationale Modelle der kognitiven Kontrolle

So faszinierend die Einblicke in die Gehirnaktivität sind, die bildgebende Verfahren eröffnen, so unverzichtbar sind für ein echtes Verständnis kognitiver Kontrolle computationale Modelle der zugrunde liegenden Informationsverarbeitungsmechanismen. Mit computationalen Modellen wird versucht, diese Mechanismen in mathematischer Form zu beschreiben und möglichst als Computersimulation (z. B. in Form künstlicher neuronaler Netze) zu implementieren (Übersicht in Botvinick und Cohen 2014; O'Reilly et al. 2010; Rösler 2011). Dies ermöglicht es, das ansonsten oft schwer vorhersagbare Verhalten dynamischer und nichtlinearer Systeme zu simulieren und mit dem Verhalten von Versuchspersonen in konkreten Aufgaben zu vergleichen. Während aktuelle Modelle einen hohen Grad an Komplexität erreicht haben (z. B. Herd et al. 2014), lassen sich grundlegende Funktionsprinzipien bereits anhand sehr einfacher Modelle erläutern. Als Beispiel dafür soll eines der ersten und einflussreichsten konnektionistischen Modelle der kognitiven Kontrolle von Cohen et al. (1990) dienen, mit dem die Autoren empirische Daten aus Experimenten zur Stroop-Aufgabe simuliert haben und das die Grundlage vieler nachfolgender Modelle war. Bei konnektionistischen Modellen handelt es sich um künstliche neuronale Netze, mit denen grundlegende Prinzipien der neuronalen Informationsverarbeitung auf einer relativ abstrakten Ebene nachgebildet werden sollen (Rogers und McClelland 2014). Solche Netzwerke bestehen aus elementaren Verarbeitungseinheiten („Knoten"), die mehr oder weniger stark aktiviert sein können und vereinfachte Modelle von Nervenzellen (oder Gruppen von Nervenzellen) darstellen (Abb. 9.22).

Das Stroop-Modell von Cohen et al. (1990) verfügt über zwei Gruppen von Inputknoten, die die Farben und Wörter in der Stroop-Aufgabe repräsentieren. Wird dem Netz ein Farbwort als Eingabemuster präsentiert, werden die entsprechenden Inputknoten aktiviert. Die Inputknoten aktivieren über exzitatorische (erregende) Konnektionen zwei Gruppen sogenannter verborgener Knoten (*hidden units*), die innere Repräsentationen der Eingabereize darstellen und als Modelle sensorischer Repräsentationen in posterioren Assoziationsregionen des Neocortex interpretiert werden können. Verborgene Knoten, die inkompatible Informationen repräsentieren (z. B. der Knoten für die Farbe Rot und der Knoten für die Farbe Grün) hemmen sich wechselseitig über inhibitorische Konnektionen. Verborgene Knoten sind mit Outputknoten verbunden, die motorische Reaktionen repräsentieren (z. B. das Aussprechen des Wortes „Rot"), wobei sich inkompatible Reaktionen ebenfalls gegenseitig inhibieren. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass das Wortlesen automatisierter ist als das Farbbenennen, sind die Verknüpfungsstärken (die *Konnektionsgewichte*) zwischen Wort- und Outputknoten größer als die zwischen Farb- und Outputknoten. Als Folge davon werden die Outputknoten zunächst stets stärker durch die Wortknoten als durch die Farbknoten aktiviert.

Um zu erklären, wie das Netzwerk bei inkongruenten Stroop-Reizen (z. B. das Wort „Blau" in roter Farbe) trotzdem die korrekte Reaktion produzieren kann, enthält es eine weitere Gruppe von *Kontextknoten*, die die beiden Aufgaben („Farbe benennen" oder „Wort lesen") repräsentieren. Diese Kontextknoten stehen im Modell für Neurone im Präfrontalcortex und zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre Aktivierung auch ohne äußeren Input aktiv aufrechterhalten können. Wird der Kontextknoten aktiviert, der die Farbbenennungsaufgabe repräsentiert, so sendet dieser Aktivierung zu den verborgenen Knoten in der Farbbahn. Als Folge davon wird die Sensitivität der verborgenen Knoten in

der Farbbahn erhöht, sodass diese stärker auf einlaufende Aktivierung reagieren, die sie von den Farb-Inputknoten erhalten. Auf diese Weise gewinnt die Farbinformation letztlich einen stärkeren Einfluss auf die Aktivierung der Outputknoten, sodass auch bei einem inkongruenten Stroop-Reiz der korrekte Outputknoten aktiviert wird. Allerdings wird die Verarbeitung der Wortinformation nicht vollständig unterdrückt, sodass auch die falsche Reaktion teilweise aktiviert wird und es zu einem Reaktionskonflikt kommt, was erklärt, warum inkongruente Stroop-Reize zu verlängerten Reaktionszeiten führen, da es länger dauert, bis die Aktivierung der korrekten Reaktion eine festgelegte Reaktionsschwelle überschreitet.

Obwohl das Modell eine extreme Vereinfachung realer neuronaler Prozesse darstellt, kann es eine ganze Reihe von Befunden zur Stroop- und anderen Interferenzaufgaben erklären (Cohen et al. 1990; vgl. auch Scherbaum et al. 2012). Wichtiger ist an dieser Stelle aber, dass das Modell grundlegende Prinzipien illustriert, nach denen kognitive Kontrolle in neuronalen Netzwerken implementiert sein könnte. Während die nur langsam durch Lernen veränderbaren Konnektionsgewichte die Grundlage automatisierter Reaktionen sind, beruhen die zentralen Aspekte kognitiver Kontrolle – die Fähigkeit, eine schwächere, aber intentionsgemäße Reaktion trotz stärkerer gewohnheitsmäßiger Reaktionen auszuführen, und die Fähigkeit, auf den gleichen Reiz in Abhängigkeit vom jeweils aktivierten Ziel mit unterschiedlichen Reaktionen zu antworten – auf dem Zusammenspiel dreier Mechanismen:

1. Die Aktivierungsmuster der Kontextknoten können (im Unterschied zu den nur langsam durch Lernprozesse modifizierbaren Konnektionsgewichte) sehr schnell und flexibel aktualisiert werden (z. B. wenn ein neuer Hinweisreiz oder eine Instruktion encodiert wird, die einen anderen Aufgabenknoten aktiviert).
2. Die Aktivierungsmuster der Kontextknoten können auch in Abwesenheit eines Reizinputs aufrechterhalten und gegen Störungen abgeschirmt werden. Dies kann in neuronalen Netzen über rekurrente exzitatorische Konnektionen geschehen, indem Knoten Aktivierung zu mit ihnen verknüpften Knoten senden und die empfangenden Knoten die Aktivierung zurück zu den sendenden Knoten schicken. Solche Netzwerke können stabile, sich selbst aufrechterhaltende Aktivierungsmuster ausbilden (Attraktorzustände) (Rolls 2010; Scherbaum et al. 2012), was der in ▶ Abschn. 9.5.2 dargestellten störungsresistenten Delay-Aktivität präfrontaler Neurone entspricht.
3. Die Aktivierungsmuster der Kontextknoten, die übergeordnete Ziele oder Aufgaben repräsentieren, können die Aktivierungsdynamik in anderen Verarbeitungsmodulen dahingehend modulieren, dass von den in jedem Moment miteinander konkurrierenden Repräsentationen solche mit höherer Priorität verarbeitet werden und die Reaktionsselektion bestimmen, die relevant für die aktuelle Aufgabe sind (*biased competition*; Desimone und Duncan 1995; Miller und Cohen 2001).

Beeinträchtigungen dieser Mechanismen können viele der kognitiven Beeinträchtigungen von Patienten mit Läsionen des Präfrontalcortex erklären. So sagt das Modell voraus, dass Läsionen des lateralen Präfrontalcortex dazu führen sollten, dass Repräsentationen von Zielen und Aufgabenregeln nicht mehr hinreichend gegen Störungen abgeschirmt werden können, sodass die Reaktionsselektion nicht mehr durch die Inhalte des Kontextgedächtnisses moduliert, sondern primär durch automatisierte Reiz-Reaktions-Verknüpfungen bestimmt wird. Dies erklärt die erhöhte Reizabhängigkeit des Verhaltens, die mangelnde Reaktionsinhibition sowie die Dominanz unmittelbarer gegenüber zukünftigen Anreizen. Gleichzeitig wird durch eine Läsion des Kontextgedächtnisses auch die Fähigkeit beeinträchtigt, Zielrepräsentationen schnell zu aktualisieren, was die reduzierte kognitive Flexibilität und erhöhte Neigung zu perseverativem Verhalten nach Frontalhirnläsionen erklärt.

Eine Frage, die das Modell in seiner ursprünglichen Form allerdings offenlässt, ist, wie das Netzwerk „entscheidet", wann das Kontextgedächtnis gegen afferente Reize abgeschirmt werden sollte und wann solche Reize Zugang zum Kontextgedächtnis erhalten sollten, d. h., wann das Kontextgedächtnis aktualisiert werden sollte. Um diese Frage zu beantworten, hat man in neuere Modelle einen dynamischen *Gating*-Mechanismus integriert, der den Zugang zum Kontextgedächtnis reguliert (Botvinick und Cohen 2014; Hazy et al. 2007; O'Reilly et al. 2010) (◘ Abb. 9.23). Solange das Gate geschlossen ist, werden aktivierte Repräsentationen im Kontextgedächtnis weiter aufrechterhalten und gegen Störungen abgeschirmt. Erst wenn das Gate sich öffnet, erhalten neue Informationen Zugang zum Kontextgedächtnis. Wann das Gate geöffnet wird, hängt dabei von Prozessen ab, die eng mit dem Lernen von Belohnungsassoziationen verbunden sind. Grundsätzlich wäre es adaptiv, wenn das Gate immer dann geöffnet würde, wenn ein neuer Reiz signalisiert, dass durch einen Wechsel auf ein alternatives Ziel eine größere Belohnung erlangt werden kann als durch das aktuell aktivierte Ziel.

Nun ist aus Tierexperimenten zum Verstärkungslernen seit Langem bekannt, dass es Neurone im ventralen Tegmentum (VTA; einem Teil des mesolimbischen Dopaminsystems) gibt, die genau dann feuern, wenn das Tier eine unerwartete Belohnung erhält oder wenn ein unerwarteter Hinweisreiz erscheint, von dem das Tier gelernt hat, dass er eine Belohnung vorhersagt (Schultz 2013). Dies hat zu der Annahme geführt, dass die phasische Aktivität dieser dopaminergen Neurone einen *Belohnungsvorhersagefehler* codiert, der signalisiert, ob ein Ereignis besser oder schlechter als erwartet ist. Die Gating-Hypothese besagt nun, dass diese phasische Aktivität dopaminerger Neurone das Signal dafür ist, das Gate zum präfrontalen Kontextgedächtnis zu öffnen und dessen Inhalt zu aktualisieren, da es anzeigt, dass durch einen Zielwechsel eine größere Belohnung erlangt werden kann als durch das aktuell verfolgte Ziel. Indem die Aktivität der dopaminergen Neurone einen positiven Belohnungsvorhersagefehler codiert, fungiert sie gleichzeitig als *Lernsignal*, das bewirkt, dass die Assoziation zwischen dem Hinweisreiz, dem neuen Ziel und dem Gating-Signal verstärkt wird. Als Folge davon wird das nächste Mal, wenn der Hinweisreiz erscheint, mit höherer Wahrscheinlichkeit erneut ein Gating-Signal ausgelöst, sodass das mit der Belohnungserwartung assoziierte Ziel wieder Zugang zum Kontextgedächtnis erhält.

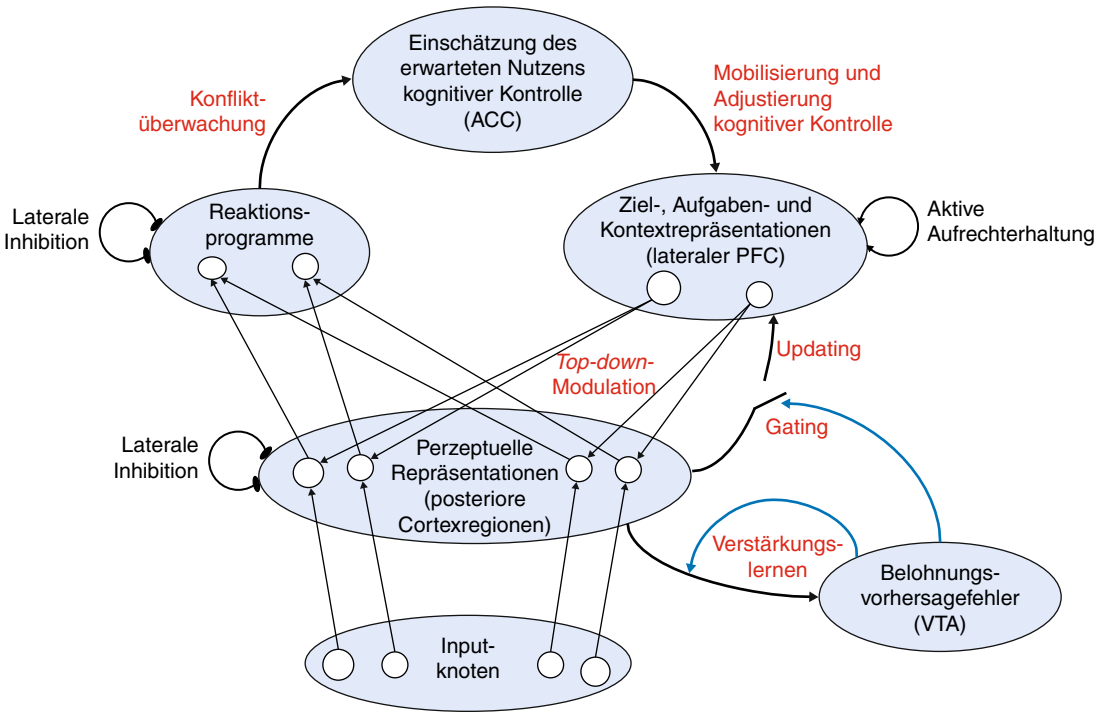


Abb. 9.23 Erweiterung des konnektionistischen Modells der kognitiven Kontrolle um einen dynamischen Gating-Mechanismus sowie einen Konflikt-Überwachungs-Mechanismus. Der Gating-Mechanismus besteht darin, dass neue Information nur dann Zugang zum Kontextgedächtnis erhält, wenn das Gate geöffnet wird. Das Gate wird geöffnet, wenn durch einen Hinweisreiz, der eine potenziell zu erreichende Belohnung ankündigt, ein dopaminerges Gatingsignal im ventralen Tegmentum (*VTA*) ausgelöst wird, wodurch der Wechsel auf ein neues Handlungsziel gefördert wird. Der Konflikt-Überwachungs-Mechanismus besteht darin, dass der dorsale anteriore cinguläre Cortex (*ACC*) Konflikte zwischen konkurrierenden Reaktionen überwacht und im Falle eines Konflikts eine erhöhte Mobilisierung kognitiver Kontrolle auslöst (Details in ▶ Abschn. 9.5.5). (Nach Botvinick & Cohen, 2014)

Empirische Belege für einen solchen dopaminergen Gating-Mechanismus stammen aus einer fMRI-Studie (D'Ardenne et al. 2012), in der gefunden wurde, das die Encodierung neuer aufgabenrelevanter Hinweisreize ins Arbeitsgedächtnis – wie von der Gating-Theorie vorhergesagt – mit Aktivierung in dopaminergen Regionen des Mittelhirns und vermutlich im ventralen Tegmentum einherging. Diese Aktivierung korrelierte sowohl positiv mit der Leistung in der Arbeitsgedächtnisaufgabe als auch mit der Aktivierung im rechten dorsolateralen präfrontalen Cortex, von dem man zuvor mittels TMS gezeigt hatte, dass er kausal an der Aufrechterhaltung der aufgabenrelevanten Reize beteiligt war. Dieses Befundmuster ist konsistent mit der Annahme, dass aufgabenrelevante (und in diesem Sinn Belohnung versprechende) Reize ein dopaminerges Gating-Signal auslösten, welches das Gate zum präfrontalen Cortex öffnete, sodass die relevanten Reize Zugang zum Arbeitsgedächtnis erhielten.

Die Gating-Hypothese ist ein vielversprechender Ansatz, um ohne die Annahme eines intelligenten Homunculus die kontextabhängige Aktualisierung des präfrontalen Kontextgedächtnisses zu erklären. Die neuronalen Systeme, die dem Gating-Mechanismus zugrunde liegen, sind derzeit Gegenstand aktiver Forschung, wobei neben dem mesolimbischen Dopaminsystem insbesondere den Basalganglien eine zentrale Rolle bei der Regulation der Balance zwischen stabiler Abschirmung und flexibler Aktualisierung des präfrontalen Kontextgedächtnisses zugeschrieben wird (Cools und D'Esposito 2011; Hazy et al. 2007; O'Reilly und Frank 2006; van Schouwenburg et al. 2010).

Obwohl computationale Modelle maßgeblich zum Verständnis der Mechanismen kognitiver Kontrollprozesse beigetragen haben und inzwischen erfolgreich auf ein breites Spektrum von Aufgaben angewandt worden sind (Übersicht in O'Reilly et al., im Druck; Rösler 2011), sind zahlreiche grundlegende Fragen noch ungelöst. So ist u. a. weitgehend ungeklärt, wie sich in neuronalen Netzwerken eine hierarchische Organisation von Kontrollstrukturen (wie in den in ▶ Abschn. 9.5.3 beschriebenen hierarchischen Modellen des Präfrontalcortex) selbstorganisierend durch Lernprozesse entwickeln kann (Botvinick et al. 2009) und wie die Verhaltenskontrolle durch zeitlich über längere Zeiträume erstreckte Ziele modelliert werden kann.

9.5.5 Konfliktüberwachung und adaptive Regulation kognitiver Kontrolle

Die bislang dargestellten Befunde sprechen dafür, dass der laterale präfrontale Cortex von zentraler Bedeutung für kognitive Kontrollfunktionen und die Top-down-Modulation perzeptueller, motorischer und motivationaler Systeme durch übergeordnete Ziele und Absichten ist. Woher aber „weiß" der präfrontale Cortex eigentlich, *ob* und *wann* kognitive Kontrolle mobilisiert werden sollte? Theorien der kognitiven Kontrolle, die ohne die fragwürdige Annahme eines zentralen Kontrollsystems auskommen wollen, müssen erklären, welche Mechanismen der kon-

textabhängigen Mobilisierung kognitiver Kontrollprozesse zugrunde liegen und wie diese Prozesse dynamisch an wechselnde Aufgabenanforderungen angepasst werden.

Konfliktüberwachungstheorie und die Funktionen des ACC

Grundsätzlich kann zwischen zwei Formen der Mobilisierung kognitiver Kontrolle unterschieden werden (Braver 2012). Zum einen können Kontrollressourcen intentional in Erwartung eines bevorstehenden Konflikts oder in Vorbereitung auf eine schwierige Aufgabe mobilisiert werden (*proaktive Kontrolle*). Zum anderen kann die Mobilisierung kognitiver Kontrolle aber auch relativ automatisch in Reaktion auf einen bereits eingetretenen Konflikt ausgelöst werden (*reaktive Kontrolle*). Eine ganz ähnliche Annahme haben wir bereits bei der Diskussion volitionstheoretischer Ansätze (▶ Abschn. 9.4.3) kennengelernt, in denen ebenfalls Konflikte zwischen Absichten und konkurrierenden Reaktionstendenzen als ein entscheidendes Signal für die Mobilisierung volitionaler Kontrollprozesse betrachtet werden (vgl. auch Kotabe und Hofmann 2015; Kuhl 1983). Die derzeit einflussreichste Formulierung dieser Idee in der Kognitiven Neurowissenschaft ist die *Konfliktüberwachungstheorie* von Botvinick et al. (2001). Die zentrale Annahme der Theorie besagt, dass der dACC im medialen Frontalhirn an der Überwachung von Reaktionskonflikten beteiligt ist und im Falle eines Konflikts signalisiert, dass verstärkte kognitive Kontrolle notwendig ist. Dieses Konfliktsignal wird an andere Hirnregionen, insbesondere den dorsolateralen Präfrontalcortex weitergeleitet, wo es eine verstärkte Aktivierung der aktuellen Ziel- oder Aufgabenrepräsentation auslöst und damit eine effektivere Top-down-Modulation aufgabenrelevanter Verarbeitungssysteme bewirkt (◘ Abb. 9.23).

Auf der Ebene des Verhaltens lässt sich aus der Konfliktüberwachungstheorie die Vorhersage ableiten, dass störende Einflüsse aufgabenirrelevanter Informationen oder konkurrierender Reaktionen unmittelbar nach einem Reaktionskonflikt als Folge der verstärkten Mobilisierung kognitiver Kontrolle reduziert sein sollten. Im Einklang damit wurde in zahlreichen Experimenten gefunden, dass Interferenzeffekte in Konfliktaufgaben wie dem Stroop-Test nach einem Reaktionskonflikt kleiner ausfallen als nach konfliktfreien Durchgängen (*Konfliktadaptationseffekt*). Beispielsweise ist die Stroop-Interferenz (also die Reaktionszeitverlängerung bei inkongruenten im Vergleich zu kongruenten Reizen) kleiner, wenn im Durchgang zuvor bereits ein inkongruenter Reiz verarbeitet wurde, als wenn ein inkongruenter Reiz auf einen kongruenten Reiz folgt (Kerns et al. 2004) (◘ Abb. 9.24). Analoge Effekte wurden in der Flankierreizaufgabe (Eriksen und Eriksen 1974) gefunden, in der die Probanden auf einen zentralen Zielreiz (z. B. einen nach rechts oder links zeigenden Pfeil) reagieren müssen, der von aufgabenirrelevanten Störreizen flankiert wird. Reaktionsinkongruente Reize (z. B. <<><<) lösen einen Reaktionskonflikt aus und führen im Vergleich zu kongruenten Reizen (z. B. <<<<<) zu verlängerten Reaktionszeiten. Auch dieser Interferenzeffekt ist in der Regel kleiner, wenn ein inkongruenter Reiz auf einen anderen inkongruenten Reiz folgt (Gratton et al. 1992). Mittels EEG-Messungen konnte zudem gezeigt werden, dass Konflikte in inkongruenten Durchgängen der Flankierreizaufgabe bereits nach wenigen Hundert Millisekunden eine verstärkte Fokussierung der Aufmerksamkeit auf den zentralen Zielreiz und eine Inhibition der irrelevanten Flankierreize auslösen (Scherbaum et al. 2011). Diese Befunde stehen in Einklang mit der Annahme, dass Konflikte automatisch eine verstärkte Mobilisierung kognitiver Kontrolle auslösen (s. aber ▶ Zur Vertiefung 9.5).

Auf neuronaler Ebene postuliert die Konfliktüberwachungstheorie, dass die Registrierung von Reaktionskonflikten durch den dACC vermittelt wird. Aufgrund von EEG-Studien war man ursprünglich davon ausgegangen, dass der dACC primär an der Registrierung von *Fehlern* beteiligt ist. So lösen Fehler in Reaktionsaufgaben im ereigniskorrelierten Potenzial (EKP) eine negative Potenzialverschiebung, die sogenannte fehlerbezogene Negativierung (*error-related negativity*; ERN) aus, deren neuronalen Generatoren im ACC lokalisiert wurden (Dehaene et al. 1994; Falkenstein et al. 1995; Übersicht in Ullsperger et al. 2014). Allerdings haben Bildgebungsstudien gezeigt, dass der dACC auch dann durch Reaktionskonflikte aktiviert wird, wenn diese nicht zu einem Fehler führen (Carter et al. 1998). Direkte Evidenz für die Konfliktüberwachungshypothese stammt ferner aus einer fMRI-Studie, in der Probanden eine Stroop-Farbbenennungsaufgabe bearbeiteten (Kerns et al. 2004). Dabei zeigte sich zunächst im Verhalten erwartungsgemäß ein Konfliktadaptationseffekt: Die Stroop-Interferenz war nach inkongruenten Durchgängen signifikant kleiner als nach kongruenten Durchgängen (◘ Abb. 9.24). Die Analyse der Hirnaktivität ergab, dass inkongruente im Vergleich zu kongruenten Reizen eine stärkere Aktivierung im ACC auslösten, wobei dieser Aktivierungsanstieg in konflikthaltigen Durchgängen nach inkongruenten Durchgängen kleiner ausfiel als nach kongruenten Durchgängen. Darüber hinaus waren Durchgänge, in denen der Konfliktadaptationseffekt besonders groß ausfiel, mit einer höheren Aktivierung im rechten dorsolateralen Präfrontalcortex assoziiert. Dies steht im Einklang damit, dass der dorsolaterale Präfrontalcortex nach Konflikten eine verstärkte Top-down-Kontrolle vermittelt. Zudem war die ACC-Aktivierung in Konfliktdurchgängen positiv mit der Aktivierung im dorsolateralen Präfrontalcortex im darauffolgenden Durchgang korreliert, was konsistent mit der Vermutung ist, dass der ACC bei Konflikten eine verstärkte Mobilisierung kognitiver Kontrolle auslöste, die im nachfolgenden Durchgang zu einer verstärkten Top-down-Modulation durch den dorsolateralen Präfrontalcortex führte.

Während behaviorale Experimente und Bildgebungsstudien Belege für die Konfliktüberwachungstheorie erbracht haben, gibt es allerdings auch Studien mit Patienten mit Läsionen im ACC sowie Einzelzellableitungsstudien bei Affen, die keine Evidenz dafür ergeben haben, dass der dACC notwendig für Konfliktadaptationseffekte ist (kritische Übersicht in Cole et al. 2009). Während die Ursachen für diese Diskrepanzen noch ungeklärt sind, wurde in einer rezenten Einzelzellableitungsstudie erstmals Evidenz dafür gefunden, dass es im dACC von Affen offenbar Neurone gibt, die durch Konflikte aufgrund von Störreizen aktiviert werden und deren Aktivität mit nachfolgenden Kontrollanpassungen korreliert ist (Ebitz und Platt 2015).

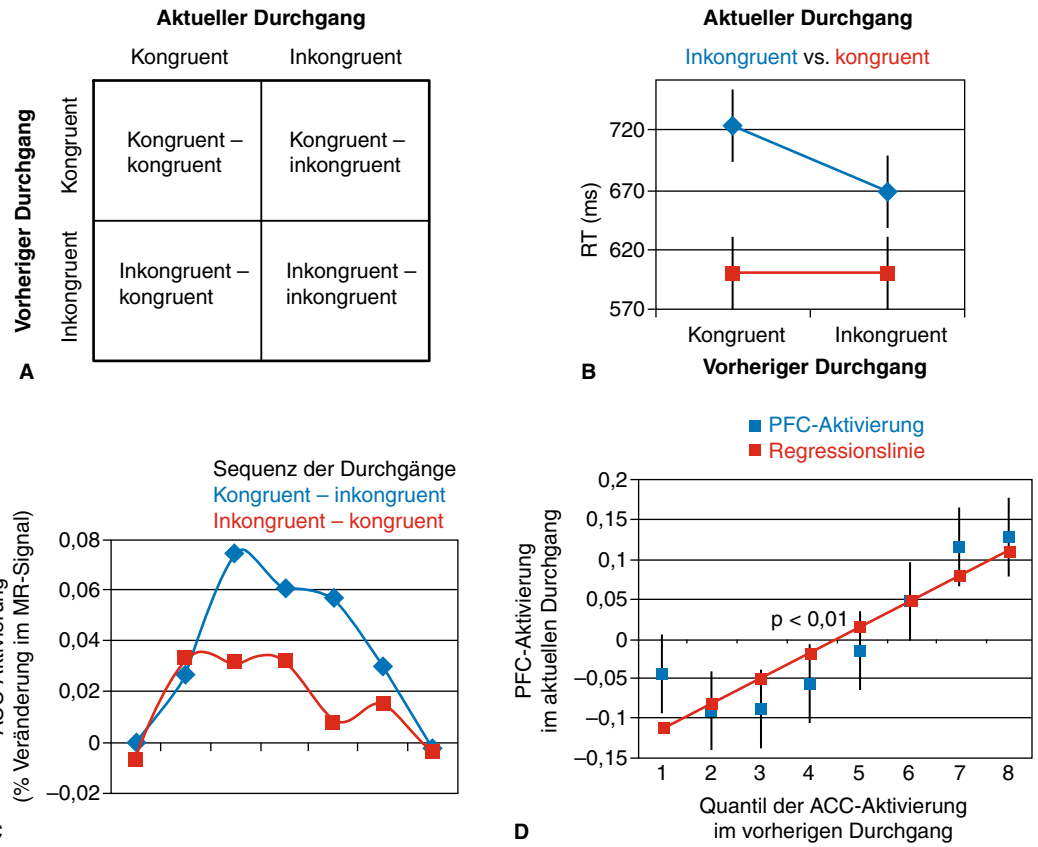


Abb. 9.24 fMRI-Studie von Kerns et al. (2004) zur Rolle des dACC bei der Konfliktadaptation in der Stroop-Aufgabe. **A** Versuchsdesign mit den vier möglichen Sequenzen kongruenter und inkongruenter in direkt aufeinanderfolgenden Durchgängen. **B** Reaktionszeiten für kongruente und inkongruente Stroop-Reize in Abhängigkeit davon, ob der vorhergehende Reiz kongruent oder inkongruent war. **C** Zeitverlauf der Aktivierung im ACC in inkongruenten Durchgängen, die auf kongruente vs. inkongruente Durchgänge folgten. **D** Zusammenhang zwischen der Aktivierung im dorsolateralen Präfrontalcortex im aktuellen Versuchsdurchgang und der Aktivierung im ACC im vorherigen Durchgang. (Adaptiert nach Kerns et al. 2004; mit freundl. Genehmigung von © The American Association for the Advancement of Science. All Rights Reserved)

Zur Vertiefung 9.5

Spiegeln Konfliktadaptationseffekte die Mobilisierung kognitiver Kontrolle?

Während Konfliktadaptationseffekte zunächst als starker Beleg für die Konfliktüberwachungstheorie betrachtet wurden, wurden auch alternative Erklärungen vorgeschlagen, die diese Effekte nicht auf eine Mobilisierung erhöhter kognitiver Kontrolle zurückführen (Hommel et al. 2004; Mayr et al. 2003). So haben beispielsweise Mayr et al. (2003) darauf hingewiesen, dass in Aufgaben mit nur zwei Reaktionsalternativen (z. B. Flankierreizaufgaben, in denen auf nach links oder rechts zeigende Pfeile reagiert werden soll) bestimmte Abfolgen von kongruenten und inkongruenten Reizen mit einem höheren Anteil identischer Reizwiederholungen verbunden sind, wenn alle möglichen Reize gleich häufig verwendet werden. Folgen nämlich zwei inkongruente Reize aufeinander, wird zwangsläufig in 50 % der Durchgänge der identische Reiz wiederholt (d. h. <>< folgt auf <><, oder >>< folgt auf >><), während es bei Übergängen von kongruenten zu inkongruenten Reizen keine identischen Reizwiederholungen geben kann. Da Reizwiederholungen zu extrem schnellen Reaktionszeiten führen, könnte dies erklären, warum inkongruente Reize nach einem inkongruenten Reiz schnellere Reaktionszeiten produzieren als inkongruente Reize nach kongruenten Reizen.

Tatsächlich konnten Mayr et al. (2003) zeigen, dass Konfliktadaptationseffekte verschwanden, wenn exakte Reizwiederholungen von der Datenanalyse ausgeschlossen wurden. Allerdings wurde in weiteren Experimenten gezeigt, dass Konfliktadaptationseffekte häufig auch dann statistisch signifikant bleiben (wenngleich sie in der Regel numerisch kleiner ausfallen), wenn der Einfluss identischer Reizwiederholungen eliminiert wird (Egner und Hirsch 2005; Kerns et al. 2004; Ullsperger et al. 2005). Leider führen einige der Maßnahmen zur Vermeidung von Priming-Effekten aufgrund identischer Reizwiederholungen wiederum zu anderen Konfundierungen (detaillierte Diskussion in Egner 2014). Insgesamt kann nach derzeitigem Stand davon ausgegangen werden, dass Konfliktadaptationseffekte sowohl episodische Priming-Effekte als auch echte Kontrollanpassungen spiegeln. Es ist insofern wichtig, Befunde, die auf den ersten Blick für Konfliktadaptationseffekte sprechen, stets kritisch auf mögliche alternative Erklärungen zu prüfen.

▪ Regulation kognitiver Kontrolle als Kosten-Nutzen-Abwägung: Die Expected-Value-of-Control-Theorie

Die Überwachung von Reaktionskonflikten ist nicht die einzige Funktion, die dem dACC zugeschrieben wird, wobei sich verschiedene Theorien nicht notwendigerweise wechselseitig ausschließen müssen, da der dACC vermutlich an multiplen Funktionen beteiligt ist. Unter anderem ist vorgeschlagen worden, dass die Funktion des dACC nicht primär die Überwachung von Konflikten, sondern die Vorhersage der Wahrscheinlichkeit von Fehlern sei (Brown und Braver 2005). Andere Ansätze gehen davon, dass der dACC ganz allgemein durch negative affektive Ereignisse aktiviert wird (Shackman et al. 2011) und an der Verarbeitung der Kosten von Handlungen und der Vorhersage negativer Konsequenzen beteiligt ist (Übersicht in Alexander und Brown 2010). Da Konflikte selbst emotional aversive Ereignisse darstellen (Fritz und Dreisbach 2013), könnten Konfliktadaptationseffekte zumindest teilweise über die negative affektive Valenz von Konflikten vermittelt sein (Dreisbach und Fischer 2012).

Ein Versuch, unterschiedliche Theorien und Befunde zum dACC zu integrieren, ist die Expected-Value-of Control-(EVC-) Theorie von Shenhav et al. (2013). Ausgangspunkt ist die Überlegung, dass die Mobilisierung kognitiver Kontrollressourcen und die möglichst optimale Zuteilung dieser Ressourcen zu bestimmten Aufgaben auf einer Abwägung des zu erwartenden Nutzens kognitiver Kontrolle beruhen sollten. Um den Nutzen kognitiver Kontrolle einzuschätzen, muss berücksichtigt werden wie viel Kontrolle benötigt wird, um ein bestimmtes Leistungsniveau in einer Aufgabe zu erreichen, wie hoch die zu erwartende Belohnung bei einem gegebenen Leistungsniveau ist und wie hoch die Kosten sind, die mit der Mobilisierung von Kontrolle verbunden sind (z. B. aufgrund subjektiver Anstrengung, erhöhten Energie- und Zeitbedarfs und komplexerer kognitiver Prozesse). Nach der EVC-Theorie integriert der dACC diese Informationen und generiert auf der Basis einer Einschätzung des erwarteten Wertes kognitiver Kontrolle ein Kontrollsignal, das spezifiziert, wie viele Kontrollressourcen mobilisiert und in welche Aufgaben oder Ziele diese Kontrollressourcen investiert werden sollten. Um diese Funktion zu erfüllen, soll der dACC der EVC-Theorie zufolge Informationen aus zahlreichen Hirnregionen überwachen, die an der Verarbeitung von antizipierten Belohnungen und Bestrafungen, motivationalen Anreizen, Handlungseffekten und Konflikten beteiligt sind (u. a. der anterioren Insula, der Amygdala, dem ventromedialen Präfrontalcortex, den Basalganglien sowie dopaminergen Strukturen im Mittelhirn). Reaktionskonflikte sind dabei nur eine von vielen Informationsquellen, die der dACC überwacht, um den erwarteten Wert der Kontrolle einzuschätzen. Die eigentliche Implementierung von Kontrollprozessen wird wie in der ursprünglichen Konfliktüberwachungstheorie Hirnregionen wie dem dorsolateralen Präfrontalcortex zugeschrieben. Die EVC-Theorie ist ein interessanter Ansatz, um zu erklären, wann und in welcher Intensität kognitive Kontrolle mobilisiert wird, wobei derzeit aus der Theorie spezifische computationale Modelle abgeleitet werden, um sie einer direkten empirischen Überprüfung zugänglich zu machen.

9.6 Kontrolldilemmata und Metakontrollprobleme

Zum Abschluss unseres Überblicks über die Forschung zu Volition und kognitiver Kontrolle soll auf ein grundlegendes, aber bislang wenig erforschtes Problem eingegangen werden, das insbesondere dann offensichtlich wird, wenn man den Kontext relativ einfacher Laboraufgaben verlässt und adaptive Kontrollprobleme betrachtet, die Lebewesen in einer sich kontinuierlich verändernden Umwelt bewältigen müssen. In solchen Umwelten müssen Lebewesen bei der zielgerichteten Verhaltenssteuerung multiple und teilweise antagonistische adaptive Anforderungen bewältigen, die im Folgenden als **Kontrolldilemmata** bezeichnet werden (Goschke 1996, 2003, 2013). Beispielsweise müssen einerseits Ziele gegen störende Information abgeschirmt werden (was idealerweise bedeuten würde, irrelevante Information möglichst effektiv auszublenden), während andererseits potenziell wichtige Reize wie z. B. Gefahrensignale oder unerwartete Belohnungsoptionen nicht übersehen werden sollten (was idealerweise eine möglich umfassende Überwachung auch von aufgabenirrelevanten Informationen erfordern würde). Unterschiedliche Kontrollzustände (z. B. eine eng fokussierte vs. eine breit verteilte Aufmerksamkeit) gehen also mit komplementären Nutzen und Kosten einher, was bedeutet, dass Lebewesen vor dem *Metakontrollproblem* stehen, wie die Balance zwischen komplementären Kontrollzuständen möglichst optimal zu adjustieren ist.

9.6.1 Kontrolldilemmata

Hier sollen exemplarisch drei solcher Kontrolldilemmata genauer beschrieben werden (◘ Abb. 9.25) (Diskussion weiterer Kontrolldilemmata in Goschke 1996, 2003, 2013; Goschke und Bolte 2014).

Bedürfnis-Antizipations-Dilemma Wie bei der Darstellung volitionaler Handlungskontrollstrategien diskutiert wurde, ist es für die Erreichung vieler langfristiger Ziele notwendig, aktuelle Bedürfnisse aufzuschieben und Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen abzuschirmen. Allerdings wäre es für ein Lebewesen kaum adaptiv, wenn es über so viel „Willensstärke" verfügen würde, dass es wichtige Bedürfnisse komplett und dauerhaft unterdrücken könnte. Wie aber wird entschieden, bis zu welchem Grad ein aktuelles Bedürfnis zugunsten eines langfristigen Zieles unterdrückt werden sollte? Wie stark sollte der subjektive Nutzen antizipierter zukünftiger Anreize im Vergleich zum Nutzen unmittelbar verfügbarer Anreize abgewertet werden? Lebewesen stehen also vor dem Metakontrollproblem einzuschätzen, bis zu welchem Grad eine momentane Verschlechterung der aktuellen Bedürfnislage zugunsten eines langfristigen Zieles in Kauf genommen werden sollte und wann es besser ist, einem aktuellen Bedürfnis nachzugeben oder eine unmittelbar verfügbare Belohnung einem langfristigen Ziel vorzuziehen.

Persistenz-Flexibilitäts-Dilemma Um langfristige Ziele zu erreichen, müssen Absichten mitunter gegen den Widerstand konkurrierender Motivationstendenzen oder Gewohnheiten

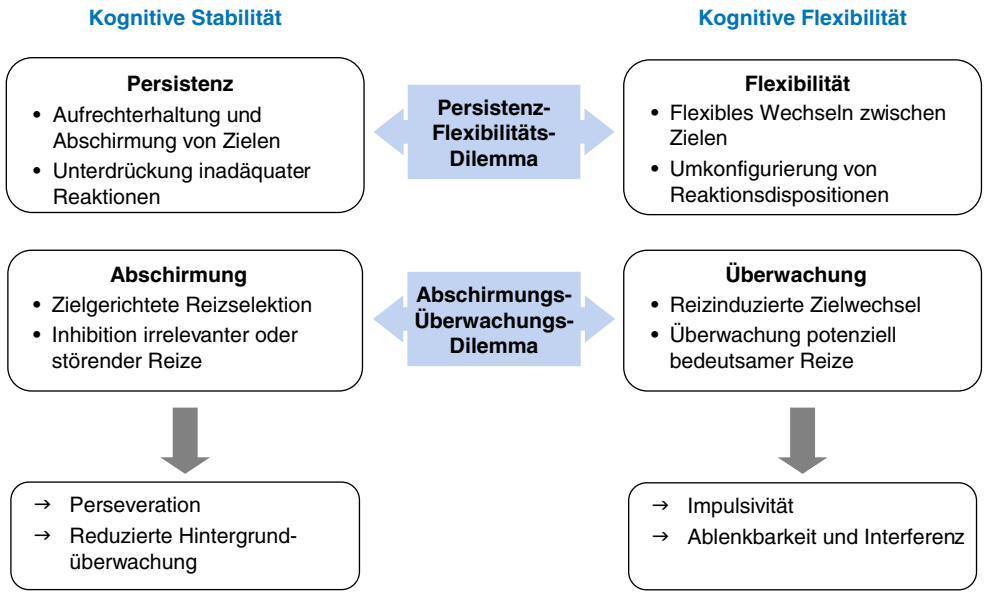


Abb. 9.25 Beispiel für zwei Kontrolldilemmata bei der Verhaltenssteuerung

aufrechterhalten werden. Auf der anderen Seite ist es in vielen Situationen ebenso wichtig, Handlungen zu unterbrechen, Absichten aufzugeben und zu einem anderen Ziel zu wechseln. So wäre es wenig adaptiv, wenn wir in Reaktion auf bedeutsame, aber konflikthaltige Reize (z. B. Brandgeruch) noch stärker an einem gerade aktivierten Ziel (z. B. Lesen eines Fachartikels) festhalten würden, statt möglichst schnell auf ein anderes Ziel zu wechseln (die Feuerwehr zu rufen). Diese nur scheinbar triviale Tatsache wirft ein grundlegendes Problem auf. Wenn volitionale Strategien dazu dienen, eine Absicht trotz konkurrierender Motivationstendenzen aufrechtzuerhalten und zu verhindern, dass die Absicht durch neuerliches Abwägen infrage gestellt wird, wie wird dann im Falle eines Konflikts entschieden, ob die Absicht weiter abgeschirmt oder ob auf ein andere Ziel gewechselt werden sollte?

Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma Für kohärentes, zielgerichtetes Verhalten ist es erforderlich, dass selektiv Informationen verarbeitet werden, die relevant für die Realisierung der aktuellen Intention sind, während störende Reize ausgeblendet werden sollten, um Interferenz zu vermeiden (z. B. wenn man versucht, eine benachbarte Party zu ignorieren, während man sich auf eine wichtige Arbeit konzentriert). Wir haben gesehen, dass dies durch die Top-down-Modulation perzeptueller Verarbeitungssysteme durch aktiv gehaltene Zielrepräsentationen vermittelt wird. Auf der anderen Seite ist es aber nicht minder wichtig, die Umwelt kontinuierlich auf potenziell bedeutsame Reize zu überwachen, selbst wenn diese Reize nicht relevant für das aktuelle Ziel sind oder sogar mit der Zielverfolgung interferieren. Es wäre wenig adaptiv, wenn wir Informationen, die nicht unmittelbar relevant für eine aktuelle Aufgabe sind, so effizient ausblenden könnten, dass wir auch potenziell bedeutsame Reize nicht mehr wahrnehmen würden. Es muss also offenbar eine *Hintergrundüberwachung* geben, durch die aufgabenirrelevante Reize zumindest so weit verarbeitet werden, dass ihre Relevanz für wichtige Bedürfnisse oder übergeordnete Ziele bewertet werden kann, sodass solche Reize ggf. einen Zielwechsel auslösen können. Interessanterweise gibt es Hinweise darauf, dass diese beiden komplementären Aufmerksamkeitsfunktionen durch teilweise separate Netzwerke von Hirnregionen vermittelt werden (Corbetta et al. 2008; Gruber et al. 2010; Vossel et al. 2014). Während die zielgerichtete Selektion aufgabenrelevanter Informationen primär durch ein dorsales frontoparietales Netzwerk vermittelt wird, ist an der reizgesteuerten Anziehung der Aufmerksamkeit durch unerwartete oder potenziell bedeutsame Reize ein ventrales, eher rechtshemisphärisches Netzwerk beteiligt, das den temporoparietalen und inferioren frontalen Cortex einschließt. Das Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma wirft also die Frage auf, wie die Interaktion und Balance dieser beiden Netzwerke kontextabhängig reguliert wird.

Im Lichte dieser Kontrolldilemmata stellt sich zielgerichtete Handlungssteuerung als ein Optimierungsproblem dar, das einen dynamischen und kontextabhängigen Ausgleich zwischen den komplementären Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Kontrollzustände erfordert (Goschke 1996, 2003, 2013). So reduziert eine starke Zielabschirmung die Interferenz durch störende Reize und konkurrierende Reaktionen, erhöht aber gleichzeitig das Risiko von unflexiblem und perseverativem Verhalten. Umgekehrt fördert eine geringe Zielabschirmung das flexible Wechseln zwischen Zielen, erhöht aber gleichzeitig die Ablenkbarkeit und Interferenzanfälligkeit.

Solche komplementären Vor- und Nachteile einer verstärkten Zielabschirmung sind auch empirisch demonstriert worden. Im Zusammenhang mit der Konfliktüberwachungstheorie haben wir gesehen, dass Reaktionskonflikte in der Regel zu einer Mobilisierung von Kontrolle und einer verstärkten Abschirmung der aktuellen Aufgabenrepräsentation führt (▶ Abschn. 9.5.5). Dies ist auch sinnvoll, solange sich eine Aufgabe oder ein Ziel nicht verändert, wie es in Experimenten zur Konfliktüberwachung in der Regel der Fall ist. Im Gegensatz dazu kann eine verstärkte Zielabschirmung negative Auswirkungen haben, wenn Aufgaben wechseln oder man die Umwelt auf potenziell relevante Reize überwachen muss. In der Tat wurde gezeigt, dass eine durch Reaktionskonflikte ausgelöste verstärkte Zielabschirmung zu höheren Reaktionszeitkosten führte, wenn Probanden nach dem

Konflikt auf eine andere Aufgabe wechseln mussten (Braem et al. 2013; Brown et al. 2007; Goschke 2000). Wie von der Kontrolldilemmatheorie vorhergesagt, führte eine verstärkte Zielabschirmung also zu reduzierter kognitiver Flexibilität. In die gleiche Richtung weist ein Experiment (Goschke und Dreisbach 2008), in dem Probanden kontinuierlich eine primäre Aufgabe ausführen und gleichzeitig potenziell relevante Reize überwachen mussten. In der primären Aufgabe sollten die Probanden auf die Richtung von Pfeilen reagieren, die an unterschiedlichen Orten erscheinen konnten. Dabei wurde in einigen Durchgängen ein Reaktionskonflikt ausgelöst, indem der Pfeil an einem inkongruenten Ort erschien (z. B. erschien ein nach links weisender Pfeil an der rechten Position) (Simon-Effekt; Simon 1969). Zusätzlich zur Hauptaufgabe mussten die Probanden eine prospektive Gedächtnisaufgabe ausführen, in der sie immer dann, wenn der Pfeil an einem bestimmten Ort (z. B. unterhalb eines zentralen Fixationspunktes) erschien, die Leertaste drücken sollten. Die Aufgabe stellte die Probanden also vor ein Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma: Einerseits musste die Hauptaufgabe gegen Interferenz durch die irrelevante Ortsinformation abgeschirmt werden; andererseits mussten die Orte überwacht werden, um die prospektiven Gedächtnisreize nicht zu übersehen. Es zeigte sich, dass Reaktionskonflikte in der Hauptaufgabe dazu führten, dass die prospektiven Gedächtnisreize signifikant häufiger übersehen wurden als in konfliktfreien Durchgängen. Auch dies spricht in Einklang mit der Kontrolldilemmatheorie dafür, dass die durch den Konflikt in der Hauptaufgabe ausgelöste verstärkte Zielabschirmung zugleich die Hintergrundüberwachung der prospektiven Gedächtnisreize beeinträchtigte.

9.6.2 Metakontrollparameter

Die beschriebenen Kontrolldilemmata werfen die Frage auf, wie die Balance zwischen antagonistischen Anforderungen an die Handlungssteuerung dynamisch und kontextabhängig reguliert wird. Soll man in einer Konfliktsituation ein Ziel weiter gegen konkurrierende Motivationstendenzen abschirmen oder zugunsten eines möglicherweise wichtigeren Zieles aufgeben (*Persistenz-Flexibilitäts-Dilemma*)? Soll die Aufmerksamkeit selektiv auf zielrelevante Informationen fokussiert werden oder soll die Umwelt auf störende, aber potenziell bedeutsame Reize überwacht werden (*Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma*)? Ein Ansatz zu Beantwortung dieser Fragen beruht auf der Annahme, dass die Balance zwischen komplementären Kontrollzuständen durch eine Reihe von *Metakontrollparametern* reguliert wird. Ein Beispiel für einen solchen Kontrollparameter ist die *Aktualisierungsschwelle*, die reguliert, wie leicht neue Information Zugang zum Arbeitsgedächtnis erhält und damit die Balance zwischen Persistenz und Flexibilität moduliert. Ist die Zugangsschwelle hoch, werden Inhalte im Arbeitsgedächtnis effizient gegen störende Reize abgeschirmt. Ist die Schwelle niedrig, kann der Inhalt des Arbeitsgedächtnisses leicht durch neue Informationen aktualisiert werden, was das flexible Wechseln zwischen Zielen erleichtert, aber zugleich die Ablenkbarkeit durch irrelevante Reize erhöht. Ein weiterer Kontrollparameter ist die *Aufmerksamkeitsbreite*, die reguliert ob die Aufmerksamkeit eng auf bestimmte Orte, Reizdimensionen oder Kategorien fokussiert ist oder ob sie breit über verschiedene Merkmalsdimensionen oder Reizkategorien verteilt wird. Dieser Kontrollparameter reguliert also die Balance zwischen Abschirmung und Hintergrundüberwachung.

Die entscheidende Frage ist, wie diese Kontrollparameter an wechselnde Bedingungen angepasst werden. Dabei spielen multiple Faktoren auf unterschiedlichen Zeitskalen eine Rolle. So werden auf einer längerfristigen Zeitskala Kontrollparameter vermutlich durch Lernerfahrungen bestimmt. Beispielsweise sollte in einem konstanten Kontext, in dem selten zwischen Aufgaben gewechselt werden muss, oder in einem Kontext mit häufigen Konflikten und einem hohen Interferenzpotenzial gelernt werden, dass es sinnvoll ist, die Aktualisierungsschwelle relativ hoch und die Aufmerksamkeitsbreite niedrig zu setzen. Dagegen sollte in einem variablen Kontext mit häufigen Aufgabenwechseln oder in einer interferenzfreien Umwelt, in der Konflikte sehr selten auftreten, die Aktualisierungsschwelle eher niedrig und die Aufmerksamkeitsbreite hoch gesetzt werden (Jiang et al. 2014). Darüber hinaus sollten Lebewesen in einer Umwelt mit stabilen Belohnungskontingenzen lernen, sich auf in der Vergangenheit bewährte Verhaltensweisen zu verlassen (*Exploitation*), während sie in einer variablen Umwelt mit häufig sich ändernden Belohnungskontingenzen vermehrt neue Handlungsoptionen austesten sollten, um herauszufinden, ob sich Belohnungskontingenzen verändert haben und andere Handlungen zu Belohnungen führen als in der Vergangenheit (*Exploration*).

9.6.3 Emotionale Modulation von Kontrollparametern

Auf einer kürzeren Zeitskala gibt es Hinweise darauf, dass Kontrollparameter durch Emotionen moduliert werden (Chiew und Braver 2011; Dreisbach und Fischer 2012; Goschke und Bolte 2014). So scheinen positive Emotionen mit erhöhter kognitiver Flexibilität einherzugehen (Isen 2007), was sich u. a. in einem breiteren Aufmerksamkeitsfokus (Fredrickson 2013; Rowe et al. 2007), einer weitflächigen Aktivierung entfernter Assoziationen im semantischen Gedächtnis (Bolte et al. 2003; Rowe et al. 2007) und einer reduzierten Aufrechterhaltung und Abschirmung von Informationen im Arbeitsgedächtnis (Frober und Dreisbach 2014) manifestiert. Um spezifisch die Effekte von positivem Affekt auf die Balance zwischen kognitiver Stabilität und Flexibilität zu untersuchen, haben Dreisbach und Goschke (2004) ein Aufgabenwechselparadigma verwendet, in dem Probanden in jedem Durchgang ein roter und ein grüner Buchstabe dargeboten wurde und sie entscheiden sollten, ob der rote Buchstabe ein Vokal oder Konsonant ist, während die grünen Buchstaben ignoriert werden konnten. Nach jeweils 40 Durchgängen wechselte die relevante Farbe. In einer *Perseverationsbedingung* mussten die Probanden nach dem Wechsel auf Reize in einer *neuen* Farbe (Blau) reagieren, während die irrelevanten Störreize in der vormals relevanten Farbe (Rot) erschienen. Eine Perseveration der zuvor relevanten Regel („rot“) sollte hier zu Reaktionszeitkosten führen. In einer *Distraktibilitätsbedingung* mussten die Proban-

den auf die zuvor irrelevante Farbe (Grün) wechseln, während die irrelevanten Störreize eine neue Farbe (Blau) hatten. In dieser Bedingung sollte eine verstärkte Neigung, auf *neue* Reize zu achten, zu erhöhten Reaktionszeitkosten führen. Wurde vor jedem Reiz kurzzeitig ein emotional positives Bilder dargeboten, so führte dies im Vergleich zu Durchgängen mit emotional neutralen Bildern dazu, dass die Wechselkosten in der Perseverationsbedingung signifikant reduziert wurden, wohingegen sie in der Distraktibilitätsbedingung signifikant größer ausfielen (Abb. 9.26). Positiver Affekt reduzierte also die Neigung zur Perseveration, ging aber gleichzeitig mit Kosten in Form erhöhter Ablenkbarkeit einher.

In einem neueren Experiment wurde dieser Befund repliziert und in wichtiger Hinsicht erweitert (Liu und Wang 2014). Die Autoren verwendeten die gleiche Aufgabe wie Dreisbach und Goschke (2004), manipulierten aber zusätzlich zur Valenz der emotionalen Bilder auch deren motivationale Qualität. Hintergrund war eine Hypothese von Gable und Harmon-Jones (2012), nach der positive Emotionen, die mit einer niedrigen Annäherungsmotivation assoziiert sind (z. B. das positive Gefühl, das durch der Anblick einer schönen Landschaft ausgelöst wird), kognitive Flexibilität erhöhen, wohingegen positive Emotionen, die mit einer hohen Annäherungsmotivation verbunden ist (z. B. die freudige Erwartung, die durch den Anblick eines leckeren Desserts ausgelöst wird) im Gegenteil zu einer stärkeren Fokussierung der Aufmerksamkeit führen sollen. Tatsächlich fanden Liu und Wang (2014), dass positive emotionale Bilder mit einem geringen Anregungsgehalt für motivationale Annäherungstendenzen Perseveration reduzierten und Distraktibilität erhöhten. Dies repliziert die Ergebnisse von Dreisbach und Goschke (2004), die ebenfalls positive Bilder mit einer niedrigen Annäherungsmotivationsintensität verwendet hatten. Dagegen hatten positive Bilder, die mit einer hohen Annäherungsmotivation assoziiert waren – wie von Gable und Harmon-Jones (2012) vermutet – genau gegenteilige Effekte und gingen mit erhöhter Perseveration und reduzierter Distraktibilität einher (Abb. 9.26).

In Bezug auf die Aufmerksamkeitsbreite konnte ebenfalls gezeigt werden, dass positiver Affekt, der mit niedriger Annäherungsmotivation verbunden ist, mit einer größeren Aufmerksamkeitsbreite einhergeht (z. B. Rowe et al. 2007; Schmitz et al. 2009), während positiver Affekt, der mit einer hohen Annäherungsmotivation verbunden ist, eher zu einer stärkeren Fokussierung der Aufmerksamkeit führt (Domachowska et al. 2016; Harmon-Jones et al. 2012). Obwohl diese Befunde den Einfluss von Emotionen auf kognitive Kontrollparameter belegen (Übersicht in Dreisbach und Fischer 2012; Goschke und Bolte 2014), ist allerdings zunehmend deutlich geworden, dass emotionale Modulationen komplexer und fragiler sind, als man ursprünglich annahm. So konnten Effekte von positivem Affekt auf die Aufmerksamkeitsbreite nicht immer konsistent repliziert werden (Bruyneel et al. 2013), und es gibt Hinweise darauf, dass emotionale Modulationen kognitiver Kontrollparameter stärker als zunächst angenommen von spezifischen Aufgabenmerkmalen und weiteren Moderatorvariablen abhängen. Tatsächlich können solche Moderatorvariablen mitunter sogar zu gegensätzlichen Effekten von Emotionen führen (Domachowska et al. 2016; Huntsinger 2012; Liu und Wang 2014). Es ist daher ein wichtiges Forschungsziel, die Randbedingungen, Moderatoren und Mechanismen emotionaler Einflüsse auf Kontrollparameter noch systematischer als bisher zu untersuchen.

9.6.4 Neuromodulation kognitiver Kontrolle

Auf neuronaler Ebene gibt es Hinweise darauf, dass Metakontrollparameter den Einfluss neuromodulatorischer Systeme auf die Verarbeitung im Präfrontalcortex und in den Basalganglien spiegeln (Doya 2008). Ohne hier genauer auf die sehr komplexe Befundlage eingehen zu können, kann festgehalten werden, dass für die Balance von kognitiver Stabilität (*Zielabschirmung*) und Flexibilität (*Zielaktualisierung*) insbesondere der Neurotransmitter Dopamin von Bedeutung ist. Der präfrontale Cortex enthält eine hohe Konzentration von Dopaminrezeptoren und wird in seiner Funktionsweise über aufsteigende Bahnen durch dopaminerge Neurone im Mittelhirn moduliert. Evidenz aus Einzelzellableitungen in Tieren sowie aus pharmakologischen und genetischen Bildgebungsstudien sprechen dafür, dass die aktive Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis gemäß einer umgekehrt U-förmigen Beziehung vom Dopaminspiegel im präfrontalen Cortex beeinflusst wird (Arnsten 2009; Cools und D'Esposito 2011). Ein optimales (mittleres) Dopaminniveau erhöht die Abschirmung von aktiven Repräsentationen gegen Interferenz durch eine Erhöhung des Signal-Rausch-Abstands in der neuronalen Verarbeitung, wodurch aber gleichzeitig die Fähigkeit vermindert wird, das Arbeitsgedächtnis schnell zu aktualisieren und flexibel zwischen Repräsentationen zu wechseln. Umgekehrt führt ein zu niedriger oder zu hoher Dopaminspiegel zu Beeinträchtigungen bei der Aufrechterhaltung von Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis und erhöht die Interferenzanfälligkeit (Durstewitz und Seamans 2002; O'Reilly 2006). Durstewitz und Seamans (2008) haben ein detailliertes neurobiologisches Modell entwickelt, dem zufolge der präfrontale Cortex in zwei Kontrollmodi operieren kann, die von unterschiedlichen Dopaminrezeptortypen abhängen. In einem durch D1-Rezeptoren dominierten Zustand bilden dem Modell zufolge Repräsentationen im Präfrontalcortex stabile Attraktorzustände, die effektiv gegen Störungen abgeschirmt sind. In einem durch D2-Rezeptoren dominierten Zustand soll dagegen die Verarbeitung durch niedrige Barrieren zwischen Attraktoren charakterisiert sein, was das flexible Wechseln fördert, aber die Interferenzanfälligkeit erhöht. Diese Annahmen stellen ein mögliches Modell dafür dar, wie die Aktualisierungsschwelle, die als Metakontrollparameter die Balance zwischen Stabilität und Flexibilität reguliert, neurobiologisch implementiert sein könnte. Darüber hinaus wird neben der Rolle von Dopamin im Präfrontalcortex in aktuellen Theorien zunehmend auch auf die Bedeutung dopaminerger Prozesse in den Basalganglien für die Regulation der Stabilitäts-Flexibilitäts-Balance fokussiert (Cools und D'Esposito 2011; van Schouwenburg et al. 2010).

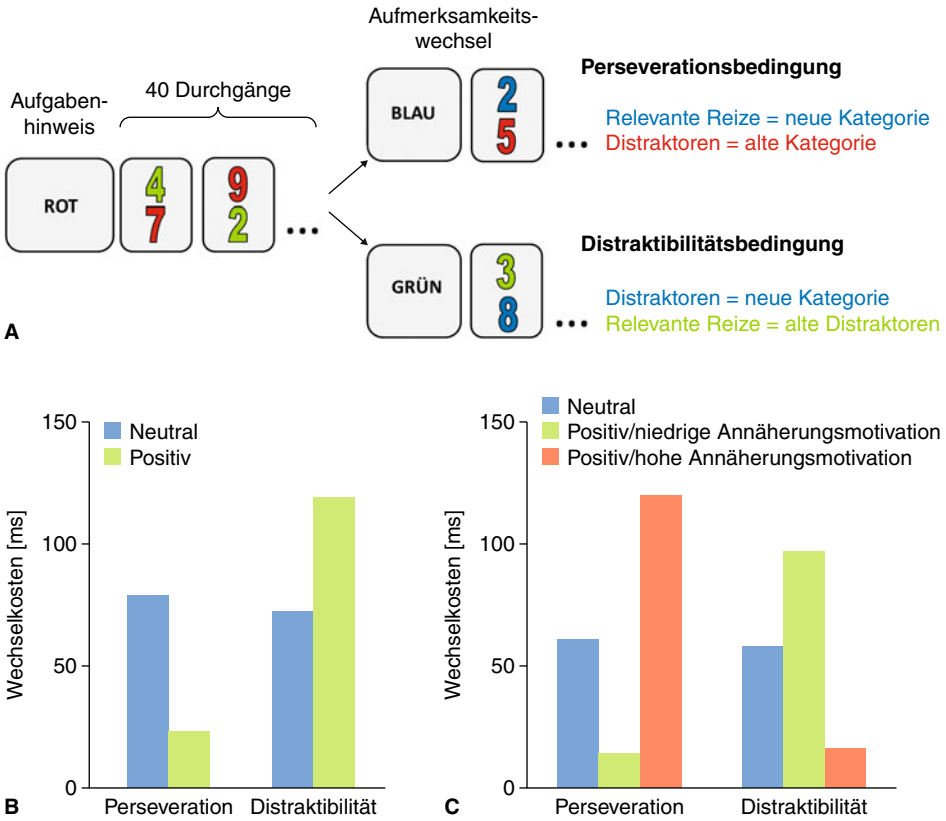


Abb. 9.26 **A** Paradigma des Experiments von Dreisbach und Goschke (2004) zum Einfluss von positivem Affekt auf den Aufmerksamkeitswechsel. **B** Wechselkosten in der Perseverations- und Distraktibilitätsbedingung nach der Darbietung emotional positiver oder neutraler Bilder im Experiment von Dreisbach und Goschke (2004). **C** Wechselkosten in der Perseverations- und Distraktibilitätsbedingung nach der Darbietung emotional positiver Bilder, die mit hoher oder niedriger Annäherungsmotivation assoziiert waren. (Nach Liu und Wang 2014)

9.7 Anwendungsbeispiele

Neben ihrer Bedeutung für die Grundlagenforschung sind Einsichten in die kognitiven und neuronalen Mechanismen kognitiver Kontrolle relevant für zahlreiche praktische Anwendungsfelder. Zum Abschluss soll kurz auf (1) die Bedeutung kognitiver Kontrollprozesse für Beeinträchtigungen der Selbststeuerung bei psychischen Störungen, (2) Möglichkeiten zum Training kognitiver Kontrollfähigkeiten und (3) Implikationen der Volitionsforschung für gesellschaftliche und ethische Fragen eingegangen werden.

Beeinträchtigte kognitive Kontrolle bei psychischen Störungen

Viele nachteilige oder schädliche Verhaltensweisen im Alltag (z. B. ungesunde Ernährung, mangelnde Bewegung, impulsive Aggression, ungenügende Ausdauer im schulischen Kontext) als auch zahlreiche psychische Störungen (z. B. Substanzgebrauchsstörungen, pathologisches Glücksspielen, Essstörungen, Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörungen, Zwangsstörungen und bestimmte Formen von Depression und Angststörungen) sind durch eine eingeschränkte willentliche Kontrolle über die eigenen Gedanken, Gefühle oder Handlungen charakterisiert (Goschke 2014). Angesichts der negativen persönlichen Konsequenzen und hohen gesellschaftlichen Kosten, die mit diesen Störungen verbunden sind (Wittchen et al. 2011), erhofft man sich vom Verständnis der zugrunde liegenden psychologischen und neurobiologischen Mechanismen langfristig verbesserte Präventions- und Interventionsmethoden sowie einen Übergang von symptomorientierten zu stärker auf Mechanismen basierenden Klassifikationen psychischer Störungen (Buckholtz und Meyer-Lindenberg 2012; Goschke 2014; Morris und Cuthbert 2012; Robbins et al. 2012). Dabei ist es wichtig zu sehen, dass psychische Störungen multikausal bedingt und neben den hier angesprochenen neuro-kognitiven Mechanismen soziale, genetische und entwicklungsbezogene Faktoren relevant sind. Zudem lassen sich Störungen nicht eins zu eins bestimmten Hirnregionen zuordnen, sondern gehen mit dysfunktionalen Interaktionen weit verteilter Netzwerke von Hirnsystemen einher (Buckholtz und Meyer-Lindenberg 2012; Bühringer et al. 2008; Goschke 2014; Menon 2011). Von besonderer Bedeutung sind im Kontext dieses Kapitels dabei (1) das bereits beschriebene *frontoparietale Kontrollnetzwerk*, (2) ein *Bewertungs- und Motivationsnetzwerk*, das den orbitofrontalen und ventromedialen präfrontalen Cortex und das ventrale Striatum umfasst, sowie (3) ein *Salienz- und Monitoringnetzwerk,* das den dACC und die anteriore Insula beinhaltet.

Dysfunktionen des *Bewertungs- und Motivationsnetzwerks* können zu unangemessenen Bewertungen von Handlungen und Zielen führen, die sich in unvorteilhaften oder scheinbar irrationalen Entscheidungen manifestieren. Ein paradigmatisches Beispiel dafür sind substanzbezogene Störungen, die durch starkes Verlangen nach der Droge, eine beeinträchtigte Kontrolle über den Substanzgebrauch und wiederholte Rückfälle trotz Einsicht in die negativen Konsequenzen des Verhaltens charakterisiert sind (Bühringer et al. 2012). Während anfänglicher riskanter Substanzkonsum von multiplen psychischen und sozialen Bedingungsfaktoren abhängt (Bühringer et al. 2012; Redish et al.

2008), ist gut belegt, dass für die Entwicklung und den Verlauf von Substanzstörungen dysfunktionale Interaktionen zwischen Bewertungs-, Überwachungs- und Kontrollnetzwerken von zentraler Bedeutung sind (Gell et al. 2016). So kommt es als Folge chronischen Substanzmissbrauchs zu neuroadaptiven Veränderungen im mesolimbischen Dopaminsystem, das von zentraler Bedeutung für das Belohnungslernen ist (Berridge 2012; Nutt et al. 2015; Volkow und Baler 2015). Als Folge davon lösen konditionierte Hinweisreize (z. B. mit der Droge assoziierte Situationen, Utensilien und soziale Kontexte) ein übermäßig starkes Verlangen aus, wohingegen der Wert natürlicher Verstärker und langfristiger Ziele abgewertet wird (MacKillop et al. 2011; Robinson und Berridge 2008). Langfristig kann es aufgrund weiterer Veränderungen in corticostriatalen Systemen zu einem Übergang von anreizmotiviertem Verhalten (das über den Präfrontalcortex und das ventrale Striatum kontrolliert wird) zu habituellem bis hin zu zwanghaftem Verhalten kommen (das über das dorsale Striatum kontrolliert wird) (Everitt und Robbins 2016).

Parallel dazu kommt es zu Dysfunktionen des *kognitiven Kontrollnetzwerks* (Goldstein und Volkow 2011; Tang et al. 2015; Volkow und Baler 2015), die sich in einer schlechteren Abschirmung von Zielen gegen unmittelbare Anreize, einer mangelnden Inhibition impulsiver oder habitueller Reaktionen und einer beeinträchtigten Stress- und Emotionsregulation äußern.

Darüber hinaus gibt es Belege dafür, dass Substanzstörungen mit Dysfunktionen des *Salienz- und Überwachungsnetzwerks* einhergehen. So wurde in funktionellen Bildgebungsstudien eine reduzierte fehlerbezogene Aktivität im ACC bei Opiatabhängigen (Forman et al. 2004), Cannabiskonsumenten (Hester et al. 2009), Kokainabhängigen (Franken et al. 2007) und Rauchern (Krönke et al. 2015) gefunden. Zusammengenommen können diese Dysfunktionen in Bewertungs-, Kontroll- und Überwachungsnetzwerken zu einem Teufelskreis führen, bei dem ein hypoaktives Überwachungsnetzwerk zu einer ungenügenden Fehler- und Konfliktüberwachung und einem verminderten Bewusstsein für negative Verhaltenskonsequenzen führt, was eine unzureichende Mobilisierung von Kontrollressourcen in Reaktion auf Konflikte zwischen langfristigen Zielen und unmittelbaren Drogenanreizen zur Folge hat. Dies wiederum beeinträchtigt die Inhibition impulsiver Reaktionen und die Top-down-Modulation von Wertsignalen durch langfristige Ziele, sodass es zu einer übermäßigen Gewichtung kurzfristiger Anreize kommt (Bühringer et al. 2008; Volkow und Baler 2015).

In Einklang mit diesen Annahmen haben rezente Studien (Berkman et al. 2011; Lopez et al. 2014) erste Belege dafür erbracht, dass neuronale Systeme, die an der Inhibition einfacher motorischer Reaktionen (▶ Abschn. 9.5.2) beteiligt sind, in der Tat auch relevant für Beeinträchtigungen der Selbstkontrolle in realen Alltagskontexten sind. In einer Studie (Berkman et al. 2011) wurde bei Personen, die das Rauchen aufgeben wollten, mittels einer Smartphone-App drei Wochen lang zu zufälligen Zeitpunkten erhoben, wie stark ihr momentanes Verlangen nach einer Zigarette war und wie viele Zigaretten sie tatsächlich geraucht hatten. Bei Probanden, die zuvor im MRT bei der Reaktionsinhibition in einer Go/NoGo-Aufgabe eine starke Aktivierung im rechten inferioren Präfrontalcortex gezeigt hatten, gab es keinen Zusammenhang zwischen dem Nikotinverlangen und der Anzahl gerauchter Zigaretten. Dagegen führte bei Probanden, die eine geringe präfrontale Aktivierung gezeigt hatten, ein starkes Verlangen nach Nikotin dazu, dass sie trotz ihres Zieles, abstinent zu werden, mehr Zigaretten rauchten. Dies spricht dafür, dass individuelle Unterschiede in der Mobilisierung präfrontaler Regionen bei der Reaktionsinhibition in Laboraufgaben prädiktiv dafür ist, wie gut Personen alltäglichen Versuchungen widerstehen können (vgl. auch Lopez et al. 2014). Im Einklang damit wurde gefunden, dass ehemalige Raucher, die das Rauchen erfolgreich aufgegeben hatten, in einer Stroop-Aufgabe geringere Interferenzeffekte und eine stärkere Aktivierung im rechten Frontalcortex und im ACC zeigten als Probanden, die mehrmals erfolglos versucht hatten, dass Rauchen aufzugeben (Krönke et al. 2015). In die gleiche Richtung weist eine umfangreiche Studie mit fast 2000 adoleszenten Probanden (Whelan et al. 2012), in der Probanden, die schon einmal illegale Drogen konsumiert hatten, eine geringere Aktivierung im rechten inferioren Frontalcortex in einer Stoppsignalaufgabe zeigten als Personen, die nach eigener Aussage noch nie illegale Drogen konsumiert hatten.

Trotz großer Fortschritte bei der Entschlüsselung der neurokognitiven Mechanismen, die Beeinträchtigungen der willentlichen Kontrolle bei psychischen Störungen zugrunde liegen, sind zahlreiche grundlegende Fragen noch ungeklärt (Goschke 2014). Die vielleicht wichtigste Frage ist, inwieweit Beeinträchtigungen kognitiver Kontrollfunktionen primär eine Folge psychischer Störungen (z. B. chronischen Drogenmissbrauchs) sind oder ob es sich um antezedente Vulnerabilitätsfaktoren handelt, die das Risiko erhöhen, unter bestimmten Umweltbedingungen eine psychische Störung auszubilden oder rückfällig zu werden. Ebenfalls ungeklärt ist, inwieweit beeinträchtigte kognitive Kontrollfunktionen *störungsübergreifende* Basismechanismen darstellen, die psychische Störungen über traditionelle diagnostische Kategorien hinweg charakterisieren (Buckholtz und Meyer-Lindenberg 2012; Goschke 2014; Morris und Cuthbert 2012). So gibt es Belege dafür, dass sich Substanzstörungen und nichtsubstanzgebundene suchtartige Verhaltensweisen wie pathologisches Glücksspielen durch ähnliche Beeinträchtigungen kognitiver Kontrollfunktionen auszeichnen (Frascella et al. 2010; Kräplin et al. 2015, 2014a, b; van Holst et al. 2010). Ferner spricht eine wachsende Zahl von Befunden dafür, dass erhöhte Impulsivität (im Sinne mangelnder Voraussicht und Planung und beeinträchtigter Reaktionsinhibition) sowie erhöhte Kompulsivität (im Sinne habituellen Verhaltens, das insensitiv für Ziele und Belohnungskonsequenzen ist) gemeinsame Merkmale phänotypisch sehr unterschiedlicher Störungen sind (z. B. Substanzstörungen, nichtsubstanzgebundene suchtartige Verhaltensweisen, Zwangsstörungen, bestimmte Essstörungen) (Robbins et al. 2012; Volkow und Baler 2015). Aber auch Angststörungen und bestimmte Formen der Depression sind durch beeinträchtigte Kontrollfunktionen charakterisiert. So gehen Angststörungen mit Beeinträchtigungen der Emotionsregulation, Veränderungen der funktionellen Konnektivität zwischen dem rACC und der Amygdala sowie einer Hypersensitivität des Salienznetzwerks einher (Berking und Wupperman 2012; Cisler et al. 2010; Etkin 2012; Etkin et al. 2015), während eine mangelnde Mobilisierung des Kontrollnetzwerks nach Fehlern oder in schwierigen Aufgaben ein Merkmal depressiver Störungen ist (Gotlib und

Joormann 2010; Rive et al. 2013). Es wird insofern ein zentrales Forschungsziel für die nächsten Jahre sein, Unterschiede und Gemeinsamkeiten im Muster gestörter und intakter kognitiver Kontrollfunktionen über verschiedene psychische Störungen hinweg zu untersuchen.

Verbesserung von Selbstkontrollkompetenzen und Training kognitiver Kontrolle

Angesichts der hohen persönlichen und gesellschaftlichen Kosten, die mit Beeinträchtigungen der Selbstkontrolle verbunden sind, stellt sich die Frage, ob und wie kognitive Kontrollfähigkeiten durch Trainingsmaßnahmen verbessert werden können. In der Tat sprechen zahlreiche empirische Studien und Metaanalysen dafür, dass hohe Selbstkontrollkompetenzen mit zahlreichen positiven Verhaltenskonsequenzen korreliert sind (z. B. einem höheren Bildungstand, besserer Stressbewältigung, besserer Gesundheit, geringerem Substanzmissbrauch, weniger kriminellen Handlungen) (Heatherton und Wagner 2011; Mischel et al. 2010; De Ridder et al. 2012; Tangney et al. 2004). Obwohl längsschnittliche Studien zumindest einige Evidenz dafür erbracht haben, dass es sich hier tatsächlich um kausale Zusammenhänge handeln könnte, ist bislang nur unzureichend verstanden, welche Mechanismen diesen Zusammenhängen zugrunde liegen. Interessanterweise sprechen neuere Befunde dafür, dass Selbstkontrolle im Alltag nicht immer auf der Unterdrückung unerwünschter Impulse oder der Fähigkeit, akuten Versuchungen zu widerstehen, beruht. Vielmehr scheint selbstkontrolliertes Verhalten häufiger als angenommen über präventive Selbstverpflichtungen (▶ Abschn. 9.5.2) sowie die Überwindung alter und die Bildung neuer Gewohnheiten vermittelt zu sein (Hofmann et al. 2012; de Ridder et al. 2012). Insbesondere in schulischen oder Arbeitskontexten ist es für die Erreichung langfristiger Ziele vermutlich wichtiger, stabile habituelle Verhaltensmuster zu etablieren als einzelne Akte der Impulskontrolle zu tätigen. Für die Frage der Verbesserung alltäglicher Selbstkontrolle durch Trainingsmaßnahmen wird es insofern wichtig sein zu klären, welche Teilaspekte von Selbstkontrolle (z. B. Bildung von Selbstkontrollzielen und Implementierungsintentionen, Fehler- und Konfliktüberwachung, präventive Selbstverpflichtungen, Aufmerksamkeitskontrolle, Etablierung neuer Gewohnheiten) in welchen Kontexten besonders effektiv sind (Inzlicht et al. 2014).

Neben der Alltagsrelevanz von Selbstkontrollstrategien hat in den letzten zehn Jahren auch die Frage der Trainierbarkeit basaler kognitiver Kontrollfähigkeiten und exekutiver Funktionen wachsendes Interesse auf sich gezogen. Die Hoffnung ist, dass Trainings des Arbeitsgedächtnisses oder der kognitiven Flexibilität helfen können, Beeinträchtigungen der kognitiven Kontrolle (z. B. bei Kindern mit einer Aufmerksamkeitsdefizit-/Hyperaktivitätsstörung) zu mindern. Trotz einer Reihe vielversprechender Ergebnisse ist die Befundlage zurzeit noch uneinheitlich (Übersichten in Diamond 2013; Karbach und Unger 2014; Karbach und Verhaeghen 2014). Auf der positiven Seite sprechen rezente Metaanalysen dafür, dass Trainings exekutiver Kontrollfunktionen und des Arbeitsgedächtnisses (Klingberg 2010) zu signifikanten Leistungsverbesserungen sowohl bei älteren Erwachsenen (Karbach und Verhaeghen 2014) als auch bei Kindern und Adoleszenten (Karbach und Unger 2014) führen. Während die meisten Studien auf Arbeitsgedächtnistrainings fokussiert haben, gibt es Hinweise darauf, dass auch andere Komponenten kognitiver Kontrolle wie das Wechseln zwischen Aufgaben oder die Koordination von Doppelaufgaben (▶ Abschn. 9.5.2) durch Training verbessert werden können (Strobach et al. 2014). Auch in Bezug auf die Reaktionsinhibition konnte gezeigt werden, dass ein entsprechendes Training die Leistung in der Stoppsignalaufgabe verbesserte und zu mehr proaktiver Kontrolle führte, was sich in einer zeitlich früheren Aktivierung von präfrontalen Kontrollregionen in Vorbereitung auf eine angekündigte Inhibitionsaufgabe zeigte (Berkman et al. 2014).

Einschränkend ist allerdings anzumerken, dass die berichteten Effekte häufig auf die Trainingsaufgaben oder sehr ähnliche Aufgaben beschränkt waren und davon abhingen, inwieweit Trainings- und Transferaufgaben überlappende Teilprozesse beinhalteten (*naher Transfer*). Dagegen fallen *weite* Transfereffekte auf neue Aufgaben in der Regel kleiner und weniger konsistent aus. So ergab eine Metaanalyse von 23 Trainingsstudien (Melby-Lervag und Hulme 2013), dass Trainings des Arbeitsgedächtnisses zwar zu signifikanten kurzzeitigen Leistungsverbesserungen führten, wohingegen die Evidenz für langfristige Effekte und die Generalisierung auf andere kognitive Aufgaben deutlich weniger konsistent waren. Allgemein scheinen insbesondere prozessorientierte Trainings effektiv zu sein, die auf kognitive Funktionen fokussieren, die über verschiedene Aufgaben hinweg beansprucht werden. Ferner sprechen die Befunde dafür, dass Trainingseffekte umso größer sind, je schwierigen die Aufgaben sind, und dass insbesondere Probanden mit geringen oder beeinträchtigten Kontrollfähigkeiten von einem Training exekutiver Kontrollfunktionen profitieren (Diamond 2013).

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass computerbasierte kognitive Trainings zunehmend auch als Komponente von klinischen Interventionen zur Behandlung psychischer Störungen eingesetzt werden. So wird beispielsweise versucht, bei Angststörungen (Linetzky et al. 2015; MacLeod und Clarke 2015) und Substanzgebrauchsstörungen (Wiers et al. 2013) die Aufmerksamkeitskontrolle zu verbessern und so den Einfluss angst- oder suchtassoziierter Reize zu reduzieren. Inwieweit solche Interventionen langfristige Effekte haben und auf Alltagssituationen generalisieren, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Gesellschaftliche und ethische Implikationen

Ein weiteres Anwendungsfeld der Forschung zur Volition und kognitiven Kontrolle, das hier abschließend erwähnt sei, betrifft Implikationen der empirischen Ergebnisse für gesellschaftliche und ethische Fragen, insbesondere im Zusammenhang mit der Zuschreibung persönlicher Verantwortung und strafrechtlicher Schuld. Zu Beginn dieses Kapitels haben wir kurz das philosophische Problem der Willensfreiheit erörtert (▶ Zur Vertiefung 9.1) und gesehen, dass die empirische Forschung zu Willenshandlungen nicht auf der Annahme einer unbedingten Willensfreiheit beruht, sondern dass willentliches Handeln als Ergebnis kognitiver Kontrollfähigkeiten betrachtet wird, die letztlich auf kausal erklärbaren neurobiologischen Mechanismen beruhen (Dennett 2003; Goschke 2006; Goschke und Walter 2005; Pauen 2006). Diese Auffassung hat auch in der breiteren Öffentlichkeit eine heftige Kontroverse darüber ausgelöst, inwieweit eine sol-

che Sicht auf menschliches Handeln vereinbar damit ist, dass wir Personen als autonome Agenten betrachten, die wir für ihre Handlungen verantwortlich machen können (z. B. Pauen und Roth 2008). An dieser Stelle soll allerdings nicht erneut auf die philosophische Frage nach der Vereinbarkeit von Determinismus und Willensfreiheit eingegangen werden, sondern auf die Relevanz empirischer Ergebnisse für unsere Praxis der Verantwortungszuschreibung. Je mehr wir über die kognitiven und neuronalen Mechanismen wissen, die Fähigkeiten wie der Antizipation langfristiger Verhaltenskonsequenzen, der Inhibition emotionaler Impulse, der Fehler- und Konfliktüberwachung und der präventiven Selbstverpflichtung zugrunde liegen, umso drängender stellt sich die Frage, ob und in welcher Form dieses Wissen unsere moralische Bewertung von Handlungen beeinflussen sollte (Greene und Cohen 2004). Führen – wie es häufig behauptet wird – zunehmend detaillierte Erkenntnisse über die neurokognitiven Mechanismen der Selbstkontrolle wirklich dazu, dass wir Menschen immer weniger als frei entscheidende und verantwortliche Personen ansehen? Ist es relevant für die strafrechtliche Beurteilung der Schuldfähigkeit einer Person, wenn psychologische oder neurowissenschaftliche Untersuchungsergebnisse dafür sprechen, dass die Person über eine verminderte Fähigkeit zur Reaktionsinhibition oder Fehlerüberwachung verfügt? Sollten Hinweise auf Beeinträchtigungen kognitiver Kontrollnetzwerke, die mittels bildgebender Verfahren gefunden wurden, genutzt werden, um die Schuldfähigkeit von Personen einzuschätzen (Schweitzer et al. 2011)? Wie reliabel und valide müssen Methoden zur Messung solcher Fähigkeiten sein, damit wir es als gerechtfertigt ansehen, sie auf die Beurteilung von Einzelfällen anzuwenden? Die hier angesprochenen Fragen sind derzeit sicher noch von begrenzter Relevanz, weil der aktuelle Stand unserer Methoden und Theorien sowie die oft ungeklärte Reliabilität von Befunden häufig keine Anwendung auf den Einzelfall rechtfertigen. Angesichts der rasanten Entwicklung, die die kognitiv-neurowissenschaftliche Forschung in den letzten zwei Jahrzehnten genommen hat, ist es allerdings dringend notwendig, jenseits der abstrakten Kontroverse über die Willensfreiheit einen breiten gesellschaftlichen Diskurs über die Relevanz von Einsichten in die Determinanten und Mechanismen menschlicher Handlungssteuerung für unsere Praxis der Verantwortungszuschreibung zu führen (vgl. z. B. Beiträge in Glannon 2015).

9.8 Ausblick

Die Integration experimentalpsychologischer und neurowissenschaftlicher Ansätze hat in den letzten drei Jahrzehnten eine Fülle von Erkenntnissen über kognitive Kontrollprozesse geliefert, sodass wir dem Ziel um einiges näher gekommen sind, den Homunculus aus Theorien der kognitiven Kontrolle zu verbannen und durch empirisch fundierte Modelle der zugrunde liegenden psychologischen und neuronalen Mechanismen zu ersetzen. Zugleich haben diese Ergebnisse zahlreiche neue Fragen aufgeworfen, wobei insbesondere das in ▶ Abschn. 9.6 diskutierte Problem der Metakontrolle – also die Frage, wie kognitive Kontrollparameter dynamisch reguliert werden – von zentraler Bedeutung ist.

Ein weiteres wichtiges Forschungsziel für die kommenden Jahre besteht darin, Ergebnisse aus der Grundlagenforschung, die zumeist anhand vergleichsweise künstlicher experimenteller Aufgaben gewonnen wurden, auf die Erklärung von erfolgreicher und beeinträchtigter Selbststeuerung in alltäglichen Handlungskontexten anzuwenden. Dabei wird es wichtig sein, nicht nur Beeinträchtigungen der Selbstkontrolle zu untersuchen, sondern auch die bislang vernachlässigte Frage zu adressieren, ob unter bestimmten Bedingungen auch ein Zuviel an Kontrolle im Sinne einer übermäßigen chronischen Unterdrückung eigener Bedürfnisse langfristig negative psychische Auswirkungen haben kann. In diesem Zusammenhang werden insbesondere Längsschnittstudien von großer Bedeutung sein, in denen experimentelle Paradigmen, Bildgebungsverfahren, klinische Diagnostik und die Erfassung von alltäglichem Verhalten über Erlebnisstichproben miteinander kombiniert werden. Eine solche Integration verschiedener Disziplinen, Theorieansätze und Analyseebenen ist die Voraussetzung, um die kausale Rolle von kognitiven Kontrollfunktionen und Dysfunktionen bei der Entwicklung psychischer Störungen aufzuklären und langfristig neue Interventions- und Trainingsverfahren für kognitive Kontrollfähigkeiten zu entwickeln.

9.9 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Willentliche Handlungen beruhen auf der Fähigkeit, zukünftige Effekte von Handlungen zu antizipieren und bezüglich ihrer Wünschbarkeit und Erreichbarkeit abzuwägen, und können als Verhaltensweisen definiert werden, die auf die Erreichung von mental repräsentierten Zielen gerichtet sind.
- Die menschliche Antizipationsfähigkeit zeichnet sich dadurch aus, dass weit in der Zukunft liegende Handlungsfolgen antizipiert und neue Handlungssequenzen vor ihrer Ausführung geplant werden können. Darüber hinaus ermöglicht es die Antizipation zukünftiger Bedürfnisse, bei der Verfolgung langfristiger Ziele zeitweise Verschlechterungen der aktuellen Bedürfnislage zu tolerieren (Selbstkontrolle).
- Der Begriff „kognitive Kontrolle“ bezeichnet Mechanismen, die die Koordination sensorischer, kognitiver, affektiver und motorischer Systeme im Sinne übergeordneter Ziele vermitteln, insbesondere wenn wenig geübte Handlungen ausgeführt werden müssen, flexibel zwischen Zielen gewechselt werden muss, Planungsprozesse notwendig sind oder konkurrierende Motivationstendenzen oder Gewohnheiten unterdrückt werden müssen.
- Konfirmatorische Faktoranalysen sprechen dafür, dass sich kognitive Kontrollfähigkeiten durch Modelle mit drei latenten Variablen beschreiben lassen, die als Wechsel kognitiver Einstellungen, Updating des Arbeitsgedächtnisses und Inhibition dominanter Reaktionen interpretiert worden sind.
- Handlungen bestehen aus einer Abfolge von Phasen, die das Abwägen alternativer Ziele, die Bildung einer verbindlichen Absicht, das Planen konkreter Handlungsschritte, die Handlungsausführung und die Bewertung des Handlungsergebnisses umfassen.

- Die Realisierung von Absichten kann durch die Bildung von Implementierungsintentionen gefördert werden, die spezifizieren, unter welchen Bedingungen eine intendierte Handlung ausgeführt werden soll und dadurch die Wahrnehmung günstiger Gelegenheiten sowie die reizgesteuerte Auslösung der Handlung fördern.
- Handlungskontrollstrategien wie Umweltkontrolle, Aufmerksamkeitskontrolle, Motivationskontrolle und Emotionskontrolle haben die Funktion, Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen abzuschirmen.
- Verletzungen des lateralen Präfrontalcortex führen zu Beeinträchtigungen der kognitiven Kontrolle, die sich in perseverativem Verhalten, erhöhter Ablenkbarkeit, beeinträchtigter Planung, unzureichender Inhibition automatisierter Reaktionen, Störungen des Arbeitsgedächtnisses und reduzierter Selbstkontrolle manifestieren können.
- Verschiedene Regionen im Präfrontalcortex sind an unterschiedlichen kognitiven Kontrollfunktionen beteiligt, wobei Regionen im lateralen präfrontalen Cortex u. a. an der Aktualisierung und Aufrechterhaltung von Zielen und Aufgabenregeln sowie der Top-down-Modulation perzeptueller, motivationaler und motorischer Systeme beteiligt sind. Der frontopolare Cortex ist spezifisch an der Handlungsplanung, am zukunftsorientierten Denken, der Koordination multipler, hierarchisch organisierter Ziele sowie der Repräsentation abstrakter und zeitlich weiter in die Zukunft erstreckter Ziele beteiligt.
- Während der aktiven Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis zeigen Neurone im lateralen Präfrontalcortex dauerhafte Aktivität, die auch bestehen bleibt, wenn Störreize dargeboten werden. Im präfrontalen Cortex aktiv gehaltene Repräsentationen können die Verarbeitung in posterioren Hirnregionen dahingehend modulieren, dass aufgabenrelevante Inhalte mit höherer Priorität beachtet und verarbeitet werden.
- Zwei-System-Modelle der Selbstkontrolle gehen davon aus, dass selbstkontrollierte Entscheidungen darauf beruhen, dass ein „impulsives" Bewertungssystem im ventralen Striatum und medialen orbitofrontalen Cortex durch ein „reflektiertes" Bewertungssystem (das den lateralen präfrontalen und parietalen Cortex umfasst) unterdrückt wird. Neuere Befunde sprechen eher für ein alternatives Modell, in dem Entscheidungen auf einem einheitlichen neuronalen Bewertungssignal im ventromedialen Präfrontalcortex beruhen und Selbstkontrolle darin besteht, dass dieses Wertsignal durch antizipierte langfristige Verhaltenskonsequenzen moduliert wird.
- Funktionelle Bildgebungs- und Läsionsbefunde stützen die Hypothese einer hierarchischen Organisation des lateralen Präfrontalcortex, wobei rostrale (weiter anteriore) Regionen an der Verarbeitung abstrakterer und komplexerer Aufgabenregeln sowie der Kontrolle durch übergeordnete oder längerfristige Ziele beteiligt sind, während caudale (weiter posteriore) Frontalhirnregionen konkretere Inhalte verarbeiten und die Kontrolle untergeordneter oder kurzfristigerer Handlungsziele vermitteln.
- Reaktionskonflikte sind wichtige Signale für die Mobilisierung kognitiver Kontrolle, was sich darin zeigt, dass der Einfluss störender Reize oder konkurrierender Reaktionen nach Reaktionskonflikten reduziert ist (Konfliktadaptationseffekt). An der Überwachung von Fehlern und Konflikten ist der dACC beteiligt, wobei in neueren Theorien angenommen wird, dass der dACC allgemein die Regulation kognitiver Kontrolle auf der Basis des erwarteten Nutzens und der Kosten der Kontrolle vermittelt.
- In konnektionistischen Modellen wird kognitive Kontrolle darauf zurückgeführt, dass neuronale Aktivierungsmuster, die Ziele oder Aufgaben repräsentieren, flexibel aktualisiert, aktiv aufrechterhalten und gegen Störungen abgeschirmt werden können. Aktiv gehaltene Zielrepräsentationen modulieren die neuronale Verarbeitung in perzeptuellen, motivationalen und motorischen Teilsystemen dahingehend, dass zielrelevante Informationen mit höherer Priorität verarbeitet wird, sodass eigentlich „schwächere" Reaktionen trotz konkurrierender automatisierter Reaktionen ausgeführt werden können.
- Adaptive Handlungssteuerung erfordert einen dynamischen Ausgleich zwischen antagonistischen Anforderungen (Kontrolldilemmata): Einerseits müssen Ziele gegen störende Reize abgeschirmt werden, andererseits muss die Umwelt kontinuierlich auf potenziell relevante Reize überwacht werden (Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma); einerseits müssen Absichten aufrechterhalten und konkurrierende Reaktionstendenzen unterdrückt werden, andererseits muss flexibel zwischen Absichten gewechselt werden können (Persistenz-Flexibilitäts-Dilemma).

Schlüsselbegriffe

Absicht (*intention*) Zustand, in dem eine Person sich verbindlich auf ein Ziel festgelegt hat und entschlossen ist, die dafür notwendigen Handlungsschritte in die Tat umzusetzen.

Absichtsüberlegenheitseffekt (*intention superiority effect*) Befund, dass Gedächtnisinhalte, die sich auf unerledigte Absichten beziehen, schneller und leichter abgerufen werden, was dafür spricht, dass diese Inhalte im Langzeitgedächtnis in einem Zustand erhöhter Aktivierung persistieren.

Anteriorer cingulärer Cortex (ACC) (*anterior cingulate cortex*) Region im medialen Frontalhirn, von der angenommen wird, dass sie an der Überwachung von Fehlern, Reaktionskonflikten und negativen Verhaltensrückmeldungen sowie an der Einschätzung der Kosten kognitiver Kontrolle beteiligt ist.

Arbeitsgedächtnis (*working memory*) Bezeichnung für die aktive Aufrechterhaltung und Manipulation aufgabenrelevanter Information. Die neurophysiologische Grundlage des Arbeitsgedächtnisses bilden Neurone im lateralen Präfrontalcortex, die Aufgabenrepräsentationen und Reiz-Reaktions-Regeln codieren und ihre Aktivität in Abwesenheit eines Reizinputs aufrechterhalten und dadurch die Verarbeitung in posterioren Hirnregionen im Sinne der aktiv gehaltenen Aufgaben modulieren können.

Belohnungsaufschub (*delay of gratification*) Fähigkeit, auf eine sofortige kleine Belohnung zugunsten einer erst später verfügbaren größeren Belohnung zu verzichten.

Bewusstseinslage (*mind set*) Kognitive Orientierungen in unterschiedlichen Handlungsphasen. Das Abwägen von Zielen geht mit einer realitätsorientierten Bewusstseinslage einher, in der Informationen über die Wünschbarkeit und Realisierbarkeit von Zielen unparteiisch verarbeitet werden, während das Planen und Ausführen von Handlungen mit einer realisierungsorientierten Bewusstseinslage einhergehen, in der die Aufmerksamkeit selektiv auf Informationen gerichtet ist, die die Verwirklichung der Absicht fördern.

Determinierende Tendenz (*determining tendency*) In Achs klassischer Willenstheorie die Bezeichnung für teilweise unbewusst vermittelte Nachwirkungen von Absichten, durch die der Wahrnehmungs- und Denkverlauf im Sinne der Zielvorstellung abläuft.

Dysexekutives Syndrom (*dysexecutive syndrome*) Sammelbegriff für Beeinträchtigungen der kognitiven Kontrolle bei Patienten mit Schädigungen des Frontalhirns, die sich in perseverativem und reizabhängigem Verhalten, mangelnder Inhibition automatischer oder habitueller Reaktionen, beeinträchtigter Handlungsplanung und Störungen der Aufmerksamkeit und des Arbeitsgedächtnisses manifestieren. Es ist umstritten, inwieweit diese Beeinträchtigungen die Störung eines einheitlichen Funktionssystems spiegeln oder funktional dissoziiert werden können.

Exekutive Funktionen (*executive functions*) Sammelbezeichnung für kognitive Mechanismen, die die Koordination, Konfiguration, Überwachung und Bewertung sensorischer, kognitiver und motorischer Systeme im Sinne übergeordneter Ziele vermitteln. Beispiele sind die Inhibition inadäquater Reaktionen, die Planung neuer Handlungssequenzen, die flexible Umkonfigurierung kognitiver Einstellungen und die aktive Aufrechterhaltung aufgabenrelevanter Information. Der Begriff überlappt stark mit dem Konzept der kognitiven Kontrolle.

Handlungskontrollstrategien (*action control strategies*) Metakognitive Prozesse, durch die Absichten gegen konkurrierende Motivationstendenzen abgeschirmt werden, indem die störende Reize ausgeblendet (*Aufmerksamkeitskontrolle*), positive Anreize der Zielerreichung fokussiert (*Motivationskontrolle*), absichtsförderliche Emotionen generiert (*Emotionskontrolle*) oder Umweltbedingung hergestellt werden, die es weniger wahrscheinlich machen, Versuchungen nachzugeben (*Umweltkontrolle*)

Handlungsphasen (*action phases*) Aufeinanderfolgende Teilprozesse bei komplexen Handlungen, die das Abwägen alternativer Ziele, die Bildung einer verbindlichen Absicht, das Planen konkreter Handlungsschritte, die Ausführung der Handlung und die Bewertung der Handlungsergebnisse umfassen.

Handlungsschema (*action schema*) In der Theorie von Norman und Shallice (1986) Bezeichnung für im Langzeitgedächtnis gespeicherte Kontrollstrukturen, die durch Auslösereize oder übergeordnete Ziele aktiviert werden und einzelne Handlungssegmente oder kognitive Operationen steuern. Handlungsschemata sind hierarchisch organisiert, wobei abstrakte Schemata untergeordnete Schemata aktivieren können und inkompatible Schemata sich wechselseitig hemmen.

Implementierungsintention (*implementation intention*) Im Gegensatz zu Zielintentionen, die einen angestrebten Zielzustand repräsentieren, spezifizieren Implementierungsintentionen, unter welchen Reizbedingungen eine intendierte Handlung ausgeführt werden soll, um ein Ziel zu erreichen. Sie fördern die Wahrnehmung günstiger Gelegenheiten und die quasiautomatische Auslösung intendierter Handlungen durch die Reizbedingungen.

Intertemporaler Entscheidungskonflikt (*intertemporal choice conflict*) Bezeichnung für Konflikte zwischen einer kleineren, sofort verfügbaren und einer größeren, aber erst später zu erlangenden Belohnung, wobei der subjektive Wert der späteren Belohnung umso stärker abgewertet wird, je weiter sie in der Zukunft liegt.

Kognitive Kontrolle (*cognitive control*) Sammelbegriff für Mechanismen, die die flexible Koordination sensorischer, emotionaler und motorischer Prozesse im Sinne übergeordneter Ziele und die Realisierung von Absichten trotz konkurrierender Motivations- oder Reaktionstendenzen vermitteln.

Kontrolldilemma (*control dilemma*) Bezeichnung für antagonistische Anforderungen bei der Handlungssteuerung wie z. B. das Ausblenden störender Reize vs. die Überwachung der Umwelt auf potenziell bedeutsame Reize (*Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma*), oder die Aufrechterhaltung und Abschirmung von Absichten gegen konkurrierende Handlungstendenzen vs. das flexible Wechseln zwischen Absichten (*Persistenz-Flexibilitäts-Dilemma*).

Lage- vs. Handlungsorientierung (*action versus state orientation*) Kontrollmodi in Kuhls Handlungskontrolltheorie. Im handlungsorientierten Zustand ist die Aufmerksamkeit auf die Verwirklichung von Absichten gerichtet, was durch die Mobilisierung positiver Emotionen und den Einsatz von Handlungskontrollstrategien unterstützt wird. Im lageorientierten Zustand neigen Personen zum Grübeln über Misserfolge, haben Schwierigkeiten, Handlungskontrollstrategien zu mobilisieren und Absichten in die Tat umzusetzen und sind weniger gut in der Lage, negativen Affekt herabzuregulieren. Der aktuelle Kontrollmodus hängt von der Interaktion situativer Bedingungen (z. B. akutem Stress) und einer entsprechenden Persönlichkeitsdisposition ab.

Modulierter Wettstreit (*biased competition*) Annahme, dass kognitive Kontrolle darauf beruht, dass aktivierte Zielrepräsentationen top-down den Wettstreit zwischen konkurrierenden sensorischen oder motorischen Repräsentationen dahingehend modulieren, dass sich zielrelevante Repräsentationen durchsetzen.

Multifunktionelles Netzwerk (*multiple demand network*) Bezeichnung für ein Netzwerk von Hirnregionen, das den lateralen Präfrontalcortex, Regionen im Parietalcortex, den dorsalen anterioren cingulären Cortex (dACC), das prä-supplementärmotorische Areal und die anteriore Insel umfasst und in zahlreichen Aufgaben aktiviert wird, die kognitive Kontrolle oder fluide Intelligenz beanspruchen.

N-Back-Aufgabe (*n-back task*) Aufgabe, in der eine Serie von Buchstaben dargeboten wird, wobei nur auf solche Buchstaben reagiert werden soll, die mit dem Buchstaben identisch sind, der zwei oder drei Durchgänge zuvor dargeboten wurde, was die kontinuierliche Überwachung und Aktualisierung des Arbeitsgedächtnisses erfordert.

Perseveration (*perseveration*) Übermäßiges Beharren auf Zielen, Verhaltensdispositionen oder Aufgabenregeln, das sich in rigidem unflexiblem Verhalten manifestiert. Perseveration kann nach Läsionen des Frontalhirns auftreten und wird mit dem Wisconsin-Kartensortiertest und Aufgabenwechselparadigmen erfasst.

Persistenz (*persistence*) Bezeichnung für die Ausdauer oder Beharrlichkeit bei der Zielverfolgung, die sich u. a. darin manifestiert, dass beim Auftreten von Problemen alternative Mittel zur Zielerreichung eingesetzt und Handlungen nach einer Unterbrechung bevorzugt wieder aufgenommen werden.

Präferenzumkehrung (*preference reversal*) Der Effekt, dass Personen in intertemporalen Entscheidungsaufgaben eine größere spätere gegenüber einer kleineren früheren Belohnung präferieren, solange beide Belohnungen in der Zukunft liegen, aber die kleinere Belohnung wählen, wenn diese sofort verfügbar ist.

Präfrontaler Cortex (*prefrontal cortex*) Zusammenfassende Bezeichnung für die vorderen Regionen des Frontallappens, die Verbindungen zu den meisten corticalen Assoziationsfeldern und zahlreichen subcorticalen Zentren aufweisen. Der laterale Präfrontalcortex ist an kognitiven Kontrollfunktionen wie der Handlungsplanung, der Ausrichtung des Verhaltens an Zielen, der Unterdrückung inadäquater Reaktionen, der Abschirmung von Informationen gegen Störreize und der Koordination multipler Ziele beteiligt. Demgegenüber sind orbitofrontale und ventromediale präfrontale Regionen an der Regulation emotionaler Impulse, Bewertungsprozessen und der Ausrichtung des Verhaltens an soziale Normen beteiligt.

Präventive Selbstverpflichtung (*precommitment*) Selbstkontrollstrategie, bei der Personen ihre eigenen zukünftigen Handlungsoptionen so einschränken, dass es unmöglich oder weniger wahrscheinlich wird, in Versuchung zu geraten oder einer zukünftigen Versuchung nachzugeben.

Prospektives Gedächtnis (*prospective memory; intention memory*) Absichtsgedächtnis. Gedächtnis für Handlungen, die zu einem späteren Zeitpunkt auszuführen sind. Die Gedächtnisrepräsentation einer Absicht beinhaltet den angestrebten Zielzustand, die zur Zielerreichung notwendigen Handlungen sowie die Ausführungsbedingungen der Handlungen.

Selbstkontrolle (*self-control*) Die Fähigkeit, kurzfristigen Versuchungen zu widerstehen, Belohnungen aufzuschieben und impulsive Reaktionen zu unterdrücken, um das eigene Verhalten in Einklang mit langfristigen persönlichen Zielen, sozialen Normen oder moralischen Werten zu bringen.

Übergeordnetes Aufmerksamkeitssystem (*supervisory attentional system*, SAS) In der Theorie von Norman und Shallice (1986) Bezeichnung für ein Kontrollsystem, das die Aktivierung von Handlungsschemata im Sinne aktueller Ziele moduliert.

Volition (*volition*) Sammelbegriff für metakognitive oder selbstregulatorische Funktionen, die die Verwirklichung von Absichten in Konfliktsituationen unterstützen, in denen starke Gewohnheiten, emotionale Versuchungen oder konkurrierende Motivationstendenzen unterdrückt oder in denen sensorische, kognitive und motorische Prozesse auf neue Weise im Sinne eines übergeordneten Zieles koordiniert werden müssen.

Wechselkosten (*switch costs*) Erhöhte Reaktionszeiten und Fehlerraten beim Wechseln zwischen Aufgaben im Vergleich zur Wiederholung der gleichen Aufgabe. In den Wechselkosten spiegeln sich multiple Prozesse, u. a. der Abruf einer Aufgabenrepräsentation, die Implementierung neuer Reiz-Reaktions-Regeln sowie proaktive Interferenz durch nicht vollständig deaktivierte irrelevante Aufgaben. Aufgabenwechsel gehen mit erhöhter neuronaler Aktivierung in einem frontoparietalen Kontrollnetzwerk einher.

Willenshandlung (*willed action; voluntary action*) Verhalten, das auf die Erreichung eines mental repräsentierten Zielzustands gerichtet ist und auf einer Abwägung der Erreichbarkeit und Wünschbarkeit antizipierter Handlungsergebnisse beruht.

Wisconsin-Kartensortiertest (*Wisconsin Card Sorting Test*) Test zur Messung der kognitiven Flexibilität, bei dem Probanden Karten mit verschiedenen Symbolen nach wechselnden Kriterien sortieren müssen. Patienten mit Frontalhirnverletzungen zeigen dabei häufig perseverativ Verhalten und bleiben nach dem Wechsel des Sortierkriteriums trotz Fehlerrückmeldung bei der zuvor angewandten Regel.

Zeigarnik-Effekt (*Zeigarnik effect*) Befund, dass Handlungen, die vor ihrer Vollendung unterbrochen wurden, besser erinnert werden als erledigte Handlungen.

Zentrale Exekutive (*central executive*) Hypothetisches Kontrollsystem, das Prozesse in untergeordneten kognitiven und motorischen Subsystemen kontrollieren soll. Es ist fraglich, ob es im Gehirn tatsächlich eine solche zentrale Steuerinstanz gibt; zielgerichtetes Verhalten beruht vielmehr auf der Interaktion multipler und anatomisch weit verteilter Teilsysteme.

Ziel (*goal*) Repräsentation eines angestrebten Zustands, der durch eigene Handlung erreicht werden kann und meist mit emotiona-

len Anreizen assoziiert ist. Ziele sind hierarchisch organisiert und reichen von weit gespannten Lebensprojekten (Familie gründen) bis zu einfachen Bewegungseffekten (Licht anschalten).

Weiterführende Literatur

Achtziger, A., & Gollwitzer, P. M. (2010). Motivation und Volition im Handlungsverlauf. In J. Heckhausen & H. Heckhausen (Eds.), *Motivation und Handeln (4. Auflage)* (pp. 277-300). Berlin: Springer. (Überblick über das Rubikonmodell und experimentelle Untersuchungen zu Bewusstseinslagen und Vorsatzeffekten.)

Botvinick, M., & Cohen, J. D. (2014). The computational and neural basis of cognitive control: charted territory and new frontiers. *Cognitive Science, 38*(6), 1249-1285. (Überblickskapitel zu computationalen Modellen der neuronalen Grundlagen kognitiver Kontrolle mit Schwerpunkt auf konnektionistischen Modellen.)

Braver, T. (Ed.) (2016). *Motivation and cognitive control*. New York: Routledge. (Aktuelle Sammlung von Übersichtsartikeln zur Interaktion von kognitiver Kontrolle mit motivationalen Prozessen.)

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168. (Überblicksartikel zur Forschung über exekutive Kontrollprozesse unter Berücksichtigung entwicklungsneurowissenschaftlicher Befunde.)

Gazzaniga, M., Ivry, R. & Mangun, R. (2014). *Cognitive neuroscience. The biology of the mind (4th Ed.) Chapter 12: Cognitive control* (pp. 506-557). W.W. Norton. (Lehrbuchkapitel zu neuronalen Grundlagen der kognitiven Kontrolle.)

Goschke, T., & Walter, H. (2005). Bewusstsein und Willensfreiheit: Philosophische und empirische Annäherungen. In C. Herrmann, M. Pauen, J. Rieger, & S. Schicktanz (Eds.), *Bewusstsein: Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik* (pp. 81-119). München: Wilhelm Fink/UTB. (Kritische Diskussion philosophischer Positionen und empirischer Ergebnisse, die als Argument dafür vorgebracht wurden, dass das bewusste Willenserleben auf einer Illusion beruht.)

Goschke, T. (2014). Dysfunctions of decision-making and cognitive control as transdiagnostic mechanisms of mental disorders: advances, gaps, and needs in current research. *International Journal of Methods in Psychiatric Research, 23*(S1), 41-57. (Überblick über beeinträchtigte kognitive Kontrollfunktionen als möglichen Basismechanismus psychischer Störungen und Diskussion offener Forschungsfragen.)

Goschke, T., & Bolte, A. (2014). Emotional modulation of control dilemmas: the role of positive affect, reward, and dopamine in cognitive stability and flexibility. *Neuropsychologia, 62*, 403-423. (Überblick über den Einfluss von positiven Emotionen und Belohnungsprozessen auf kognitive Kontrolle aus der Perspektive der Kontrolldilemmatheorie.)

Grange, J. A. & Houghton, G. (Eds.) (2014). *Task switching and cognitive control*. Oxford: Oxford University Press. (Sammlung aktueller Artikel zum Aufgabenwechsel.)

Haggard, P. (2008). Human volition: towards a neuroscience of will. *Nature Reviews Neuroscience, 9(12)*, 934-946. (Überblick über neuronale Grundlagen einfacher Willenshandlungen und des Erlebens willentlicher Kontrolle.)

Hassin, R. R., Ochsner, K., & Trope, Y. (Eds.). (2010). *Self control in society, mind, and brain*. Oxford: Oxford University Press. (Sammlung von Artikeln zur Selbstkontrolle aus der Perspektive unterschiedlicher Disziplinen.)

Hommel, B. & Nattkemper D. (2014). *Handlungspsychologie. Planung und Kontrolle intentionalen Handelns*. Berlin: Springer. (Lehrbuch zur Psychologie der Handlungssteuerung für Bachelorstudenten.)

Kane, R. (Ed.). (2011). *Oxford Handbook of Free Will* (2nd ed.). Oxford: Oxford University Press. (Sammlung von Artikeln zum philosophischen Problem der Willensfreiheit.)

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science, 21*(1), 8-14. (Überblick über die Forschung zur Faktorstruktur exekutiver Kontrollfunktionen.)

Prinz, W. (Hrsg.) (2014). *Experimentelle Handlungsforschung*. Suttgart: Kohlhammer. (Lehrbuch zur Handlungspsychologie aus kognitionspsychologischer, sozialer und ontogenetischer Perspektive.)

Roskies, A. L. (2010). How does neuroscience affect our conception of volition? *Annual Review of Neuroscience, 33(1)*, 109-130. (Diskussion von Implikationen der neurowissenschaftlichen Volitionsforschung für das Verständnis von Autonomie und willentlicher Kontrolle.)

Sinnot-Armstrong, W., & Nadel, L. (Eds.). (2011). *Conscious will and responsibility*. Oxford: Oxford University Press. (Sammlung von Artikeln von Philosophen, Psychologen und Neurowissenschaftlern zu den Implikationen von Libets Experimenten.)

Spence, S. A. (2009). *The actor's brain. Exploring the cognitive neuroscience of free will*. New York: Oxford University Press. (Darstellung der neuronalen Grundlagen willentlicher Handlungen von der Steuerung einfacher Bewegungen bis zu psychiatrischen und neurologischen Störungen der willentlichen Kontrolle.)

Stuss, D. T., & Knight, R. T. (2013). *Handbook of frontal lobe function*. Oxford: Oxford University Press. (Umfassendes Handbuch zur Anatomie, Neuropharmakologie, Entwicklung, Struktur, Funktion und Störungen des Frontalhirns.)

Vohs, K. D. & Baumeister, R. F. (Eds.) (2016). *Handbook of self-regulation: Research, theory, and applications (3rd ed.)*. New York: Guilford Press. (Aktuelles Handbuch zu einem breiten Spektrum von Forschungsergebnissen zur Selbstkontrolle.)

Danksagung

Die Arbeit an diesem Kapitel und meine Forschung zum Thema wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Volition and Cognitive Control" (SFB 940/2016-1) sowie die Volkswagen-Stiftung (II/80774) gefördert.

Literatur

Ach, N. (1910). *Über den Willensakt und das Temperament*. Leipzig: Quelle & Meyer.

Ach, N. (1935). Analyse des Willens. In E. Abderhalden (Hrsg.), *Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden* Bd. 6 Berlin: Urban & Schwarzenberg.

Achtziger, A., & Gollwitzer, P. M. (2010). Motivation und Volition im Handlungsverlauf. In J. Heckhausen, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* (4. Aufl. S. 277–300). Berlin: Springer.

Achtziger, A., Gollwitzer, P. M., & Sheeran, P. (2008). Implementation intentions and shielding goal striving from unwanted thoughts and feelings. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *34*(3), 381–393.

Ainslie, G. (2005). Precis of Breakdown of Will. *Behavioral and Brain Sciences*, *28*(5), 635–673.

Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2010). Computational models of performance monitoring and cognitive control. *Topics in Cognitive Science*, *2*(4), 658–677.

Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umilta, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 421–452). Cambridge, MA, USA: Mit Press.

Ansorge, U., & Neumann, O. (2005). Intentions determine the effect of invisible metacontrast-masked primes: evidence for top-down contingencies in a peripheral cuing task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(4), 762–777.

Arnsten, A. F. T. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(6), 410–422.

Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(4), 177–185.

Azuar, C., Reyes, P., Slachevsky, A., Volle, E., Kinkingnehun, S., Kouneiher, F., & Levy, R. (2014). Testing the model of caudo-rostral organization of cognitive control in the human with frontal lesions. *Neuroimage*, *84*, 1053–1060.

Baddeley, A. (2012). Working memory: theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, *63*, 1–29.

Badre, D., & D'Esposito, M. (2007). Functional magnetic resonance imaging evidence for a hierarchical organization of the prefrontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(12), 2082–2099.

Badre, D., & D'Esposito, M. (2009). Is the rostro-caudal axis of the frontal lobe hierarchical? *Nature Reviews Neuroscience*, *10*(9), 659–669.

Badre, D., Hoffman, J., Cooney, J. W., & D'Esposito, M. (2009). Hierarchical cognitive control deficits following damage to the human frontal lobe. *Nature Neuroscience*, *12*(4), 515–522.

Banks, B. S., & Isham, E. A. (2009). We infer rather than perceive the moment we decide to act. *Psychological Science*, *20*(1), 17–21.

Baumann, N., Kaschel, R., & Kuhl, J. (2005). Striving for unwanted goals: stress-dependent discrepancies between explicit and implicit achievement motives reduce subjective well-being and increase psychosomatic symptoms. *Journal of Personality and Social Psychology*, *89*(5), 781–799.

Baumann, N., & Kuhl, J. (2003). Self-infiltration; Confusing assigned tasks as self-selected in memory. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *29*(4), 487–497.

Beauregard, M., Levesque, J., & Bourgouin, P. (2001). Neural correlates of conscious self-regulation of emotion. *Journal of Neuroscience*, *21*(18), 6993–7000.

Beck, S. M., Ruge, H., Walser, M., & Goschke, T. (2014). The functional neuroanatomy of spontaneous retrieval and strategic monitoring of delayed intentions. *Neuropsychologia*, *52*, 37–50.

Bergen, A. v (1968). *Task interruption*. Amsterdam: North Holland Publishing Company.

Berking, M., & Wupperman, P. (2012). Emotion regulation and mental health: recent findings, current challenges, and future directions. *Current Opinion in Psychiatry*, *25*(2), 128–134.

Berkman, E. T., Falk, E. B., & Lieberman, M. D. (2011). In the trenches of real-world self-control: neural correlates of breaking the link between craving and smoking. *Psychological Science*, *22*(4), 498–506.

Berkman, E. T., Kahn, L. E., & Merchant, J. S. (2014). Training-induced changes in inhibitory control network activity. *Journal of Neuroscience*, *34*(1), 149–157.

Berridge, K. C. (2012). From prediction error to incentive salience: mesolimbic computation of reward motivation. *European Journal of Neuroscience*, *35*(7), 1124–1143.

Blunt, A. P. (1998). Volitional action and inaction in the lives of undergraduate students: State orientation, procrastination and proneness to boredom. *Personality and Individual Differences*, *24*, 837–846.

Bolte, A., Goschke, T., & Kuhl, J. (2003). Emotion and intuition: Effects of positive and negative mood on implicit judgments of semantic coherence. *Psychological Science*, *14*(5), 416–421.

Boorman, E. D., Behrens, T. E. J., Woolrich, M. W., & Rushworth, M. F. S. (2009). How green is the grass on the other side? Frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action. *Neuron*, *62*(5), 733–743.

Botvinick, M., & Braver, T. (2015). Motivation and cognitive control: from behavior to neural mechanism. *Annual Review of Psychology*, *66*, 83–113.

Botvinick, M., & Cohen, J. D. (2014). The computational and neural basis of cognitive control: charted territory and new frontiers. *Cognitive Science*, *38*(6), 1249–1285.

Botvinick, M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, *108*(3), 624–652.

Botvinick, M., Niv, Y., & Barto, A. C. (2009). Hierarchically organized behavior and its neural foundations: A reinforcement learning perspective. *Cognition*, *113*(3), 262–280.

Braem, S., King, J. A., Korb, F. M., Krebs, R. M., Notebaert, W., & Egner, T. (2013). Affective modulation of cognitive control is determined by performance-contingency and mediated by ventromedial prefrontal and cingulate cortex. *Journal of Neuroscience*, *33*(43), 16961–16970.

Brandstätter, V., Lengfelder, A., & Gollwitzer, P. M. (2001). Implementation intentions and efficient action initiation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *81*(5), 946–960.

Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(2), 106–113.

Braver, T. S., & Bongiolatti, S. R. (2002). The role of frontopolar cortex in subgoal processing during working memory. *Neuroimage*, *15*(3), 523–536.

Brown, J. W., & Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, *307*(5712), 1118–1121.

Brown, J. W., Reynolds, J. R., & Braver, T. S. (2007). A computational model of fractionated conflict-control mechanisms in task-switching. *Cognitive Psychology*, *55*(1), 37–85.

Bruyneel, L., Steenbergen, H. van, Hommel, B., Band, G. P. H., De Raedt, R., & Koster, E. H. W. (2013). Happy but still focused: failures to find evidence for a mood-induced widening of visual attention. *Psychological Research-Psychologische Forschung*, *77*(3), 320–332.

Buckholtz, J. W., & Meyer-Lindenberg, A. (2012). Psychopathology and the human connectome: toward a transdiagnostic model of risk for mental illness. *Neuron*, *74*(6), 990–1004.

Bugg, J. M., Scullin, M. K., & McDaniel, M. A. (2013). Strengthening encoding via implementation intention formation increases prospective memory commission errors. *Psychonomic Bulletin and Review*, *20*(3), 522–527.

Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., & Kober, H. (2014). Cognitive reappraisal of emotion: a meta-analysis of human neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *24*(11), 2981–2990.

Bühringer, G., Wittchen, H.-U., Gottlebe, K., Kufeld, C., & Goschke, T. (2008). Why people change? The role of cognitive-control processes in the onset and cessation of substance abuse disorders. *International Journal of Methods in Psychiatric Research*, *17*(Suppl1), 4–S15.

Bühringer, G., Kräplin, A., & Behrendt, S. (2012). Universal characteristics and consequences of the addiction syndrome. In H. J. Shaffer, D. A. LaPlante, & S. E. Nelson (Hrsg.), *foundations, influences, and expressions of addiction* APA Addiction syndrome handbook, (Bd. 1, S. 291–316). Washington, D.C.: American Psychological Association.

Burgess, P. W., Veitch, E., Lacy Costello, A. de, & Shallice, T. (2000). The cognitive and neuroanatomical correlates of multitasking. *Neuropsychologia*, *38*(6), 848–863.

Burgess, P. W., Gonen-Yaacovi, G., & Volle, E. (2011). Functional neuroimaging studies of prospective memory: what have we learnt so far? *Neuropsychologia*, *49*(8), 2246–2257.

Calhoun, V. D., Miller, R., Pearlson, G., & Adali, T. (2014). The chronnectome: time-varying connectivity networks as the next frontier in fMRI data discovery. *Neuron*, *84*(2), 262–274.

Carlin, D., Bonerba, J., Phipps, M., Alexander, G., Shapiro, M., & Grafman, J. (2000). Planning impairments in frontal lobe dementia and frontal lobe lesion patients. *Neuropsychologia*, *38*, 655–665.

Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, *280*(5364), 747–749.

Casey, B. J., Somerville, L. H., Gotlib, I. H., Ayduk, O., Franklin, N. T., Askren, M. K., & Shoda, Y. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, *108*(36), 14998–15003.

Chao, L. L., & Knight, R. T. (1998). Contribution of human prefrontal cortex to delay performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 167–177.

Chiew, K. S., & Braver, T. S. (2011). Positive affect versus reward: emotional and motivational influences on cognitive control. *Frontiers in Psychology*, *2*, 279.

Chiew, K. S., & Braver, T. S. (2014). Dissociable influences of reward motivation and positive emotion on cognitive control. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *4*(2), 509–529.

Cisler, J. M., Olatunji, B. O., Feldner, M. T., & Forsyth, J. P. (2010). Emotion Regulation and the Anxiety Disorders: An Integrative Review. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, *32*(1), 68–82.

Cohen, J. D., Dunbar, K., & McClelland, J. L. (1990). On the control of automatic processes: A parallel distributed processing account of the Stroop effect. *Psychological Review*, *97*(3), 332–361.

Cohen, A. L., Bayer, U. C., Jaudas, A., & Gollwitzer, P. M. (2008). Self-regulatory strategy and executive control: implementation intentions modulate task switching and Simon task performance. *Psychological Research*, *72*(1), 12–26.

Cohen, A.-L., Kantner, J., Dixon, R. A., & Lindsay, D. S. (2011). The intention interference effect: the difficulty of ignoring what you intend to do. *Experimental Psychology*, *58*(6), 425–433.

Cole, M. W., Yeung, N., Freiwald, W. A., & Botvinick, M. (2009). Cingulate cortex: Diverging data from humans and monkeys. *Trends in Neurosciences*, *32*(11), 566–574.

Cole, M. W., Laurent, P., & Stocco, A. (2013a). Rapid instructed task learning: a new window into the human brain's unique capacity for flexible cognitive control. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *13*(1), 1–22.

Cole, M. W., Reynolds, J. R., Power, J. D., Repovs, G., Anticevic, A., & Braver, T. S. (2013b). Multi-task connectivity reveals flexible hubs for adaptive task control. *Nature Neuroscience*, *16*(9), 1348–1355.

Cools, R., & D'Esposito, M. (2011). Inverted-U-shaped dopamine actions on human working memory and cognitive control. *Biological Psychiatry*, *69*(12), 113–125.

Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: From environment to theory of mind. *Neuron*, *58*(3), 306–324.

Crockett, M. J., Braams, B. R., Clark, L., Tobler, P. N., Robbins, T. W., & Kalenscher, T. (2013). Restricting temptations: neural mechanisms of precommitment. *Neuron*, *79*(2), 391–401.

Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S. E., & Bunge, S. A. (2006). Neural evidence for dissociable components of task-switching. *Cerebral Cortex*, *16*(4), 475–486.

D'Ardenne, K., Eshel, N., Luka, J., Lenartowicz, A., Nystrom, L. E., & Cohen, J. D. (2012). Role of prefrontal cortex and the midbrain dopamine system in working memory updating. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, *109*(49), 19900–19909.

Daw, N. D., O'Doherty, J. P., Dayan, P., Seymour, B., & Dolan, R. J. (2006). Cortical substrates for exploratory decisions in humans. *Nature*, *441*(7095), 876–879.

Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *5*(5), 303–305.

Dennett, D. C. (2003). *Freedom evolves*. New York: Viking.

De Ridder, D. T. D., Lensvelt-Mulders, G., Finkenauer, C., Stok, F. M., & Baumeister, R. F. (2012). Taking stock of self-control: a meta-analysis of how trait self-control relates to a wide range of behaviors. *Personality and Social Psychology Review*, *16*(1), 76–99.

Derrfuss, J., Brass, M., Neumann, J., & Cramon, D. Y. von (2005). Involvement of the inferior frontal junction in cognitive control: meta-analyses of switching and Stroop studies. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 22–34.

Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*, 193–222.

D'Esposito, M., & Postle, B. R. (2014). The Cognitive Neuroscience of Working Memory. *Annual Review of Psychology*, 66, 115–142.

D'Esposito, M., Aquirre, G. K., Zarahn, E. K., Ballard, D., Shin, R. K., & Lease, J. (1998). Functional MRI studies of spatial and non-spatial working memory. *Cognitive Brain Research*, *7*, 1–13.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, *64*, 135–168.

Diefendorff, J. M., Hall, R. J., Lord, R. G., & Strean, M. L. (2000). Action-state orientation: Construct validity of a revised measure and its relationship to work-related variables. *Journal of Applied Psychology*, *85*(2), 250–263.

Dockree, P. M., & Ellis, J. A. (2001). Forming and canceling everyday intentions: Implications for prospective remembering. *Memory & Cognition*, *29*(8), 1139–1145.

Dolan, R. J., & Dayan, P. (2013). Goals and habits in the brain. *Neuron*, *80*(2), 312–325.

Domachowska, I., Heitmann, C., Deutsch, R., Goschke, T., Scherbaum, S., & Bolte, A. (2016). Approach-motivated positive affect reduces breadth of attention: Registered replication report of Gable and Harmon-Jones (2008). *Journal of Experimental Social Psychology*.

Dörner, D. (1987). Denken und Wollen: Ein systemtheoretischer Ansatz. In P. M. G. H. Heckhausen (Hrsg.), *Jenseits des Rubikon. Der Wille in den Humanwissenschaften* (S. 238–250). Berlin: Springer.

Doya, K. (2008). Modulators of decision making. *Nature Neuroscience*, *11*(4), 410–416.

Dreisbach, G., & Fischer, R. (2012). The role of affect and reward in the conflict-triggered adjustment of cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 342.

Dreisbach, G., & Goschke, T. (2004). How positive affect modulates cognitive control: Reduced perseveration at the cost of increased distractibility. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *30*(2), 343–353.

Druzgal, T. J., & D'Esposito, M. (2003). Dissecting contributions of prefrontal cortex and fusiform face area to face working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(6), 771–784.

Duncan, J. (2010). The multiple-demand (MD) system of the primate brain: mental programs for intelligent behaviour. *Trends in Cognitive Science*, *14*(4), 172–179.

Duncan, J., & Owen, A. M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neurosciences*, *23*, 475–483.

Durstewitz, D., & Seamans, J. K. (2002). The computational role of dopamine D1 receptors in working memory. *Neural Networks*, *15*(4–6), 561–572.

Durstewitz, D., & Seamans, J. K. (2008). The dual-state theory of prefrontal cortex dopamine function with relevance to catechol-o-methyltransferase genotypes and schizophrenia. *Biological Psychiatry*, *64*(9), 739–749.

Ebitz, R. B., & Platt, M. L. (2015). Neuronal activity in primate dorsal anterior cingulate cortex signals task conflict and predicts adjustments in pupil-linked arousal. *Neuron*, *85*(3), 628–640.

Egner, T. (2014). Creatures of habit (and control): a multi-level learning perspective on the modulation of congruency effects. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1247.

Egner, T., & Hirsch, J. (2005). Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information. *Nature Neuroscience*, *8*(12), 1784–1790.

Elsner, B., & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*(1), 229–240.

Emerson, M. J., & Miyake, A. (2003). The role of inner speech in task switching: A dual-task investigation. *Journal of Memory and Language*, *48*(1), 148–168.

Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, *16*(1), 143–149.

Etkin, A. (2012). Neurobiology of anxiety: from neural circuits to novel solutions? *Depression and Anxiety*, *29*(5), 355–358.

Etkin, A., Büchel, C., & Gross, J. J. (2015). The neural bases of emotion regulation. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(11), 693–700.

Everitt, B. J., & Robbins, T. W. (2016). Drug addiction: Updating actions to habits to compulsions ten years on. *Annual Review of Psychology*, *67*(1), 23–50.

Falkenstein, M., Hohnsbein, J., & Hoormann, J. (1995). Event-related potential correlates of errors in reaction tasks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *44*(Supplement), 287–296.

Figner, B., Knoch, D., Johnson, E. J., Krosch, A. R., Lisanby, S. H., Fehr, E., & Weber, E. U. (2010). Lateral prefrontal cortex and self-control in intertemporal choice. *Nature Neuroscience*, *13*(5), 538–539.

Fischer, R., Plessow, F., Dreisbach, G., & Goschke, T. (2015). Individual differences in the context-dependent recruitment of cognitive control: evidence from action versus state orientation. *Journal of Personality*, *83*(5), 575–583.

Forman, S. D., Dougherty, G. G., Casey, B. J., Siegle, G. J., Braver, T. S., Barch, D. M., & Lorensen, E. (2004). Opiate addicts lack error-dependent activation of rostral anterior cingulate. *Biological Psychiatry*, *55*(5), 531–537.

Forster, J., Liberman, N., & Higgins, E. T. (2005). Accessibility from active and fulfilled goals. *Journal of Experimental Social Psychology*, *41*(3), 220–239.

Franken, I. H., Strien, J. W. van, Franzek, E. J., & Wetering, B. J. van de (2007). Error-processing deficits in patients with cocaine dependence. *Biological Psychology*, *75*(1), 45–51.

Frascella, J., Potenza, M. N., Brown, L. L., & Childress, A. R. (2010). Shared brain vulnerabilities open the way for nonsubstance addictions: carving addiction at a new joint? *Annals of the New York Academy of Science*, *1187*, 294–315.

Fredrickson, B. L. (2013). Positive Emotions Broaden and Build. In D. Patricia, & P. Ashby (Hrsg.), *Advances in Experimental Social Psychology* (Bd. 47, S. 1–53). Burlington: Academic Press.

Freeman, J. E., & Ellis, J. A. (2003). The intention-superiority effect for naturally occurring activities: The role of intention accessibility in everyday prospective remembering in young and older adults. *International Journal of Psychology*, *38*(4), 215–228.

Fried, I., Mukamel, R., & Kreiman, G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, *69*(3), 548–562.

Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*(2), 201–225.

Fritz, J., & Dreisbach, G. (2013). Conflicts as aversive signals: conflict priming increases negative judgments for neutral stimuli. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *13*(2), 311–317.

Frober, K., & Dreisbach, G. (2014). The differential influences of positive affect, random reward, and performance-contingent reward on cognitive control. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(2), 530–547.

Fujita, K., Gollwitzer, P. M., & Oettingen, G. (2007). Mindsets and pre-conscious open-mindedness to incidental information. *Journal of Experimental Social Psychology*, *43*(1), 48–61.

Funahashi, S., Bruce, C. J., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex. *Journal of Neurophysiology*, *61*(2), 331–349.

Fuster, J. M., & Alexander, G. E. (1971). Neuron activity related to short-term memory. *Science*, *173*, 652–654.

Harmon-Jones, E., Gable, P. A., & Price, T. F. (2012). The influence of affective states varying in motivational intensity on cognitive scope. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *6*, 73.

Gawrilow, C., & Gollwitzer, P. M. (2008). Implementation intentions facilitate response inhibition in children with ADHD. *Cognitive Therapy and Research*, *32*(2), 261–280.

Gazzaley, A., & Nobre, A. C. (2012). Top-down modulation: bridging selective attention and working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(2), 129–135.

Gazzaley, A., Cooney, J., McEvoy, J., Knight, R. T., & d'Esposito, M. (2005). Top-down Enhancement and Suppression of the Magnitude and Speed of Neural Activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(3), 507–517.

Gell, L., Bühringer, G., McLeod, J., Forberger, S., Holmes, J., Lingford-Hughes, A., & Meier, P. S. (Hrsg.). (2016). *What determines harm from addictive substance and behaviours?* Oxford: Oxford University Press.

Glannon, W. (Hrsg.). (2015). *Free Will and the Brain: Neuroscientific, Philosophical, and Legal Perspectives*. Cambridge: Cambridge University Press.

Gläscher, J., Adolphs, R., Damasio, H., Bechara, A., Rudrauf, D., Calamia, M., & Tranel, D. (2012). Lesion mapping of cognitive control and value-based decision making in the prefrontal cortex. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, *109*(36), 14681–14686.

Goldstein, R. Z., & Volkow, N. D. (2011). Dysfunction of the prefrontal cortex in addiction: neuroimaging findings and clinical implications. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(11), 652–669.

Gollwitzer, P. M. (1999). Implementation intentions: Strong effects of simple plans. *American Psychologist*, *54*(7), 493–503.

Gollwitzer, P. M. (2012). Mindset theory of action phases. In P. van Lange, A. W. Kruglanski, & E. T. Higgins (Hrsg.), *Handbook of theories of social psychology* (Bd. 1, S. 526–545). London: Sage.

Gollwitzer, P. M., & Brandstätter, V. (1997). Implementation intentions and effective goal pursuit. *Journal of Personality and Social Psychology*, *73*(1), 186–199.

Gollwitzer, P. M., & Kinney, R. F. (1989). Effects of deliberative and implemental mind-sets on illusion of control. *Journal of Personality and Social Psychology*, *56*(4), 531–542.

Gollwitzer, P. M., & Sheeran, P. (2006). Implementation intentions and goal achievement: A meta-analysis of effects and processes. In M. P. Zanna (Hrsg.), *Advances in Experimental Social Psychology* (Bd. 38, S. 69–119). San Diego, CA: Elsevier Academic Press.

Gollwitzer, P. M., Heckhausen, H., & Steller, B. (1990). Deliberative and implemental mind-sets: Cognitive tuning toward congruous thoughts and information. *Journal of Personality and Social Psychology*, *59*(6), 1119–1127.

Goschke, T. (1996). Wille und Kognition. Zur funktionalen Architektur der intentionalen Handlungssteuerung. In J. Kuhl, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation, Volition und Handeln* Enzyklopädie der Psychologie Serie IV, (Bd. 4, S. 583–663). Göttingen: Hogrefe.

Goschke, T. (2000). Intentional reconfiguration and involuntary persistence in task set switching. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and Performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 331–355). Cambridge, MA: MIT Press.

Goschke, T. (2003). Voluntary action and cognitive control from a cognitive neuroscience perspective. In S. Maasen, W. Prinz, & G. Roth (Hrsg.), *Voluntary action: Brains, minds, and sociality* (S. 49–85). New York, NY: Oxford University Press.

Goschke, T. (2006). Der bedingte Wille: Willensfreiheit aus der Sicht der kognitiven Neurowissenschaft. In G. Roth, & K.-J. Grün (Hrsg.), *Das Gehirn und seine Freiheit. Beiträge zur neurowissenschaftlichen Grundlegung der Philosophie* (S. 107–156). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Goschke, T. (2013). Volition in action: Intentions, control dilemmas and the dynamic regulation of cognitive control. In W. Prinz, A. Beisert, & A. Herwig (Hrsg.), *Action science: Foundations of an emerging discipline* (S. 409–434). Cambridge, MA: MIT Press.

Goschke, T. (2014). Dysfunctions of decision-making and cognitive control as transdiagnostic mechanisms of mental disorders: advances, gaps, and needs in current research. *International Journal of Methods in Psychiatric Research*, *23*(S1), 41–57.

Goschke, T., & Bolte, A. (2014). Emotional modulation of control dilemmas: the role of positive affect, reward, and dopamine in cognitive stability and flexibility. *Neuropsychologia*, *62*, 403–423.

Goschke, T., & Dreisbach, G. (2008). Conflict-triggered goal shielding: Response conflicts attenuate background monitoring for prospective memory cues. *Psychological Science*, *19*(1), 25–32.

Goschke, T., & Kuhl, J. (1993). Representation of intentions: Persisting activation in memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*(5), 1211–1226.

Goschke, T., & Kuhl, J. (1996). Remembering what to do: Explicit and implicit memory for intentions. In M. Brandimonte, G. O. Einstein, & M. A. McDaniel (Hrsg.), *Prospective memory: Theory and applications* (S. 53–91). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Goschke, T., & Walter, H. (2005). Bewusstsein und Willensfreiheit: Philosophische und empirische Annäherungen. In C. Herrmann, M. Pauen, J. Rieger, & S. Schicktanz (Hrsg.), *Bewusstsein: Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik* (S. 81–119). München: Wilhelm Fink/UTB.

Goschke, T., Linser, K., & Wendt-Kürschner, J. (2008). Wille und Bewusstsein. In T. Vierkant (Hrsg.), *Willenshandlungen: Zur Natur und Kultur der Selbststeuerung* (S. 40–66). Frankfurt a.M.: Suhrkamp.

Gotlib, I. H., & Joormann, J. (2010). Cognition and depression: current status and future directions. *Annual Review of Clinical Psychology*, *6*, 285–312.

Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1992). Optimizing the use of information: Strategic control of activation of responses. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*(4), 480–506.

Greene, J., & Cohen, J. (2004). For the law, neuroscience changes nothing and everything. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, *359*(1451), 1775–1785.

Greenwald, A. G., McGhee, D. E., & Schwartz, J. L. K. (1998). Measuring individual differences in implicit cognition: The implicit association test. *Journal of Personality and Social Psychology*, *74*, 1464–1480.

Gross, J. J. (2013). Emotion regulation: taking stock and moving forward. *Emotion*, *13*(3), 359–365.

Gruber, O., Diekhof, E. K., Kirchenbauer, L., & Goschke, T. (2010). A neural system for evaluating the behavioural relevance of salient events outside the current focus of attention. *Brain Research*, *1351*, 212–221.

Gruber, O., Karch, S., Schlueter, E. K., Falkai, P., & Goschke, T. (2006). Neural mechanisms of advance preparation in task switching. *Neuroimage*, *31*(2), 887–895.

Gundlach, H. (1987). Anfänge der experimentellen Willenspsychologie. In H. Heckhausen, P. M. Gollwitzer, & F. E. Weinert (Hrsg.), *Jenseits des Rubikon. Der Wille in den Humanwissenschaften* (S. 67–85). Berlin: Springer.

Hacker, W. (2014). *Allgemeine Arbeitspsychologie* (3. Aufl.). Göttingen: Hogrefe.

Haggard, P., & Eimer, M. (1999). On the relation between brain potentials and the awareness of voluntary movements. *Experimental Brain Research*, *126*(1), 128–133.

Hare, T. A., Camerer, C. F., & Rangel, A. (2009). Self-control in decision-making involves modulation of the vmPFC valuation system. *Science*, *324*(5927), 646–648.

Hare, T. A., Malmaud, J., & Rangel, A. (2011). Focusing attention on the health aspects of foods changes value signals in vmPFC and improves dietary choice. *Journal of Neuroscience*, *31*(30), 11077–11087.

Harmon-Jones, E., Gable, P. A., & Price, T. F. (2012). The influence of affective states varying in motivational intensity on cognitive scope. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *6*, 73.

Harrison, S. A., & Tong, F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. *Nature*, *458*(7238), 632–635.

Hassin, R. R., Ochsner, K., & Trope, Y. (Hrsg.). (2010). *Self control in society, mind, and brain*. Oxford: Oxford University Press.

Haynes, J.-D. (2015). A primer on pattern-based approaches to fMRI: Principles, pitfalls, and perspectives. *Neuron*, *87*(2), 257–270.

Haynes, J.-D., Sakai, K., Rees, G., Gilbert, S., Frith, C., & Passingham, R. E. (2007). Reading Hidden Intentions in the Human Brain. *Current Biology*, *17*(4), 323–328.

Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus: computational models of the prefrontal cortex/basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *362*(1485), 1601–1613.

Heatherton, T. F., & Wagner, D. D. (2011). Cognitive neuroscience of self-regulation failure. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(3), 132–139.

Heckhausen, H. (1989). *Motivation und Handeln* (2. Aufl.). Berlin: Springer.

Herd, S. A., O'Reilly, R. C., Hazy, T. E., Chatham, C. H., Brant, A. M., & Friedman, N. P. (2014). A neural network model of individual differences in task switching abilities. *Neuropsychologia*, *62*, 375–389.

Hester, R., Nestor, L., & Garavan, H. (2009). Impaired error awareness and anterior cingulate cortex hypoactivity in chronic cannabis users. *Neuropsychopharmacology*, *34*(11), 2450–2458.

Heuvel, O. A. v.d., Groenewegen, H. J., Barkhof, F., Lazeron, R. H. C., Dyck, R. van, & Veltmana, D. J. (2003). Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of Tower of London task. *Neuroimage*, *18*, 367–374.

Hiemisch, A., Ehlers, A., & Westermann, R. (2002). Mindsets in social anxiety: A new look at selective information processing. *Journal of Behavioral Therapy and Experimental Psychiatry*, *33*, 103–114.

Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.

Hofmann, W., & Kotabe, H. (2012). A General Model of Preventive and Interventive Self-Control. *Social and Personality Psychology Compass*, *6*(10), 707–722.

Hofmann, W., Gschwendner, T., Friese, M., Wiers, R. W., & Schmitt, M. (2008). Working memory capacity and self-regulatory behavior: toward an individual differences perspective on behavior determination by automatic versus controlled processes. *Journal of Personality and Social Psychology*, *95*(4), 962–977.

Hofmann, W., Friese, M., & Roefs, A. (2009). Three ways to resist temptation: The independent contributions of executive attention, inhibitory control, and affect regulation to the impulse control of eating behavior. *Journal of Experimental Social Psychology*, *45*(2), 431–435.

Hofmann, W., Baumeister, R. F., Förster, G., & Vohs, K. D. (2012). Everyday temptations: An experience sampling study of desire, conflicts, and self-control. *Journal of Personality and Social Psychology*, *6*, 1318–1335.

Holst, R. J. van, Brink, W. van den, Veltman, D. J., & Goudriaan, A. E. (2010). Why gamblers fail to win: A review of cognitive and neuroimaging findings in pathological gambling. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *34*(1), 87–107.

Hommel, B. (2000). The prepared reflex: automaticity and control in stimulus-response translation. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Control of cognitive processes: Attention and Performance XVIII* (S. 247–273). Cambridge, MA: MIT Press.

Hommel, B., Proctor, R. W., & Vu, K. P. (2004). A feature-integration account of sequential effects in the Simon task. *Psychological Research*, *68*(1), 1–17.

Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2014). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, MA: Sinauer.

Huntsinger, J. R. (2012). Does positive affect broaden and negative affect narrow attentional scope? A new answer to an old question. *Journal of Experimental Psychology: General*, *141*(4), 595–600.

Inwagen, P. (1983). *An essay on free will*. Oxford: Oxford University Press.

Inzlicht, M., Legault, L., & Teper, R. (2014). Exploring the Mechanisms of Self-Control Improvement. *Current Directions in Psychological Science*, *23*(4), 302–307.

Isen, A. M. (2007). Positive affect, cognitive flexibility, and self-control. In Y. Shoda, D. Cervone, & G. Downey (Hrsg.), *Persons in context: Building a science of the individual* (S. 130–147). New York: Guilford Press.

James, W. (1890). *Principles of psychology*. New York: Holt.

Jiang, J., Heller, K., & Egner, T. (2014). Bayesian modeling of flexible cognitive control. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *1*(46), 30–43.

Jostmann, N. B., & Koole, S. L. (2007). On the regulation of cognitive control: Action orientation moderates the impact of high demands in Stroop interference tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *136*(4), 593–609.

Kable, J. W. (2014). Valuation, intertemporal choice, and self-control. In P. Glimcher, & E. Fehr (Hrsg.), *Neuroeconomics. Decision making and the brain* (2. Aufl. S. 173–192). Amsterdam: Academic Press.

Kable, J. W., & Glimcher, P. W. (2007). The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature Neuroscience*, *10*(12), 1625–1633.

Kane, R. (Hrsg.). (2011). *The Oxford Handbook of Free Will* (2. Aufl.). Oxford: Oxford University Press.

Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, *5*, 390.

Karbach, J., & Verhaeghen, P. (2014). Making working memory work: a meta-analysis of executive-control and working memory training in older adults. *Psychological Science*, *25*(11), 2027–2037.

Kazén, M., Baumann, N., & Kuhl, J. (2003). Self-infiltration vs. self-compatibility checking in dealing with unattractive tasks: The moderating influence of state vs. action orientation. *Motivation and Emotion*, *27*(3), 157–197.

Kazén, M., Kaschel, R., & Kuhl, J. (2008). Individual differences in intention initiation under demanding conditions: Interactive effects of state vs. action orientation and enactment difficulty. *Journal of Research in Personality*, *42*(3), 693–715.

Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald III, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, *303*(5660), 1023–1026.

Kiefer, M. (2007). Top-down modulation of unconscious 'automatic' processes: A gating framework. *Advances in Cognitive Psychology*, *3*(1–2), 289–306.

Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching – A review. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 849–874.

Kim, C., Johnson, N. F., Cilles, S. E., & Gold, B. T. (2011). Common and distinct mechanisms of cognitive flexibility in prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, *31*(13), 4771–4779.

Kliegel, M., McDaniel, M. A., & Einstein, G. O. (2008). *Prospective memory: Cognitive, neuroscience, developmental, and applied perspectives*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(7), 317–324.

Kober, H., Kross, E. F., Mischel, W., Hart, C. L., & Ochsner, K. N. (2010). Regulation of craving by cognitive strategies in cigarette smokers. *Drug and Alcohol Dependence*, *106*(1), 52–55.

Koch, I., Gade, M., Schuch, S., & Philipp, A. M. (2010). The role of inhibition in task switching: a review. *Psychonomic Bulletin & Review*, *17*(1), 1–14.

Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(6), 229–235.

Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, *399*(6732), 148–151.

Koechlin, E., Ody, C., & Kounelher, F. (2003). The Architecture of Cognitive Control in the Human Prefrontal Cortex. *Science*, *302*(5648), 1181–1185.

Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., & Botvinick, M. M. (2010). Decision Making and the Avoidance of Cognitive Demand. *Journal of Experimental Psychology-General*, *139*(4), 665–682.

Koole, S. L., & Jostmann, N. B. (2004). Getting a Grip on Your Feelings: Effects of Action Orientation and External Demands on Intuitive Affect Regulation. *Journal of Personality and Social Psychology*, *87*(6), 974–990.

Koole, S. L., & Kuhl, J. (2008). Dealing with unwanted feelings: The role of affect regulation in volitional action control. In J. Y. Shah, & W. L. Gardner (Hrsg.), *Handbook of motivation science* (S. 295–307). New York, NY: Guilford Press.

Kotabe, H. P., & Hofmann, W. (2015). On integrating the components of self-control. *Perspectives on Psychological Science*, *10*(5), 618–638.

Kräplin, A., Buehringer, G., Oosterlaan, J., Brink, W. van den, Goschke, T., & Goudriaan, A. E. (2014a). Dimensions and disorder specificity of impulsivity in pathological gambling. *Addictive Behaviors*, *39*(11), 1646–1651.

Kräplin, A., Dshemuchadse, M., Behrendt, S., Scherbaum, S., Goschke, T., & Buehringer, G. (2014b). Dysfunctional decision-making in pathological gambling: Pattern specificity and the role of impulsivity. *Psychiatry Research*, *215*(3), 675–682.

Kräplin, A., Behrendt, S., Scherbaum, S., Dshemuchadse, M., Bühringer, G., & Goschke, T. (2015). Increased impulsivity in pathological gambling: Considering nicotine dependence. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *37*(4), 367–378.

Krönke, K. M., Wolff, M., Benz, A., & Goschke, T. (2015). Successful smoking cessation is associated with prefrontal cortical function during a Stroop task: A preliminary study. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, *234*(1), 52–56.

Kubota, K. N. (1971). Prefrontal cortical unit activity and delayed alternation performance in monkeys. *Journal of Neurophysiology*, *34*, 337–347.

Kuhl, J. (1981). Motivational and functional helplessness: The moderating effect of state versus action orientation. *Journal of Personality & Social Psychology*, *40*(1), 155–170.

Kuhl, J. (1982). Handlungskontrolle als metakognitiver Vermittler zwischen Intention und Handeln: Freizeitaktivitaten bei Hauptschulern. *Zeitschrift fur Entwicklungspsychologie und Padagogische Psychologie*, *14*(2), 141–148.

Kuhl, J. (1983). *Motivation, Konflikt und Handlungskontrolle*. Heidelberg, New York, Tokyo: Springer.

Kuhl, J. (1985). Volitional mediators of cognitive-behavior consistency: Self-regulatory processes and actions versus state orientation. In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Action control: From cognition to behavior* (S. 101–128). Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer.

Kuhl, J. (1994). Action versus state orientation: Psychometric properties of the action-control scale (ACS-90). In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and personality: action versus state orientation* (S. 47–59). Toronto/Göttingen: Hogrefe.

Kuhl, J. (1996). Wille und Freiheitserleben. Formen der Selbststeuerung. In J. Kuhl, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation, Volition und Handlung* Enzyklopädie der Psychologie Serie IV, (Bd. 4, S. 665–765). Göttingen: Hogrefe.

Kuhl, J. (2000). A functional-design approach to motivation and self-regulation: The dynamics of personality systems and interactions. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Hrsg.), *Handbook of self-regulation* (S. 111–169). San Diego, CA: Academic Press.

Kuhl, J. (2001). *Motivation und Persönlichkeit. Interaktionen psychischer Systeme*. Göttingen: Hogrefe.

Kuhl, J. (2010). Individuelle Unterschiede in der Selbststeuerung. In J. Heckhausen, & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* 4. Aufl. Berlin: Springer.

Kuhl, J., & Beckmann, J. (1994). *Volition and personality: Action versus state orientation*. Göttingen: Hogrefe & Huber.

Kuhl, J., & Goschke, T. (1994a). A theory of action control: Mental subsystems, modes of control, and volitional conflict-resolution strategies. In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and personality: Action versus state orientation* (S. 93–124). Göttingen/Toronto: Hogrefe.

Kuhl, J., & Goschke, T. (1994b). State orientation and the activation and retrieval of intentions in memory. In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and personality: action vs. state orientation* (S. 127–153). Toronto/Göttingen: Hogrefe.

Kuhl, J., & Kazén, M. (1994). Self-discrimination and memory: State orientation and false self-ascription of assigned activities. *Journal of Personality & Social Psychology*, *66*(6), 1103–1115.

Kuhl, J., & Weiß, M. (1994). Performance deficits following uncontrollable failure: Impaired action control or global attributions and generalized expectancy deficits? In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and personality: action versus state orientation* (S. 317–328). Toronto/Göttingen: Hogrefe.

Kunde, W., Kiesel, A., & Hoffmann, J. (2003). Conscious control over the content of unconscious cognition. *Cognition*, *88*(2), 223–242.

LeDoux, J. (2012). Rethinking the emotional brain. *Neuron*, *73*(4), 653–676.

Lengfelder, A., & Gollwitzer, P. M. (2001). Reflective and reflexive action control in patients with frontal brain lesions. *Neuropsychology*, *15*(1), 80–100.

Lewin, K. (1926). Vorsatz, Wille und Bedürfnis. *Psychologische Forschung*, *7*, 330–385.

Lhermitte, F. (1983). 'Utilization behavior' and its relation to lesions of the frontal lobes. *Brain*, *106*, 237–255.

Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*, *3*(106), 623–642.

Linetzky, M., Pergamin-Hight, L., Pine, D. S., & Bar-Haim, Y. (2015). Quantitative evaluation of the clinical efficacy of attention bias modification treatment for anxiety disorders. *Depression and Anxiety*, *32*(6), 383–391.

Liu, Y., & Wang, Z. (2014). Positive affect and cognitive control: approach-motivation intensity influences the balance between cognitive flexibility and stability. *Psychological Science*, *25*(5), 1116–1123.

Locke, H. S., & Braver, T. S. (2008). Motivational influences on cognitive control: Behavior, brain activation, and individual differences. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *8*(1), 99–112.

Loewenstein, G., Rick, S., & Cohen, J. D. (2008). Neuroeconomics. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 647–672.

Logan, G. D. (1989). Automaticity and cognitive control. In J. S. Uleman, & J. A. Bargh (Hrsg.), *Unintended thought* (S. 52–74). New York, NY, USA: Guilford Press.

Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm. Inhibitory processes in attention, memory, and language. In D. Dagenbach, & T. H. Carr (Hrsg.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (S. 189–239). San Diego, CA, US: Academic Press.

Lopez, R. B., Hofmann, W., Wagner, D. D., Kelley, W. M., & Heatherton, T. F. (2014). Neural predictors of giving in to temptation in daily life. *Psychological Science*, *25*(7), 1337–1344.

Luria, A. R. (1961). *The role of speech in regulation of normal and abnormal behavior*. London: Pergamon.

Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Andover: Tavistock.

Luria, A. R. (1973). *The working brain*. London: Penguin.

MacKillop, J., Amlung, M. T., Few, L. R., Ray, L. A., Sweet, L. H., & Munafo, M. R. (2011). Delayed reward discounting and addictive behavior: a meta-analysis. *Psychopharmacology (Berl)*, *216*(3), 305–321.

MacLeod, C., & Clarke, P. J. F. (2015). The attentional bias modification approach to anxiety intervention. *Clinical Psychological Science*, *3*(1), 58–78.

Maier, S. U., Makwana, A. B., & Hare, T. A. (2015). Acute stress impairs self-control in goal-directed choice by altering multiple functional connections within the brain's decision circuits. *Neuron*, *87*(3), 621–631.

Marsh, R. L., Hicks, J. L., & Bink, M. L. (1998). Activation of completed, uncompleted, and partially completed intentions. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *24*(2), 350–361.

Marsh, R. L., Hicks, J. L., & Bryan, E. S. (1999). The activation of unrelated and canceled intentions. *Memory & Cognition*, *27*(2), 320–327.

Maylor, E. A., Chater, N., & Brown, G. D. A. (2001). Scale invariance in the retrieval of retrospective and prospective memories. *Psychonomic Bulletin & Review*, *8*(1), 162–167.

Mayr, U., & Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: The role of backward inhibition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *129*(1), 4–26.

Mayr, U., Awh, E., & Laurey, P. (2003). Conflict adaptation effects in the absence of executive control. *Nature Neuroscience*, *6*(5), 450–452.

McClure, S. M., Laibson, D. I., Loewenstein, G., & Cohen, J. D. (2004). Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science*, *306*(5695), 503–507.

Meilan, J. J. G. (2008). Activation and deactivation processes in the postponed intention paradigm. *Psychologia*, *51*(1), 89–97.

Meiran, N., Chorev, Z., & Sapir, A. (2000). Component processes in task switching. *Cognitive Psychology*, *41*(3), 211–253.

Melby-Lervag, M., & Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, *49*(2), 270–291.

Menon, V. (2011). Large-scale brain networks and psychopathology: a unifying triple network model. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(10), 483–506.

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, *24*, 167–202.

Miller, J., & Trevena, J. A. (2002). Cortical movement preparation and conscious decisions: Averaging artifacts and timing biases. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, *11*(2), 308–313.

Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart & Winston.

Miller, E. K., Erickson, C. A., & Desimone, R. (1996). Neural mechanisms of visual working memory in prefrontal cortex of the macaque. *Journal of Neuroscience*, *16*(0), 5154–5167.

Milner, B. (1963). Effects of different brain lesions on card-sorting. *Archives of Neurology*, *9*, 90–100.

Mischel, W., Ebbesen, E. B., & Raskoff, Z. A. (1972). Cognitive and attentional mechanisms in delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, *21*(2), 204–218.

Mischel, W., Shoda, Y., & Peake, P. K. (1988). The nature of adolescent competencies predicted by preschool delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*(4), 687–696.

Mischel, W., Ayduk, O., Berman, M. G., Casey, B. J., Gotlib, I. H., Jonides, J., Kross, E., Teslovich, T., Wilson, N. L., Zayas, V., & Shoda, Y. (2010). 'Willpower' over the life span: decomposing self-regulation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *6*(2), 252–256.

Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 8–14.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex 'frontal lobe' tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49–100.

Miyake, A., Emerson, M. J., Padilla, F., & Ahn, J.-C. (2004). Inner speech as a retrieval aid for task goals: The effects of cue type and articulatory suppression in the random task cuing paradigm. *Acta Psychologica*, *115*(2–3), 123–142.

Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(3), 134–140.

Moors, A. (2016). Automaticity: Componential, Causal, and Mechanistic Explanations. *Annual Review of Psychology*, *67*(1), 263–287.

Morris, S. E., & Cuthbert, B. N. (2012). Research Domain Criteria: cognitive systems, neural circuits, and dimensions of behavior. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, *14*(1), 29–37.

Nee, D. E., & Brown, J. W. (2012). Rostral-caudal gradients of abstraction revealed by multi-variate pattern analysis of working memory. *Neuroimage*, *63*(3), 1285–1294.

Neumann, O. (1984). Automatic processing: a review of recent findings and a plea for an old theory. In W. Prinz, & A. F. Sanders (Hrsg.), *Cognition and motor processes* (S. 255–294). Berlin: Springer.

Neumann, O., & Klotz, W. (1994). Motor responses to nonreportable, masked stimuli: Where is the limit of direct parameter specification? In C. Umilta, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and performance 15: Conscious and nonconscious information processing* (S. 123–150). Cambridge, MA: The MIT Press.

Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *12*(2), 241–268.

Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: willed and automatic control of behavior. In R. J. Davidson, G. E. Schwartz, & D. Shapiro (Hrsg.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research* (Bd. 4, S. 1–18). New York: Plenum Press.

Nutt, D. J., Lingford-Hughes, A., Erritzoe, D., & Stokes, P. R. (2015). The dopamine theory of addiction: 40 years of highs and lows. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(5), 305–312.

O'Reilly, R. C. (2006). Biologically Based Computational Models of High-Level Cognition. *Science*, *314*(5796), 91–94.

O'Reilly, R. C., & Frank, M. J. (2006). Making Working Memory Work: A Computational Model of Learning in the Prefrontal Cortex and Basal Ganglia. *Neural Computation*, *18*(2), 283–328.

O'Reilly, R. C., Herd, S. A., & Pauli, W. M. (2010). Computational models of cognitive control. *Current Opinion in Neurobiology*, *20*(2), 257–261.

O'Reilly, R. C., Hazy, T. E., & Herd, S. A. (im Druck). The Leabra cognitive architecture. In S. Chipman (Ed.), *The Oxford handbook of cognitive science* (Vol. 1). Oxford: Oxford University Press.

Ochsner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Rethinking feelings: An fMRI study of the cognitive regulation of emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*(8), 1215–1229.

Owen, A. M., Downes, J. J., Sahakian, B. J., Polkey, C. E., & Robbins, T. W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, *28*, 1021–1034.

Parks-Stamm, E. J., Gollwitzer, P. M., & Oettingen, G. (2007). Action control by implementation intentions: Effective cue detection and efficient response initiation. *Social Cognition*, *25*(2), 248–266.

Pauen, M. (2006). *Illusion Freiheit? Mögliche und unmögliche Konsequenzen der Hirnforschung* (2. Aufl.). Frankfurt a.M.: Fischer.

Pauen, M., & Roth, G. (2008). *Freiheit, Schuld und Verantwortung. Grundzüge einer naturalistischen Theorie der Willensfreiheit*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.

Peters, J., & Büchel, C. (2010). Neural representations of subjective reward value. *Behavioural Brain Research*, *213*(2), 135–141.

Pezzulo, G., & Rigoli, F. (2011). The value of foresight: how prospection affects decision-making. *Frontiers in Neuroscience*, *5*, 79.

Plessow, F., Fischer, R., Kirschbaum, C., & Goschke, T. (2011). Inflexibly focused under stress: acute psychosocial stress increases shielding of action goals at the expense of reduced cognitive flexibility with increasing time lag to the stressor. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(11), 3218–3227.

Plessow, F., Kiesel, A., & Kirschbaum, C. (2012a). The stressed prefrontal cortex and goal-directed behaviour: acute psychosocial stress impairs the flexible implementation of task goals. *Experimental Brain Research*, *216*(3), 397–408.

Plessow, F., Schade, S., Kirschbaum, C., & Fischer, R. (2012b). Better not to deal with two tasks at the same time when stressed? Acute psychosocial stress reduces task shielding in dual-task performance. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, *12*(3), 557–570.

Posner, M. I., & Snyder, C. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Hrsg.), *Information processing and cognition* (S. 55–85). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Prinz, W. (2004). Kritik des freien Willens: Bemerkungen über eine soziale Institution. *Psychologische Rundschau*, *55*, 198–206.

Prinz, W., Aschersleben, G., & Koch, I. (2013). Cognition and action. In E. Morsella, J. A. Bargh, & P. M. Gollwitzer (Hrsg.), *Oxford handbook of human action* (S. 35–71). Oxford: Oxford University Press.

Puca, R. M. S. (2001). The influence of the achievement motive on spontaneous thoughts in pre- and postdecisional action phases. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *27*, 302–308.

Quirin, M., Bode, R. C., & Kuhl, J. (2011). Recovering from negative events by boosting implicit positive affect. *Cognition & Emotion*, *25*(3), 559–570.

Reason, J. T. (1984). Lapses of attention. In R. Parasuraman, & D. Davies (Hrsg.), *Varieties of attention* (S. 515–550). New York: Academic Press.

Redish, A. D. (2013). *The Mind within the Brain: How we make decisions and how those decisions go wrong*. New York: Oxford University Press.

Redish, A. D., Jensen, S., & Johnson, A. (2008). A unified framework for addiction: vulnerabilities in the decision process. *The Behavioral and Brain Sciences*, *31*(4), 415–437.

Richter, F. R., & Yeung, N. (2014). Neuroimaging studies of task switching. In J. A. Grange, & G. Houghton (Hrsg.), *Task switching and cognitive control* (S. 237–271). Oxford: Oxford University Press.

Riggall, A. C., & Postle, B. R. (2012). The relationship between working memory storage and elevated activity as measured with functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, *32*(38), 12990–12998.

Rive, M. M., Rooijen, G. van, Veltman, D. J., Phillips, M. L., Schene, A. H., & Ruhe, H. G. (2013). Neural correlates of dysfunctional emotion regulation in major depressive disorder. A systematic review of neuroimaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *37*(10 Pt 2), 2529–2553.

Robbins, T. W., Gillan, C. M., Smith, D. G., Wit, S. de, & Ersche, K. D. (2012). Neurocognitive endophenotypes of impulsivity and compulsivity: towards dimensional psychiatry. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(1), 81–91.

Robinson, T. E., & Berridge, K. C. (2008). Review. The incentive sensitization theory of addiction: some current issues. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1507), 3137–3146.

Roca, M., Torralva, T., Gleichgerrcht, E., Woolgar, A., Thompson, R., Duncan, J., & Manes, F. (2011). The role of Area 10 (BA10) in human multitasking and in social cognition: a lesion study. *Neuropsychologia*, *49*(13), 3525–3531.

Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*(2), 207–231.

Rogers, T. T., & McClelland, J. L. (2014). Parallel Distributed Processing at 25: further explorations in the microstructure of cognition. *Cognitive Science*, *38*(6), 1024–1077.

Rolls, E. T. (2010). Attractor networks. *WIREs Cognitive Science*, *1*, 119–134.

Rösler, F. (2005). Neuronale Korrelate der Handlungsausführung. Zur Validität der Experimente von Libet (1983). In D. Stederoth, & K. Köchy (Hrsg.), *Willensfreiheit als interdisziplinäres Problem* (S. 165–190). Freiburg i. Br: Alber.

Rösler, F. (2011). *Psychophysiologie der Kognition – Eine Einführung in die kognitive Neurowissenschaft*. Heidelberg: Springer.

Rowe, G., Hirsh, J. B., & Anderson, A. K. (2007). Positive affect increases the breadth of attentional selection. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, *104*(1), 383–388.

Ruge, H., Jamadar, S., Zimmermann, U., & Karayanidis, F. (2013). The many faces of preparatory control in task switching: reviewing a decade of fMRI research. *Human Brain Mapping*, *34*(1), 12–35.

Ruge, H., & Wolfensteller, U. (2010). Rapid Formation of Pragmatic Rule Representations in the Human Brain during Instruction-Based Learning. *Cerebral Cortex*, *20*(7), 1656–1667.

Ruge, H., & Wolfensteller, U. (2013). Functional integration processes underlying the instruction-based learning of novel goal-directed behaviors. *Neuroimage*, *68*, 162–172.

Ruge, H., & Wolfensteller, U. (2015). Distinct fronto-striatal couplings reveal the double-faced nature of response-outcome relations in instruction-based learning. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *15*(2), 349–364.

Schacter, D. L., Addis, D. R., Hassabis, D., Martin, V. C., Spreng, R. N., & Szpunar, K. K. (2012). The future of memory: remembering, imagining, and the brain. *Neuron*, *76*(4), 677–694.

Scherbaum, S., Fischer, R., Dshemuchadse, M., & Goschke, T. (2011). The dynamics of cognitive control: evidence for within trial conflict adaptation from frequency tagged EEG. *Psychophysiology*, *48*(5), 591–600.

Scherbaum, S., Dshemuchadse, M., Ruge, H., & Goschke, T. (2012). Dynamic goal states: adjusting cognitive control without conflict monitoring. *Neuroimage*, *63*(1), 126–136.

Schmitz, T. W., De Rosa, E., & Anderson, A. K. (2009). Opposing influences of affective state valence on visual cortical encoding. *Journal of Neuroscience*, *29*(22), 7199–7207.

Schouwenburg, M. R. van, Aarts, E., & Cools, R. (2010). Dopaminergic modulation of cognitive control: Distinct roles for the prefrontal cortex and basal ganglia. *Current Pharmacological Design*, *16*(18), 2026–2032.

Schultz, W. (2013). Updating dopamine reward signals. *Current Opinion in Neurobiology*, *23*(2), 229–238.

Schurger, A., Sitt, J. D., & Dehaene, S. (2012). An accumulator model for spontaneous neural activity prior to self-initiated movement. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, *109*(42), E2904–2913.

Schweitzer, N. J., Saks, M. J., Murphy, E. R., Roskies, A. L., Sinnott-Armstrong, W., & Gaudet, L. M. (2011). Neuroimages as evidence in a mens rea defense: no impact. *Psychology, Public Policy, and Law*, *17*(3), 357–393.

Serences, J. T., Ester, E. F., Vogel, E. K., & Awh, E. (2009). Stimulus-specific delay activity in human primary visual cortex. *Psychological Science*, *20*(2), 207–214.

Shackman, A. J., Salomons, T. V., Slagter, H. A., Fox, A. S., Winter, J. J., & Davidson, R. J. (2011). The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(3), 154–167.

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, *298*, 199–209.

Shallice, T., & Burgess, P. (1991). Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain*, *114*, 727–741.

Shallice, T., Burgess, P. W., Schon, F., & Baxter, D. M. (1989). The origins of utilization behaviour. *Brain*, *112*(Pt 6), 1587–1598.

Sheeran, P., & Orbell, S. (2000). Using implementation intentions to increase attendance for cervical cancer screening. *Health Psychology*, *19*, 283–289.

Sheeran, P., Webb, T. L., & Gollwitzer, P. M. (2005). The Interplay Between Goal Intentions and Implementation Intentions. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *31*(1), 87–98.

Shenhav, A., Botvinick, M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: an integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, *79*(2), 217–240.

Simon, J. R. (1969). Reactions towards the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, *81*, 174–176.

Sinnot-Armstrong, W., & Nadel, L. (Hrsg.). (2011). *Conscious will and responsibility*. Oxford: Oxford University Press.

Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H. J., & Haynes, J.-D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience*, *11*(5), 543–545.

Stelzel, C., Basten, U., & Fiebach, C. J. (2011). Functional connectivity separates switching operations in the posterior lateral frontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(11), 3529–3539.

Stiensmeier-Pelster, J. (1994). Choice of decision-making strategies and action versus state orientation. In J. Kuhl, & J. Beckmann (Hrsg.), *Volition and personality: Action- versus state orientation* (S. 167–176). Seattle: Hogrefe.

Strack, F., & Deutsch, R. (2004). Reflective and impulsive determinants of social behavior. *Personality and Social Psychology Review*, *8*(3), 220–247.

Strobach, T., Salminen, T., Karbach, J., & Schubert, T. (2014). Practice-related optimization and transfer of executive functions: a general review and a specific realization of their mechanisms in dual tasks. *Psychological Research*, *78*(6), 836–851.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reaction. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 643–662.

Stuss, D. T., & Knight, R. T. (2013). *Handbook of frontal lobe function*. Oxford: Oxford University Press.

Szczepanski, S. M., & Knight, R. T. (2014). Insights into human behavior from lesions to the prefrontal cortex. *Neuron*, *83*(5), 1002–1018.

Tang, Y. Y., Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Volkow, N. D. (2015). Circuitry of self-control and its role in reducing addiction. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(8), 439–444.

Tangney, J. P., Baumeister, R. F., & Boone, A. L. (2004). High self-control predicts good adjustment, less pathology, better grades, and interpersonal success. *Journal of Personality*, *72*(2), 271–324.

Trevena, J. A., & Miller, J. (2010). Brain preparation before a voluntary action: Evidence against unconscious movement initiation. *Consciousness and Cognition*, *19*(1), 447–456.

Ullsperger, M., Bylsma, L. M., & Botvinick, M. (2005). The conflict adaptation effect: It's not just priming. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *5*(4), 467–472.

Ullsperger, M., Danielmeier, C., & Jocham, G. (2014). Neurophysiology of performance monitoring and adaptive behavior. *Physiological Reviews*, *94*, 35–79.

Vandierendonck, A., Liefooghe, B., & Verbruggen, F. (2010). Task switching: Interplay of reconfiguration and interference control. *Psychological Bulletin*, *136*(4), 601–626.

Vihvelin, K. (2013). *Causes, laws, and free will*. Oxford: Oxford University Press.

Volkow, N. D., & Baler, R. D. (2015). NOW vs LATER brain circuits: implications for obesity and addiction. *Trends in Neurosciences*, *38*(6), 345–352.

Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2014). Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles. *Neuroscientist*, *20*(2), 150–159.

Vygotski, L. S. (1962). *Thought and language*. Cambridge, MA: MIT Press.

Wallis, J. D., Anderson, K. C., & Miller, E. K. (2001). Single neurons in prefrontal cortex encode abstract rules. *Nature*, *411*(6840), 953–956.

Walser, M., Fischer, R., & Goschke, T. (2012). The failure of deactivating intentions: Aftereffects of completed intentions in the repeated prospective memory cue paradigm. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, *38*(4), 1030–1044.

Walser, M., Goschke, T., & Fischer, R. (2014). The difficulty of letting go: moderators of the deactivation of completed intentions. *Psychological Research*, *78*(4), 574–583.

Walter, H., Kalckreuth, A. von, Schardt, D., Stephan, A., Goschke, T., & Erk, S. (2009). The temporal dynamics of voluntary emotion regulation. *PLoS ONE*, *4*(8), e6726.

Waszak, F., Hommel, B., & Allport, D. A. (2003). Task-switching and long-term priming: Role of episodic stimulus-task bindings in task-shift costs. *Cognitive Psychology*, *46*(4), 361–413.

Waszak, F., Cardoso-Leite, P., & Hughes, G. (2012). Action effect anticipation: Neurophysiological basis and functional consequences. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *36*(2), 943–959.

Whelan, R., Conrod, P. J., Poline, J.-B., Lourdusamy, A., Banaschewski, T., Barker, G. J., & Garavan, H. (2012). Adolescent impulsivity phenotypes characterized by distinct brain networks. *Nature Neuroscience*, *15*(6), 920–925.

Wiers, R. W., Gladwin, T. E., Hofmann, W., Salemink, E., & Ridderinkhof, K. R. (2013). Cognitive bias modification and cognitive control training in addiction and related psychopathology: Mechanisms, clinical perspectives, and ways forward. *Clinical Psychological Science*, *1*(2), 192–212.

Winsler, A., Fernyhough, C., & Montero, I. (Hrsg.). (2009). *Private speech, executive functioning, and the development of verbal self-regulation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wittchen, H.-U., Jacobi, F., Rehm, J., Gustavsson, A., Svensson, M., Jonsson, B., & Steinhausen, H. C. (2011). The size and burden of mental disorders and other disorders of the brain in Europe 2010. *European Neuropsychopharmacology*, *21*(9), 655–679.

Wolfensteller, U., & Ruge, H. (2012). Frontostriatal mechanisms in instruction-based learning as a hallmark of flexible goal-directed behavior. *Frontiers in Psychology*, *3*, 192.

Wylie, G., & Allport, A. (2000). Task switching and the measurement of "switch costs". *Psychological Research*, *63*(3–4), 212–233.

Yeung, N., Nystrom, L. E., Aronson, J. A., & Cohen, J. D. (2006). Between-task competition and cognitive control in task switching. *Journal of Neuroscience*, *26*(5), 1429–1438.

Zanto, T. P., Rubens, M. T., Thangavel, A., & Gazzaley, A. (2011). Causal role of the prefrontal cortex in top-down modulation of visual processing and working memory. *Nature Neuroscience*, *14*(5), 656–661.

Zeigarnik, B. (1927). Das Behalten erledigter und unerledigter Handlungen. *Psychologische Forschung*, *9*, 1–85.

Lernen und Gedächtnis

Kapitel 10 **Lernen – Assoziationsbildung, Konditionierung und implizites Lernen – 319**
Iring Koch und Christoph Stahl

Kapitel 11 **Kategorisierung und Wissenserwerb – 357**
Michael R. Waldmann

Kapitel 12 **Gedächtniskonzeptionen und Wissensrepräsentationen – 401**
Axel Buchner und Martin Brandt

Patienten mit schweren Gedächtnisstörungen (Amnesien) sind in ihrem täglichen Leben massiv behindert. Dies zeigt, dass Menschen (und nicht nur Menschen) darauf angewiesen sind, Neues zu erlernen und früher Gelerntes zu erinnern. Ohne Gedächtnis gibt es kein Lernen, und ohne Lernen gelangt nichts Neues in unser Gedächtnis. Lernen und Gedächtnis sind also eng miteinander verknüpft. Dennoch lassen sich diese psychischen Funktionen mit unterschiedlichen Methoden untersuchen, sodass wir diesen zusammenhängenden Themenkomplex in mehrere Kapitel aufgeteilt haben.

In ▶ Kap. 10 werden vorwiegend die elementaren Lernmechanismen, die bei Mensch und Tier gleichermaßen nachweisbar sind, behandelt. Hierzu zählt vor allem das Konditionieren, aber auch das „implizite" Lernen, bei dem Menschen komplexe Regelhaftigkeiten der Umwelt in ihrem Handeln nutzen, ohne dass ihnen dies zwangsläufig bewusst wird.

Lernen ist auch die Grundlage für Kategorisierungsprozesse. So hängt beispielsweise das Erkennen von Objekten maßgeblich von früheren Erfahrungen ab, die man mit anderen Exemplaren dieser Kategorie gemacht hat (z. B. ist es wichtig zu wissen, ob ein Pilz essbar ist oder nicht). Ein Objekt zu kategorisieren, bedeutet damit u. a. auch, bereits erworbenes Wissen für die Auswahl von Handlungen zu nutzen. Wie geschieht diese Kategorisierung? Und wie sind Kategorien im Gedächtnis repräsentiert? Diese Fragen werden in ▶ Kap. 11 behandelt.

In ▶ Kap. 12 wird schließlich die Frage, wie das Gedächtnis aufgebaut ist und wie es funktioniert, erörtert. Hier wird beschrieben, welche Prinzipien dem Encodieren, Behalten und Abrufen von Wissen zugrunde liegen. Außerdem wird der Frage nachgegangen, ob verschiedene – und wenn ja, welche – voneinander unabhängige Gedächtnissysteme existieren.

Lernen – Assoziationsbildung, Konditionierung und implizites Lernen

Iring Koch und Christoph Stahl

10.1 Einleitung – 320
10.1.1 Definition und Abgrenzung – 320
10.1.2 Historische Einordnung – 321

10.2 Experimentelle Untersuchungsparadigmen in der Lernpsychologie – 322
10.2.1 Explizites, hypothesengeleitetes Lernen (Wissenserwerb) vs. implizites, inzidentelles Lernen – 322
10.2.2 Lernen von neuen Verhaltensweisen: Konditionierungsparadigmen – 323
10.2.3 Erwerb von neuen Einstellungen und Wissen – 325
10.2.4 Zusammenfassung – 327

10.3 Grundphänomene des assoziativen Lernens – 328
10.3.1 Erwerb und Löschung – 328
10.3.2 Merkmale des Reizes: Generalisierung und Diskrimination – 330
10.3.3 Merkmale der gelernten Reaktion – 331
10.3.4 Biologische Einschränkungen des Lernens – 332
10.3.5 Wann wird gelernt? Kontiguität, Kontingenz und Erwartungsdiskrepanz – 333
10.3.6 Zusammenfassung – 337

10.4 Mechanismen des assoziativen Lernens – 337
10.4.1 Was wird gelernt? – 337
10.4.2 Das Rescorla-Wagner-Modell als Basismodell assoziativen Lernens – 340
10.4.3 Limitationen des Rescorla-Wagner-Modells – 341
10.4.4 Elementale und konfigurale Modelle – 342
10.4.5 Zusammenfassung – 343

10.5 Implizites Lernen – 343
10.5.1 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung impliziten Lernens – 344
10.5.2 Prädiktive Relationen beim impliziten Lernen – 345
10.5.3 Unbewusstes Lernen – 346
10.5.4 Zusammenfassung – 348

10.6 Anwendungsbeispiele – 348

10.7 Ausblick – 349

10.8 Weiterführende Informationen – 350

Literatur – 352

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_10

Im Blickfang

Assoziatives Lernen als elementarer Mechanismus der Verhaltensänderung

Grundlegende Mechanismen des Lernens laufen bei einfacheren Organismen nach denselben Prinzipien ab wie beim Menschen. Wichtige Fortschritte in der Erforschung der neurophysiologischen und molekularen Grundlagen des Lernens stammen aus Untersuchungen an der marinen Nacktschnecke *Aplysia californica* (Kandel und Hawkins 1992). *Aplysia* ist eine Seeschnecke, die bis zu 1 m lang und bis zu 7 kg schwer werden kann (◘ Abb. 10.1). Bei *Aplysia* ist das Nervensystem besonders einfach aufgebaut. Es enthält nur ca. 20.000 Nervenzellen (Neurone). Diese geringe Anzahl von Neuronen sowie ihre Größe erleichtern es, individuelle Neurone sowie deren Verschaltung zu identifizieren.

Aplysia zeigt eine Reihe von unbedingten Reaktionen (Reflexen), z. B. den Kiemenrückzugsreflex. Berührt man *Aplysia* am Kiemenmantel oder an der Atemröhre (Siphon), dann zieht sie die Kiemen ein, weil sowohl Mantel als auch Siphon eine direkte Verbindung zum Motoneuron des Kiemenmuskels haben. Dieser Kiemenrückzugsreflex, der ursprünglich für Mantel und Siphon ungefähr gleich stark ist, kann selektiv verstärkt werden, wenn die Berührung des Mantels oder des Siphons von einem Schmerzreiz (einem Stromschlag) am Schwanz des Tieres gefolgt wird. In Experimenten wird z. B. erst der Mantelrand berührt, und danach folgt der Stromschlag. Nach nur fünfmaliger Wiederholung dieser Paarung führt das Berühren des Mantels bereits zu einem deutlich stärkeren Rückziehen der Kiemen als vor der Konditionierungsprozedur. Die Kontrollbedingung für diesen Lerneffekt ist die Berührung des Siphons, der nicht mit dem Stromschlag am Schwanz gepaart wurde. Tatsächlich löst die Berührung des Mantelrandes eine viel stärkere Reaktion als die Berührung des Siphons aus. Dies wird als Beleg für klassisches Konditionieren bei *Aplysia* gewertet (► Abschn. 10.2.2).

Die neurophysiologischen und molekularen Grundlagen dieses Lerneffekts sind mittlerweile sehr gut verstanden (Kandel und Hawkins 1992). Die neuronale Verschaltung der an der Konditionierung beteiligten Nervenzellen ist in ◘ Abb. 10.1 vereinfacht dargestellt. Die Reizung des Siphons bzw. des Mantelrandes erregt sensorische Neurone, die synaptischen Kontakt mit einem Motoneuron haben, das für das Zurückziehen der Kiemen verantwortlich ist. Die Abbildung zeigt außerdem noch ein drittes sensorisches Neuron, das durch den Stromschlag am Schwanz erregt werden kann. Dessen Erregung wird über ein modulatorisches Neuron zu den synaptischen Regionen der beiden anderen sensorischen Neurone weitergeleitet. An diesen Synapsen erzeugt die Erregung des modulatorischen Neurons eine sogenannte präsynaptische Bahnung, d. h., die Synapsen der beiden sensorischen Neuronen schütten nun leichter ihre Botenstoffe (Neurotransmitter) aus.

Um nun die spezifische Konditionierung beispielsweise der Reaktion auf die Reizung des Mantelrandes zu erzeugen, ist die zeitliche Koppelung (d. h. die Kontiguität) der Aktivität des modulatorischen und des beteiligten sensorischen Neurons erforderlich. Es zeigte sich, dass die Reizung des Mantelrandes dem Stromschlag ungefähr 500 ms vorausgehen muss. Diese Zeitverhältnisse führen aufgrund der unterschiedlichen neuronalen Verschaltungen dazu, dass die Erregung des modulatorischen Neurons die Synapse des sensorischen Neurons genau dann erreicht, wenn dieses gerade selbst „gefeuert" hat. Unter diesen spezifischen zeitlichen Verhältnissen ergibt sich eine besonders starke präsynaptische Bahnung des sensorischen Neurons, die die neurophysiologische Grundlage des beobachteten Konditionierungsprozesses bei *Aplysia* darstellt. Die besondere Stärke und Dauerhaftigkeit dieser präsynaptischen Bahnung beruht auf einer ganzen Kaskade von molekularen Prozessen, die in der präsynaptischen Endigung der Sinneszelle unter Beteiligung des Neurotransmitters *Serotonin* stattfinden. Die molekularen Grundlagen dieses elementaren Lernprozesses sind mittlerweile bis ins Details entschlüsselt (ausführliche Darstellung z. B. in Kandel und Hawkins 1992).

Die Untersuchung des klassischen Konditionierens bei *Aplysia* hat vor allem zwei bemerkenswerte Ergebnisse gebracht. Erstens handelt es sich um das Konditionieren eines Reflexes. Obwohl dieser Fall bei *Aplysia* etwas untypisch ist, weil der konditionierte Reiz (CS) bereits *vor* der Konditionierung eine leichte Reaktion auslöst, könnte man diesen Befund als Beleg dafür werten, dass klassisches Konditionieren bei *Aplysia* zur Herstellung einer neuen Reiz-Reaktions-Verbindung führt. Das zweite bemerkenswerte Ergebnis ist die Übereinstimmung der erforderlichen zeitlichen Verhältnisse zwischen den Reizen mit denjenigen, die man typischerweise auch bei höheren Organismen findet (► Abschn. 10.3.5). Bei *Aplysia* ist zeitliche Kontiguität für den Lernprozess erforderlich, und diese Erfordernis ergibt sich bei ihr aus spezifischen neurophysiologischen und molekularen Gegebenheiten (weitere neurophysiologische Befunde zum Konditionieren in Fanselow und Poulos 2005; Güntürkün 1996; Thompson 2005).

Die Erforschung der neurophysiologischen Grundlagen des Konditionierens stellt zweifellos einen großen Fortschritt dar. Die Ergebnisse liefern eine empirische Rechtfertigung für eine Spekulation, die von Hebb bereits 1949 vorgebracht wurde. Hebb (1949) vermutete, dass sich eine Assoziation zwischen zwei miteinander verbundenen Neuronen dadurch verstärkt, dass sie beide gleichzeitig aktiv sind. Diese *Hebb-Lernregel* verkörpert die Vorstellung, dass zeitliche und räumliche Kontiguität eine entscheidende Voraussetzung für Lernen darstellen.

10.1 Einleitung

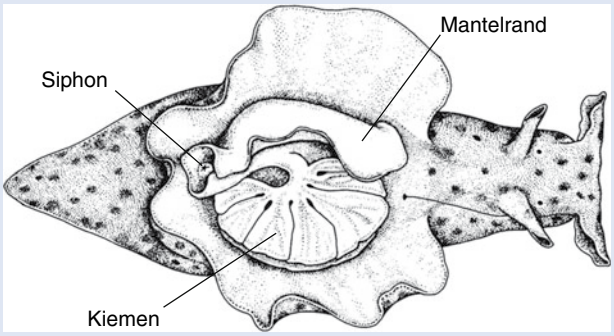
Menschen sind darauf angewiesen, Neues zu erlernen und früher Gelerntes zu erinnern. Ohne Gedächtnis gibt es kein Lernen, und ohne Lernen gelangt nichts Neues in unser Gedächtnis. Lernen und Gedächtnis sind also eng miteinander verknüpft. Lernen ist auch die Grundlage für Kategorisierungsprozesse (► Kap. 11). So hängt z. B. das Erkennen von Objekten maßgeblich von früheren Erfahrungen ab, die man mit anderen Exemplaren dieser Kategorie gemacht hat (z. B. ist es wichtig zu wissen, ob ein Pilz essbar ist oder nicht). Ein Objekt zu kategorisieren bedeutet damit u. a. auch, bereits erworbenes Wissen für die Auswahl von Handlungen zu nutzen. Lernen resultiert also in Wissen, was wiederum die Grundlage für eine erfolgreiche Handlungssteuerung darstellt. In diesem Kapitel behandeln wir vor allem die elementaren Lernmechanismen, die bei Mensch und Tier gleichermaßen nachweisbar sind. Hierzu zählt vor allem das assoziative Lernen, das zumeist mittels Konditionierungsprozeduren untersucht wird, aber auch das implizite Lernen, bei dem Menschen komplexe Regelhaftigkeiten der Umwelt in ihrem Handeln nutzen, ohne dass ihnen dies zwangsläufig bewusst wird. Dabei werden wir auch Modelle des Lernens darstellen und diskutieren, inwieweit sowohl assoziative als auch kognitive Mechanismen beteiligt sind.

10.1.1 Definition und Abgrenzung

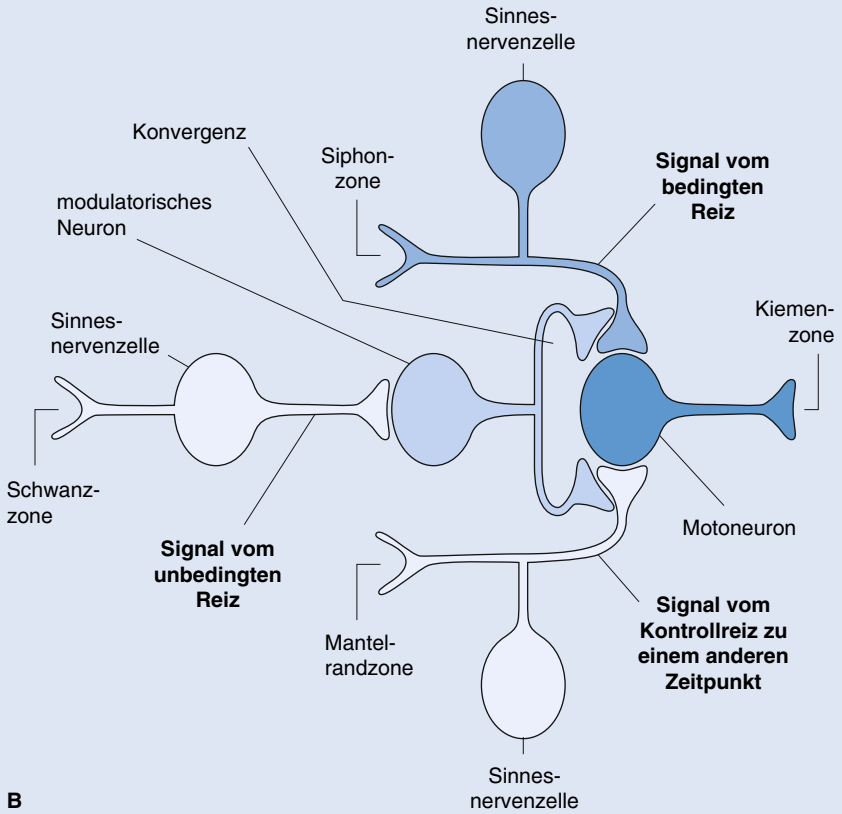
Die große Flexibilität und Adaptivität menschlichen und tierischen Verhaltens setzen die Fähigkeit zum Lernen voraus. Wie aber lässt sich **Lernen** definieren? Die meisten Forscher stimmen darin überein, dass Lernen ein Prozess ist, der als Ergebnis von

Im Blickfang (*Fortsetzung*)

Abb. 10.1 **A** Skizze einer *Aplysia californica*. **B** Schematische Darstellung der Neurone, die an der Konditionierung des Kiemenrückzugsreflexes beteiligt sind



A



B

Erfahrungen relativ langfristige Änderungen im Verhaltenspotenzial erzeugt (z. B. Anderson 2000).

Gehen wir die Bestandteile dieser Definition der Reihe nach durch. Lernen ist das *Ergebnis von Erfahrung*, weil z. B. auch körperliches Wachstum zu langfristigen Änderungen im Verhaltenspotenzial führen kann, was man allerdings eher auf einen Reifungs- oder Entwicklungsprozess als auf einen Lernprozess zurückführen würde. Weiterhin sagt die Definition, dass Lernen zu *relativ langfristigen Änderungen* führt, um kurzfristige Änderungen, z. B. als Folge von Ermüdung, auszuschließen. Schließlich spezifiziert die Definition Lernen als Änderung im *Verhaltenspotenzial*, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich Lernen nicht immer unmittelbar im Verhalten ausdrückt, sondern sich häufig erst zu einer späteren Gelegenheit zeigt.

Bei einer Definition ist es wichtig, dass sie das Phänomen definiert, ohne dabei bereits eine bestimmte Erklärung vorauszusetzen. De Houwer et al. (2013) schlagen deshalb vor, Lernen rein funktional über die Verhaltensänderung und nicht mechanistisch z. B. über einen vermuteten Prozess der Assoziationsbildung zu definieren. Dadurch wird es zum Untersuchungsgegenstand, ob bzw. inwieweit Lernen tatsächlich durch die Bildung von Assoziationen, d. h. Verbindungen zwischen mentalen Vorstellungen (Repräsentationen), erklärt werden kann. Wir werden diese Frage später aufgreifen.

10.1.2 Historische Einordnung

Historisch ist die psychologische Erforschung des Lernens allerdings eng mit dem Begriff der Assoziation verbunden (ausführlichere Darstellung in Kiesel und Koch 2012, S. 12–15). Bereits von Aristoteles wurden drei Prinzipien der Assoziationsbildung

beschrieben: (1) Kontiguität, (2) Ähnlichkeit und (3) Kontrast. Das Kontiguitätsprinzip besagt, dass zwei Ereignisse assoziiert werden, wenn sie wiederholt zeitlich oder räumlich gemeinsam auftreten (z. B. Blitz und Donner). Die beiden letzteren Prinzipien besagen, dass sowohl große Ähnlichkeit als auch große Unähnlichkeit (d. h. Kontrast) eine Assoziation zwischen zwei Elementen stiften können.

Einige alltägliche Beispiele können das Kontiguitätsprinzip veranschaulichen. So kann bei einigen Menschen allein das Geräusch des Zahnarztbohrers bereits im Wartezimmer zu Schweißausbrüchen führen, weil dieses Geräusch früher mit unangenehmen Erfahrungen assoziiert wurde und diese nun wieder ankündigt. Diese Form des Lernens wird als *klassisches Konditionieren* bezeichnet. Historisch betrachtet ist hier vor allem die Pionierleistung von Iwan P. Pawlow hervorzuheben, der beim Studium der Verdauungstätigkeit des Hundes entdeckt hat, dass die Speichelflussreaktion des Hundes nicht nur durch Futter ausgelöst werden kann, sondern auch durch andere Reize (z. B. einen Glockenton), die der Futtergabe zuverlässig vorausgehen (Pawlow 1927).

Menschen lernen aber auch die Assoziation zwischen einer Handlung und dem darauffolgenden Ereignis (z. B. dem Betätigen eines Lichtschalters und dem Effekt, dass es im dunklen Raum hell wird). Ein früher Pionier der Erforschung dieses instrumentellen Lernens war Edward L. Thorndike (1911), der vor allem bei Katzen untersuchte, wie Verhalten im Rahmen des Lernens durch Versuch und Irrtum (*trial and error*) von seinen Handlungseffekten abhängig ist. Die Abhängigkeit des Verhaltens von seinen Konsequenzen wurde dann vor allem von Burrhus F. Skinner (1938) systematisch unter der Bezeichnung *operantes Konditionieren* studiert und resultierte in der Entwicklung von Verstärkerplänen (Ferster und Skinner 1957), die man sowohl für therapeutische Interventionen (etwa in der Verhaltenstherapie) als auch für pädagogische Zwecke ganz allgemein einsetzen kann.

Eine von Beginn an wichtige Frage betrifft die Rolle des Bewusstseins beim Lernen. Es wurde vermutet, dass elementare Lernprozesse, wie etwa beim Konditionieren, auch unbewusst ablaufen können (kritische Übersicht in Lovibond und Shanks 2002). Häufig werden aber auch sehr komplexe, regelhafte Verbindungen gelernt. Beispielsweise lernen Kinder beim Spracherwerb syntaktische Relationen in Wortfolgen, die überaus komplex sind. Dabei werden mehr oder weniger beiläufig Regeln gelernt und erfolgreich angewandt, die nur schwer zu verbalisieren und möglicherweise kaum bewusst sind. Hierfür wurde von Arthur Reber 1967 der Begriff des *impliziten Lernens* geprägt.

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, für jede dieser Lernformen die elementaren Untersuchungsmethoden und Basisphänomene zu beschreiben sowie die wichtigsten Erklärungsansätze darzustellen. Obwohl sich die Untersuchungsmethoden deutlich voneinander unterscheiden, handelt es sich bei den verschiedenen Lernformen stets um das Lernen von prädiktiven (d. h. vorhersagekräftigen) Relationen zwischen Ereignissen: Beim klassischen Konditionieren wird vor allem gelernt, dass der konditionierte (bedingte) Stimulus (z. B. das Geräusch des Zahnarztbohrers) den unkonditionierten (unbedingten) Stimulus (z. B. Schmerz) ankündigt; beim operanten Konditionieren wird vor allem gelernt, dass eine Reaktion einen „wünschenswerten" oder unangenehmen Reiz als Effekt hat; und beim impliziten Lernen werden komplexe Relationen in Sequenzen von Reizen und/oder Reaktionen gelernt.

Die folgende Darstellung basiert auf einer Version dieses Kapitels für eine frühere Auflage (Koch 2008), ist aber in großen Teilen umstrukturiert und aktualisiert. Eine ausführlichere Darstellung der Lernpsychologie findet sich auch bei Kiesel und Koch (2012). Natürlich kann das vorliegende Kapitel keinesfalls einen umfassenden Überblick über jedes der oben genannten Gebiete geben. Hierfür muss auf die vertiefende Literatur verwiesen werden.

10.2 Experimentelle Untersuchungsparadigmen in der Lernpsychologie

In diesem Abschnitt werden wir die grundlegenden Untersuchungsmethoden in der Lernpsychologie darstellen. Zunächst werden wir kurz die übergeordnete und ganz allgemeine Frage angehen, inwieweit es qualitativ unterscheidbare Lernprozesse gibt, die in unterschiedlichem Maße mit „bewusster Mühe" einhergehen.

10.2.1 Explizites, hypothesengeleitetes Lernen (Wissenserwerb) vs. implizites, inzidentelles Lernen

In der Literatur wird häufig angenommen, dass es zwei separate Modi des Lernens gibt. Auf der einen Seite gibt es das explizite, hypothesengeleitete Lernen, das eine Lernintention erfordert sowie mühevolle und zeitaufwendige kognitive Prozesse beinhaltet. Ein Beispiel wäre etwas das Lernen in Schule und Studium, bei dem explizit repräsentiertes Wissen über Relationen in der Welt in „propositionalem Format" aufgebaut wird. Eine *Proposition* ist die kleinste Wissenseinheit, die einen Sachverhalt beschreibt und damit einen Wahrheitswert haben kann, also wahr oder falsch sein kann (z. B. „A verursacht B"). Demgegenüber stehen eher beiläufige (inzidentelle) Lernprozesse, die schnell und automatisch ablaufen sowie kognitiv wenig aufwendig sind und deswegen auch keine bewussten Verarbeitungsprozesse erfordern. Diese Art des Lernens könnte auf der automatischen Bildung von Assoziationen beruhen, die sich dann zwangsläufig im Verhalten auswirken, etwa im Sinne eines konditionierten Reflexes (Übersicht und Diskussion in Shanks 2010). Eine wichtige Frage bezieht sich nun darauf, ob die vorhandenen empirischen Phänomene durch allein die eine oder die andere Art des Lernens erklärt werden können bzw. ob beide Prozesse möglicherweise unabhängig voneinander zu den beobachtbaren Lerneffekten beitragen (Zwei-Prozess-Theorien).

Die Frage nach der Bewusstheit des Lernens werden wir in ▶ Abschn. 10.5 ausführlicher diskutieren. Zunächst werden wir aber experimentelle Untersuchungsanordnungen (Paradigmen) darstellen, mit denen das assoziative Lernen untersucht wurde. Es handelt sich dabei um Konditionierungsprozeduren, für die typischerweise nicht angenommen wird, dass sie sehr komplexe kognitive Schlussfolgerungsprozesse erfordern (obgleich diese

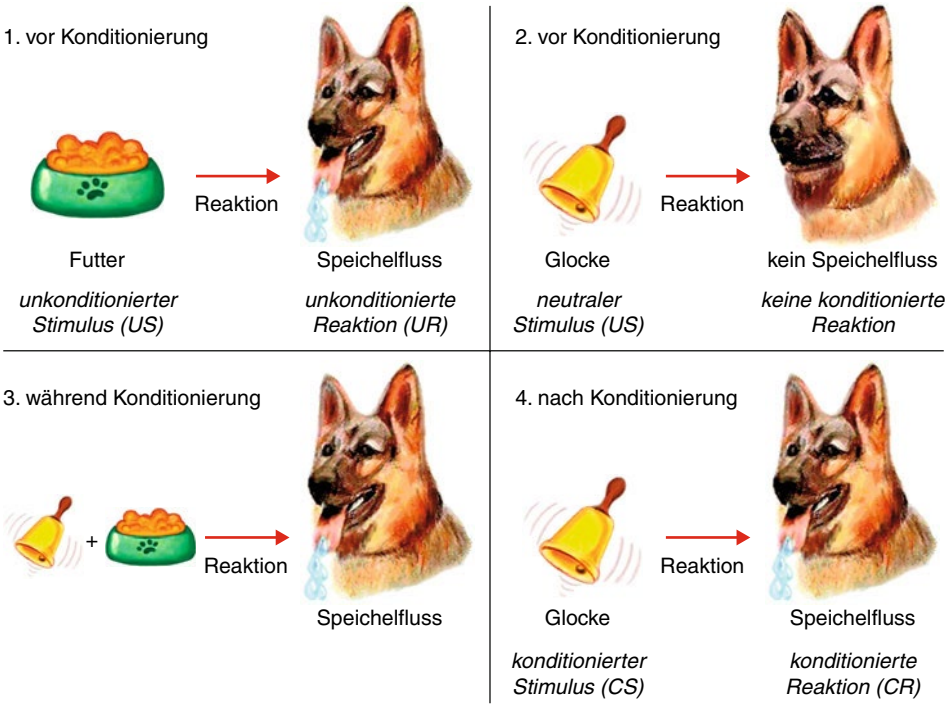


Abb. 10.2 Schematische Darstellung des klassischen Konditionierens. (Zeichnung von Viktoria Fedosejew)

Annahme durchaus kontrovers ist; vgl. den propositionalen Ansatz zum assoziativen Lernen z. B. in De Houwer 2009).

10.2.2 Lernen von neuen Verhaltensweisen: Konditionierungsparadigmen

Klassische Konditionierung (Signallernen)

Das **klassische Konditionieren** wurde von dem russischen Forscher Iwan P. Pawlow (1849–1936) erforscht, als er die Physiologie der Verdauungstätigkeit am Hund untersuchte. Zunächst ging es Pawlow in seinen Untersuchungen darum, den reflexhaft resultierenden Speichelfluss zu messen, wenn man Futter (Pawlow verwendete damals Fleischpulver) in den Mund des Hundes gibt. Dabei stellte sich aber heraus, dass der Hund nach einigen Versuchsdurchläufen bereits zu speicheln begann, sobald die Versuchsleiter das Labor betraten. Allein die Anwesenheit der Versuchsleiter löste nun also die Reaktion aus, die normalerweise erst auf die Fütterung folgte. Diese antizipatorische (vorwegnehmende) Reaktion, die Pawlow als *konditionierten Reflex* bezeichnete, wurde in der Folge systematisch mit einer Methode untersucht, die nun als klassisches Konditionieren bekannt ist.

In der Basisanordnung des klassischen Konditionierens wird ein **unkonditionierter Reiz** (*unconditioned stimulus*, US), z. B. Futter, der eine **unkonditionierte Reaktion** (*unconditioned response*, UR), z. B. Speichelfluss, nach sich zieht, mit einem zunächst, d. h. vor der Konditionierung, neutralen Reiz gepaart. Dieser ursprünglich neutrale Reiz wird dann zum **konditionierten Reiz** (*conditioned stimulus*, CS). Als CS hat Pawlow in seinen Experimenten das Läuten einer Glocke verwendet (Abb. 10.2). Nach einigen Paarungen des Glockentones mit dem Futter begann der Hund als **konditionierte Reaktion** (*conditioned response*, CR) schon beim Glockenton zu speicheln, sodass ein ursprünglich neutraler Reiz nun ein konditionierter Reiz geworden ist (Pawlow 1927). Seit seiner Entdeckung stellt das klassische Konditionieren eine wichtige Methode dar, um elementare assoziative Lernprozesse bei Menschen und Tieren zu untersuchen (▶ Zur Vertiefung 10.1).

In aktuelleren Studien zum assoziativen Lernen beim Menschen wird häufig ein experimentelles Paradigma verwendet, bei dem ein Reiz (hier statt CS häufig als Cue, d. h. Hinweisreiz, bezeichnet) ein weiteres relevantes Ereignis (hier statt US häufig *Outcome* genannt) vorhersagen lässt. So haben z. B. Shanks und Darby (1998) ihre Probanden gebeten, sich in die Rolle einer Ärztin bzw. Arztes hineinzuversetzen und auf der Basis von (fiktiven) Patientenakten herauszufinden, ob das Essen bestimmter Nahrungsmittel (z. B. Banane oder Schokolade = Cue) mit einer allergischen Reaktion (= Outcome) einhergeht bzw. ob eine Allergie zu erwarten ist. Die Vorhersage wurde mittels manueller Reaktion (linke vs. rechte Taste für „ja“ vs. „nein“) abgegeben. Hier ist also die Grundstruktur von Pawlows Konditionierungsanordnung beibehalten, aber es wird eine Reaktion (im Sinne einer Vorhersage des Outcome) gefordert, die bei menschlichen Probanden (typischerweise Studierenden) häufig ist (Tastendrücken). Überdies lässt sich dieses Paradigma leicht auf assoziatives Lernen komplexerer Relationen erweitern, etwa wenn es um die Wirkung der Kombination einzelner Nahrungsmittel geht (wie wir später beim Blockierungsphänomen noch sehen werden). Mit diesem Nahrungsallergieparadigma lassen sich alle wesentlichen Effekte der klassischen Konditionierung bzw. des assoziativen Lernens experimentell demonstrieren.

Operante Konditionierung (instrumentelles Lernen)

Mit dem Begriff „instrumentelles Lernen“, auch **operantes Konditionieren** genannt, bezeichnet man Lernprozesse in Situationen, in denen Ereignisse von der Ausführung einer Reaktion abhängen. Dies ist auch der wichtigste methodische Unterschied zum klassischen Konditionieren, bei dem der US als bedeutsames Ereignis *unabhängig* von der Reaktion (der CR) auftritt.

Zur Vertiefung 10.1

Der Fall des kleinen Albert – Konditionieren emotionaler Reaktionen und Verhaltenstherapie

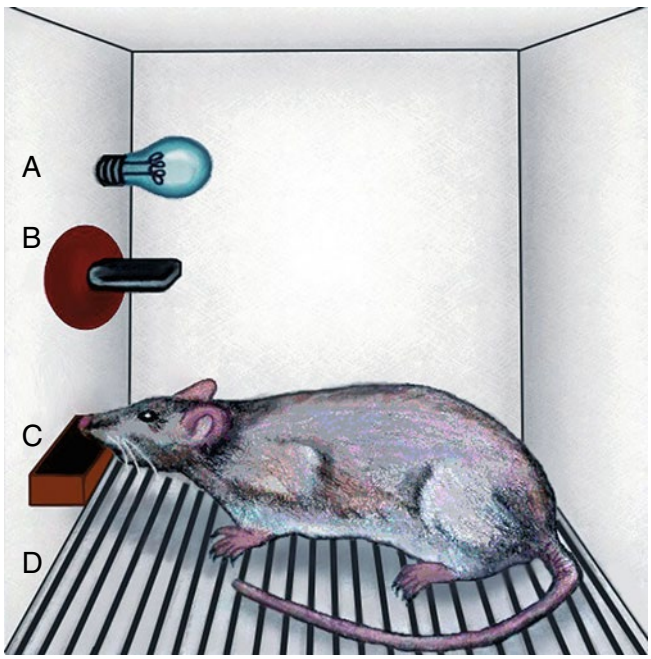
Möglicherweise lernen Menschen einen Teil ihrer vielfältigen emotionalen Reaktionen durch klassisches Konditionieren. Dies ist jedenfalls die Schlussfolgerung, die John B. Watson (1878–1958) aus einer Studie zur Furchtkonditionierung mit dem elf Monate alten Albert zog (Watson und Rayner 1920). Albert spielte gern mit einer weißen Ratte, die bei ihm also eine positive emotionale Reaktion auslöste. Um zu demonstrieren, dass emotionale Reaktionen gelerntes Verhalten sind, konditionierte Watson bei Albert nun eine negative emotionale Reaktion auf die Ratte. Diese Konditionierung geschah, indem Watson immer dann ein unangenehm lautes Geräusch erzeugte, wenn Albert die Ratte gezeigt wurde. Im Ergebnis dieser Prozedur lernte Albert schnell, auf die Ratte nicht mehr positiv zu reagieren (z. B. durch Hinwendung), sondern stattdessen zeigte er nun negative emotionale Reaktionen auf den Anblick der Ratte (z. B. begann er zu weinen und versuchte wegzukrabbeln). Diese neue emotionale Reaktion zeigt, dass auch Emotionen durch Lernprozesse konditioniert werden können (LeDoux 1998).

Diese Studie zur Furchtkonditionierung ist vielleicht eine der berühmtesten Studien in der Geschichte der Psychologie. In der Zwischenzeit haben sich die ethischen Standards stark verändert, sodass solche Studien heutzutage glücklicherweise nicht mehr durchgeführt werden. Gleichwohl wurden solche Befunde zum Anlass genommen, die Technik des Gegenkonditionierens in der Verhaltenstherapie zu entwickeln (Wolpe 1958). Beim Gegenkonditionieren wird eine vom Patienten unerwünschte Verhaltensweise durch eine neue, erwünschte Verhaltensweise „ersetzt". Allerdings gibt es Kritiker, die befürchten, dass solche Prozeduren auch dazu missbraucht werden können, Menschen gegen ihren Willen „umzuerziehen", wie es z. B. drastisch und kritisch in Stanley Kubricks Film *Uhrwerk Orange* dargestellt wird.

In der frühen Lernpsychologie wurde instrumentelles Lernen vor allem als Untersuchung des S-R-Lernens betrachtet (S steht hier für *stimulus*, also den Reiz, und R steht für *response*, die Reaktion). Diese Betrachtungsweise geht auf Edward L. Thorndike (1874–1949) zurück. In seinen Studien verwendete Thorndike (1911) Katzen als Versuchstiere und untersuchte, wie schnell sie sich aus einem Käfig befreien konnten. Außerhalb des Käfigs hatten die Katzen Zugang zu Futter, sodass ihre Befreiungsaktionen verstärkt (d. h. belohnt) wurden. Er stellte fest, dass die Katzen zunächst recht lange brauchten, um durch Versuch und Irrtum (*trial and error*) die richtigen Reaktionen zu finden, um aus dem Käfig zu kommen. Allerdings wurde diese Zeit mit zunehmender Übung immer kürzer. Thorndike führte diesen Lernprozess darauf zurück, dass die Katzen eine S-R-Verbindung gelernt haben, nämlich dass in dem Käfig (S) bestimmte Reaktionen (R) zum Erfolg führen. Die Belohnung in Form von Futter (bzw. Freiheit) als Konsequenz (K) der Reaktion dient dabei nach Thorndike allein dem Zweck, diese S-R-Assoziation zu verstärken, und ist dabei nicht selbst Bestandteil der gelernten Assoziation. Thorndikes Forschungsbemühungen führten zur Formulierung des **Gesetzes der Wirkung** (*law of effect*), das postuliert, dass erfolgreiches (d. h. verstärktes) Verhalten dazu tendiert, häufiger aufzutreten. Spätere Erklärungsansätze unterscheiden sich vor allem darin, welche Rolle die Verstärkung spielt und ob angenommen wird, dass tatsächlich S-R-Verbindungen gelernt werden oder ob es sich vielmehr um R-K-Verbindungen oder S-(R-K-)Verbindungen handelt (► Abschn. 10.4).

Die Bezeichnung „operantes Konditionieren" verbindet sich vor allem mit dem Namen Burrhus F. Skinnner (1904–1990). Skinner unterschied zwischen respondentem und operantem Verhalten. *Respondentes Verhalten* wird beim klassischen Konditionieren beobachtet, weil das Verhalten hier eine Reaktion auf einen Reiz ist. Demgegenüber ist *operantes Verhalten* keine Reaktion auf einen Reiz, sondern ein (instrumentelles) Verhalten, das eine Konsequenz in der Umwelt herbeiführt, die ohne dieses Verhalten nicht eintreten würde. Skinner untersuchte operantes Verhalten in Versuchskäfigen, in denen es typischerweise eine Vorrichtung gab, mit der eine bestimmte Reaktion ausgeführt werden kann (z. B. ein Hebel), sowie ein Futtermagazin, in dem das Versuchstier Futter in vom Experimentator kontrollierter Weise erhalten kann. Je nach Typ der Untersuchung kann es zusätzlich u. a. auch ein Licht, einen elektrifizierbaren Rost (für die Verabreichung aversiver Stimuli) oder andere Vorrichtungen geben (■ Abb. 10.3). Diese Art von Versuchsanordnung wird umgangssprachlich gelegentlich auch Skinner-Box genannt, wenngleich Skinner selbst diesen Begriff nicht verwendet und sie als *operant chamber* bezeichnet hat.

Skinner interessierte sich dafür, wie Verhalten durch die Umwelt kontrolliert werden kann. Für die Untersuchung dieser Frage eignet sich die Skinner-Box gut, weil sie es erlaubt, Erwerb und Löschung von Verhalten systematisch als Funktion von Verstärkungsart und Verstärkungsplan zu studieren. Was aber ist Verstärkung? Da es schwer ist, einen Verstärker inhaltlich zu definieren, hat Skinner (1938) eine rein „operationale"



■ **Abb. 10.3** Schematische Darstellung einer Versuchskammer (Skinner-Box) zur Untersuchung operanten Konditionierens. **A** Licht, **B** Hebel, **C** Futtermagazin, **D** elektrifizierbarer Rost. (Zeichnung von Viktoria Fedosejew)

Tab. 10.1 Verstärkung und Bestrafung beim operanten Konditionieren

Verhaltens-konsequenz	Qualität des Reizes	
	Angenehm	Unangenehm
Darbietung eines Reizes	Positive Verstärkung	Bestrafung
Entfernung eines Reizes	Bestrafung	Negative Verstärkung
Keine Konsequenz → Löschung		

Definition gegeben. Danach ist ein **Verstärker** ein Reiz, der die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Reaktion verändert. Zum Beispiel könnte Hebeldrücken durch Futtergabe verstärkt werden, sodass die Hebeldrückrate steigt (oder eine Schülerin bekommt nach einer guten Wortmeldung ein Lob, woraufhin sie sich häufiger zu Wort meldet). Dies wäre ein Fall von **positiver Verstärkung**. Allerdings muss ein Verstärker für sich genommen kein angenehmer Reiz sein. So könnte Hebeldrücken dazu führen, dass ein unangenehmer, schmerzhafter Stromschlag aufhört (oder die Schülerin bekommt nach guter Mitarbeit die Hausaufgaben erlassen). Dies wäre ein Fall von **negativer Verstärkung**, was zu einer Erhöhung der Reaktionsrate führt, da eine unangenehme Situation beendet wird. Negative Verstärkung darf also keinesfalls mit **Bestrafung** verwechselt werden. Bei der Bestrafung könnte beispielsweise der Stromschlag (oder in der Schule etwa eine Zusatzhausaufgabe) jedes Mal auf die Reaktion folgen. Dann würde das Versuchstier (oder die Schülerin) schnell lernen, die Reaktion zu unterlassen. Schließlich kann als Bestrafung aber auch ein angenehmer Reiz aus der Situation entzogen werden, wenn eine bestimmte Reaktion auftritt. So könnte das Hebeldrücken dazu führen, dass alles Futter aus dem Futtermagazin entfernt wird (oder es wird ein Wunschthema der Schüler nicht weiterbehandelt). Auch dann werden Versuchstiere (oder Schüler) schnell lernen, dass das Verhalten keine vorteilhaften Konsequenzen hat und deswegen besser nicht ausgeführt wird. Die Arten von Verstärkung und Bestrafung sind in Tab. 10.1 schematisch dargestellt.

Nahrung oder Schmerzreize, aber auch soziale Verstärker wie Lob und Tadel, sind Beispiele für *primäre Verstärker*, die ohne vorherige Lernvorgänge verstärkend wirken. Werden ursprünglich neutrale Reize (z. B. bunte Papierscheine) mit primären Verstärkern gepaart, können auch solche neutralen Reize zu Verstärkern werden (z. B. wird aus „bunten Papierscheinen" Geld), die man dann **sekundäre** oder **generalisierte Verstärker** nennt.

Instrumentelles Lernen findet im Prinzip immer dann statt, wenn gelernt werden kann, dass relevante Ereignisse in der Umwelt (d. h. Verstärker) systematisch durch eine eigene Handlung beeinflusst werden. Operante Konditionierungsprozeduren können im Prinzip also in allen Bereichen für die praktische Nutzung eingesetzt werden, wenn es sich um relativ stark strukturierte Verhaltenskontexte handelt, in denen ein hohes Maß an Kontrolle über die Verhaltenskonsequenzen vorliegt. Dies gilt beispielsweise für die meisten pädagogischen Situationen.

10.2.3 Erwerb von neuen Einstellungen und Wissen

Die bislang beschriebenen experimentellen Paradigmen zur Untersuchung des Lernens (klassische und operante Konditionierung) werden vor allem im Hinblick auf das Erlernen neuer Verhaltensweisen eingesetzt. Zwar wird diskutiert, inwieweit dieses Verhalten eventuell jeweils nicht durch unmittelbar verhaltenssteuernd wirkende Assoziationen, sondern stets durch die Bildung eher kognitiver Repräsentationen in Propositionsformat, also durch erworbenes Wissen, vermittelt wird (vgl. z. B. den Diskussionsaufsatz von Mitchell et al. 2009), aber der Verhaltensaspekt des Lernens steht hier im Vordergrund.

Im Unterschied dazu stehen Lernparadigmen, in denen die Änderung des Verhaltens nicht im Vordergrund steht, sondern das primäre Ergebnis des Lernens darin besteht, dass Einstellungen (d. h. affektive Bewertungen von Personen oder Objekten) gelernt bzw. vorhandene Einstellungen verändert werden (*evaluatives Konditionieren*), oder in denen der Erwerb explizit repräsentierten Wissens über Kausalverhältnisse in der Umwelt untersucht wird (*Kausallernen* und *Beobachtungslernen*). Diese Formen des Lernens werden im Folgenden beschrieben.

Evaluative Konditionierung

Beim evaluativen Konditionieren wird ein neutraler Stimulus mit einem positiven oder einem negativem Stimulus gepaart dargeboten. Dabei wird überprüft, ob dieser Stimulus anschließend positiver bzw. negativer bewertet wird. Levey und Martin (1975) präsentierten ihren Probanden ein Set von Bildern und ließen die Bilder in die Kategorien „mag ich", „mag ich nicht" und „neutral" sortieren. In einer Lernphase wurden dann ursprünglich neutrale Bilder (CS) gemeinsam mit positiven, negativen oder neutralen Bildern (US) präsentiert. Anschließend sollten die Probanden die ursprünglich neutralen Bilder (CS) beurteilen. Bilder, die gemeinsam mit positiven Bildern gezeigt worden waren, wurden positiver bewertet, und Bilder, die mit negativen Bildern dargeboten worden waren, wurden negativer bewertet als Bilder, die mit neutralen Bildern gezeigt worden waren.

Um die Bewertung neutraler Stimuli zu verändern, können diese Stimuli beliebig mit anderen, valenten (d. h. affektiv „aufgeladenen") Stimuli gepaart werden, unabhängig von der Darbietungsart und Modalität (Überblick in Hofmann et al. 2010). In der Werbung werden beispielsweise bekannte, beliebte Personen mit einem Produkt assoziiert, oder es wird angenehme Musik oder auch ein angenehmer Duft verwendet, um die Bewertung eines Produkts zu beeinflussen.

Gegenwärtig wird diskutiert, ob evaluative Konditionierung und klassisches Konditionieren auf dieselben Lernmechanismen zurückzuführen sind. Beispielsweise ist beim klassischen Konditionieren die Aufmerksamkeit für den Zusammenhang von CS und US eine wichtige Voraussetzung für die Assoziationsbildung, während evaluative Konditionierung möglicherweise auch stattfindet, ohne dass die Paarung zwischen CS und US bewusst werden muss (Olson und Fazio 2001). Evaluativ konditionierte Einstellungsänderungen könnten also auf automatische, unbewusste assoziative Prozesse zurückgehen. Allerdings konnte in einer ähnlichen Studie gezeigt werden, dass die Bewertungs-

änderung tatsächlich nur für diejenigen CS stattgefunden hat, von denen die Probanden nachträglich auch angeben konnten, mit welchem US sie in der Lernphase gepaart wurden (Pleyers et al. 2007); dies spricht für eine bewusste Paarung und gegen die Automatizität evaluativen Lernens. So ist noch ungeklärt, ob evaluatives Konditionieren auf dieselben Lernmechanismen wie assoziatives Lernen zurückzuführen ist oder ob es als Beispiel für *implizites Lernen* gewertet werden kann (▶ Abschn. 10.5; Diskussion in Shanks 2010).

Kausallernen (*response-outcome learning*)

Beim instrumentellen Lernen (z. B. in operanten Konditionierungsprozeduren) wird gelernt, ob ein bestimmter Verstärker (bzw. eine Konsequenz) auf ein bestimmtes Verhalten folgt, d. h. ob der Verstärker durch das Verhalten herbeigeführt wird. Ist dies der Fall, dann schließen Menschen in der Regel auf eine *Kausalbeziehung* zwischen Verhalten und seiner Konsequenz (Übersicht z. B. in Lagnado et al. 2007). Tatsächlich verhalten sich aber auch Tiere so, *als ob* sie eine Kausalbeziehung zwischen ihrem Verhalten und den folgenden Konsequenzen gelernt hätten. Allerdings können wir nicht wissen, ob dies so ist, weil man die Tiere ja nicht direkt danach fragen, sondern dies nur indirekt aus ihrem Verhalten schließen kann. Demgegenüber kann man menschliche Versuchspersonen direkt (explizit) nach ihrem *Urteil* darüber fragen, ob sie *glauben*, dass ihr Verhalten einen bestimmten Effekt kausal erzeugt. Dieses Urteil kann dann beispielsweise auf einer Rating-Skala abgegeben werden, bei der der Wert 100 anzeigt, dass der Effekt dem Verhalten immer kontingent folgt (d. h., dass die Versuchspersonen glauben, ihr Verhalten *verursacht* den Effekt), der Wert 0 für das Fehlen eines Kausalzusammenhangs steht, und der Wert −100 anzeigt, dass der Effekt durch das Verhalten *verhindert* wird.

Dieses Vorgehen wählten z. B. Wasserman et al. (1993). In ihrer Studie drückten Versuchspersonen eine Taste (R, für *response*), was manchmal innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls dazu führte, dass ein Licht (O, für *outcome*) anging (O|R, d. h. *outcome*, gegeben die *response*). Manchmal ging das Licht aber auch dann an, wenn die Taste in diesem Intervall vorher nicht gedrückt wurde (O|−R). In Analogie zum operanten Konditionieren kann das Licht hier als Verstärker interpretiert werden, d. h. als ein Reizereignis, das auf der Grundlage des eigenen Verhaltens vorhergesagt („verursacht") werden kann. (Response-Outcome-Lernen ist also analog zum operanten Konditionieren in der gleichen Weise, wie Cue-Outcome-Lernen analog zum klassischen Konditionieren ist.)

In ihrer Studie variierten Wasserman et al. (1993) die Wahrscheinlichkeit P(O|R) (P steht hier für *probability*), mit der das Licht innerhalb eines Zeitintervalls anging, wenn vorher die Taste gedrückt wurde. Diese Wahrscheinlichkeiten betrugen 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 und 1.00. Weiterhin wurde aber auch mit genau den gleichen Werten die Wahrscheinlichkeit P(O|−R) variiert, mit der das Licht anging, wenn die Taste vorher nicht gedrückt wurde, sodass es insgesamt 5 * 5 = 25 Bedingungen gab. Abb. 10.4 zeigt die mittleren Urteile der Versuchspersonen über die kausale „Stärke" der Relation zwischen ihrem Tastendruck und dem Aufleuchten des Lichtes. Dabei reflektiert das kausale Urteil der Versuchspersonen über die Taste-Licht-Relation das

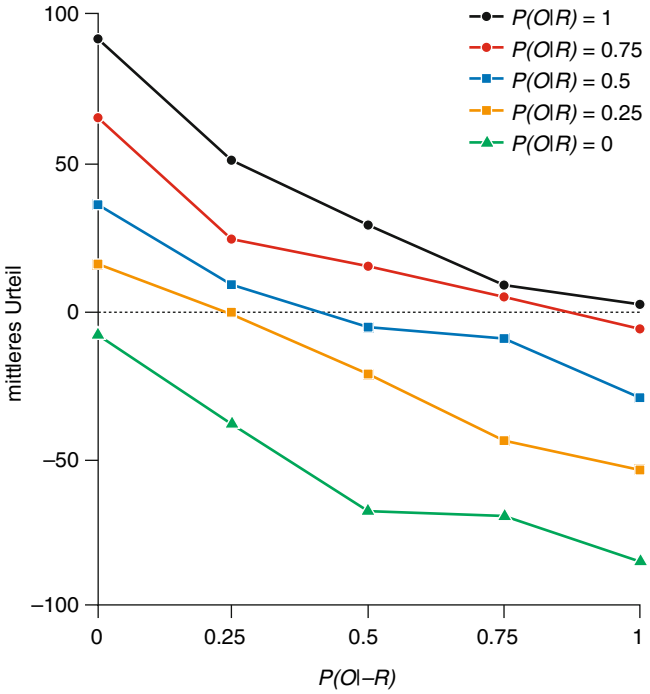


Abb. 10.4 Kausalurteil als Funktion der Wahrscheinlichkeit des Lichtes (O, für *outcome*) bei gegebenem Tastendruck (R, für *response*) sowie nach Abwesenheit des Tastendruckes (nach Wasserman et al. 1993). Positive Werte repräsentieren die Wahrnehmung einer Verursachung des Lichtes durch den Tastendruck, während negative Werte indizieren, dass der Tastendruck das Licht verhindert

Verhältnis der beiden Wahrscheinlichkeiten ziemlich genau. Dieses Ergebnis legt nahe, dass Menschen in einem operanten Konditionierungsparadigma die R-O-Kontingenzen direkt als kausale Relation beurteilen.

An dieser Stelle fällt die Ähnlichkeit zum klassischen Konditionieren auf, bei dem gelernt werden kann, dass der CS den US vorhersagt (Cue-Outcome-Lernen). In solchen Experimenten verhalten sich Probanden, aber auch Versuchstiere, so, *als ob* sie von einer Kausalbeziehung zwischen CS und US ausgingen. Tatsächlich verweist z. B. Rescorla (1988, S. 154) auf die Nützlichkeit dieser Analogie: „Indeed, in teaching undergraduates, I favor an analogy between animals showing Pavlovian conditioning and scientists identifying the cause of a phenomenon". Ob allerdings das, was Tiere im Konditionierungsexperiment lernen, wirklich Kausalbeziehungen sind, sei an dieser Stelle dahingestellt. Zumindest in Bezug auf menschliches Lernen gibt es aber ausformulierte Ideen dazu, dass beim Konditionieren kausale Regeln erworben werden (z. B. Holyoak et al. 1989). Auf diese Diskussion kann hier nicht eingegangen werden (Übersichten z. B. in De Houwer und Beckers 2002; Lagnado et al. 2007; Pineño und Miller 2007; Waldmann und Hagmayer 2013; ▶ Kap. 11).

Beobachtungslernen (soziales Lernen)

Die bisher beschriebene Form instrumentellen Lernens, das operante Konditionieren, legt nahe, dass Verhalten *unmittelbar* „verstärkerabhängig" ist. Das operante Konditionieren setzt dabei voraus, dass die Umwelt kontrolliert werden kann. Zum Beispiel können mit der Shaping-Prozedur (▶ Abschn. 10.3.1) bei Tauben neue Verhaltensmuster antrainiert werden, um auf diese

Art elementare Lernmechanismen am Tiermodell zu studieren. Im Vergleich zu Tieren sind Menschen allerdings um ein Vielfaches lernfähiger, sodass bei ihnen vergleichbare Lernvorgänge ungleich schneller ablaufen. Vor allem lernen Menschen nicht nur durch das Ausführen eigener Handlungen und dem daraus resultierenden Erfahren positiver oder negativer Konsequenzen (d. h. Verstärkung), sondern auch *mittelbar* durch das Beobachten der Handlungen anderer Personen. Dieses **Beobachtungslernen** kann unter geeigneten Umständen dazu führen, dass das beobachtete Verhalten direkt *imitiert* wird (Übersicht in Spada et al. 2006).

Imitatives Verhalten bei Menschen wurde früher vor allem als Ausdruck eines angeborenen Instinkts aufgefasst (McDougall 1908; Morgan 1896). Allerdings wurde von Miller und Dollard (1941) darauf hingewiesen, dass Imitation alle Merkmale gelernten Verhaltens zeigt (z. B. Verstärkerabhängigkeit, Löschung, Generalisierung). In ihrer Studie untersuchten sie imitatives Verhalten bei Kindern. Jedes Kind sah in dem Versuchsraum zunächst ein anderes Kind (die Modellperson), wie es sich zwischen zwei verschiedenen, rechts oder links postierten Schachteln entscheidet. Nur in einer der beiden Schachteln befand sich ein Bonbon, den die Modellperson behalten durfte, während die andere Schachtel leer war. Nach der Modellperson durfte immer auch die Versuchsperson eine Schachtel auswählen. Diese Wahl wurde nun in einer Bedingung immer dann verstärkt (d. h., es war ein Bonbon in der Schachtel), wenn die Schachtel gewählt wurde, die das Modell bereits vorher gewählt hat (Imitationsbedingung). In einer Gegenimitationsbedingung wurde immer die Wahl der anderen Schachtel verstärkt. Dieser Ablauf wiederholte sich einige Male, wobei die Modellperson zufällig zwischen den beiden Schachteln abwechselte. Die Ergebnisse zeigten, dass die Kinder sehr schnell lernten, welches Verhalten in Relation zur Modellperson zum Erfolg führte, und dass sowohl Imitation als auch Gegenimitation gleich schnell gelernt werden. Vor allem der letztere Befund spricht gegen die Instinkttheorie, da diese ja annehmen müsste, dass Gegenimitation, wenn überhaupt, nur viel langsamer gelernt werden dürfte.

Die Studie von Miller und Dollard (1941) zeigt eindeutig, dass imitatives Verhalten gelernt wird. In dieser Studie wurden die Kinder in jedem Durchgang jedoch auch für ihr eigenes Verhalten verstärkt. Ein wichtiges Merkmal des Beobachtungslernens ist allerdings, dass es auch durch bloße Beobachtung, also ohne Ausführung eigenen, verstärkten Verhaltens, stattfindet. In diesem Zusammenhang spricht man von stellvertretender Verstärkung, und diese Art von Beobachtungslernen wurde vor allem von Bandura und seinen Mitarbeitern untersucht (Überblick in Bandura 1976).

In einer viel beachteten Studie von Bandura (1965) wurde Kindern ein Film gezeigt, in dem ein anderes Kind als Modellperson eine lebensgroße Plastikpuppe („Bobo“) misshandelte (z. B. mit dem Fuß trat). In einer Versuchsbedingung kam in dem Film am Ende ein Erwachsener hinzu, der die „aggressive“ Modellperson deutlich tadelte (stellvertretende Bestrafung), während der Erwachsene das Modell in einer anderen Bedingung lobte (stellvertretende Verstärkung). In einer dritten Bedingung hatte der Film ein neutrales Ende ohne Konsequenzen für das Modell. Nach dem Film wurden die Kinder in einem anderen Raum, in dem das Verhalten der Kinder vom Versuchsleiter beobachtet werden konnte, allein gelassen. In diesem Raum befand sich auch die in dem Film verwendete Plastikpuppe. Tatsächlich zeigte sich, dass die Kinder in der Bedingung, in der sie stellvertretende Verstärkung erlebt hatten, die Plastikpuppe spontan in ähnlicher Weise misshandelten, wie sie es kurz zuvor im Film gesehen hatten. Wichtig ist, dass diese Imitation aggressiven Verhaltens in dieser Bedingung häufiger auftrat als in den beiden anderen Bedingungen.

Befunde dieser Art demonstrieren, dass beobachtetes Verhalten gelernt und später bei passender Gelegenheit selbst ausgeführt (d. h. imitiert) werden kann. Bandura zog aus diesen und ähnlichen Befunden die Schlussfolgerung, dass soziales Lernen vier zentrale Faktoren beinhaltet:

1. *Aufmerksamkeit in der Encodierungsphase:* Die relevanten Verhaltensweisen sowie deren Konsequenzen müssen beachtet werden.
2. *Gedächtnis:* Das Wissen über diese instrumentellen Relationen muss behalten werden.
3. *Motivation:* Es muss einen Anreiz für das Ausführen der gelernten (beobachteten) Verhaltensweise geben.
4. *Motorische Reproduktion:* Das beobachtete Verhalten muss auch im Repertoire des Lerners vorhanden sein.

Dieses *sozial-kognitive Lernmodell* von Bandura (1976) repräsentiert damit in seiner Betonung von kognitiven Prozessen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis) eine seinerzeit einflussreiche Abkehr von strikt behavioristischen, d. h. rein verhaltensbezogenen, Ansätzen. Dieses soziale Lernen (oder Modelllernen) scheint eine wichtige Grundlage für das Lernen von Rollenverhalten in unserer Gesellschaft zu sein (ausführliche Diskussion z. B. in Bandura 1976). Allerdings ist das soziale Lernen keineswegs eine ausschließliche Domäne menschlichen Lernens, sondern kommt auch bei Tieren vor (Übersicht z. B. in Pearce 1997, Kap. 9).

In Bezug auf das Beobachtungslernen stellt sich die Frage, ob ein spezifisches Verhalten oder vielmehr das Erreichen eines Zieles, d. h. eine instrumentelle Mittel-Zweck-Relation, gelernt wird. In diesem Zusammenhang gibt es Befunde von Meltzoff und Moore (1977), die zeigen, dass bereits zwölf bis 21 Tage alte Babys spontan einfache Handlungen des Versuchsleiters imitieren (z. B. Zunge herausstrecken). In diesem frühen Alter scheint dieses imitative Verhalten nahezulegen, dass das Verhalten selbst imitiert wird, zumal das zu imitierende Verhalten kein klar definierbares Verhaltensziel zu haben scheint. Allerdings sprechen z. B. Befunde von Bekkering et al. (2000) eindeutig dafür, dass Kinder im Vorschulalter nicht das beobachtete Verhalten selbst lernen und imitieren, sondern vielmehr durch Beobachtung lernen, das Erreichen eines vermuteten Verhaltenszieles zu imitieren; dies konnte später sogar auch bei präverbalen Kleinkindern nachgewiesen werden (Gergely et al. 2002; ▶ Zur Vertiefung 10.2).

10.2.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt haben wir wesentliche experimentelle Paradigmen beschrieben. Beim klassischen und operanten Konditionieren handelt es sich um Paradigmen zur Untersuchung des assoziativen Lernens, mit denen traditionell erforscht wird, wie neue Verhaltensweisen erworben werden. Diese eher auf das motorische Verhalten fokussierten Ansätze basieren sowohl auf tier-

Zur Vertiefung 10.2

Kognitive und neurale Grundlagen des Imitationslernens

Ein wichtiges aktuelles Problem in der Forschung zur Imitation ist die Frage, wie es möglich ist, allein auf der Basis von visuellen Merkmalen des beobachteten Verhaltens diejenige motorische Aktivität auszulösen, die dann eben genau das beobachtete Verhalten beim Beobachter hervorruft, d. h. eine Korrespondenz zwischen beobachtetem und eigenem Verhalten erzeugt. Zur Lösung dieses Korrespondenzproblems werden verschiedene theoretische Ansätze in der Kognitionspsychologie diskutiert:

1. Es wird vermutet, dass visuelle Bewegungsrepräsentationen aktiv in eine supramodale Repräsentation konvertiert werden, die den Zugang zur Motorik ermöglicht (*active intermodal matching*; Übersicht in Meltzoff und Prinz 2002).
2. Es wird angenommen, dass motorische Handlungen generell über ihre antizipierten sensorischen Effekte (also quasi im Wahrnehmungsformat) repräsentiert werden (*common coding*; Prinz 1997), sodass das Beobachten einer Handlung auch die Ausführung eben jener Handlung bahnt.
3. Es wird verstärkt diskutiert, inwieweit allgemeine assoziative Lernmechanismen dafür sorgen, die visuellen und motorischen Repräsentationen so miteinander zu verknüpfen, dass eine erfolgreiche Verhaltensimitation möglich wird (Übersicht in Brass und Heyes 2005).

Diese drei Ansätze schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich gegenseitig. So ist vorstellbar, dass assoziative Lernprozesse die Grundlage für supramodale Repräsentationen bilden, die verhaltensleitend werden, sobald der Beobachter ein entsprechendes Verhaltensziel hat.

Diese Diskussion der basalen kognitiven Mechanismen des imitativen Verhaltens wurde im letzten Jahrzehnt durch neurowissenschaftliche Befunde zu den Spiegelneuronen (*mirror neurons*) weiter angefacht (Übersicht in Rizzolatti und Craighero 2004). Spiegelneurone wurden zunächst im prämotorischen Cortex von Affen entdeckt, und später wurden auch beim Menschen Hinweise auf die Existenz solcher Neurone gefunden (Mukamel et al. 2010). Die besondere Eigenschaft dieser Neurone ist, dass sie sowohl bei der Beobachtung als auch bei der Ausführung von Handlungen feuern und somit eine Basis für die sensomotorische Verknüpfung liefern könnten, die dem oben erwähnten Korrespondenzproblem zugrunde liegt. Einige Autoren vermuten, dass Spiegelneurone möglicherweise sehr weitreichende Funktionen haben und z. B. auch bei der Sprachentwicklung oder beim Verstehen der Handlungsintentionen anderer Personen eine Rolle spielen könnten (Rizzolatti und Craighero 2004), während andere Autoren eine zurückhaltendere Interpretation bevorzugen (z. B. Brass und Heyes 2005; Jacob und Jeannerod 2005). In jedem Fall hat die Entdeckung der Spiegelneurone die Kognitionspsychologie und die Neurowissenschaft näher aneinandergerückt, und es sind hier noch zahlreiche neue und interessante Befunde zu erwarten.

experimentellen Studien als auch auf Lernstudien mit Menschen. Darüber hinaus haben wir Untersuchungsansätze vorgestellt, die weniger stark verhaltensorientiert sind, sondern mehr auf die emotionale und kognitive Ebene abzielen und vor allem auf das menschliche Lernen bezogen sind. Diese Ansätze haben Bewertungsveränderungen von Einstellungsobjekten (evaluative Konditionierung) oder den Aufbau von Kausalwissen (Kausallernen bzw. Response-Outcome-Lernen) zum Gegenstand. Schließlich haben wir in Bezug auf das Beobachtungslernen (Modelllernen, Imitationslernen) gezeigt, inwieweit kognitive, verhaltensorientierte und soziale Lernprozesse in komplexerer Weise zusammenspielen, und haben exemplarisch das klassische soziale (bzw. sozial-kognitive) Lernmodell von Bandura (z. B. 1976) dargestellt.

Die Darstellung dieser experimentellen Paradigmen diente dem Zweck, einen Überblick über die in der Lernforschung verwendeten Untersuchungsansätze zu geben. Im Folgenden werden wir mehr ins Detail gehen und in ▶ Abschn. 10.3 die Basisphänomene des Lernens vorstellen und diskutieren. Hier werden wir vor allem auf Konditionierungsparadigmen fokussieren, weil sie auch für die Entwicklung von theoretischen Modellen zum assoziativen Lernen (▶ Abschn. 10.4) besonders bedeutsam sind. In ▶ Abschn. 10.5 werden wir schließlich implizite Lernparadigmen vorstellen und diskutieren, inwieweit Lernprozesse auch unbewusst stattfinden können.

10.3 Grundphänomene des assoziativen Lernens

Die Grundphänomene sind beim klassischen und beim operanten Konditionieren durchaus vergleichbar, weswegen sie hier auch gemeinsam behandelt werden. Zunächst stellen wir Befunde zu Erwerb und Löschung (▶ Abschn. 10.3.1), den Eigenschaften der Reizsituation (▶ Abschn. 10.3.2) und den Eigenschaften von Reaktion bzw. Verhalten dar (▶ Abschn. 10.3.3). Anschließend werden biologische Einschränkungen des Lernens diskutiert (▶ Abschn. 10.3.4). Schließlich wird in ▶ Abschn. 10.3.5 die Rolle von Kontiguität und Kontingenz für den Erwerb von Assoziationen diskutiert.

10.3.1 Erwerb und Löschung

Erwerb und Löschung beim klassischen Konditionieren

Obwohl das klassische Konditionieren ursprünglich an Tieren untersucht wurde, lassen sich alle Basisphänomene auch beim Menschen zeigen. (Ein Beispiel haben wir bereits im Rahmen des Nahrungsmittelallergieparadigmas von Shanks und Darby [1998] beschrieben.) Ein experimentelles Paradigma, das in der frühen Forschung zur klassischen Konditionierung häufig eingesetzt wurde, ist die Lidschlagkonditionierung. Hierbei wird auf die Cornea des Auges ein schwacher Luftstoß (US) gerichtet, der normalerweise eine Lidschlussreaktion (UR) auslöst. Der Luftstoß wird mit einem CS gepaart (z. B. einem Ton oder einem Lichtreiz). Nach einigen Paarungen löst bereits der CS eine Lidschlussreaktion (CR) aus.

Die Stärke des Lernens kann in dieser Anordnung als prozentuale Häufigkeit gemessen werden, mit der die CR als Funktion der Häufigkeit der CS-US-Paarungen auftritt. In einer Studie von Prokasy et al. (1958) gab es 40 CS-US-Paarungen, denen 20 Versuchsdurchgänge folgten, in denen der CS allein (d. h. ohne nachfolgenden US) dargeboten wurde. ◘ Abb. 10.5 zeigt den Prozentsatz von Durchgängen, in denen der CS die CR auslöste.

Die Daten zeigen eine typische Erwerbskurve, bei der die Wahrscheinlichkeit der CR schnell ansteigt und dann rasch ein asymptotisches Niveau erreicht. Die Stärke der CR hängt dabei

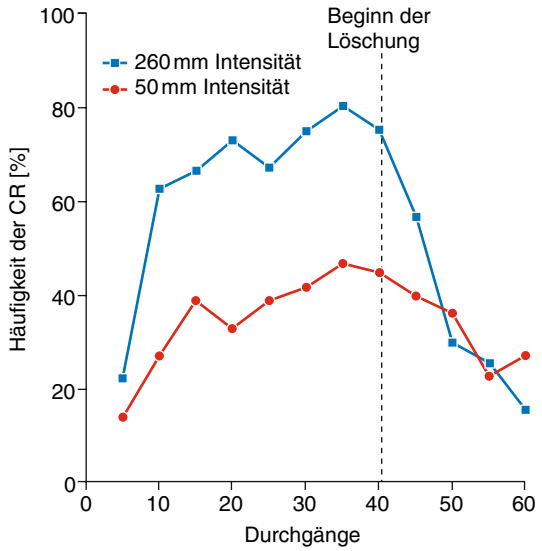


Abb. 10.5 Prozentsatz konditionierter Lidschlagreaktionen während der Erwerbs- und der Löschungsphase als Funktion der US-Intensität. (Aus Anderson 2000)

nicht nur von der Anzahl der CS-US-Paarungen ab, sondern auch von der Intensität des US. Intensivere US führen im Vergleich zu schwächeren US zu einem schnelleren Konditionieren der CR.

Sobald aber der CS nicht mehr vom US gefolgt wird, nimmt die Wahrscheinlichkeit der CR deutlich ab. Diese Abnahme wird als **Löschung** (*extinction*) bezeichnet. Die Löschung stellt vermutlich mehr als ein bloßes „Verlernen" einer Assoziation dar. So wird gelegentlich beobachtet, dass die CR nach Verstreichen einiger Zeit spontan erneut auftreten kann (Pawlow 1927). Diese *Spontanerholung* einer bereits gelöschten CR deutet darauf hin, dass die ursprünglich gelernte Reaktion gar nicht wirklich „verlernt" wird. Stattdessen wird möglicherweise während der Löschung eine neue Reaktion gelernt (z. B. Nichtreagieren), die mit der ursprünglichen Reaktion retroaktiv (d. h. rückwärtsgerichtet) interferiert und deren Abruf verhindert. Die neue Reaktion könnte dann nach einem genügend langen Intervall so weit vergessen werden, dass die ursprünglich gelernte CR wieder eine erhöhte Wahrscheinlichkeit bekommt, aus dem Gedächtnis abgerufen zu werden und sich im Verhalten durchzusetzen. Darüber hinaus wurde herausgefunden, dass auch Veränderungen der Umgebung (z. B. ein anderes Versuchslabor) die ursprüngliche CR wiederherstellen können (*reinstatement*; Diskussion in Bouton 1993, 2004). Solche Befunde haben wichtige Implikationen für verhaltenstherapeutische Anwendungen (z. B. Alberini und LeDoux 2013; Bouton et al. 2001).

Erwerb und Löschung von Verhalten beim instrumentellen Lernen

Analog zur Rolle des US bei Erwerb und Löschung einer klassisch konditionierten Reaktion führt die Anwesenheit von Verstärkung zum Erwerb und die Abwesenheit von Verstärkung zur Löschung instrumentellen Verhaltens. Die Bedingungen, unter denen neues Verhalten gelernt und auch wieder verlernt wird (Erwerb bzw. Löschung), wurden von Skinner ausführlich studiert (Ferster und Skinner 1957). Neue Verhaltensweisen

Tab. 10.2 Schematische Darstellung verschiedener Verstärkerpläne beim operanten Konditionieren

	Quotenverstärkung	Intervallverstärkung
Fest	Es wird z. B. jede vierte korrekte Reaktion verstärkt (jede korrekte Reaktion wird verstärkt = kontinuierliche Verstärkung).	Es wird z. B. jeweils die erste Reaktion in einem 5-min-Intervall verstärkt.
Variabel	Es wird z. B. im Durchschnitt jede vierte korrekte Reaktion verstärkt (aber es könnte auch die dritte oder fünfte Reaktion sein).	Es wird z. B. im Durchschnitt jeweils eine Reaktion in einem 5-min-Intervall verstärkt.

werden am schnellsten erworben, wenn zunächst jede Reaktion verstärkt wird. Unter diesen Bedingungen wird das gelernte Verhalten allerdings auch sehr schnell wieder eingestellt, wenn keine Verstärkung mehr gegeben wird, d. h., das gelernte Verhalten ist nicht sehr löschungsresistent. Die Löschung von Verhalten vollzieht sich viel langsamer, wenn die gewünschten Reaktionen vorher nur noch gelegentlich verstärkt wurden (man spricht hier von intermittierender Verstärkung). Die Art der Verstärkung wirkt sich demnach unterschiedlich auf Erwerb und Löschung aus.

Skinner entwickelte verschiedene *Verstärkerpläne* (Tab. 10.2). Verstärkerpläne unterscheiden sich vor allem darin, ob *jede* gewünschte Reaktion verstärkt wird (*kontinuierliche Verstärkung*) oder ob das nicht so ist (**intermittierende Verstärkung**). Bei letzteren Plänen unterscheidet man zwischen *Quotenverstärkung*, die sich auf die Reaktionshäufigkeit bezieht, und *Intervallverstärkung*, die sich auf Zeitintervalle bezieht. Beide können entweder fest oder variabel sein. Zum Beispiel könnte *im Durchschnitt* alle 5 min ein Verstärker gegeben werden (**variabler Intervallplan**), oder es wird z. B. *genau* jede fünfte Reaktion verstärkt (**fester Quotenplan**). Ein fester Quotenplan, bei dem jede Reaktion verstärkt wird, entspricht dabei wieder der kontinuierlichen Verstärkung.

Beim operanten Konditionieren lässt sich durch Verstärkung nahezu jedes beliebige Verhalten erzeugen. Eine Möglichkeit dafür ist die stufenweise Annäherung (*shaping*). Dies ist eine von Skinner entwickelte Methode, um Versuchstieren neue Verhaltensweisen beizubringen, die die Tiere normalerweise nicht (oder nur ganz selten) ausführen würden, wie etwa sich im Kreis zu drehen. Dazu wartet man, bis das Tier eine leichte Bewegung in die vom Experimentator gewünschte Richtung, z. B. nach links, ausführt, und verstärkt dies durch die Gabe von etwas Futter. Dies sollte nach dem Gesetz der Wirkung dazu führen, dass diese Bewegung häufiger auftritt. Als Nächstes wird allerdings nur eine Bewegung verstärkt, die noch etwas weiter nach links geht, und schließlich wird nur noch eine volle Drehung verstärkt. Auf diese Art kann man Tieren relative komplexe Verhaltensfolgen beibringen. Tatsächlich benutzen Tiertrainer für die Dressur ähnliche Methoden, indem sie solche neue Verhaltensfolgen miteinander verketten (*chaining*).

10.3.2 Merkmale des Reizes: Generalisierung und Diskrimination

Generalisierung und Diskrimination in der klassischen Konditionierung

Bislang wurden experimentelle Variablen vorgestellt, die den Erwerb einer CR beeinflussen. Eine Studie von Siegel et al. (1968) demonstriert, dass die CR nicht nur *spezifisch* auf den gelernten CS stattfindet, sondern auch auf Reize *generalisiert*, die dem Trainings-CS ähnlich sind. In ihrer Studie konditionierten sie eine Lidschluss-CR beim Kaninchen zunächst auf einen Ton mit einer bestimmten Frequenz, z. B. einen 1000-Hz-Ton, und untersuchten dann, ob die CR auch durch andere Töne ausgelöst wird. Sie fanden heraus, dass der identische Trainings-CS stets die stärkste CR auslöste und dass sich die CR mit abnehmender Ähnlichkeit des Test-CS mit dem Trainings-CS immer mehr abschwächt. Die resultierenden Kurven werden als **Generalisationsgradienten** bezeichnet (Abb. 10.6).

Generalisationsgradienten zeigen, dass Organismen dazu tendieren, gelerntes Verhalten auf ähnliche Reizsituationen zu verallgemeinern. Aber auch der gegenteilige Lernprozess lässt sich beobachten. Hier wird die Bandbreite der Reize, auf die reagiert wird, durch einen Prozess des **Diskriminationslernens** reduziert.

Gynther (1957) trainierte in einem Experiment zur Lidschlusskonditionierung Versuchspersonen zunächst mithilfe eines Luftstoßes (US), eine CR auf ein Licht auf der rechten Seite (CS1) zu zeigen. Wenn sie dann ein Licht auf der linken Seite (CS2) dargeboten bekamen, führten sie die CR auch aus (Reizgeneralisation). Allerdings wurde der CS2 niemals von dem Luftstoß gefolgt, und bald lernten die Versuchspersonen, zwischen den beiden Reizen zu diskriminieren und auf CS1 viel stärker zu reagieren als auf CS2. Befunde dieser Art verdeutlichen, dass konditionierte Reaktionen normalerweise auf eine ganze Klasse von Reizen generalisieren, aber dass auch gelernt wird, zwischen Reizen zu unterscheiden.

Generalisation und Diskrimination in der operanten Konditionierung

Operant gelerntes Verhalten tendiert genau wie beim klassischen Konditionieren dazu, auf ähnliche Stimulussituationen zu generalisieren. In einer Studie von Guttman und Kalish (1956) wurden Tauben trainiert, auf eine Taste zu picken. Jeweils in 60-s-Intervallen wurde die Taste mit Licht einer bestimmten Farbe (definiert als Wellenlänge in Nanometer) beleuchtet, und Picken wurde mit Futter verstärkt. Zwischen diesen Intervallen gab es jeweils eine Pause von 10 s mit völliger Dunkelheit, in der das Picken nicht verstärkt wurde. Nach dieser Trainingsphase wurde in einer Transferphase getestet, wie häufig die Tauben die Taste picken, wenn diese nun eine andere Farbe hat. Abb. 10.7 zeigt die beobachteten Generalisationsgradienten für verschiedene Trainingsbedingungen.

Die Reaktionsrate ist am höchsten bei der ursprünglichen Trainingswellenlänge, aber auch bei anderen Farben wird die Taste gepickt, wenngleich die Reaktionshäufigkeit mit geringer werdender Farbähnlichkeit abnimmt. Diese Tendenz zur Generalisation kann allerdings durch entsprechende Trainingsbedingungen so modifiziert werden, dass gelernt wird, nur auf ganz bestimmte Werte auf einer Reizdimension zu reagieren und andere zu ignorieren (Diskriminationslernen). So wurden Tauben in einer Studie von Jenkins und Harrison (1962) zunächst verstärkt, eine Taste zu picken, wenn ein 1000-Hz Ton dargeboten wurde, wohingegen das Picken nicht verstärkt wurde, wenn es keinen Ton gab. Dieses Training resultierte zunächst in einem

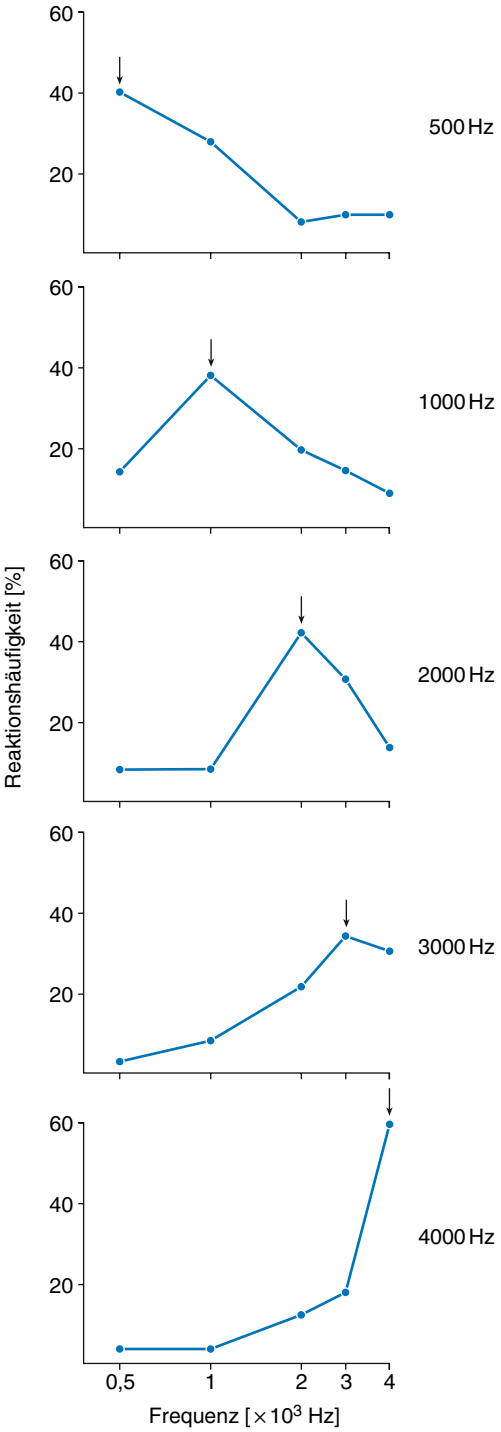


Abb. 10.6 Generalisationsgradienten als Funktion der Ähnlichkeit zwischen Trainingsreiz (CS) und Testreiz (Punkte). Der Pfeil zeigt die Frequenz des jeweiligen Trainings-CS an, die auch rechts neben jeder Abbildung angegeben ist. (Nach Siegel et al. 1968)

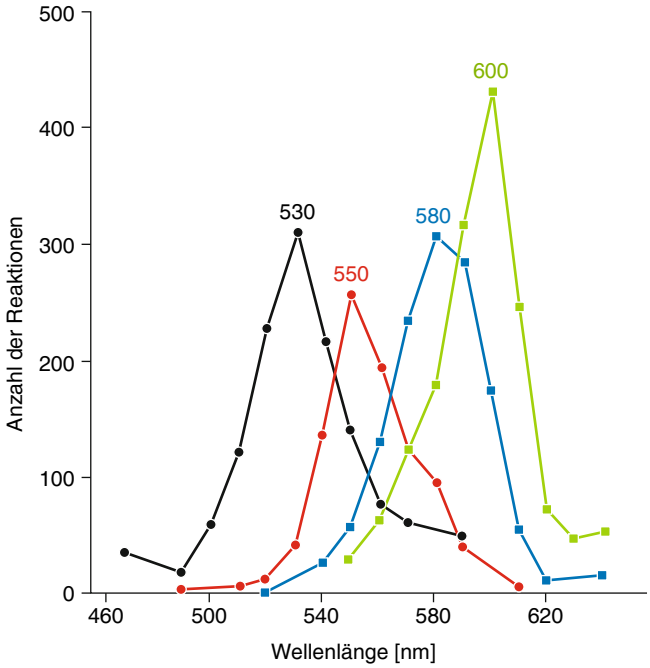


Abb. 10.7 Generalisationsgradienten (gemessen als kumulative Reaktionsanzahl pro 6-min-Intervall) für Tauben, die entweder bei 530, 550, 580 oder 600 nm Wellenlänge trainiert wurden. (Nach Guttman und Kalish 1956)

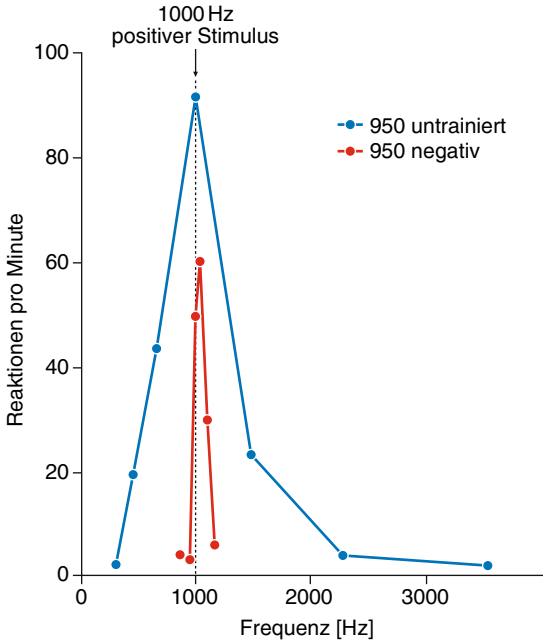


Abb. 10.8 Unterschiedliche Generalisationsgradienten nach Diskriminationslernen bei Tauben in einer Studie von Jenkins und Harrison (1962)

typischen Generalisationsgradienten, d. h., die Taube pickt auch noch bei relativ ähnlichen Tonfrequenzen. Anschließend wurde ein 950-Hz-Ton eingeführt, bei dem das Picken niemals zu Verstärkung führte. Abb. 10.8 zeigt die Gradienten nach dem 1000-Hz-Training sowie nach dem anschließenden Diskriminationstraining.

Das Diskriminationstraining hat zu einem eindeutig steileren Gradienten geführt – es wurde gelernt, zwischen verschiedenen Tönen zu unterscheiden. Dabei zeigte sich allerdings ein interessantes Phänomen: Nach dem Diskriminationstraining reagierten die Tiere sogar etwas häufiger auf einen 1050-Hz-Ton als auf den ursprünglich positiv verstärkten 1000-Hz-Trainingsreiz (*peak shift*). Dieses Phänomen des *peak shift* führte zur Formulierung von verschiedenen Theorien des Diskriminationslernens (z. B. Köhler 1950; Spence 1937), auf die hier nicht eingegangen werden kann (z. B. Pearce 1997, Kap. 5). Wichtig ist hier, dass beim instrumentellen Konditionieren gelernt wird, *unter welchen Bedingungen* ein bestimmtes Verhalten erfolgreich ist.

10.3.3 Merkmale der gelernten Reaktion

Merkmale klassisch konditionierter Reaktionen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden funktionale Merkmale der CS beschrieben. Es ist aber auch wichtig, sich über die funktionalen Merkmale der CR Gedanken zu machen (Domjan 2005). Meistens ist die CR der ursprünglichen UR ähnlich. Zum Beispiel führt ein Glockenton-CS in Pawlows Experimenten zu einer Speichelreaktion, die ähnlich wie diejenige ist, die als Reaktion auf Fleischpulver eintritt. Auch die konditionierte Lidschlussreaktion ist der unkonditionierten Reaktion ähnlich, die als Reflex auf einen störenden Reiz (z. B. einen Luftstoß) auftritt. Diese Ähnlichkeit der CR mit der UR hat einige Forscher veranlasst, von Lernen durch *Reizsubstitution* (Ersetzung) zu sprechen, weil auf den CS so reagiert wird, *als ob* er der US wäre. Nach dieser Sichtweise würde die Darbietung des CS eine Art „inneres Bild" des US aktivieren, was dann zwangsläufig (d. h. reflexhaft) die Reaktion auf den US auslöst. Deswegen sollten die CR und die UR sehr ähnlich sein.

Als Alternative zu dieser Auffassung (d. h. CR = UR) kann man sich allerdings auch vorstellen, dass der CS *Information* über den US liefert (z. B. Rescorla 1988), die flexibel genutzt werden kann, und dass die CR eine Reaktion ist, die auf den US vorbereitet. In diesem Sinne wäre die CR eine *Vorbereitung* auf den US, nicht eine *Reaktion* auf ihn. Entsprechend könnte die konditionierte Speichelreaktion als Vorbereitung auf die Futtergabe und die Lidschluss-CR als Vorbereitung auf den Luftstoß betrachtet werden.

Tatsächlich gibt es auch Beispiele von konditionierten Reaktionen, die überhaupt nicht der unkonditionierten Reaktion entsprechen. Ratten reagieren auf einen leichten Stromschlag mit erhöhter Aktivität, stellen aber als Reaktion auf einen CS, der mit dem Stromschlag assoziiert ist, jede Aktivität ein (Rescorla 1988). Hier ist die CR also das genaue Gegenteil der UR. Dennoch kann auch diese CR als adaptiv betrachtet werden. Geht man beispielsweise davon aus, dass Ratten auf einen Stromschlag ähnlich reagieren wie auf einen Fressfeind, dann wäre die angemessene Reaktion auf den Anblick des Feindes (CS) das Einstellen aller sichtbaren Aktivität (CR), um nicht entdeckt zu werden. Sobald der Feind aber angreift (US), ist Flucht (erhöhte Aktivität) als Reaktion (UR) angemessen (Anderson 2000, S. 56). Wie dieses Beispiel zeigt, muss die CR der UR nicht ähnlich sein; sie wird es allerdings in vielen Fällen sein, weil das oftmals ein adaptives Verhalten darstellt, das auf den US vorbereitet.

Merkmale instrumenteller Reaktionen

In Skinners Experimenten zum operanten Konditionieren war oft ein ganz bestimmtes Verhalten zu lernen: das Picken auf eine Taste. Eine kritische Frage ist nun, wie spezifisch das gelernte Verhalten ist. Genau wie beim klassischen Konditionieren legt die traditionelle Sichtweise nahe, dass nur ganz bestimmte Reaktionen gelernt werden, nämlich solche (und nur solche), die verstärkt wurden (z. B. Hull 1943). Allerdings hat sich auch hier gezeigt, dass offenbar nicht *spezifische Reaktionen* gelernt werden, sondern vielmehr *instrumentelle Relationen* zwischen Verhalten und Konsequenzen. Dies zeigt sich beispielsweise in einer Studie von Macfarlane (1930). In dieser Studie lernten Ratten, durch ein Labyrinth zu schwimmen, um an Futter zu kommen. Durch dieses Training wurde also eine „Schwimmreaktion" verstärkt. Allerdings zeigte sich, dass die Ratten den gelernten Weg genauso gut fanden, wenn sie nicht schwimmen, sondern im trockenen Labyrinth laufen mussten. Offenbar hatten die Ratten also nicht eine bestimmte Reaktion gelernt, sondern *Information* über den Weg zu ihrem Verhaltensziel, das sie in flexibler Weise durch das eine oder das andere Verhalten erreichen konnten (▶ Abschn. 10.4; vgl. auch Tolman 1948; O'Keefe und Nadel 1979).

10

10.3.4 Biologische Einschränkungen des Lernens

Biologische Einschränkungen beim klassischen Konditionieren: Assoziative Präferenzen

Eine weitere wichtige Erkenntnis in der Forschung zum klassischen Konditionieren besteht darin, dass manche CS leichter mit einem gegebenen US assoziiert werden als andere CS. Diese Bedeutsamkeit der Art der Relation zwischen CS und US spricht gegen eine rein empiristische Auffassung, wie sie beispielsweise von dem britischen Philosophen John Locke (1632–1704) und später von dem radikalen Behavioristen Burrhus F. Skinner (▶ Abschn. 10.2.2) vertreten wurde. Diese Auffassung besagt, dass Organismen gleichsam als Tabula rasa (d. h. als unbeschriebene Tafeln) auf die Welt kommen und dass alles Wissen allein durch die Erfahrung erworben wird. Demzufolge sollten prinzipiell alle Ereignisse gleichermaßen gut assoziiert werden. Demgegenüber zeigt die neuere Forschung allerdings sehr eindeutig, dass die Assoziierbarkeit von Stimuli stark von angeborenen (d. h. biologischen) Prädispositionen bestimmt wird (Übersicht in Domjan 2005; Staddon und Cerutti 2003). Dies kann eindrucksvoll am Beispiel der Geschmacksaversion (*taste aversion*) gezeigt werden.

Die *Geschmacksaversion* stellt einen Fall biologisch besonders prädisponierten Lernens dar und wurde von Garcia und Koelling (1966) ausführlich untersucht. In ihrer Studie hatten durstige Ratten nur einen Zugang zu Wasser. Während sie das Wasser tranken, wurde ihnen ein zusammengesetzter (*compound*) CS dargeboten, der aus einer Geschmackskomponente (ein süßer Geschmack, CS1) und einer audiovisuellen Komponente (ein Licht und ein Ton, CS2) bestand. Danach bekamen unterschiedliche Gruppen von Ratten entweder ein Mittel injiziert, das bei ihnen Übelkeit und Erbrechen hervorrief (US1), oder sie erhielten einen leichten Stromschlag (US2). Später wurden die Ratten separat entweder mit Zuckerwasser oder mit dem audiovisuellen Reiz getestet, um zu prüfen, ob sich die CS-Komponenten unterschiedlich auf die Menge des Wassertrinkens auswirken (CR).

Die Befunde zeigten, dass diejenigen Ratten, die das Übelkeit erregende Mittel injiziert bekamen, später weniger Wasser tranken, wenn es einen süßen Geschmack hatte (daher der Name „Geschmacksaversion"), im Vergleich zu der Situation, in der sie gleichzeitig mit dem Wasser den audiovisuellen Reiz dargeboten bekamen. Die Geschmacksaversions-CR tritt bereits nach einmaliger CS-US-Paarung auf (*one-trial learning*) und findet auch bei zeitlichen Verzögerungen von bis zu 24 h statt (Übersicht in Schedlowski und Pacheco-López 2010). Im Unterschied dazu zeigte sich bei den Ratten, die einen Stromschlag erhalten hatten, das umgekehrte Muster. Hier tranken sie weniger Wasser, wenn gleichzeitig der audiovisuelle Reiz dargeboten wurde, störten sich aber kaum an dem süßen Geschmack. Zusammengenommen legt dieses Befundmuster nahe, dass Übelkeit (US1) eher mit Geschmacksreizen (CS1) assoziiert wird als mit äußeren Reizen (CS2), wohingegen Schmerz infolge eines Stromschlags (US2) eher mit äußeren Reizen (CS2) als mit inneren Reizen (CS1) assoziiert wird.

Die Assoziierbarkeit der Stimuli unterscheidet sich vermutlich vor allem deswegen, weil manche CS-US-Relationen eine höhere biologische Relevanz haben als andere. Solche **assoziativen Bevorzugungen** (*associative bias*) scheinen auf angeborenen Mechanismen zu beruhen, die für die jeweilige Spezies biologisch besonders adaptiv sind (Domjan 2005; Güntürkün 1996; Seligman 1970).

Biologische Einschränkungen beim instrumentellen Lernen

Die Techniken des operanten Konditionierens stellen eine sehr effiziente Methode dar, Tieren neue Verhaltensweisen beizubringen. Allerdings gibt es auch klare Begrenzungen in der Effektivität operanten Konditionierens. Breland und Breland (1961) konnten Waschbären dazu bringen, Münzen in einen Behälter zu legen, beobachteten jedoch, dass ihre Waschbären bald begannen, die Münzen in einer Weise zu behandeln, die dem Waschen und Reinigen ihrer natürlichen Nahrung entspricht. Diese biologisch adaptiven Verhaltensweisen sind also in das neu konditionierte Verhalten „eingedrungen" und machten bald das gesamte Trainingsprogramm zunichte. Dieses Phänomen des Eindringens von artspezifischen Verhaltensmustern in sorgfältig durch Verhaltensformung (*shaping*) und Reaktionsverkettung (*chaining*) antrainiertes Verhalten wird als *instinctive drift* bezeichnet und stellt eine biologische Einschränkung der Lernmöglichkeiten von Organismen dar (Bolles 1972; Seligman 1970). Dieses Phänomen in der operanten Konditionierung ähnelt sehr den beschriebenen assoziativen Bevorzugungen beim klassischen Konditionieren (Übersicht in Domjan 2005).

Das Phänomen des *instinctive drift* ist ein Beispiel dafür, dass es manchmal schwierig sein kann, Tieren ein komplett neues Verhalten dauerhaft anzutrainieren. Allerdings tritt auch der umgekehrte Fall gelegentlich auf, nämlich dass Tiere ein neues Verhalten lernen, ohne dass dies vom Versuchsleiter beabsichtigt war. Dieses Phänomen wird als **Selbstausformung** (*autoshaping*) bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel wurde von Brown und Jenkins (1968) bei Tauben berichtet. In zufälligen Intervallen beleuchte-

Zur Vertiefung 10.3

Abergläubisches Verhalten

Beim instrumentellen Konditionieren gibt es normalerweise eine Kontingenz (s. unten) zwischen einer Reaktion und einem Verstärker. Der Verstärker erhöht dann nach dem Gesetz der Wirkung die Auftretenswahrscheinlichkeit dieser Reaktion. Allerdings wurde zur Verblüffung der Lerntheoretiker beobachtet, dass eine Kontingenz zwischen Reaktion und Verstärker überhaupt nicht erforderlich zu sein scheint, um einen entsprechenden Lernprozess in Gang zu bringen. Eine solche Beobachtung beschrieb Skinner (1948): Er setzte Tauben jeweils einzeln in eine speziell konstruierte Versuchskammer, in der Futterkörner in einem Magazin angeboten werden können. Das Futter wurde unabhängig von dem Verhalten der Tauben alle 15 s dargeboten (d. h. in einem festen Intervallverstärkungsplan). Obwohl die Tauben eigentlich nichts tun mussten, um an das Futter zu kommen, zeigten nahezu alle Tiere unterschiedliche und teilweise sehr bizarre Verhaltensweisen. Eine Taube drehte sich während des unverstärkten Intervalls beispielsweise mehrmals gegen den Uhrzeigersinn. Offensichtlich verhielten sich die Tauben, als ob sie glaubten, dass ihr Verhalten die Verstärkergabe kontrollierte, obwohl dies tatsächlich nicht der Fall war. Aus diesem Grund bezeichnete Skinner dieses Verhalten als abergläubisches Verhalten.

Skinner erklärte dieses abergläubische Verhalten durch die Annahme, dass jeder Verstärkung ein zufälliges Verhalten vorangeht. Die Wahrscheinlichkeit dieses zufälligen Verhaltens wird aufgrund des Gesetzes der Wirkung durch die Verstärkung erhöht. Tritt es erneut auf, wird es auch erneut verstärkt, sodass sich beliebige abergläubische Verhaltensmuster selbst ausformen können. Diese Erklärung geht also davon aus, dass reine Kontiguität (d. h. räumlich-zeitliche Nähe) von Reaktion und Verstärker für das Lernen ausreicht. Es ist nun ein amüsantes Gedankenexperiment zu überlegen, welche Teile unserer täglichen Routinehandlungen möglicherweise auf abergläubisches Verhalten zurückzuführen sind.

Allerdings hat eine spätere Studie von Staddon und Simmelhag (1971) gezeigt, dass die Verhaltensmuster von Tauben in solchen Situationen mit nichtkontingenter Reaktions-Verstärkungs-Relation weit weniger individuell und bizarr sind als von Skinner beschrieben. Darüber hinaus scheint der dem Verstärker zeitlich nahe Teil des Verhaltens eindeutige antizipatorische Merkmale aufzuweisen. Die Tauben scheinen also vor allem den Zeitpunkt gelernt zu haben, zu dem Verstärkung (d. h. Futter) kommt. Schließlich ist auch die Auffassung, dass dem Lernen reine Kontiguität zugrunde liegt, mittlerweile weitgehend der Auffassung gewichen, dass Reaktions-Verstärkungs-Kontingenzen zentral für das Lernen sind. Diese gewandelte Auffassung spiegelt die Idee wider, dass Verhalten nicht abergläubisch, sondern vielmehr in erstaunlich rationaler Weise an die tatsächlichen Kontingenzen in der Umwelt angepasst ist.

ten sie eine Taste und gaben danach Futter. Die Futtergabe war vollkommen unabhängig vom Verhalten der Tauben – und doch begannen sie bald, die Taste zu picken: Die Tauben verhielten sich, *als ob* es eine Kontingenz zwischen Tastenpicken und Futter gab. Wie beim *instinctive drift* tritt also auch beim Autoshaping ein artspezifisches Verhaltensmuster in einer Situation auf, in der es vom Versuchsleiter nicht gewünscht ist. Solche Verhaltensmuster können mitunter recht bizarre Formen annehmen und werden dann als **abergläubisches Verhalten** bezeichnet (▶ Zur Vertiefung 10.3).

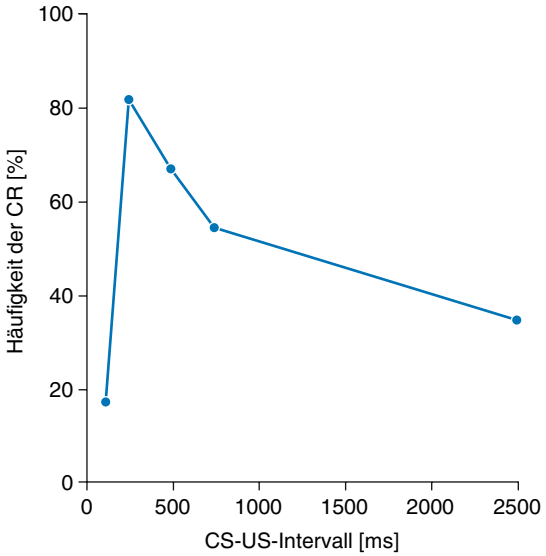
10.3.5 Wann wird gelernt? Kontiguität, Kontingenz und Erwartungsdiskrepanz

Kontiguität – Zeitliche Nähe

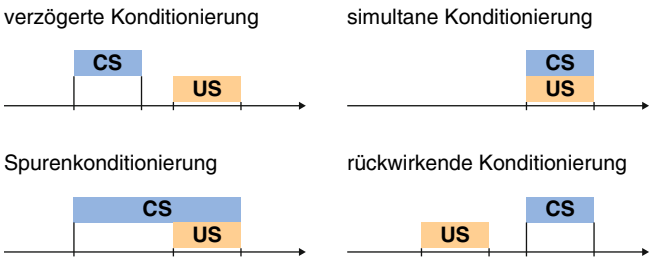
Für das klassische Konditionieren ist gemäß der Idee, dass **Kontiguität** eine wichtige Variable für die Assoziationsbildung ist, das zeitliche Intervall zwischen Darbietung des CS und US (CS-US-Intervall) wichtig für den Erwerb einer neuen CR. In einer Studie zur Lidschlagkonditionierung variierte McAllister (1953) das Intervall zwischen CS und US von 100–2500 ms. ◘ Abb. 10.9 zeigt die Stärke des Konditionierens nach 20 Lerndurchgängen als Funktion des CS-US-Intervalls.

Die prozentuale Häufigkeit der CR ist am höchsten, wenn dieses Intervall zwischen 250 und 700 ms liegt. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass klassisches Konditionieren am effektivsten ist, wenn der CS dem US zeitlich vorausgeht (verzögerte und Spurenkonditionierung; ◘ Abb. 10.10) und weniger effektiv, wenn beide Reize simultan dargeboten werden.

Auch für das operante Konditionieren ist die Kontiguität (das gemeinsame Auftreten von Reaktion und Verstärkung) wichtig. Das zeitliche Intervall zwischen Reaktion und Verstärkung be-



◘ **Abb. 10.9** Häufigkeit der Lidschluss-CR als Funktion des CS-US Intervalls (in Millisekunden) in der Studie von McAllister (1953)



◘ **Abb. 10.10** Unterschiedliche Prozeduren der klassischen Konditionierung unterscheiden sich in der zeitlichen Abfolge von CS und US.

einflusst operantes Lernen: Genau wie beim klassischen Konditionieren hat sich gezeigt, dass am besten gelernt wird, wenn dieses Intervall kurz ist. Auch hier haben sich Intervalle in der Größenordnung von 500 ms als optimal herausgestellt, während deutlich längere Intervalle das Lernen beeinträchtigen (Grice 1948; vgl. auch Tarpy und Sawabini 1974). Dieser Zusammenhang zwischen Kontiguität und Lernerfolg wurde auch von Shanks und Dickinson (1991) gefunden, die menschliche Kausalurteile in operanten Lernsituation untersuchten (▶ Abschn. 10.2.3).

Ursprünglich glaubte man, dass rückwirkendes Konditionieren (◘ Abb. 10.10) generell unwirksam ist. Mittlerweile vermuten allerdings einige Forscher, dass es sich dabei nicht um ein Lernproblem, sondern um ein Performanzproblem handelt. Wenn man z. B. davon ausgeht, dass klassisches Konditionieren im Wesentlichen eine antizipatorische Reaktion auf den US ist (▶ Abschn. 10.4.1), dann ist diese beim rückwirkenden (und partiell auch beim simultanen) Konditionieren nicht sonderlich sinnvoll und tritt deswegen nicht auf. Tatsächlich konnten Lerntests, die nicht auf dem direkten Messen von antizipatorischen Reaktionen beruhen (z. B. beim Konditionieren höherer Ordnung; ▶ Abschn. 10.4.1) vielfach den Erwerb einer Assoziation auch für das rückwirkende Konditionieren nachweisen (Wasserman und Miller 1997).

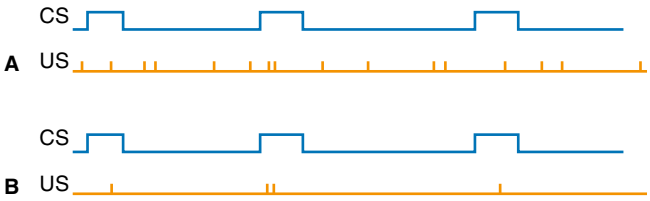
Bei den bisherigen Beispielen handelte es sich stets darum, wie ein Organismus lernt, dass ein Ereignis (z. B. ein CS oder ein eigenes Verhalten) ein anderes Ereignis (z. B. einen US oder ein Outcome) ankündigt. In diesem Sinne stehen beide Ereignisse in einer positiven Relation zueinander, und man spricht von *exzitatorischem Konditionieren*. Allerdings gibt es in der Umwelt manchmal auch Reize, die signalisieren, dass ein wichtiges anderes Ereignis *nicht* eintreten wird. Solche Reize sind wichtig, weil sie beispielsweise erlauben vorherzusagen, welche Orte ungefährlich sind, z. B. wo sich der Fressfeind vermutlich *nicht* aufhält oder wo vermutlich *kein* Futter zu finden sein wird. In solchen Fällen besteht eine negative Relation (bzw. *Kontingenz*) zwischen den Ereignissen, sodass man auch von *inhibitorischem Konditionieren* spricht. Das heißt, dass ein Ereignis (z. B. der CS) die Abwesenheit des anderen Ereignisses (z. B. des US) signalisiert. Die Tatsache, dass auch solche negative Kontingenzen gelernt werden können, spielt eine bedeutende Rolle für ein tieferes Verständnis des assoziativen Lernens, wie wir im nächsten Abschnitt diskutieren werden.

Kontingenz – Relativer Informationswert

Für das klassische Konditionieren wurde ursprünglich angenommen, der Lernprozess vollziehe sich automatisch, wenn es eine Kontiguität zwischen CS und US gäbe. In diesem Abschnitt wird nun diskutiert, inwieweit die CS-US-Kontiguität eine hinreichende oder überhaupt eine notwendige Voraussetzung für klassisches Konditionieren ist.

Befunde gegen die Annahme, dass CS-US-Kontiguität allein entscheidend ist, stammen aus Studien zum Einfluss der *Basisrate des US* (d. h. der Auftretenshäufigkeit des US unabhängig von der des CS) und zur sogenannten *konditionierten Inhibition*. Die Basisrate des US kann anhand von ◘ Abb. 10.11 veranschaulicht werden.

In ◘ Abb. 10.11B kommen CS und US immer gleichzeitig vor, sodass jeder US zuverlässig durch den CS angekündigt wird (d. h., es besteht hohe CS-US-Kontiguität). Hier erwarten wir schnelles Lernen. Die Anzahl der CS-US-Paarungen ist in ◘ Abb. 10.11A genauso hoch wie ◘ Abb. 10.11B. Allerdings kommt der US dort auch vor, ohne dass er mit dem CS gepaart ist. Das Auftreten des US ohne CS vermindert nicht die Kontiguität zwischen beiden Reizen, reduziert aber die **Kontingenz** (d. h. den Zusammenhang) zwischen ihnen.



◘ **Abb. 10.11** Schematische Darstellung zweier verschiedener Relationen zwischen CS und US. Die CS-US-Kontiguität (d. h. das gemeinsame Auftreten) ist in beiden Bedingungen identisch, aber die US-Basisrate ist unterschiedlich, sodass auch die Information unterschiedlich ist, die der CS über das Auftreten des US vermittelt. (Nach Rescorla 1988)

Die Kontingenz zwischen CS und US kann formalisiert werden als die Differenz (Δ, für Delta) zwischen der Wahrscheinlichkeit (P) des US nach vorherigem Auftreten des CS und der Wahrscheinlichkeit des US ohne vorheriges Auftreten des CS:

$$\Delta P = P(\text{US}|\text{CS}) - P(\text{US}|-\text{CS}).$$

P(US|CS) kann dabei als ein Maß für die CS-US-Kontiguität aufgefasst werden (d. h. die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens), während P(US|−CS) die Wahrscheinlichkeit des US in Abwesenheit des CS bezeichnet. In ◘ Abb. 10.11B ist $P(\text{US}|-\text{CS}) = 0$ und $P(\text{US}|\text{CS}) = 1$, sodass eine perfekte CS-US-Kontingenz vorliegt, also $\Delta P = 1$. In ◘ Abb. 10.11A dagegen ist $P(\text{US}|-\text{CS}) > 0$, sodass ΔP trotz gleichbleibender P(US|CS) reduziert ist. Das heißt, dass der CS hier deutlich weniger Information über das Auftreten des US liefert, da der US häufig auch ohne CS auftritt. Der Einfluss der CS-US-Kontingenz beim klassischen Konditionieren wurde in einer klassischen Studie von Rescorla (1968) demonstriert.

In Rescorlas Studie wurden Ratten zunächst durch *operantes Konditionieren* (▶ Abschn. 10.2.2) trainiert, einen Hebel zu drücken, um Futter zu bekommen. Danach wurden die Ratten klassisch konditioniert. Hierbei wurde als CS ein Ton von 2 min Dauer und als US ein Stromschlag verwendet, der in diesem Zeitintervall appliziert werden konnte. Rescorla (1968) variierte nun die Wahrscheinlichkeit P(US|CS), mit der diese Ereignisse gekoppelt waren (d. h. die CS-US-Kontiguität). Unabhängig davon wurde aber auch die Wahrscheinlichkeit P(US|−CS) variiert, mit der der Stromschlag-US in den Zwischenzeiten auftritt (d. h. in den Zeitintervallen ohne CS) und somit nicht mit dem Ton-CS gepaart war. Wie oben beschrieben wirkt sich diese Variation auf die CS-US-Kontingenz aus (d. h. auf ΔP), sodass der CS entweder viel oder wenig Information über den US vermittelt.

Als abhängige Variable wurde in diesem Experiment gemessen, ob der CS mit der Häufigkeit des vorher operant gelernten Hebeldrückens interferiert, ob es also zur CR des „Einfrierens" bzw. Unterdrückens aller Aktivitäten kommt, was als konditionierte emotionale Reaktion (*conditioned emotional response*,

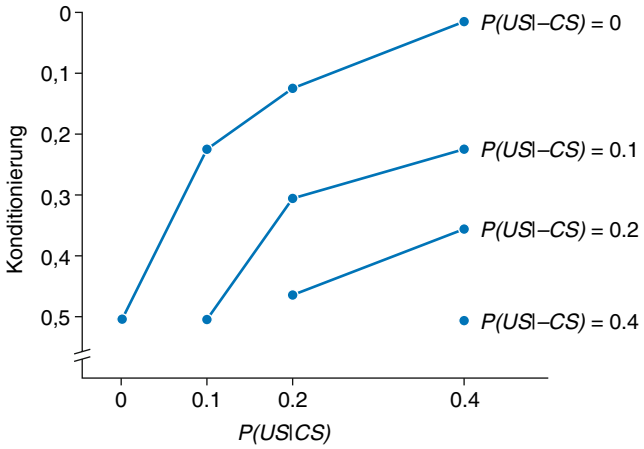


Abb. 10.12 Stärke des Konditionierens (gemessen als Unterdrückung instrumentellen Verhaltens) als Funktion der Wahrscheinlichkeit *P*(US|CS) des US-Auftretens in der Anwesenheit des CS (d. h. der CS-US-Kontiguität) und der Wahrscheinlichkeit *P*(US|–CS) des US-Auftretens in der Abwesenheit des CS. (Nach Rescorla 1988; adaptiert aus Koch 2008)

CER) bezeichnet wird. Wenn die Ratten den CS als Signal für das Auftreten des Stromschlags (US) lernen, dann sollten sie aufgrund dieser klassischen Furchtkonditionierung alles instrumentelle appetitive Annäherungsverhalten während des CS einstellen. Falls die CS-US-Relation aber nicht gelernt wird, dann gibt es auch keinen Grund, das Verhalten während des CS zu ändern. Die Ergebnisse dieses Experiments sind in Abb. 10.12 dargestellt.

Das Ausmaß der Reaktionsunterdrückung (d. h. die CR) ist auf der Ordinate (*y*-Achse) so dargestellt, dass der Wert 0 völlige Unterdrückung anzeigt, während der Wert 0,5 bedeutet, dass die Reaktionshäufigkeit nicht von der An- oder Abwesenheit des CS abhängt. Auf der Abszisse (*x*-Achse) ist die CS-US-Kontiguität als bedingte Wahrscheinlichkeit abgetragen: Der US wurde entweder nie in Anwesenheit des CS dargeboten, also $P(\text{US}|\text{CS}) = 0$, oder aber in 10, 20 oder 40 % seines Auftretens. Die Kurven beziehen sich jeweils auf $P(\text{US}|\text{–CS})$, also die Auftretenswahrscheinlichkeit des US in Abwesenheit des CS. Die Daten zeigen, dass die Erhöhung der Kontiguität (entlang der *x*-Achse) keinen Einfluss auf das Lernen hatte, wenn gleichzeitig auch die Auftretenswahrscheinlichkeit des US in Abwesenheit des CS auf denselben Wert erhöht wurde (über die verschiedenen Kurven), sodass $\Delta P = 0$ blieb. Der Grund hierfür ist, dass der CS in diesen Situationen keine Information über das Auftreten des US vermittelt: Der US kommt mit und ohne vorherigem CS gleich häufig vor. Umgekehrt führt bei gegebener Kontiguität jede Verringerung der Auftretenswahrscheinlichkeit des US in Abwesenheit des CS zu einer Erhöhung der Kontingenz, und dies führt wiederum zu einer Verbesserung des Lernens.

Die Studie von Rescorla (1968) zeigt also eindeutig, dass die CS-US-Kontiguität allein nicht über das Ausmaß des Konditionierens entscheidet, wie ursprünglich angenommen wurde. Stattdessen hängt klassisches Konditionieren stark von der Kontingenz zwischen CS und US ab (Rescorla 1988). In gleicher Weise und genauso analog zum klassischen Konditionieren (Rescorla 1968) spielt auch beim operanten Konditionieren die Kontingenz zwischen Verhalten und Konsequenz eine zentrale Rolle. An dieser Stelle verweisen wir auf die in ▶ Abschn. 10.2.3 ausführlich dargestellte Studie von Wasserman et al. (1993).

Relativer Informationswert beim Lernen mit mehreren Reizen

Dass Kontiguität allein assoziatives Lernen nicht erklären kann, sondern vielmehr der Kontingenz eine zentrale Rolle zukommt, wird durch die Befunde zur **konditionierten Inhibition** unterstützt. Sie zeigen, dass CS-US-Kontiguität in bestimmten Situationen für die Bildung einer Assoziation sogar überhaupt nicht erforderlich ist. Diese Situation lässt sich wieder an Abb. 10.11 veranschaulichen. Stellen wir uns vor, dass in Abb. 10.11A nicht, wie vorhin beschrieben, alle US-Darbietungen entfernt werden, die in Abwesenheit des CS auftreten, sondern stattdessen alle diejenigen, die in *Anwesenheit* des CS auftreten. Diese Variation entfernt jegliche CS-US-Kontiguität, behält aber eine hohe US-Basisrate bei. Diese Situation führt nun nicht dazu, dass nichts gelernt wird (wie es die Kontiguitätsannahme nahelegt), sondern es wird vielmehr gelernt, dass es eine *negative* CS-US-Relation (bzw. Kontingenz) gibt. Dies führt zu einem Verhalten, das so aussieht, als ob die Abwesenheit des US „erwartet" wird, wenn der CS dargeboten wird – der CS wird zu einem *conditioned inhibitor*.

Das Standardparadigma, um konditionierte Inhibition nachzuweisen, beinhaltet zwei CS (CS1 und CS2). CS1+ ist positiv mit dem US assoziiert, während CS2– negativ mit dem US assoziiert ist. Zimmer-Hart und Rescorla (1974) verwendeten als CS1+ einen Ton, der einen Stromschlag (US) ankündigte. Versuchsdurchgänge mit Ton (CS1+) und Stromschlag (US) wechselten sich ab mit solchen, in denen der Ton (CS1+) mit einem Licht (CS2–) gemeinsam (als Compound) dargeboten und nicht vom US gefolgt wurde. Schnell wurde gelernt, dass der CS1+ allein den US ankündigt, und der CS1+ verursachte eine CER. Zunächst führte auch der zusammengesetzte Reiz zu einer CER, allerdings verschwand diese im Laufe des Trainings nahezu vollständig. Dieses Verhaltensmuster legt nahe, dass die Versuchstiere gelernt haben, dass das Licht (der CS2–) dem Ton (CS1+) entgegenwirkt und den Stromschlag „verhindert". Mit anderen Worten wurde der CS2– mit der Abwesenheit des US assoziiert. Allerdings könnte es sein, dass dieser Effekt nicht darauf zurückzuführen ist, dass die Tiere etwas über den CS2– für sich genommen gelernt haben, sondern dass sie vor allem gelernt haben, dass die *Kombination* des CS1+ mit dem CS2– nicht vom Stromschlag gefolgt wird. Um zwischen diesen beiden Alternativen zu entscheiden, wurden zwei verschiedene Methoden entwickelt: der Summationstest und der Verzögerungstest.

Beim *Summationstest*, der ursprünglich von Pawlow (1927) entwickelt wurde, wird geprüft, welchen Effekt der CS2– hat, wenn er nachfolgend mit einem weiteren CS gepaart wird, der positiv mit dem US assoziiert wird (CS3+). Dieser Test wurde in der Studie von Zimmer-Hart und Rescorla (1974) verwendet. Sie konditionierten noch einen weiteren akustischen Reiz (CS3+) mit dem US, und auch dieser CS3+ löste eine CER aus. Wenn nun der CS2– nach dem Training in dem anschließenden Summationstest mit diesem anderen CS3+ gemeinsam dargeboten wurde, dann zeigte sich auch hier eine verringerte CER. Dies legt nahe, dass der CS2– dazu führt, dass gelernte Assoziationen eines

CS mit einem US negiert werden oder, anders ausgedrückt, dass nach einem CS– nicht das Auftreten, sondern die Abwesenheit des US antizipiert wird.

Die gleiche Schlussfolgerung lässt sich auch mit der zweiten Methode, dem *Verzögerungstest* (*retardation test*), bestätigen. Hier wird der konditionierte Inhibitor (CS–) in einem anschließenden Test direkt mit dem US gepaart. Wenn im Training tatsächlich eine negative Relation zwischen dem CS– und dem US gelernt wurde, dann sollte diese negative Relation ein nachfolgendes Lernen einer positiven Relation verzögern. Dass dies tatsächlich so ist, wurde von Pearce et al. (1982) gezeigt. Ihr Experiment war zunächst ähnlich wie das von Zimmer-Hart und Rescorla (1974), aber anschließend wurde das Licht (CS–) direkt mit dem Stromschlag gepaart, während es bei einer Kontrollgruppe kein vorheriges Inhibitionstraining gab. Wie in dem Experiment von Rescorla (1968) wurde das Ausmaß des Konditionierens als Unterdrückung aktueller Aktivität gemessen. Die Daten zeigen, dass diese Unterdrückung in der Kontrollgruppe deutlich schneller als in der Experimentalgruppe gelernt wurde, d. h., ein früherer CS– lässt sich schwerer (d. h. langsamer) als ein neutraler CS mit einem US assoziieren.

Diese Befunde legen nahe, dass ein CS– eine *negative* Assoziation mit dem US erwirbt, obwohl er im Inhibitionstraining niemals allein mit dem US gepaart wurde und es somit auch keine CS-US-Kontiguität gab. Demgegenüber ist der CS– kontingent mit der Abwesenheit des US. Dies unterstützt Rescorlas (1968) Position, dass nicht Kontiguität, sondern vor allem Kontingenz für klassisches Konditionieren wichtig ist.

Allerdings gibt es auch eine Reihe wichtiger Befunde, die gegen eine zu simple Kontingenzannahme sprechen. Es handelt sich hierbei um sogenannte *cue-competition*-Phänomene (aktuelle Übersicht in Boddez et al. 2014), etwa das Überschatten (*overshadowing*) einer Assoziation durch eine andere oder die Blockierung (*blocking*).

Overshadowing bezeichnet das Phänomen, dass bei zwei gleichzeitig dargebotenen CS zumeist einer von beiden eine stärkere Assoziation zum US entwickelt als der andere (d. h. ihn „überschattet"), obwohl beide CS gleichermaßen mit dem US gepaart wurden (Kamin 1969; Pawlow 1927). Auch beim Phänomen der **Blockierung** geht es darum, dass eine Assoziation eine andere überschatten kann.

Das Blockierungsphänomen wurde von Kamin (1968) in einer klassischen Studie zum assoziativen Lernen bei Ratten gezeigt. In einer Experimentalgruppe wurde zunächst in 16 Durchgängen ein Geräusch (CS1) mit einem Stromschlag (US) gepaart. Danach folgte eine zweite Phase mit acht weiteren Durchgängen, in denen das Geräusch (CS1) und ein Licht (CS2) gemeinsam mit einem Stromschlag (US) gepaart wurden. In einer Kontrollgruppe gab es nur diese zweite Phase, in der der CS1 und CS2 gemeinsam mit dem US gepaart dargeboten wurden, d. h. ohne CS1-Vortraining.

Die Ergebnisse zeigten, dass der CS2 in der Kontrollgruppe erwartungsgemäß eine starke CER auslöste, wohingegen der CS2 in der Experimentalgruppe zu nahezu keiner CER führte. Dieser Befund legt nahe, dass das vorherige Paaren des CS1 mit dem US in der Experimentalgruppe zu einer starken CS1-US Assoziation führte, die die CS2-US-Assoziation überschattet bzw. blockiert hat.

Das Blockierungsphänomen wurde ursprünglich im Tierversuch demonstriert, aber völlig vergleichbare Befunde lassen sich auch leicht bei Menschen zeigen. Hierfür kann das Nahrungsmittelallergie-Paradigma verwendet werden. Wenn Menschen z. B. erfahren, dass auf das Verspeisen von Spaghetti mit Tomaten (CS1 bzw. *Cue*) eine starke Allergie (US bzw. *Outcome*) folgt und dass eine gleich starke Allergie später auch nach Spaghetti mit Tomaten (CS1) und Kapern (CS2) folgt, dann werden sie vermutlich Tomaten meiden, aber nicht unbedingt denken, dass sie (auch) auf Kapern allergisch sind. Übrigens konnte neben dieser Vorwärtsblockierung auch eine Rückwärtsblockierung (*backward blocking*) nachgewiesen werden, z. B. wenn erst Tomaten und Kapern der Allergie vorausgehen und, wie in Kamins (1968) Kontrollgruppe, also beide Nahrungsmittel mit der Allergie in Zusammenhang gebracht werden, aber dann nachträglich erfahren wird, dass eine gleich starke Allergie auch mit Tomaten alleine auftritt. In diesem Fall verlieren Kapern nachträglich „ihren Schrecken", weil gelernt wurde, dass die Allergie durch Tomaten alleine erklärt werden kann (Übersicht in Boddez et al. 2014; De Houwer und Beckers 2002; Shanks 2010).

Die Befunde aus Studien zur Blockierung beim assoziativen Lernen stehen offenbar nicht in Übereinstimmung mit einer reinen Kontiguitätsannahme, denn in beiden Phänomenen besteht Kontiguität des CS2 mit dem US. Diese Befunde sind aber auch nicht mit einer reinen Kontingenzannahme vereinbar, weil auch in der Blockierungsgruppe jeweils eine positive (wenn auch abgeschwächte) Kontingenz zwischen CS2 und dem US besteht (Papini und Bitterman 1990), sodass also in jedem Fall eine Konditionierung auch von CS2 zu erwarten wäre. Diese Unvereinbarkeit der experimentellen Befunde mit beiden Annahmen führte dazu, dass die *relative Information* betont wurde, die ein Reiz über den anderen gibt (Rescorla 1988). Zum Beispiel liefert der CS2 beim Blockierungsphänomen keine neue Information über das Auftreten des US, weil der US bereits valide durch den CS1 vorhergesagt wird. Dadurch ist das Auftreten des US nach dem CS2 nicht überraschend (Kamin 1969), weil es bereits aufgrund des CS1 erwartet werden konnte. Mit anderen Worten muss es scheinbar eine *Diskrepanz* zwischen einer Erwartung und dem Eintreten eines Ereignisses geben, damit neue Assoziationen gebildet werden.

Das Blockierungsphänomen ist ein zentraler Befund in der Forschung zum assoziativen Lernen und hat zu einem bis heute außerordentlich einflussreichen Modell zur Erklärung assoziativen Lernens geführt – dem Rescorla-Wagner-Modell (Rescorla und Wagner 1972). Dieses Modell geht von rein assoziativen Vorgängen aus. In jüngerer Zeit sind solche rein assoziativen Lernmodelle allerdings zunehmend in die Kritik geraten. So argumentieren Mitchell et al. (2009; vgl. auch De Houwer 2009), dass Befunde wie etwa die Rückwärtsblockierung viel eher mit der *Annahme propositionaler Schlussfolgerungsprozesse* erklärt werden können, und Waldmann und Hagmayer (2013) gehen davon aus, dass primär mentale *kausale Modelle* entwickelt werden. (Hier ist zu beachten, dass eine Assoziation ja tatsächlich bloß eine *Verbindung* zwischen zwei Elementen ist, aber selbst überhaupt nichts über die Art der Verbindung, etwa im Sinne von Kausalität, sagt.) Allerdings ist das Rescorla-Wagner-Modell erstaunlich erfolgreich und repräsentiert nach über 40 Jahren immer noch den „Goldstandard", mit dem sich jede Theorie des

assoziativen Lernens vergleichen muss (z. B. Pearce und Bouton 2001; Shanks 2010). In ▶ Abschn. 10.4 werden wir dieses Modell sowie konkurrierende Erklärungsansätze diskutieren.

10.3.6 Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt dargestellten Befunde haben deutlich gemacht, dass die ursprünglich aus der Reflextradition stammenden Erklärungsansätze zum klassischen Konditionieren der Komplexität der tatsächlich beobachteten Lernvorgänge nicht gerecht werden. Früher wurde klassisches Konditionieren als ein niederer Prozess betrachtet, bei dem die Reaktionskontrolle aufgrund von Kontiguität automatisch von einem Reiz auf einen anderen übergeht. Neuere Ansätze orientieren sich dagegen mehr an kognitivistischen Konzepten und betonen die Rolle von Gedächtnisprozessen, Erwartungen und Aufmerksamkeitsfaktoren. Diese Ansätze messen dem relativen Informationsgehalt der CS-US-Relation (d. h. der Kontingenz) zumeist eine hohe Bedeutung bei (Pearce und Bouton 2001).

Kontingenz kann Kontiguität allerdings nicht als Erklärungskonzept ablösen (Papini und Bitterman 1990; Rescorla 1988). So argumentieren Miller und Matzel (1988), dass die Berechnung von Kontingenz erfordert, dass die Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens von CS und US (also die Kontiguität) vorher registriert wurde. Dies setzt also das Lernen von CS-US-Assoziationen voraus, sodass Assoziationen bereits gebildet werden müssen, bevor die Kontingenz als das Verhältnis von Auftretenswahrscheinlichkeiten berechnet werden kann. Um nun den klaren Einfluss der CS-US-Kontingenz beim klassischen Konditionieren zu erklären, legen Wasserman und Miller (1997, S. 591) nahe, dass der Erwerb von Assoziationen von Kontiguität abhängt, aber dass Kontingenz darüber entscheidet, ob diese Assoziationen auch im Verhalten wirksam werden.

In diesem Sinne kann klassisches Konditionieren als ein komplexes Lerngeschehen betrachtet werden, bei dem Relationen zwischen Ereignissen gelernt und aktiv für die Verhaltenssteuerung nutzbar gemacht werden. So betrachtet beispielsweise Rescorla (1988, S. 154) das Versuchstier in Studien zur Konditionierung als „[…] information seeker using logical and perceptual relations among events, along with its own preconceptions, to form a sophisticated representation of its world". Auf diese Art wird Wissen erworben, das flexibel und instrumentell einsetzbar ist, um das Verhalten optimal an die Umwelt anzupassen.

10.4 Mechanismen des assoziativen Lernens

In diesem Abschnitt werden wir zunächst argumentieren, dass die Lernprinzipien beim klassischen und operanten Konditionieren sehr ähnlich sind. Tatsächlich lassen sich die empirischen Befunde in beiden Formen des Lernens mit demselben Grundmodell assoziativen Lernens, dem in ▶ Abschn. 10.4.2 beschriebenen Rescorla-Wagner-Modell, erklären. In ▶ Abschn. 10.4.3 werden die Limitationen und in ▶ Abschn. 10.4.4 konkurrierende Modellvorstellungen des Rescorla-Wagner-Modells diskutiert sowie einige Parallelen zu Gedächtnistheorien aufgezeigt (▶ Kap. 12).

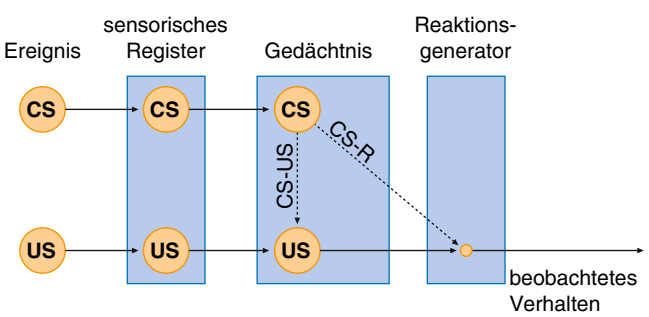
10.4.1 Was wird gelernt?

Nachdem wir in ▶ Abschn. 10.3 die Grundphänomene assoziativen Lernens betrachtet haben, sollen nun die vermittelnden theoretischen Konstrukte diskutiert werden, die zur Erklärung dieser Phänomene herangezogen wurden. Theorien assoziativen Lernens haben sich seit jeher mit der zentralen Frage auseinandergesetzt, welcher Art die erworbenen Assoziationen sind: So wurde untersucht, ob klassisches Konditionieren zur Bildung von Assoziationen zwischen CS und UR (S-R-Lernen) oder zwischen CS und US (S-S-Lernen) führt. Ähnlich wurde in der Forschung zum instrumentellen Lernen der Frage nachgegangen, ob dort tatsächlich S-R-Assoziationen gelernt werden, wie frühe Ansätze postulierten.

S-R-Lernen oder S-S-Lernen in der klassischen Konditionierung?

Die Antwort auf die Frage, ob klassisches Konditionieren zur Bildung von Assoziationen zwischen CS und UR (S-R-Lernen) oder zwischen CS und US (S-S-Lernen) führt, wurde durchaus kontrovers diskutiert. Kognitivistisch orientierte Forscher wie Pearce (1997) schlagen ein Modell vor, das Konditionieren als Informationsverarbeitungsprozess zu erklären versucht und sich dabei auf *Gedächtnisrepräsentationen* bezieht (◘ Abb. 10.13). In diesem Modell werden CS und US als Ereignisse dargestellt, die von einem „sensorischen Register" aufgenommen werden und dadurch eine Erinnerung oder eine Gedächtnisrepräsentation aktivieren. Die Aktivierung der Repräsentation des US wird typischerweise auch dazu führen, dass das für die Reaktionserzeugung verantwortliche System derart aktiviert wird, dass die UR ausgeführt wird. In diesem Modell kann die wiederholte Paarung von CS und US entweder dazu führen, dass sich eine direkte Assoziation zwischen CS und UR bildet (S-R-Lernen), oder es kann sich eine Assoziation zwischen CS und US bilden (S-S-Lernen). Im letzteren Fall würde die Aktivierung der CS-Repräsentation eine Erinnerung an den US aus dem Gedächtnis abrufen, die dann verantwortlich ist für die Ausführung einer *antizipatorischen* CR. Tatsächlich spricht die Mehrheit der vorhandenen experimentellen Befunde eher für diesen Ansatz, der S-S-Lernen annimmt (Rescorla 1988).

Eine Methode, S-R-Lernen experimentell zu untersuchen, besteht darin, die Reaktion auf den US zu verhindern. Wenn dennoch eine Assoziation gelernt wird, dann kann dies nicht



◘ **Abb. 10.13** Gedächtnismodell des klassischen Konditionierens. Die durchgezogenen Pfeile repräsentieren permanente (unkonditionale) Verbindungen, während die gestrichelten Linien konditionierte Verbindungen darstellen. (Adaptiert nach Pearce 1997)

Tab. 10.3 Drei experimentelle Paradigmen und die Assoziationen, die mit dem CS gebildet werden

Paradigma	Phase 1	Phase 2	CS1-Assoziation	CS2-Assoziation
Standard	–	CS1-US	S-S (zu US)	–
Sensorisches Vorkonditionieren	CS2-CS1	CS1-US	S-S (zu US)	S-S (zu CS1)
Konditionieren höherer Ordnung	CS1-US	CS2-CS1	S-S (zu US)	S-R oder S-S (zu CR oder CS1)

auf die Ausführung einer Reaktion zurückzuführen sein. Dieses Paradigma der *Reaktionsverhinderung* wurde z. B. von Light und Gantt (1936) verwendet. Sie paarten einen Summton (CS) mit einem Stromschlag (US) an der Pfote eines Hundes. Dieser US würde normalerweise als UR zu einem Zurückziehen der Pfote führen. Die UR wurde aber verhindert, indem die motorischen Nervenbahnen zu dieser Pfote temporär geschädigt wurden (d. h. die Pfote gelähmt wurde). Dadurch konnte der Hund die UR nicht mehr ausführen, und deswegen sollte auch keine Assoziation zwischen dem CS und der UR gebildet werden können. Nach einiger Zeit erholten sich die motorischen Nervenbahnen von der Schädigung, sodass der Hund wieder die Pfote heben konnte. Nun wurde getestet, ob die Darbietung des CS eine CR auslöst. Tatsächlich hob der Hund nun die Pfote, obwohl der CS vorher nie mit dieser Reaktion gepaart wurde, sondern immer nur mit dem US. Ähnliche Befunde wurden auch beobachtet, wenn die UR auf andere Weise verhindert wurde (z. B. pharmakologisch; Fitzgerald et al. 1973). Zusammengenommen unterstützen diese Befunde also die Hypothese des S-S-Lernens. Allerdings könnte hier eingewendet werden, dass die getestete Interpretation des S-R-Ansatzes physiologisch zu peripher ist. Im Rahmen des von Pearce (1997) vorgeschlagenen Informationsverarbeitungsmodells ist durchaus denkbar, dass auch *Reaktionen* im Gedächtnis repräsentiert sind und dass es nicht die motorische *Ausführung* der Reaktion selbst ist, die mit dem CS assoziiert wird, sondern vielmehr die Repräsentation der UR im Gedächtnis. Aber auch weitere Befunde sprechen für S-S-Lernen.

Eine weitere Methode, S-S-Lernen von S-R-Lernen zu dissoziieren, besteht darin, den US zu entwerten (*US devaluation*), nachdem eine klassische Konditionierung bereits stattgefunden hat. Das *US-Entwertungsparadigma* wurde z. B. von Holland und Rescorla (1975) verwendet. Sie haben bei hungrigen Ratten ein Licht (CS) mit Futter (US) gepaart, was im Ergebnis des Konditionierens typischerweise vor allem erhöhte Aktivität als CR auslöst. Später haben sie die Ratten getestet, als diese bereits vorher Futter bekommen hatten. Unter diesen Umständen löste der CS keine CR mehr aus. Dies spricht dagegen, dass eine S-R-Assoziation gelernt wurde, denn dann sollte der CS die CR auslösen, selbst wenn kein Grund dafür besteht, weil die Ratten nicht mehr hungrig sind. Wenn die Ratten dagegen gelernt haben, dass der CS Futter (US) ankündigt (S-S-Lernen), dann ist das Ausbleiben einer CR bei satten Ratten leicht erklärbar.

Auch Experimente mit dem Paradigma des **sensorischen Vorkonditionierens** (Rizley und Rescorla 1972) sprechen für die S-S-Hypothese. In diesem Paradigma wird in einer ersten Phase z. B. zunächst ein Licht als neutraler Reiz (CS2) vor einem anderen neutralen Reiz (z. B. ein Ton, CS1) dargeboten. Hier werden die Reize also nur beobachtet, ohne dass auf sie reagiert werden muss. In einer zweiten Phase wird nun der CS1 mit einem US (z. B. ein Stromschlag auf die Pfote) verknüpft, sodass eine CR (Pfote zurückziehen) auf den CS1 ausgeführt wird. Der kritische Test besteht nun darin, den CS2 zu präsentieren. Da der CS2 niemals mit dem US gepaart wurde, kann er auch nicht direkt mit einer Reaktion assoziiert worden sein, sodass der CS2 keine CR auslösen sollte. Werden dagegen Reize direkt miteinander assoziiert (S-S-Lernen), dann sollte die Darbietung des Lichtes (CS2) zur Antizipation des Tones (CS1) führen (d. h. seine Repräsentation im Gedächtnis aktivieren), was wiederum die CR auslösen sollte. Tatsächlich wird in Experimenten dieser Art in der Regel beobachtet, dass auch der CS2 die CR auslöst. Dieser Befund zeigt, dass eine Reaktion für die Bildung einer S-S-Assoziation überhaupt nicht erforderlich ist, und spricht damit für die S-S-Hypothese und gegen die S-R-Hypothese des klassischen Konditionierens. Die erworbenen Assoziationen für CS1 und CS2 beim sensorischen Vorkonditionieren sowie die Phasen des Versuchsablaufs sind in Tab. 10.3 dargestellt. Die Tabelle beinhaltet auch die Standardprozedur sowie das im nächsten Absatz beschriebene Konditionieren höherer Ordnung.

Das **Konditionieren höherer Ordnung** ist ein anderes Paradigma, um S-S-Lernen von S-R-Lernen zu unterscheiden. Dieses Paradigma zeigt allerdings weniger eindeutige Ergebnisse. In einem Experiment von Holland und Rescorla (1975) wurde bei Ratten ein Lichtreiz (CS1) mit Futter (US) gepaart, sodass das Licht als CR erhöhte Aktivität auslöste. Dann wurde ein Ton (CS2) mit dem CS1 gepaart. Es zeigte sich, dass nun bereits der CS2 eine CR auslöste – genau wie bei dem Experiment zum sensorischen Vorkonditionieren. Wie dort gab es sowohl eine CS2-CS1-Paarung als auch eine CS1-US Paarung. Hier kommt allerdings die CS1-US-Paarung zeitlich vor der CS2-CS1-Paarung, sodass nunmehr die CR auf CS2 kein eindeutiger Hinweis auf S-S-Lernen ist, weil bereits der CS1 eine Reaktion auslöste, die nach dem Prinzip der Reizsubstitution bei der nachfolgenden CS2-CS1-Paarung von der CS1 auf den CS zweiter Ordnung (d. h. auf den CS2) übergegangen sein könnte. Um nun zwischen S-S-Lernen und S-R-Lernen zu entscheiden, verwendeten Holland und Rescorla (1975) das oben beschriebene Entwertungsparadigma, indem sie die Ratten sättigten. Dies führt dazu, dass auf den CS1 keine CR mehr auftritt, was für das Lernen der CS1-US-Relation spricht. Demgegenüber führte die Entwertung des Futters aber nicht dazu, dass auch die CR auf den CS2 reduziert war. Dieser Befund spricht dafür, dass ein CS höherer Ordnung möglicherweise eher direkt mit der Reaktion assoziiert wird (S-R-Lernen), wohingegen sich Assoziationen erster Ordnung normalerweise auf die CS-US-Relation beziehen (S-S-Lernen).

Allerdings gibt es Studien, die auch für CS höherer Ordnung Hinweise für S-S-Lernen finden (z. B. Rashotte et al. 1977).

Zusammengenommen sprechen die vorliegenden Daten insgesamt gegen die reflextheoretisch inspirierte Annahme, dass klassisches Konditionieren allgemein auf dem Lernen von S-R-Assoziationen beruht. Stattdessen ist die Mehrzahl der Befunde mit der mehr kognitiv orientierten Annahme des S-S-Lernens konsistent, obwohl es auch Belege dafür gibt, dass in bestimmten Situationen direkte S-R-Assoziationen gebildet werden. Vor dem Hintergrund dieser Datenlage wurde spekuliert, dass sowohl Reize als auch Reaktionen gemeinsam mit anderen kontextuellen Stimuli (z. B. Aspekte der Laborumgebung) Ereignisse sind, die potenziell miteinander konkurrieren, um in die Assoziationen einzugehen, die dann das beobachtbare Verhalten vermitteln (z. B. Holland 1985).

Die Rolle der Verstärkung, S-R-Assoziationen und latentes Lernen in der operanten Konditionierung

Die Erklärungsansätze zum instrumentellen Lernen befassen sich traditionell vor allem mit der Frage, welche theoretische Rolle die Verstärkung (d. h. die Verhaltenskonsequenzen) für den (S-R-) Lernprozess spielt. In Bezug auf theoretische Erklärungsansätze zum Lernen vertrat Skinner (1938, 1950) eine Extremposition. Nach seiner Auffassung kommt es vor allem darauf an zu beobachten, unter welchen Bedingungen welches Verhalten auftritt, sodass es durch Herbeiführung der geeigneten Stimulusbedingungen und durch Verstärkung kontrolliert werden kann. Annahmen über nicht beobachtbare Prozesse lehnte er strikt ab. Deswegen war für ihn auch das Konzept der Assoziation inakzeptabel, weil Assoziationen nicht direkt beobachtbar sind. Konsequenterweise beschrieb Skinner die Faktoren, die Verhalten kontrollieren (z. B. in Form von Verstärkerplänen), ohne theoretische Erklärungen dafür zu suchen. Gleichwohl musste Skinner zugestehen, dass die Wirkung von Verstärkung auf die Reaktionswahrscheinlichkeit auch von situativen Stimuli und damit vom Verhaltenskontext abhängig ist. Dies bedeutete für ihn aber nicht, dass S-R-Verbindungen gelernt werden, sondern einfach, dass diese *diskriminativen Stimuli* (*occasion setters*; Schmajuk und Holland 1998; Swartzentruber 1995) Situationen definieren, in denen operantes Verhalten erfolgreich ist. Auf diese Art vermied er die Verwendung von *vermittelnden* theoretischen Konstrukten, sodass seine Position auch als *deskriptiver Behaviorismus* bezeichnet wird.

Im Unterschied zu Skinner nehmen die meisten Forscher an, dass beim Lernen neue Assoziationen aufgebaut werden – wenngleich diese Annahme von Mitchell et al. (2009) durchaus kritisch diskutiert wird. Auch in Theorien des operanten Konditionierens spielte die Art der Assoziation eine zentrale Rolle. Ursprünglich gingen die meisten Lerntheoretiker in der Tradition von Thorndike (1911) davon aus, dass instrumentelles Lernen darin besteht, dass der Organismus lernt, in einer gegebenen Situation zu reagieren (S-R-Ansätze). Thorndike nahm an, dass eine S-R-Verbindung (*connection*) aufgebaut wird, wenn Verstärkung auf die Reaktion folgt. Durch mehrmaliges Wiederholen dieses Vorgangs wird dann diese S-R-Verbindung graduell immer stärker. Wichtig bei Thorndikes Erklärung des instrumentellen Lernens ist, dass es eine reine S-R-Erklärung ist, in der die Verstärkung den assoziativen Lernprozess lediglich in Gang bringt, aber nicht selbst Bestandteil der gebildeten Assoziation ist. Auch Guthrie (1952) favorisierte einen reinen S-R-Ansatz, wobei er im Unterschied zu Thorndike allerdings davon ausging, dass Verstärkung *nicht* wesentlich für instrumentelles Lernen ist, sondern dass vielmehr bloße Kontiguität, also zeitliche Nähe, zwischen Reiz und Reaktion dazu führt, dass eine S-R-Verbindung entsteht. Diese ist nach Guthrie auch gleich in voller Stärke etabliert und muss nicht durch Übung graduell verstärkt werden.

Im Unterschied zu Guthrie vermutete Hull (1943, 1952) genau wie Thorndike, dass Verstärkung für S-R-Lernen unbedingt erforderlich ist und versuchte, die Rolle von Verstärkung genauer zu spezifizieren. Er nahm an, dass nur solche Reize als Verstärker wirken, die einen Trieb reduzieren. Diese Triebreduktion sorgt dann für die Stärkung der S-R-Assoziation. Neben dieser triebtheoretischen, motivationalen Spezifikation des Verstärkungskonzepts hat Hull eine Lerntheorie aufgestellt, deren Kern vermittelnde Prozesse (*intervenierende Variable*) waren. Diese intervenierenden Variablen, z. B. Gewohnheitsstärke (*habit strength*) oder Antriebsstärke (*drive*), beziehen sich auf rein hypothetische Prozesse, die selbst nicht direkt beobachtbar sind. Hulls Theorie kann hier aus Platzgründen nicht ausgeführt werden; eine ausführliche Darstellung findet sich in Bower und Hilgard (1983, 1984).

In den reinen S-R-Ansätzen ist allerdings kein Mechanismus formuliert, der es gestattet, den Verstärker zu *antizipieren* – vielleicht mit Ausnahme des von Hull (1931) angenommenen Mechanismus der *partiellen antizipatorischen Zielreaktion*. Auch Skinner (1938) ging in seiner streng deskriptiven Forschung (radikaler Behaviorismus) zum operanten Konditionieren nicht davon aus, dass ein Verstärker auf der Basis einer Assoziation vorhergesagt wird. Das Fehlen eines solchen Mechanismus wurde allerdings als gravierende Schwäche dieser Ansätze herausgestellt (z. B. Bolles 1972; Tolman 1932). Tolman vermutete, dass es ein wesentliches Merkmal des Verhaltens ist, zielgerichtet zu sein, und dass die Zielantizipation wichtiger Bestandteil des Lernens ist. Deswegen verwarf Tolman die Idee, dass instrumentelles Lernen allein auf S-R-Lernen beruht. Stattdessen nahm er an, dass instrumentelles Lernen in dem Erwerb von Verbindungen zwischen drei Einheiten, nämlich Reizen, Reaktionen sowie ihren Konsequenzen, liegt. Die letzte Einheit erlaubt es, die Reaktionskonsequenzen vorherzusagen (z. B. Bolles 1972; Colwill und Rescorla 1990; Rescorla 1998).

Die theoretische Zusatzannahme, dass die Reaktionskonsequenzen Teil der lernabhängig gebildeten Assoziationen sind, stellt eine wichtige Abkehr vom traditionellen S-R-Ansatz dar, weil nun das Lernen nicht mehr im Konditionieren von spezifischen Reaktionen besteht, sondern im Erwerb von assoziativen Strukturen, die Wissen über instrumentelle Mittel-Zweck-Relationen repräsentieren (Übersicht in Urcuioli 2005). Diese unterschiedlichen assoziativen Strukturen wurden u. a. von Rescorla (1998; Colwill und Rescorla 1990) intensiv untersucht. Er schlägt vor, dass instrumentelles Lernen nicht in der linearen Verknüpfung der drei Einheiten S, R, und O besteht (S-R-O), sondern in einer *hierarchischen* assoziativen Struktur in der Form S-(R-O), sodass das Lernen von Verhaltens-Effekt-Kontingenzen situationsspezifisch ausdifferenziert wird.

Allerdings spielt Verstärkung vermutlich für den *Ausdruck des Lernens* im Verhalten (d. h. für die Performanz) eine größere Rolle als für den Erwerbsprozess selbst. Tolman nahm ähnlich wie Guthrie an, dass Verstärkung für das Lernen nicht erforder-

lich ist. In einer wichtigen Studie konnte er nachweisen, dass Ratten in einem Labyrinth auch ohne direkte Verstärkung lernen (Tolman und Honzik 1930). Dieses **latente Lernen** zeigt sich erst dann im beobachtbaren Verhalten, wenn am Ende des Labyrinths Verstärkung eingeführt wird. (Auch das in ▶ Abschn. 10.2.3 dargestellte Beobachtungslernen spricht gegen Lernen allein durch Verstärkung eigener Reaktionen.) Solche Befunde veranlassten Tolman (1948) zu der Annahme, dass *kognitive Landkarten* gelernt werden, die für eine spätere instrumentelle Zielerreichung wichtig sind. Die Einführung des Zieles als Verstärker dient nun nicht mehr allein der motivationalen Triebreduktion, sondern fungiert vor allem als kognitiver Anreiz, gelerntes Verhalten in Antizipation des Zieles tatsächlich auszuführen.

Zusammengenommen kann man die theoretische Position von Tolman (1948) als wichtigen Vorläufer der mehr kognitivistischen Theorien auffassen, die heute von den meisten Lernforschern sowohl in Bezug auf instrumentelles Lernen als auch klassisches Konditionieren bevorzugt werden. Genau wie in der Forschung zum klassischen Konditionieren hat sich also die ursprüngliche Annahme eines S-R-Lernprozesses als zu simpel herausgestellt, während man heute weiß, dass assoziative Lernprozesse äußerst komplexe Vorgänge sind, die Wissen über die Umwelt erzeugen (▶ Abschn. 10.5).

10

▪ Gemeinsamkeiten zwischen klassischem und operantem Konditionieren

Im Hinblick auf die Modelle des assoziativen Lernens drängt sich die Frage auf, inwieweit die dem Lernen zugrunde liegenden Mechanismen beim klassischen Konditionieren und beim instrumentellen Lernen (operanten Konditionieren) überhaupt unterschiedlich sind. Auf einer oberflächlichen Ebene ist klar, dass sich die beiden experimentellen Paradigmen voneinander unterscheiden. Beim klassischen Konditionieren erzeugt der Experimentator eine Kontingenz zwischen CS und US, wobei der US unabhängig von der Reaktion auftritt. Dagegen besteht beim operanten Konditionieren diese Kontingenz darin, dass in einer Stimulussituation (analog zum CS) eine Reaktion zum Verstärker (US) führt, der ohne Reaktion nicht auftreten würde. Auf der theoretischen Ebene scheint es allerdings in beiden Fällen jeweils eine prädiktive Relation zu sein, die gelernt wird. Beim klassischen Konditionieren wird gelernt, dass der CS den US vorhersagt, und beim operanten Konditionieren wird gelernt, dass der CS (d. h. der situative Kontext) *gemeinsam mit der Reaktion* den US vorhersagt. Tatsächlich scheint dies die derzeit herrschende Auffassung über beide Formen des Konditionierens zu sein, wie Wasserman und Miller (1997, S. 574) zusammenfassen: „Although the events in Pavlovian and Thorndikean [d. h. klassisches und operantes] conditioning are decidedly different, the rules that govern these cases of learning are strikingly similar“ (vgl. auch Gallistel und Gibbon 2000).

10.4.2 Das Rescorla-Wagner-Modell als Basismodell assoziativen Lernens

In den meisten frühen Untersuchungen zum klassischen Konditionieren wurde als US ein Reiz genommen, der eine unbedingte, reflexartige Reaktion erfordert, wie den Lidschluss bei einem Luftstoß oder das Speicheln bei Futterzufuhr. Ursprünglich ging man im Rahmen dieser „Reflextradition“ davon aus, dass die wiederholte Paarung eines solchen US mit einem beliebigen CS dazu führt, dass bereits der CS eine Reaktion auslöst, die dem vom US ausgelösten Reflex ähnelt. Deswegen bezeichnete Pawlow diese erworbene Reaktion als konditionierten Reflex (CR). Dabei ist die Grundidee, dass der CS den US in seiner Fähigkeit ersetzt, eine UR auszulösen (*Reizsubstitution*), weil der CS durch das Konditionieren eine direkte Verbindung zur UR erworben hat. Gemäß dieser traditionellen, reflextheoretischen Sichtweise ist der Inhalt des Lernens eine neue direkte S-R-Verbindung (nämlich zwischen CS und UR). Diese Sichtweise nimmt weiterhin an, dass das Konditionieren einer neuen S-R-Verbindung die Kontiguität (räumlich-zeitliche Nähe) zwischen CS und US voraussetzt. Diese Annahme wird z. B. durch den Befund gestützt, dass die Stärke bzw. Wahrscheinlichkeit der CR abnimmt, wenn das CS-US-Intervall größer ist bzw. wenn die Kontiguität in einer Löschungsphase sogar ganz aufgehoben wird (d. h. der CS ohne nachfolgenden US dargeboten wird).

Inzwischen gibt es eine Reihe von empirischen Befunden, die gegen die reflextheoretische Interpretation sprechen. Wie bereits in ▶ Abschn. 10.4.1 erwähnt wurde, fordert die Reflextheorie, dass die CR genau der UR entspricht. Tatsächlich zeigen die Daten aber, dass die CR nicht immer der UR entspricht, sondern in manchen Fällen sogar ihr genaues Gegenteil sein kann. Zum Beispiel ist die UR eine auf einen Stromschlag erhöhte Aktivität, aber die CR auf einen den Stromschlag ankündigenden CS besteht in dem *Einstellen* jeglicher Aktivität. Darüber hinaus gibt es Befunde zum *sensorischen Vorkonditionieren*, die zeigen, dass das Auftreten einer Reaktion für die Bildung einer Assoziation zwischen zwei Reizen überhaupt nicht erforderlich ist. Zusammengenommen stellen diese und andere Befunde die Annahme infrage, dass klassisches Konditionieren im Wesentlichen S-R-Lernen ist, und sprechen eher für S-S-Lernen (▶ Abschn. 10.4.1). Auch die Annahme, dass Kontiguität zwischen CS und US entscheidend für das Lernen ist, wird durch eine Reihe wichtiger experimenteller Befunde angefochten. Diese Befunde legen nahe, dass vor allem die relative Information wichtig ist, die der CS über das Auftreten des US vermittelt (▶ Abschn. 10.3.5).

Rescorla und Wagner (1972) formulierten ein mathematisches Modell, um diese Grundüberlegungen im Lernprozess zu berücksichtigen. Das Rescorla-Wagner-Modell nimmt an, dass klassisches Konditionieren in der Bildung von Assoziationen zwischen den Repräsentationen von CS und US besteht. Die Fähigkeit des CS, die US-Repräsentation zu aktivieren und damit die CR auszulösen, hängt von der Stärke der CS-US-Assoziation ab. Der Zuwachs an *assoziativer Stärke* in jedem Lerndurchgang lässt sich nach Rescorla und Wagner (1972) mit folgender Formel beschreiben:

$$\Delta V = ab(1 - V).$$

Der Term V bezeichnet die Stärke der CS-US-Assoziation und ΔV deren Veränderung (daher wird sie auch *Delta-Regel* genannt). Der Parameter a steht für die Lernrate, die von der Auffälligkeit des CS abhängt, und b indiziert die Intensität des US. Die theoretisch maximal mögliche Stärke der CS-US-Assoziation

(die u. a. durch *b* bestimmt wird, also durch Merkmale des US) wird als 1 gesetzt. Gemäß dieser Formel wächst die assoziative Stärke mit der Anzahl der Lerndurchgänge bis zu einer theoretisch maximal möglichen Stärke.

Wichtig in diesem Modell ist, dass der Zuwachs an assoziativer Stärke nicht in jedem Lerndurchgang gleich, sondern am Anfang besonders groß ist und dann immer schwächer wird, je stärker die Assoziation bereits ist (d. h., je kleiner die Differenz zwischen der bereits bestehenden und der theoretisch maximalen Stärke ist). Mit anderen Worten: Zu Beginn des Lernens ist der US besonders „überraschend" (d. h., der CS ist maximal informativ), weil der US noch nicht durch den CS vorhergesagt wird. Mit jedem Lerndurchgang nimmt diese Überraschung ab, sodass die Diskrepanz zwischen erwartetem und tatsächlichem Ereignis und damit auch der Lernzuwachs immer kleiner werden.

Das Besondere an diesem Modell ist, dass es nicht nur auf Fälle mit einem einzigen CS anwendbar ist, sondern auch leicht auf mehrere CS verallgemeinert werden kann. Rescorla und Wagner nehmen hierfür einfach an, dass der US durch die Kombination aller vorhandenen CS und damit durch die *Summe ihrer assoziativen Stärken* vorhergesagt wird. Wichtig ist hierbei, dass die CS nicht völlig unabhängig voneinander an Stärke gewinnen, wie es in früheren Modellen angenommen wurde (z. B. Hull 1943), sondern dass sie miteinander um assoziative Stärke *konkurrieren*.

Auf der Grundlage dieser Annahmen lässt sich nun z. B. das in ▶ Abschn. 10.3.5 beschriebene Blockierungsphänomen beim assoziativen Lernen mit mehreren CS erklären (Kamin 1968). Dieses Phänomen hat eine zentrale theoretische Bedeutung für die Forschung zum assoziativen Lernen. Bei der Blockierung hat der CS1 durch seine früheren Paarungen mit dem US bereits viel assoziative Stärke gewonnen, sodass danach nur noch wenig Stärke übrig bleibt. Wird nun zusätzlich zum CS1 noch der CS2 dargeboten, dann konkurrieren beide CS um die wenige verbleibende Stärke, und im Resultat blockiert das frühere Stärken der CS1-US-Assoziation das Lernen der (redundanten) CS2-US-Assoziation.

Auch *Overshadowing* lässt sich mit der Formel vorhersagen, indem angenommen wird, dass die Lernrate (Parameter *a*) für zwei CS unterschiedlich ist. Dann wird ein CS deutlich schneller als der andere an Stärke gewinnen, sodass dieser andere CS in der Konkurrenz um Stärke bereits nach dem ersten Lerndurchgang zunehmend ins Hintertreffen gerät. Overshadowing zeigt sich aber aufgrund der Annahme geteilter assoziativer Stärke auch bei gleicher Lernrate bereits allein darin, dass jeder CS in einem Compound weniger Stärke bekommen kann, als wenn er alleine konditioniert wird. Neben diesen beiden Phänomenen kann das Modell auch konditionierte Inhibition sowie eine Reihe weiterer wichtiger Phänomene erklären.

Zusammengenommen ist das Rescorla-Wagner-Modell also ein quantitatives Lernmodell, das eine Vielzahl von Befunden erfolgreich vorhersagen kann. Aus Platzgründen können dieses Modell und seine Anwendungen hier nicht ausführlich dargestellt, sondern nur einige Probleme des Modells geschildert und Vorschläge zu ihrer Lösung skizziert werden (ausführlichere Darstellung in Anderson 2000; Kiesel und Koch 2012, Kap. 4; umfassende und kritische Diskussion des Rescorla-Wagner-Modells in Miller et al. 1995; vgl. auch Pearce und Bouton 2001).

10.4.3 Limitationen des Rescorla-Wagner-Modells

Ein Problem für das Rescorla-Wagner-Modell ist das Phänomen der *latenten Inhibition*. Hierbei wird der CS vor dem eigentlichen Lernbeginn einige Male allein dargeboten (*stimulus preexposure*), ohne vom US gefolgt zu werden. Die alleinige Darbietung des CS führt dazu, dass die Lernrate deutlich reduziert ist, wenn dieser CS später mit einem US gepaart wird (z. B. Hall 1991) – ähnlich wie bei dem oben beschriebenen Verzögerungstest zum Nachweis konditionierter Inhibition. Dieser Befund legt nahe, dass eine Art Erwartung, dass der CS keine Konsequenzen hat, gelernt wurde. Das Problem für das Modell ist nun, dass die angenommene Stärke der CS-US-Assoziation bei null beginnt und dort während der alleinigen Darbietung des CS auch bleibt, weil überhaupt kein US dargeboten wird. Deswegen muss das Modell annehmen, dass das Konditionieren von der früheren Darbietung des CS unbeeinflusst bleibt – was nicht den Daten entspricht.

Der Befund der latenten Inhibition hat offensichtlich nichts mit Merkmalen des US zu tun (z. B. mit der maximalen Stärke, die der US zulässt), sondern mit Eigenschaften des CS. Um diesen Effekt in das Modell zu integrieren, wurde angenommen, dass frühere Darbietungen des CS diesen weniger „auffällig" machen (z. B. Wagner 1978), sodass er später auch weniger beachtet und deswegen schlechter konditioniert wird. Wagner hat auf dieser Grundlage eine eigene Theorie als *Gedächtnismodell* entwickelt, um zu erklären, wann Reize miteinander assoziiert werden können und wann nicht (Wagner 1981, 2003, 2008; Wagner und Brandon 1989). Es wurden aber auch andere Theorien aufgestellt, die sich auf die Idee von Veränderungen in der Konditionierbarkeit von Reizen beziehen (z. B. Mackintosh 1975; Pearce und Hall 1980). Auch in diesen Theorien gibt es einen „Wettbewerb", der sich aber nicht wie bei Rescorla und Wagner (1972) auf die Stärke der CS-US-Assoziation bezieht, sondern auf die Lernrate. Die Grundidee ist dabei, dass frühere Darbietungen des CS ohne US den Parameter für die Lernrate reduzieren, sodass dieser CS später schlechter (d. h. langsamer) konditioniert werden kann, wenn die CS-US-Kontingenz eingeführt wird (Pearce und Bouton 2001).

Ein weiteres Problem für das ursprüngliche Rescorla-Wagner-Modell ist das Konditionieren mit **konfiguralen Hinweisreizen** (*configural cues*). Hierbei werden zwei Reize, A und B, entweder allein oder als zusammengesetzter CS (*compound CS*) dargeboten. Beim konfiguralen Konditionieren (*configuring*) kann gelernt werden, auf die *Kombination* der Reize (AB) anders zu reagieren als auf die individuellen Reize. Zum Beispiel wird beim *negativen Patterning* gelernt, auf A oder B separat zu reagieren (A+, B+), aber nicht, wenn A und B gemeinsam dargeboten werden (AB–; Kehoe und Gormezano 1980; Lachnit 1993). Aus der Sicht des Modells sollte aber aufgrund der Annahme der Addition assoziativer Stärke bei verschiedenen CS auf die Stimuluskombination AB sogar stärker reagiert werden als auf A oder B allein. Dieses Problem könnte gelöst werden, indem Reizkonfigurationen (AB) als neue CS eingeführt werden, die sich von den individuellen CS (A, B) unterscheiden (Rescorla und Wagner 1972; vgl. auch Gluck und Bower 1988). Diese Idee schwächt allerdings die Erklärungskraft des Modells, dessen ursprüngliche

Stärke vor allem in der Erklärung des Blockierungseffekts lag, wo die CS jeweils separat behandelt werden – denn nun hat man das Problem zu entscheiden, wann zwei (oder mehr) CS jeweils separat und wann als konfiguraler CS betrachtet werden (Pearce und Bouton 2001).

10.4.4 Elementale und konfigurale Modelle

Die Probleme des Rescorla-Wagner-Modells bei der Erklärung des Lernens mit konfiguralen Cues, oder allgemeiner, bei der Erklärung von *Kontexteffekten* weisen darauf hin, dass einzelne Hinweisreize nicht unabhängig voneinander assoziiert werden, sondern dass auch der Kontext, in dem ein Hinweisreiz auftritt (z. B. allein vs. zusammen mit einem anderen Hinweisreiz), gelernt wird. Die Berücksichtigung komplexer Reizkonstellationen (bzw. allgemeiner der Kontextsensitivität des Lernens) wurde in aktuellen Lerntheorien auf zwei verschiedenen Wegen geleistet: einerseits durch die Weiterentwicklung elementaler Theorien, andererseits durch die Formulierung konfiguraler Theorien.

Zunächst wurde versucht, das Rescorla-Wagner-Modell so anzupassen, dass es kontextabhängiges Lernen erklären kann. Das Rescorla-Wagner-Modell ist eine *elementale Theorie* (Mackintosh 1975; Wagner 2003, 2008; Harris 2006), die auf der Annahme basiert, dass nicht die komplette Lernsituation als CS mit dem US assoziiert wird, sondern dass nur bestimmte Teile der Situation assoziiert werden (die Assoziation bindet „parts of the situation to parts of the response"; Thorndike 1913, S. 32). So wird im Rescorla-Wagner-Modell eine Assoziation nur zwischen der Repräsentation des CS und des US gebildet, während der Kontext des CS nicht berücksichtigt wird. Dies verhindert eine Erklärung beispielsweise des negativen Patterning, da es bei diesem Phänomen entscheidend ist zu berücksichtigen, ob der CS A allein (A+; in diesem Fall wird eine Reaktion gezeigt) oder ob er gemeinsam mit dem CS B dargeboten wird (AB–; in diesem Fall bleibt die Reaktion aus). Eine Lösung dieses Problems der Kontextabhängigkeit im Kontext elementaler Theorien war die Annahme der Existenz konfiguraler Elemente als Repräsentation der Reizkonfigurationen, die unabhängig von den Elementen, die die einzelnen Reize repräsentieren, eine Assoziation mit dem US bilden können (Rescorla und Wagner 1972). So kann die Darbietung eines CS in dieser Vorstellung sowohl kontextunabhängige Elemente aktivieren (die bei jeder Darbietung von A aktiviert werden) als auch kontextabhängige Elemente, die entweder die Anwesenheit (A in Anwesenheit von B) oder die Abwesenheit eines bestimmten Kontextreizes (A in Abwesenheit von B) repräsentieren (Wagner 2003). Auf diese Weise kann das Modell für die Darbietung von A in Anwesenheit von B andere Vorhersagen machen als für die Darbietung von A in Abwesenheit von B und liefert damit eine Erklärung des negativen Patterning.

Darüber hinaus kann diese Erweiterung auch die Effekte komplexerer Reizkonfigurationen (mit drei oder mehr Cues) bzw. ganz allgemein die Effekte des Lernkontexts beschreiben (Übersicht in Wagner 2008). Jedoch steigt mit zunehmender Komplexität (d. h. mit zunehmender Zahl zu berücksichtigender Reize oder Situationsmerkmale) sehr schnell die Zahl der notwendigen konfiguralen Elemente, weil für jede mögliche Kombination von Merkmalen ein neues Element angenommen werden muss. Da sich aber jede Situation durch prinzipiell unendlich viele Merkmale beschreiben lässt, ist es unplausibel anzunehmen, dass jede mögliche Konstellation dieser zahllosen Merkmale tatsächlich durch ein eigenes konfigurales Element repräsentiert wird. Die Ergänzung elementaler Lerntheorien um solche konfiguralen Elemente kann also einfache Kontext- und Konfigurationseffekte erklären, allerdings lässt sich diese Erklärung nicht auf beliebig komplexe Konfigurationen erweitern (▶ Kap. 11).

Konfigurale Theorien (z. B. Pearce 2002) wählen einen anderen Weg zur Erklärung von Reizkonfigurationseffekten und kontextabhängigem Lernen. Sie nehmen an, dass nicht jeder einzelne Reiz durch ein (theoretisch postuliertes) Element repräsentiert wird und mit dem US eine Assoziation eingehen kann, sondern dass die gesamte Lernsituation als eine Konfiguration von Reizen im Gedächtnis repräsentiert wird. Diese Reizkonfiguration kann dann mit einem US oder einem Verhalten assoziiert werden. Mithilfe dieser Repräsentation der gesamten Situation (d. h. Cue und Kontext) sind diese Modelle gut in der Lage, Effekte bestimmter Reizkonfigurationen (bzw. ganz allgemein Kontexteffekte) zu erklären. Beispielsweise ist eine Erklärung des negativen Patterning so ohne weitere Annahmen möglich: Da sich die Reizkonfigurationen A, B, und AB voneinander unterscheiden, werden sie jeweils separat im Gedächtnis repräsentiert und können daher auch mit unterschiedlichen Outcomes assoziiert werden (im Beispiel aus dem vorhergehenden Abschnitt würden die Repräsentationen von A und B mit dem Auftreten des US assoziiert, während die Repräsentation von AB mit dem Ausbleiben des US assoziiert würde).

Im Rescorla-Wagner-Modell wird das Ausmaß der Aktivierung eines US über die Summe der Assoziationen des US mit allen CS ermittelt; dabei werden andere in der Situation vorhandene Reize nicht berücksichtigt. In konfiguralen Theorien dagegen werden bei der Ermittlung der Vorhersage alle Merkmale der Situation berücksichtigt: Ein mit einer Konfiguration A assoziierter US wird in einer neuen Situation (Konfiguration A′) aktiviert, wenn die Ähnlichkeit zwischen A und A′ ausreichend groß ist. Die Ähnlichkeit zweier Konfigurationen wird ermittelt, indem alle Merkmale der aktuellen Situation A′ mit allen im Gedächtnis gespeicherten Situationen verglichen werden. Die Ähnlichkeit der aktuellen Situation A′ mit einer im Gedächtnis gespeicherten Situation A bestimmt wiederum, wie stark der mit der gespeicherten Situation A assoziierte US aktiviert wird, d. h. Generalisierung stattfindet. Auf diese Weise können auch Kontextmerkmale und deren Änderung über Situationen hinweg die Lernleistung beeinflussen.

Es ist beachtenswert, dass einige enge Parallelen zwischen Lerntheorien und Theorien der Kategorisierung sowie Gedächtnismodellen bestehen. So wurden die Kernideen des Rescorla-Wagner-Modells beispielsweise schon früh in die Forschung zur Kategorisierung übertragen. In einer typischen Kategorisierungsstudie wird ein Reiz präsentiert, und Versuchspersonen sollen eine von zwei Kategorisierungsreaktionen geben (beispielsweise indem sie angeben, ob ein Reiz zu Kategorie A oder Kategorie B gehört). In dieser Situation mit zwei möglichen Reaktionen ist das Rescorla-Wagner-Modell äquivalent mit dem Kategorisierungsmodell von Gluck und Bower (1988): Beide Theorien pos-

tulieren, dass Assoziationen zwischen Repräsentationen von Reiz und Reaktion gebildet werden und dass die Stärke dieser Assoziationen von der Delta-Regel bestimmt wird. (Diese Grundideen des Rescorla-Wagner-Modells lassen sich auch als neuronales Netzwerkmodell formulieren, wie in ▶ Kap. 11 illustriert wird.)

Weit verbreitet in aktuellen Theorien sind auch die oben beschriebenen Ideen der konfiguralen Repräsentation von Reizkonstellationen und der Aktivierung in Abhängigkeit von der Ähnlichkeit zwischen Repräsentationen (Beispiel in Logan 2002). Sie spielen auch in Theorien der Kategorisierung (▶ Kap. 11) und in formalen Gedächtnismodellen (▶ Kap. 12) eine wichtige Rolle. So bilden sie den Kern einer erfolgreichen Theorie der Kategorisierung (*generalized context model*, GCM; Nosofsky 1984; ▶ Kap. 11). Auch gibt es enge Verknüpfungen zwischen dem konfiguralen Lernmodell von Pearce (1994) und der exemplarbasierten Kategorisierungstheorie von Kruschke (1992). Konfigurale Repräsentation und ähnlichkeitsabhängige Aktivierung spielen auch in *globalen Gedächtnismodellen* eine zentrale Rolle. Ein solches Gedächtnismodell, MINERVA 2 (Hintzman 1984) wird in ▶ Kap. 12 vorgestellt. Assoziative Lerntheorien haben in vielen Fällen die Theorienbildung in anderen Bereichen der allgemeinen Psychologie befruchtet. Eine Befruchtung findet aber auch umgekehrt statt, wenn beispielsweise eine neue Lerntheorie entwickelt wird, die auf dem MINERVA-2-Gedächtnismodell basiert und eine Erklärung zahlreicher Phänomene des assoziativen Lernens leistet (Jamieson et al. 2012).

Derzeit ist jedoch wohl keines der diskutierten Modelle imstande, alle vorhandenen relevanten Lernphänomene einheitlich zu erklären (Gallistel und Gibbon 2000; Harris 2006; Wagner 2003, 2008; Wasserman und Miller 1997). Dennoch haben diese Modelle zu vielen neuen Experimenten geführt, die die Forschung deutlich vorangebracht haben.

10.4.5 Zusammenfassung

Sowohl klassisches als auch operantes Konditionieren verweist also auf einen grundlegenden Lernprozess, der sich auf die Abfolge von Ereignissen in der Umwelt bezieht. So lässt sich Konditionieren nach Pearce (1997, S. 27) beschreiben als ein „process that is essential for learning about the sequential structure of the environment". Diese angenommene Gemeinsamkeit der zugrunde liegenden Lernprozesse kann man dadurch veranschaulichen, dass sich das in ▶ Abschn. 10.4.2 beschriebene Rescorla-Wagner-Modell nicht nur auf klassische Konditionierung anwenden lässt. Dort haben wir ja gesehen, dass die besondere Stärke des Modells in der Behandlung von kompetitiven Lernsituationen mit mehr als einem Prädiktor (d. h. CS) für den US liegt. Das operante Konditionieren kann nun genau als ein solcher Fall konzeptualisiert werden, in dem sowohl die Reaktion als auch die Versuchssituation (der experimentelle Kontext; vgl. Balsam und Tomie 1985) um die Vorhersage des US (d. h. des Verstärkers bzw. *Outcome*, O) konkurrieren. Immer dann, wenn beide gemeinsam auftreten und vom US (bzw. O) gefolgt werden, wird eine Assoziation zwischen S, R und O gestärkt, während jedes Auftreten von O in der Abwesenheit von R diese Assoziation schwächt, weil O dann auch von S allein (d. h. aufgrund des situativen Kontexts) vorhergesagt werden kann. Tatsächlich lassen sich beispielsweise die in ▶ Abschn. 10.2.3 beschriebenen Daten von Wasserman et al. (1993) zum kausalen Lernen in einer instrumentellen Lernsituation ziemlich gut mit dem Rescorla-Wagner-Modell simulieren (z. B. Shanks 1995).

In typischen Konditionierungsparadigmen sind diese sequenziellen Strukturen allerdings häufig noch vergleichsweise wenig komplex. In letzter Zeit wurde eine Reihe neuer experimenteller Paradigmen entwickelt, um zu untersuchen, wie Menschen komplexere Strukturen lernen. Dieses *implizite Lernen* wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

10.5 Implizites Lernen

Tiere in Konditionierungsexperimenten kann man nicht direkt fragen, ob sie sich der prädiktiven Relationen bewusst geworden sind, die ihrem Lernen zugrunde liegen. Dieses Lernen lässt sich deswegen nur *indirekt* aus ihrem Verhalten erschließen. Im Unterschied zu Tieren kann man Menschen direkt fragen, ob sie sich ihres Lernens bewusst geworden sind. In ▶ Abschn. 10.2.3 wurden bereits Studien beschrieben, in denen Menschen *direkt* (d. h. explizit) nach ihrem Urteil über die kausale Stärke des Zusammenhangs zwischen einer Handlung und eines Effekts befragt wurden. Hier bildet sich der Lernerfolg also nicht nur indirekt in Verhaltensmaßen des Lernens ab, sondern auch in direkten Verbalmaßen. Es gibt allerdings auch Lernsituationen, in denen Menschen scheinbar stärker *intuitiv* lernen und sich der dem Lernen zugrunde liegenden Kontingenzen wenig bewusst sind. Dieses Lernen wird in der Literatur als **implizites Lernen** bezeichnet und vom *expliziten Lernen* unterschieden, wie es beispielsweise beim Lernen von Regeln oder eines mathematischen Beweises stattfindet. Eine zentrale Frage in der Forschung zum impliziten Lernen ist, ob es auf einem besonderen Lernmechanismus beruht, der sich von demjenigen des expliziten Lernens grundsätzlich unterscheidet (Übersichten z. B. in Dienes und Berry 1997; Hoffmann 1993; Perrig 1996; Shanks und St. John 1994; Shanks 2005; Stadler und Frensch 1998).

Implizites Lernen bezieht sich nach Dienes und Berry (1997) auf Lernsituationen, in denen die Person Strukturen einer relativ komplexen Reizumgebung lernt, ohne dies zu beabsichtigen und ohne dass das resultierende Wissen verbalisierbar ist. Implizites Lernen lässt sich also durch drei Merkmale definieren:

1. Es findet *beiläufig* (inzidentell) statt, also ohne dass die Versuchsperson dazu aufgefordert wird, die Strukturen intentional zu lernen (Stadler 1997).
2. Es wird vermutet, dass es weniger von Aufmerksamkeitsfaktoren abhängig ist als explizites Lernen (Übersicht in Hsiao und Reber 1998).
3. Es wird angenommen, dass dieses Lernen auch *unbewusst* bleiben kann.

Vor allem die letzte Annahme, dass implizites Lernen unbewusst stattfindet, ist sehr kontrovers (Hoffmann 1993; Rünger und Frensch 2010; Shanks 2010; Shanks und St. John 1994) und wird in ▶ Abschn. 10.5.3 diskutiert. Zunächst werden exemplarisch vier verschiedene experimentelle Paradigmen zur Untersuchung

impliziten Lernens beschrieben (vgl. auch Kiesel und Koch 2012, Kap. 8). Anschließend wird erörtert, welche prädiktiven Relationen (Strukturen) dem impliziten Lernen in diesen Paradigmen zugrunde liegen.

10.5.1 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung impliziten Lernens

Steuerung komplexer Systeme

Befunde, die für unterschiedliche explizite und implizite Lernmodi sprechen, wurden in Studien zu *dynamischen Steuerungsaufgaben* berichtet. Berry und Broadbent (1984, 1988) haben eine Aufgabe entwickelt, in der Versuchspersonen die Produktionsmenge einer fiktiven Zuckerfabrik steuern sollten. Die Versuchspersonen haben dabei die Rolle eines Managers, der die Zuckerproduktion auf einem bestimmten Niveau halten muss, indem er die Anzahl der Fabrikarbeiter festlegt. Sobald diese Anzahl eingegeben wird, bekommt die Versuchsperson die resultierende Produktionsmenge als Feedback. Im nächsten Durchgang muss dann die Arbeiteranzahl erneut adjustiert werden usw. Der Zusammenhang zwischen Arbeiteranzahl und Produktionsmenge wird dabei durch eine wenig offensichtliche Gleichung geregelt, die den Versuchspersonen nicht mitgeteilt wird. Zum Beispiel konnte die Produktionsmenge nicht nur von der eingegebenen Arbeiteranzahl, sondern auch von der vorangegangen Produktionsmenge abhängen, und zu der neuen Produktionsmenge wird noch eine kleine Zufallskomponente addiert. In dieser komplexen Steuerungsaufgabe zeigt sich implizites Lernen darin, dass einige Versuchspersonen das spezifizierte Produktionsniveau zunehmend besser einzuhalten imstande sind, aber dennoch nicht den Zusammenhang zwischen Arbeiterzahl und Zuckerproduktion verbalisieren können. Tatsächlich waren viele Versuchspersonen in Berry und Broadbents (1984) Studie in einem anschließenden Interview nicht in der Lage, ihre Fähigkeit, die Fabrik zu leiten, in Worte zu fassen. Vergleichbare Befunde wurden auch in anderen, ähnlichen Aufgaben beobachtet (Dienes und Berry 1997).

Lernen versteckter Kovariationen

Ein weiteres Paradigma, in dem ein Urteil von Kriterien beeinflusst wird, die von den Versuchspersonen häufig nicht angegeben werden können, ist das Lernen versteckter Kovariationen. Lewicki (1986) zeigte seinen Versuchspersonen Fotografien von Personen, die entweder als „freundlich“ oder als „intelligent“ bezeichnet wurden. Ohne dass dies den Versuchspersonen mitgeteilt wurde, hatten bei einem Teil der Versuchspersonen alle „freundlichen“ Personen kürzere Haare als die „intelligenten“ Personen, während dies für den anderen Teil der Versuchspersonen genau umgekehrt war. In einer anschließenden Testphase bekamen die Versuchspersonen Fotos von neuen Personen gezeigt und mussten nun entscheiden, ob es sich um eine freundliche oder eine intelligente Person handelt. In dieser Testphase waren die Urteile der Versuchspersonen tatsächlich überzufällig häufig in Übereinstimmung mit der vorher erfahrenen Kovariation zwischen Haarlänge und Persönlichkeitsmerkmal. Lewicki berichtet, dass keine der Versuchspersonen in einem späteren Interview zur Begründung ihrer Urteile die Haarlänge erwähnt hatte. Sie waren sich also dieses Zusammenhangs offenbar gar nicht bewusst. Das Berücksichtigen solcher versteckten Kovariationen wurde auch für eine Reihe ähnlicher Versuchssituationen berichtet (Überblick z. B. in Lewicki et al. 1992).

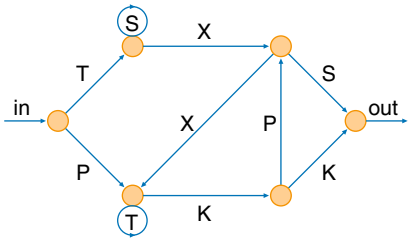


Abb. 10.14 Beispiel einer künstlichen Grammatik (*finite state grammar*). Buchstabenfolgen werden erzeugt, indem vom Eingangsknoten („in“) ausgehend die Knoten in Pfeilrichtung durchlaufen werden, bis der Ausgangsknoten („out“) erreicht wird. Korrekte Folgen wären etwa TXS oder TSSXXKK. (Nach Cleeremans et al. 1998)

Dieses Paradigma ähnelt in vielerlei Hinsicht einigen Untersuchungen zum evaluativen Konditionieren (▶ Abschn. 10.2.3). Auch hier wurde in einigen Studien versucht, die Relation zwischen CS und US-Valenz zu verbergen, und es wurde wiederholt beobachtet, dass das Urteil von Versuchspersonen durch den Zusammenhang von CS und US-Valenz beeinflusst war, obwohl diese in einer Nachbefragung diesen Zusammenhang nicht angeben konnten (z. B. Olson und Fazio 2001).

Lernen künstlicher Grammatiken

Kovariationen zwischen Reizmerkmalen liegen auch dem Lernen künstlicher Grammatiken zugrunde. In typischen Studien zum Grammatiklernen werden Versuchspersonen zunächst aufgefordert, eine Reihe von Buchstabenfolgen auswendig zu lernen. Diese Folgen werden auf der Grundlage einer künstlichen Grammatik (*finite state grammar*, z. B. Reber 1989) erzeugt, die festlegt, welche Buchstabenfolgen möglich sind, um künstliche Wörter zu bilden. Den Versuchspersonen wird allerdings nicht mitgeteilt, dass es ein solches grammatisches Regelsystem gibt. Ein Beispiel für eine solche Grammatik ist in Abb. 10.14 zu sehen. Auf der linken Seite beginnt die Erzeugung der Buchstabenfolgen mit der zufälligen Auswahl eines Buchstabens, hier also T oder P. Wurde T ausgewählt, dann kann der nächste Buchstabe entweder S sein, der in einer rekursiven Schleife auch wiederholt werden kann, oder X. Eine fertige grammatische Folge entsteht, wenn das rechte Ende erreicht ist, z. B. wenn nach X S folgt. Beispiele für grammatische Folgen wären also TXS oder TSSXXKK. Nach der Lernphase mit grammatischen Folgen werden die Versuchspersonen aufgeklärt, dass es komplexe grammatische Regeln in diesen Folgen gab. Anschließend werden die Versuchspersonen aufgefordert, neue Buchstabenfolgen danach zu klassifizieren, ob sie diesen Regeln entsprechen oder nicht. Dies gelingt den Versuchspersonen typischerweise überzufällig gut. In einer Studie von Reber (1967) klassifizierten die Versuchspersonen 69 % der Folgen korrekt, während zufälliges Auswählen zu 50 % korrekter Klassifikationen geführt hätte. In einer anschließenden Befragung zeigte sich, dass die Versuchspersonen weder in der Lage waren, die Regeln der Grammatik zu spezifizieren noch ihr eigenes Klassifikationsverhalten zu erklären. Stattdessen schienen

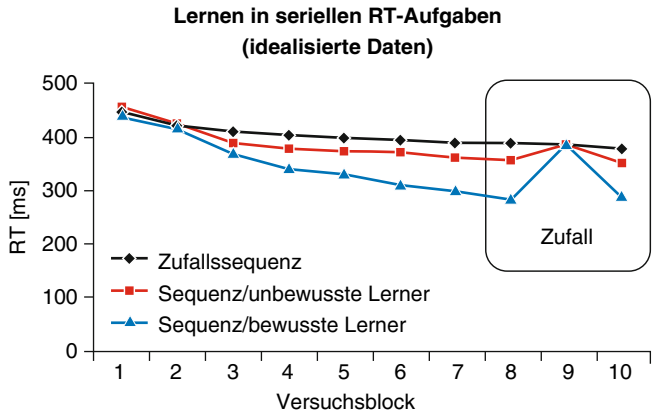


Abb. 10.15 Idealtypische Daten eines Sequenzlernexperiments mit serieller Reaktionszeit-(RT-)Aufgabe. In Block 9 wird in allen Bedingungen eine Zufallsfolge dargeboten. Bei dem Wechsel von der Trainings- zur Zufallssequenz steigen die RT auch bei solchen Probanden an, die in einer Nachbefragung angeben, keine Sequenz bemerkt zu haben (unbewusste Lerner)

sie sich auf ihre Intuition zu verlassen. Reber (1989) vermutete deswegen, dass das implizite Grammatiklernen darin besteht, dass die Versuchspersonen unbewusst komplexe Regeln aus der Reizumgebung abstrahieren. Diese Regeln bestimmen die Sequenz der einzelnen Reize (d. h. Buchstaben) in den zu lernenden oder zu klassifizierenden Buchstabenfolgen (kritische Diskussion in Perruchet und Pacton 2006).

Sequenzlernen

Das implizite Lernen komplexerer sequentieller Strukturen wurde in den letzten 15 Jahren auch in seriellen Reaktionszeit-(RT-)Aufgaben untersucht. Im Unterschied zu den bisher beschriebenen Paradigmen wird das Lernen in seriellen RT-Aufgaben nicht (nur) direkt über die Güte eines verbalen Urteils gemessen, sondern lässt sich (auch) indirekt aus der Geschwindigkeit der geforderten Reaktionen erschließen (d. h. im Sinne eines indirekten Verhaltensmaßes des Lernens). Typischerweise werden als Reize Sternchen einzeln an einer von vier horizontal angeordneten Bildschirmpositionen dargeboten. Die Aufgabe der Versuchspersonen besteht darin, jeweils so schnell wie möglich diejenige von vier nebeneinander angeordneten Reaktionstasten zu drücken, die der Reizposition räumlich entspricht. Die Reaktion löst dann nach kurzer Zeit (z. B. 500 ms) die Darbietung des nächsten Reizes aus, auf den dann wieder reagiert werden muss, usw. In dieser seriellen Reaktionsaufgabe werden nun RTs auf regelhaft strukturierte Folgen mit den RTs auf Zufallsfolgen verglichen.

Nissen und Bullemer (1987) boten die Reize in der festen Abfolge 4231324321 dar (die Ziffern bezeichnen hier die Bildschirmpositionen von links nach rechts), die pro Versuchsblock zehnmal ohne Unterbrechung wiederholt wurde. Die feste Sequenz führte im Vergleich zu einer Zufallsfolge zu deutlich niedrigeren RTs. In einer Nachbefragung zeigte sich, dass einige Versuchspersonen überhaupt nicht bemerkt hatten, dass die Reizfolge regelhaft war. Aber auch diese Versuchspersonen zeigten sequenzspezifische RT-Effekte, sodass Nissen und Bullemer hierfür einen *unbewussten* Sequenzlernprozess vermuteten. Abb. 10.15 zeigt idealtypische Daten zum impliziten Lernen in seriellen RT-Aufgaben (für eine Übersicht siehe Abrahamse et al. 2010; Buchner und Frensch 2000; Schwarb und Schumacher 2012; s. auch ▶ Zur Vertiefung 10.4).

10.5.2 Prädiktive Relationen beim impliziten Lernen

Wir erinnern uns, dass es beim klassischen Konditionieren vor allem die CS-US-Relation ist, die gelernt wird, während es beim instrumentellen Konditionieren vermutlich vorwiegend S-(R-O)-Relationen sind (Rescorla 1998). Genau wie beim Konditionieren stellt sich nun auch für das implizite Lernen die Frage, welche prädiktiven Relationen den Lerneffekten zugrunde liegen (Übersicht in Hoffmann und Koch 1998).

Beim impliziten Lernen der Steuerung komplexer Systeme scheint es sich wie beim operanten Konditionieren um das Lernen von Kontingenzen zwischen Handlungen und ihren Effekten zu handeln, also um R-O-Relationen (Shanks und St. John 1994), die auch durch vorangegangene Systemzustände (S) spezifiziert werden können. Bei dieser Lernanforderung gibt es allerdings eine sehr große Anzahl möglicher Systemzustände, sodass sich das Lernen vermutlich mehr auf „Regeln" als auf einzelne spezifische R-O-Assoziationen bezieht. Im Vergleich dazu ähnelt das Kovariationslernen strukturell weniger dem instrumentellen Lernen, sondern mehr dem klassischen Konditionieren. Hier geht es um das Lernen von Kontingenzen zwischen zwei Reizmerkmalen. In Lewickis (1986) Studie könnte die Haarlänge als eine Art CS betrachtet werden, der die Kategorienzugehörigkeit der betreffenden Fotografie (z. B. „freundliche" Person) vorhersagt. Auch beim impliziten Grammatiklernen geht es um das Lernen von Kontingenzen, wobei sich diese allerdings auf mehr als nur zwei Reizmerkmale (Buchstaben) beziehen, d. h. auf ganze Buchstabenketten unterschiedlicher Länge. Weil diese Kontingenzen durch die Finite-State-Grammatik probabilistisch erzeugt werden, wurde wie beim Lernen komplexer Systeme vermutet, dass diese S-S-Kontingenzen in Form von abstrakten Regeln repräsentiert sind (z. B. Reber 1989).

In diesen drei Paradigmen werden Kontingenzen zwischen Ereignissen oder Reizmerkmalen gelernt, die dann auf neue Situationen oder Reize regelhaft übertragen werden müssen. Die Art der Elemente, zwischen denen die Kontingenzen wirksam sind, ist hier weitgehend klar, und die Diskussion bezieht sich vor allem auf die Frage, was es tatsächlich bedeutet, einer Regel zu folgen. Zum Beispiel gibt es zum Grammatiklernen auch die Hypothese, dass die Lerneffekte auf dem Erinnern einzelner Lernexemplare (oder Fragmente solcher Exemplare) beruhen, die dann auf ihre Ähnlichkeit mit den neuen Testexemplaren verglichen werden (z. B. ob zwei unmittelbare Buchstabenwiederholungen vorkommen können). Bei hoher Ähnlichkeit ist es wahrscheinlich, dass ein Exemplar als grammatisch korrekt klassifiziert wird (Perruchet und Pacton 2006; Shanks und St. John 1994).

Im Vergleich zu den drei obigen Paradigmen wird für das Sequenzlernen in seriellen RT-Aufgaben kontrovers diskutiert, welches die Ereignisse sind, zwischen denen die experimentell eingeführten Kontingenzen funktional wirksam sind. Eindeutig nicht infrage kommen hier S-R-Relationen, da sich diese in zufälligen und strukturierten Folgen nicht unterscheiden. Deswe-

Zur Vertiefung 10.4

Neuronale Grundlagen des impliziten Sequenzlernens

Neuropsychologische Untersuchungen können Aufschluss über die Mechanismen des Sequenzlernens geben. Beim Sequenzlernen gibt es im Wesentlichen drei Untersuchungsgebiete.

1. *Erhaltenes Lernen bei anterograder Amnesie:* Evidenz für einen möglicherweise unbewusst operierenden impliziten Lernmechanismus stammt aus Untersuchungen an Patienten mit Amnesie (Gedächtnisschwäche). Die untersuchten Patienten litten an dem weitgehenden Unvermögen, neue Inhalte langfristig zu lernen (anterograde Amnesie), während ihre Langzeiterinnerung kaum beeinträchtigt war. Solche Gedächtnisstörungen sind vor allem mit Schädigungen von Strukturen des medialen Schläfenlappens sowie des Hippocampus korreliert. Diese Hirnstrukturen scheinen normalerweise am expliziten Lernen beteiligt zu sein (O'Reilly und Rudy 2001). Tatsächlich zeigte sich z. B. in einer Reihe von Studien zum Sequenzlernen, dass solche Patienten nahezu normale implizite RT-Lerneffekte zeigen, aber im Vergleich zu Kontrollgruppen deutlich weniger Wissen über die offensichtlich gelernte Sequenz explizit erinnern konnten (z. B. Nissen und Bullemer 1987; Nissen et al. 1989; Reber und Squire 1994). Diese Dissoziationsbefunde scheinen nahezulegen, dass beim impliziten Lernen neuroanatomisch distinkte Hirnstrukturen beteiligt sind, die nicht zwangsläufig mit expliziten Erinnerungen einhergehen. Allerdings wurden in manchen Studien bei den Patienten auch Defizite im impliziten RT-Lernen festgestellt, und eine Reihe methodologischer Probleme stehen einer eindeutigen Interpretation der bisherigen Befunde im Wege (Übersicht in Curran 1998). Darüber hinaus wurde die Relevanz von Patientenstudien für die Frage nach der Bewusstheit des Lernens von Shanks und St. John (1994) infrage gestellt, weil solche Studien weniger etwas über die Bewusstheit *während* des Lernens aussagen, sondern vor allem etwas über die Bewusstheit *nach* dem Lernen. Da aber die spätere explizite Erinnerung bei anterograder Amnesie bekanntermaßen (d. h. definitionsgemäß) beeinträchtigt ist, kann man aus genau diesem Unvermögen kaum Rückschlüsse auf den Lernprozess selbst ziehen. Dieses Problem, auf der Grundlage des gegenwärtigen bewussten Wissens auf den Bewusstseinsstatus in vergangenen Lernepisoden *rückzuschließen*, ist allerdings ein allgemeines Problem, das nicht nur für Patientenstudien gilt.
2. *Lerndefizite infolge neurologischer Erkrankungen:* Im Unterschied zu den oben beschriebenen Amnesiepatienten gibt es auch Patienten, bei denen vermutlich weniger das explizite, sondern vorwiegend das implizite Lernen beeinträchtigt ist. Solche Patienten leiden an neurologischen Erkrankungen (z. B. Morbus Parkinson und Chorea Huntington), die zu umschriebenen Schädigungen von subcorticalen Hirnstrukturen (vor allem den Basalganglien) führen, die an der Steuerung von Willkürbewegungen beteiligt sind. Patienten mit solchen Erkrankungen haben häufig messbare Defizite im RT-Lernmaß. Dieses Defizit weist darauf hin, dass die betroffenen Hirnstrukturen am Sequenzlernen beteiligt sind (Curran 1998).
3. *Untersuchung der neuronalen Repräsentation von Sequenzwissen bei gesunden Versuchspersonen:* Die beim Lernen beteiligten Hirnstrukturen können mit modernen Methoden der kognitiven Neurowissenschaften auch an gesunden Versuchspersonen untersucht werden. Diese Verfahren umfassen die transcraniale Magnetstimulation (TMS; z. B. Pascual-Leone et al. 1994), Positronemissionstomografie (PET; z. B. Hazeltine et al. 1997; Rauch et al. 1995) sowie die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI; z. B. Rauch et al. 1997; s. auch ▶ Kap. 9). Allgemein legen solche Studien nahe, dass Lernen neuronale Veränderungen in denjenigen Hirnarealen erzeugt, die an der Bewegungssteuerung und -ausführung beteiligt sind, und verweisen auf die Bedeutung zusätzlicher distinkter Areale, die vor allem bei Bewusstheit des Lernens aktiviert sind (Übersicht z. B. in Clegg et al. 1998; Curran 1998).

gen sieht es auf den ersten Blick so aus, als ob es die Sequenz der Reize ist, die gelernt wird (S-S-Lernen bzw. *perzeptuelles Lernen*). Allerdings sind die Reaktionen den Reizen typischerweise eindeutig zugeordnet, sodass auch die Reaktionsfolge in gleicher Weise wie die Reizfolge strukturiert ist. Demzufolge könnte Sequenzlernen also auch R-R-Lernen bzw. *motorisches Lernen* sein (z. B. Robertson 2007). Tatsächlich gibt es sowohl empirische Befunde für S-S-Lernen als auch für R-R-Lernen. Allerdings zeigt eine Studie von Koch und Hoffmann (2000), dass S-S- und R-R-Lernen keine ausschließlichen Optionen sind. Diese Studie legt nahe, dass im Prinzip beide Folgen gelernt werden können, wobei es allerdings eine starke Präferenz für das Lernen *räumlicher Relationen* zu geben scheint, unabhängig davon, ob diese in der Reiz- oder der Reaktionsfolge gegeben sind. Diese Bevorzugung des Lernens von Relationen zwischen räumlichen Ereignissen (Reizpositionen bzw. Positionen von Reaktionstasten) gegenüber Relationen zwischen symbolischen (z. B. Ziffern bei Reizfolgen) oder verbalen Ereignissen (bei sprachlichen Reaktionen) verweist möglicherweise auf eine Prädisposition für das Lernen bestimmter Relationen. Diese Prädisposition stünde in Analogie zu den assoziativen Bevorzugungen, wie sie beim Konditionieren beobachtet wurden (▶ Abschn. 10.3.4).

Zusammengenommen gibt es in den verwendeten experimentellen Paradigmen des impliziten Lernens eine Vielzahl von unterschiedlichen prädiktiven Relationen, die darüber hinaus zwischen verschiedenen Elementen bestehen können. So wird auch diskutiert, dass Kontingenzen zwischen Reaktionen und den darauffolgenden Stimuli (R-S-Lernen) am Sequenzlernen beteiligt sind (Hoffmann et al. 2001; Zießler und Nattkemper 2001). Schließlich wurde auch demonstriert, dass abstrakte Sequenzen von kognitiven Aufgaben (z. B. entweder auf die Farbe, die Form oder die Größe eines Reizes zu reagieren) gelernt werden (Koch 2001), selbst wenn die Sequenz der Reize und der Reaktionen zufällig ist (Übersicht in Abrahamse et al. 2010). Solche Befunde legen nahe, dass die Lernmechanismen (1) auch Strukturen höherer Ordnung aufgreifen, (2) nicht auf Folgen von konkreten Reizen bzw. Reaktionen beschränkt sind und (3) Kontingenzen auf den verschiedensten Dimensionen aufgreifen (vgl. auch Keele et al. 2003). In Bezug auf diese Lernmechanismen stellt sich nun die Frage, ob das implizite Lernen tatsächlich auch unbewusst stattfinden kann.

10.5.3 Unbewusstes Lernen

Die Frage, ob Lernen auch unbewusst stattfinden kann, wird bei Tieren nicht gestellt, da Tiere nicht direkt nach ihrer Bewusstheit (*awareness*) des Lernens befragt werden können. Die prinzipielle

Frage, inwieweit Tiere ein Bewusstsein haben, kann hier nicht erörtert werden (z. B. Gould und Gould 1997). Demgegenüber stellt sich die Frage nach dem unbewussten Lernen aber durchaus in Bezug auf Menschen. Die Antwort auf diese Frage wird allerdings durch grundlegende konzeptuelle und methodologische Probleme erschwert, die sich darauf beziehen, wie man Bewusstheit definieren sollte und wie die Unbewusstheit eines Lerneffekts etabliert werden kann (Rünger und Frensch 2010; s. auch ▶ Kap. 6). Shanks und St. John (1994) verweisen darauf, dass Demonstrationen unbewussten Lernens zwei Kriterien standhalten müssen:

1. Der Test muss zur Aufdeckung bewussten Wissens auf genau diejenigen Kontingenzen gerichtet sein, die auch den vermeintlich unbewussten Verhaltenseffekten zugrunde liegen (*Informationskriterium*).
2. Dieser Test darf zur Aufdeckung bewussten Wissens nicht weniger sensitiv (d. h. messgenau) sein als der Test für unbewusstes Wissen (*Sensitivitätskriterium*).

Auf der Grundlage dieser zwei Kriterien kommen Shanks und St. John (1994) nach Übersicht der Befundlage insgesamt zu einer vorsichtig-skeptischen Auffassung zum unbewussten Lernen, die mittlerweile von vielen Autoren geteilt wird (z. B. Cleeremans et al. 1998; Dienes und Berry 1997; Shanks 2005, 2010; für eine weniger skeptische Einschätzung vgl. auch Rünger und Frensch 2010). Im Folgenden werden die einschlägigen Befunde in den relevanten Paradigmen diskutiert.

Vor allem vom klassischen Konditionieren wurde zunächst vermutet, dass es sich auch unbewusst vollziehen kann. Diese Vermutung beruhte auf der Auffassung, dass klassisches Konditionieren ein primitiver und reflexhafter Lernmechanismus ist. Allerdings hatten wir bereits in ▶ Abschn. 10.4.1 gesehen, dass klassisches Konditionieren beim Menschen vor allem auf dem Lernen von CS-US-Kontingenzen und weniger auf dem zwangsläufigen Transfer eines Reflexes von einem Reiz (dem US) auf einen anderen (den CS) beruht. Tatsächlich kommen Shanks und St. John (1994) zu dem Schluss, dass es bislang kaum überzeugende Hinweise dafür gibt, dass klassisches Konditionieren ohne Bewusstheit über diese Kontingenzen stattfindet (vgl. auch Brewer 1974).

Die gleiche Schlussfolgerung – dass es bislang wenig überzeugende Evidenz für unbewusstes Lernen gibt – beziehen diese Autoren auch auf das sogenannte *evaluative Konditionieren*, bei der eine affektive Reaktion (z. B. eine emotionale Bewertung) von einem Reiz auf einen anderen, ursprünglich affektiv neutralen Reiz, transferiert wird (▶ Abschn. 10.2.3). Neuere Untersuchungen, in denen die von Shanks und St. John (1994) formulierten Kriterien berücksichtigt sind, stützen diese Position (Pleyers et al. 2007; Stahl et al. 2009). Allerdings gibt es Autoren, die die Befundlage zum unbewussten evaluativen Konditionieren weniger skeptisch bewerten (z. B. Hammerl und Grabitz 1997; Hütter et al. 2012; vgl. aber Field 2000; Shanks 2010). Auch in Bezug auf das implizite Kovariationslernen (z. B. Lewicki et al. 1992) scheinen die Daten wenig eindeutig. Hier kritisieren Shanks und St. John (1994), dass die Nachbefragungen in diesen Studien vermutlich nicht sensitiv genug für das Aufdecken des möglicherweise erworbenen bewussten Wissens waren. Darüber hinaus konnten wesentliche Befunde zum unbewussten Kovariationslernen nicht repliziert werden (Hendrickx et al. 1997). Vor diesem Hintergrund scheint derzeit insgesamt eine zurückhaltende Bewertung hinsichtlich unbewussten Lernens in diesen Paradigmen ratsam.

Bezogen auf unbewusstes Lernen in instrumentellen Lernaufgaben haben wir bereits in ▶ Abschn. 10.2.3 gesehen, dass beispielsweise in der Studie von Wasserman et al. (1993) die bewussten Urteile über Kausalzusammenhänge zwischen Handlungen und Konsequenzen recht genau die tatsächlichen Kontingenzen widerspiegeln und somit kaum für unbewusstes Lernen solcher Kontingenzen sprechen (vgl. auch Shanks und Dickinson 1991). Weniger klar ist hingegen, ob unbewusstes Lernen in komplexeren instrumentellen Lernaufgaben stattfindet, z. B. beim Steuern komplexer Systeme (Berry und Broadbent 1988). Hier wurde berichtet, dass Versuchspersonen, die in der Steuerungsaufgabe selbst besonders gut waren, sogar eher schlechter als die anderen Versuchspersonen darin waren, in nach dem Experiment auszufüllenden Fragebögen die Konsequenzen von Änderungen der Input-Variablen (z. B. die Arbeiteranzahl in der „Zuckerfabrik“) auf die Output-Variable (Produktionsmenge) zu bestimmen. Diese Dissoziation zwischen Handlungswissen und verbalisierbarem Wissen lässt sich aber nach Buchner et al. (1995) vor allem darauf zurückführen, dass diese Versuchspersonen aufgrund ihrer guten Leistung die Variation der Output-Variable besser kontrollierten und daher auch weniger verschiedene Systemzustände erfahren konnten. Da alle Versuchspersonen aber eine große Anzahl solcher Zustände beurteilen müssen, sind die besseren Versuchspersonen also nicht *trotz* ihrer guten Steuerungsleistung in der Nachbefragung schlecht, sondern *wegen* ihrer guten Leistung. Darüber hinaus berichten Dienes und Berry (1997, S. 13) in einem Überblicksaufsatz, dass bewusstes Wissen über die Kontingenzen in diesen Aufgaben zumeist aufgedeckt werden konnte, wenn sensitive Testverfahren verwendet wurden, die entweder genügend Hinweisreize geben (*cued-report*) oder Versuchspersonen vor die Wahl zwischen Antwortalternativen (*forced-choice test*) stellen. Solche direkten, objektiven Tests können auch subjektiv sehr unsicheres Wissen aufdecken, das Versuchspersonen in völlig freien Testsituationen häufig nicht preisgeben.

Die Ergebnisse freier Befragungen über die grammatikalischen Regeln haben ursprünglich dazu geführt, dass das implizite Lernen künstlicher Grammatiken als unbewusstes Lernen verstanden wurde, weil die Versuchspersonen die grammatischen Regeln nicht berichten konnten. Allerdings scheinen die den Lerneffekten zugrunde liegenden Kontingenzen zumeist gar nicht in Form von *unbewussten, abstrakten Regeln* repräsentiert zu sein, wie z. B. ursprünglich von Reber (1989) vermutet wurde. So hat spätere Forschung eher nahegelegt, dass dieses Lernen vor allem in Form von Wissen über bestimmte *Häufigkeitsmerkmale der Buchstabenfolgen* (z. B. Anzahl von Wiederholungen, Häufigkeit von Buchstabenpaaren) oder in Form von *erinnerten Teilfolgen* repräsentiert ist (vgl. Shanks und St. John (1994) sowie ihr Informationskriterium). Tatsächlich hat die Verwendung von sensitiven, objektiven Testverfahren auch im Falle des impliziten Lernens künstlicher Grammatiken zumeist zur Aufdeckung bewusster Wissensfragmente über die grammatischen Kontingenzen in den Buchstabensequenzen geführt. Allerdings betonen Dienes und Berry (1997), dass es Hinweise darauf gibt, dass diese

Wissensfragmente gelegentlich durchaus unterhalb einer subjektiven Bewusstheitsschwelle liegen können (▶ Kap. 6).

Im Unterschied zum Grammatiklernen ist das Maß für das Lernen sequenzieller Kontingenzen beim impliziten Sequenzlernen als ein indirektes RT-Maß konstruiert. Hier gibt es zahlreiche Befunde, die für unbewusste RT-Lerneffekte sprechen (z. B. Jiménez et al. 1996; Reed und Johnson 1994). Diese Befunde werden allerdings methodenkritisch von einigen Autoren diskutiert, die argumentieren, dass solche RT-Effekte bei der Verwendung geeigneter Testverfahren stets auch mit entsprechendem bewussten Wissen korreliert sind (z. B. Perruchet und Amorim 1992; Shanks und Johnstone 1999; vgl. auch Rünger und Frensch 2010). Diese Diskussion legt nahe, dass auch Studien zum impliziten Sequenzlernen bislang nicht alle Zweifel hinsichtlich der Unbewusstheit des Lernens ausräumen können. Neu entwickelte Messmethoden könnten diese Zweifel vielleicht in Zukunft reduzieren (z. B. Destrebecqz und Cleeremans 2001; Haider et al. 2011; Rose et al. 2010).

10.5.4 Zusammenfassung

Zusammengenommen verweisen die Befunde zum impliziten Lernen darauf, dass Lernen in bestimmten komplexen Situationen durchaus intuitiv geschehen kann und sich mitunter nur durch sehr strenge Testverfahren als bewusst aufdecken lässt. In diesem Sinne könnte man nach Dienes und Berry (1997) davon sprechen, dass subjektiv unterschwelliges und damit *phänomenal unbewusstes Wissen* beim impliziten Lernen erworben wird. Ob eine Unterscheidung zwischen bewusstem und unbewusstem Lernen auf dieser phänomenalen Ebene allerdings auch mit einer Unterscheidung der zugrunde liegenden Lernmechanismen auf *funktionaler Ebene* einhergeht, wird derzeit höchst kontrovers diskutiert. Diese Kontroverse hat allerdings die Frage nach der funktionalen Rolle des Bewusstseins für menschliche Kognition und Handlungssteuerung erneut in den Blickpunkt kognitionspsychologischer Forschungsbemühungen gestellt, nachdem diese Frage lange Zeit wissenschaftlich als unseriös galt. So argumentieren etwa Cleeremans et al. (1998, S. 406): „Can we learn without awareness? While the current consensus is most likely to be ‚no', there is, however, considerable ongoing debate about the role that consciousness plays in cognition and about the nature of consciousness itself." Diese Frage ist nach wie vor Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen (Übersicht z. B. in Shanks 2010).

10.6 Anwendungsbeispiele

Menschen und Tiere können mithilfe der in diesem Kapitel diskutierten elementaren Lernprozesse eine erstaunliche Vielfalt komplexer Verhaltensweisen erlernen bzw. ihr Verhalten flexibel an die Umgebung anpassen. Dies soll im Folgenden durch drei Anwendungsbeispiele illustriert werden: Die im aktuellen Kapitel diskutierten elementaren Lernprozesse werden in der Praxis (oft auch unter dem Stichwort *behavior modification*) in vielen verschiedenen Kontexten eingesetzt, beispielsweise in der Tierdressur, den Sport- und Bewegungswissenschaften und ihren Anwendungsfeldern sowie der sonderpädagogischen Praxis. Das Phänomen des evaluativen Konditionierens ist besonders für Marketing und Produktwerbung wichtig. Elementare Lerntechniken sind die Grundbausteine der klinischen Verhaltenstherapie; in der klinischen Praxis spielt beispielsweise die systematische Desensibilisierung eine wichtige Rolle.

▪ Shaping und Chaining beim Erlernen motorischer Fertigkeiten

Damit ein Individuum einen komplexen Verhaltensablauf erlernt, muss es zunächst die einzelnen Elemente dieses Ablaufs erlernen (z. B. via Shaping), bevor sie in einer bestimmten Reihenfolge kombiniert werden können (via Chaining). Shaping und Chaining werden in der Tierdressur eingesetzt, beispielsweise um Delfinen das Balancieren von Bällen anzutrainieren. Dieselben Techniken werden auch beim Erlernen einer neuen Sportart eingesetzt (Wollny 2007), und sie helfen Menschen mit Lernbehinderungen beim Erwerb einfacher alltäglicher Handlungssequenzen wie dem Anziehen, Händewaschen oder Zähneputzen (Hughes et al. 1993; Parrott et al. 2000).

Neue Verhaltensweisen können erlernt werden, wenn spontan gezeigte Ansätze dieses Verhaltens systematisch verstärkt werden. Dies macht man sich beispielsweise in der Bewegungswissenschaft zunutze. Um Kindern im Sportunterricht eine Technik zum Wegschlagen eines Gymnastikballes beizubringen, wartet die Lehrkraft, bis das Kind beim Spielen mit dem Ball spontan ein Verhaltenselement zeigt, das dem zu erlernenden Zielverhalten teilweise ähnelt, und verstärkt dieses Verhalten durch Lob. Dies wird wiederholt, bis das Verhaltenselement des Kindes dem zu erlernenden Verhaltensteil entspricht. Dann wird die Verstärkung entzogen, woraufhin das Kind sein Verhalten abwandelt. Zeigt es dann ein Verhalten, das ein zusätzliches Element der angestrebten Verhaltensabfolge enthält, wird dieses wiederum verstärkt. Dieser Prozess der Verhaltensausformung wird wiederholt, bis das Kind das Wegschlagen des Gymnastikballes beherrscht (Wollny 2007).

Mehrere einfache Handlungen, die sich bereits im Verhaltensrepertoire eines Individuums befinden, können durch Chaining zu einer komplexen Abfolge kombiniert werden. Dabei funktioniert jeder Teilschritt als Abrufhinweis für den nächsten Schritt. Soll ein Delfin lernen, einen Ball auf der Schnauze zu balancieren, kann der Trainer ihm diesen Ball zunächst dort platzieren und anschließend durch Gabe von Futter belohnen, wenn er ihn dort eine kurze Zeit halten konnte. Im nächsten Schritt würde der Trainer den Ball beispielsweise auf die Stirn des Tieres legen und mit der Futtergabe warten, bis es von selbst den Ball auf die Schnauze nimmt. In einem dritten Schritt würde der Trainer den Ball in der Nähe des Tieres ins Wasser geben und das Tier erst dann belohnen, wenn es den Ball auf die Stirn genommen und dann auf der Schnauze balanciert hat.

▪ Evaluatives Konditionieren in der Werbung

Ein Ziel der Produktwerbung ist es, neue, noch unbekannte Produkte oder Markennamen bei potenziellen Verbrauchern mit positivem Affekt zu verknüpfen, um sie so zum Kauf des Produkts

oder der Marke zu bewegen. Dieses Ziel kann mithilfe des evaluativen Konditionierens verfolgt werden, bei dem ein zunächst neutraler CS (Produkt oder Marke) gemeinsam mit positiven US (z. B. angenehme Düfte oder Melodien, Bilder von attraktiven oder prominenten Menschen) präsentiert werden. Nach wiederholter Präsentation wird die anfangs unbekannte Marke oder das neue Produkt als angenehmer beurteilt und vielleicht sogar mit größerer Wahrscheinlichkeit gekauft.

Ein klassisches Beispiel ist die Studie von Gorn (1982), in der Probanden entweder angenehme oder unangenehme Hintergrundmusik vorgespielt bekamen, während sie ein anfangs neutrales Produkt (entweder einen blauen oder beigen Stift) betrachteten. Wenn die Hintergrundmusik die Präferenz der Probanden für den betrachteten Stift beeinflusst, sollten sie den betrachteten Stift vorziehen, wenn die Musik angenehm war; bei unangenehmer Hintergrundmusik sollten sie dagegen den anderen Stift präferieren. Als Belohnung für ihre Teilnahme konnten sich die Probanden einen der beiden Stifte (blau oder beige) auswählen. Probanden, die die angenehme Musik hörten, während sie den Stift betrachteten, wählten tatsächlich häufiger den betrachteten Stift. Dagegen entschieden sich diejenigen Probanden, die beim Betrachten des Stiftes unangenehme Musik hörten, häufiger für den nicht betrachteten Stift.

Dies zeigt, dass evaluative Konditionierung nicht nur die Bewertung, sondern auch die für die praktische Anwendung in der Werbung so wichtige Wahl eines Produkts beeinflussen kann. Vergleichbare Befunde erzielten Stuart, Shimp und Engle (1987), die ihren Probanden unbekannte Produkte gemeinsam mit angenehmen Bildern präsentierten, ähnlich einer Werbeanzeige in einer Zeitschrift. Ähnlich wie bei Gorn (1982) wurden die Produkte schon nach einer einzelnen gemeinsamen Präsentation später positiver bewertet; nach zehn Paarungen mit einem angenehmen Bild war auch die Bereitschaft, das Produkt zu kaufen, gegenüber nicht beworbenen Produkten deutlich erhöht.

▪ Systematische Desensibilisierung

Die Verhaltenstherapie nutzt das Wissen um elementare Lernprozesse und wendet es im therapeutischen Kontext an. Eine besonders erfolgreiche Technik ist die systematische Desensibilisierung, die bei Angststörungen eingesetzt wird (z. B. Linden und Hautzinger 2011). Eine Patientin mit einer Angststörung reagiert auf bestimmte Reize (wie etwa enge Räume, Spinnen, Zahnarztbesuche, Prüfungssituationen) mit einer ungewöhnlich starken und irrationalen Angstreaktion. Beschreibt man den angstauslösenden Reiz als CS, kann die Angstreaktion als CR_A betrachtet werden. Ziel der systematischen Desensibilisierung ist es nun, eine andere Reaktion (CR_E) zu erzeugen (typischerweise eine Entspannungsreaktion) und mit dem CS zu assoziieren, sodass sie die Angstreaktion CR_A ersetzt.

In der systematischen Desensibilisierung gibt die Patientin zunächst an, welche Reize oder Situationen ihre Angst auslösen und wie stark die Angst jeweils ist; die angstauslösenden Reize werden anschließend hierarchisch geordnet. Des Weiteren erlernt die Patientin eine Entspannungstechnik wie beispielsweise progressive Muskelrelaxation oder autogenes Training. In der Therapie wird die Patientin nun in einem Zustand der Entspannung mit dem am wenigsten Angst auslösenden Reiz konfrontiert, beispielsweise indem sie gebeten wird, sich die Situation für eine Weile möglichst anschaulich vorzustellen. Dies wird so oft wiederholt, bis die Patientin sich den ursprünglich angstauslösenden Reiz vorstellen kann, ohne dabei aber Angst zu erleben. So wird die Assoziation zwischen Reiz (CR) und Angstreaktion (CR_A) abgeschwächt, und es wird eine Entspannungsreaktion (CR_E) erlernt. Diese Vorstellungsübung wird sukzessive mit dem in der Hierarchie jeweils nächsten Reiz wiederholt, bis die Patientin auch bei Vorstellung des ursprünglich stärksten Angstreizes entspannt bleibt. Man kann auch sagen, die Patientin lernt mit der Zeit, sich an die angstauslösenden Reize zu gewöhnen, und macht die Erfahrung, dass von ihnen keinerlei Gefahr ausgeht.

10.7 Ausblick

In den Formen des Lernens, die in diesem Kapitel dargestellt worden sind, besteht das Lernen im Wesentlichen darin, dass Relationen zwischen Ereignissen im Verhalten berücksichtigt werden. Ein beträchtlicher Teil der beschriebenen Forschung bezog sich dabei einerseits auf die Frage, welcher Art diese Relationen sind (z. B. ob sie zu inhibitorischen oder exzitatorischen Assoziationen führen), und andererseits auf die Frage, zwischen welchen Ereignissen die funktional bedeutsamen Relationen bestehen (z. B. S-R, S-S, R-R oder R-S). Diese Betrachtungsweise hat dazu geführt, dass ein relativ einheitliches, integratives Bild der zugrunde liegenden Lernmechanismen entstanden ist, obwohl sich die einzelnen Untersuchungsparadigmen mitunter deutlich voneinander unterscheiden. Diese Integrativität zeigt sich vor allem im großen Erfolg und in der weiten Verbreitung des Rescorla-Wagner-Modells des assoziativen Lernens.

Gleichwohl gibt es eine Reihe von Kontroversen, die dieses Forschungsgebiet so lebendig machen und auf wichtige, noch ungeklärte Fragen verweisen. Eine dieser kontroversen Fragen bezieht sich darauf, ob es möglicherweise unterschiedliche Lernsysteme (oder Module) gibt, die sich auf verschiedene *Arten von erworbenem Wissen* beziehen (z. B. Regeln vs. erinnerte Fragmente; Shanks und St. John 1994), oder ob sich gar sämtliche assoziative Lernphänomene durch den Erwerb von Propositionen, also sprachlich formulierbaren Wissenseinheiten, erklären lassen (Mitchell et al. 2009). Eine weitere Frage bezieht sich auf die *Art der Ereignisse*, auf die sich solches Wissen beziehen kann. So herrscht nach wie vor Forschungsbedarf, inwieweit perzeptuelles und motorisches Lernen auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen (z. B. Goschke 1998; Koch und Hoffmann 2000).

Diese empirischen Fragen lassen sich unabhängig von der Frage formulieren, ob Lernen auch unbewusst geschehen kann. Im Hinblick auf diese Frage nach der phänomenal erlebten Bewusstheit des Lernens erscheint, wie wir im vorangegangenen Abschnitt gesehen haben, eine vorsichtig-skeptische Haltung angeraten. Tatsächlich gibt es bislang auch kaum überzeugende Modelle, die prozessuale Unterschiede zwischen dem impliziten, unbewussten Lernen und dem expliziten, bewussten Lernen auf *funktionaler* Ebene in befriedigender Weise spezifizieren könnten. Hier steht die Lernforschung bislang noch vor einem ungelösten konzeptuellen Rätsel.

10.8 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Lernen ist ein Prozess, der als Ergebnis von Erfahrungen relativ langfristige Änderungen im Verhaltenspotenzial erzeugt.
- Beim klassischen Konditionieren wird gelernt, dass ein Ereignis (CS) ein anderes Ereignis (US) vorhersagt, sodass bereits das erste Ereignis (CS) eine konditionierte Reaktion (CR) hervorrufen kann, die sich auf das zweite Ereignis bezieht.
- Gemäß der traditionellen, reflextheoretischen Sichtweise besteht klassisches Konditionieren in der Bildung einer direkten S-R-Verbindung (nämlich zwischen CS und UR), die Kontiguität (räumlich-zeitliche Nähe) zwischen CS und US voraussetzt.
- Neben Kontiguität zwischen CS und US beim klassischen Konditionieren ist vor allem auch die CS-US-Kontingenz wichtig, d. h. die zusätzliche Information, die der CS über das Auftreten des US vermittelt (S-S-Lernen).
- Beim klassischen Konditionieren wird gelernt, dass der CS den US vorhersagt, während beim instrumentellen Konditionieren gelernt wird, dass der CS *gemeinsam mit der Reaktion* den US vorhersagt.
- Das von Edward L. Thorndike (1874–1949) formulierte Gesetz der Wirkung (*law of effect*) postuliert, dass erfolgreiches Verhalten dazu tendiert, häufiger aufzutreten.
- Ein Verstärker ist nach Burrhus F. Skinnner (1904–1990) ein Reiz, der die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Reaktion verändert.
- Vor allem Menschen lernen nicht nur durch das Ausführen eigener Handlungen und dem daraus resultierenden Erfahren positiver oder negativer Konsequenzen (d. h. Verstärkung), sondern profitieren auch vom Beobachten der Handlungen anderer Personen (Beobachtungslernen).
- S-R-Theorien des instrumentellen Lernens nehmen an, dass instrumentelles Konditionieren darin besteht, dass der Organismus lernt, in einer gegebenen Situation zu reagieren. Diese Theorien enthalten keine Annahmen, die es gestatten würden, den Verstärker zu *antizipieren*.
- Im Unterschied dazu ging Tolman (1932) davon aus, dass Verhalten zielgerichtet ist.
- Implizites Lernen bezieht sich auf Lernsituationen, in denen die Person Strukturen einer relativ komplexen Reizumgebung lernt, ohne dies notwendigerweise zu beabsichtigen, und in einer Weise, dass das resultierende Wissen schwer zu verbalisieren ist.
- Ob eine Unterscheidung zwischen bewusstem und unbewusstem Lernen auf einer phänomenalen Ebene (im Sinne von intuitivem Lernen) auch mit einer Unterscheidung der zugrunde liegenden Lernmechanismen auf *funktionaler Ebene* einhergeht, ist derzeit noch kontrovers.

Schlüsselbegriffe

Abergläubisches Verhalten (*superstitious behavior*) Die Beobachtung, dass Tiere spontan Verhalten produzieren, selbst wenn es keine Kontingenz zwischen diesem Verhalten und der Verstärkung gibt.

Assoziative Bevorzugung (*associative bias*) Die Prädisposition, manche Stimuli mit ganz bestimmten anderen Stimuli oder Reaktionen zu assoziieren.

Beobachtungslernen (*observational learning*) Instrumentelles Lernen allein durch Beobachten einer Modellperson, d. h. ohne Ausführung einer eigenen Reaktion.

Bestrafung (*punishment*) Vorgehen des instrumentellen Konditionierens, in dem ein aversiver Reiz kontingent auf eine Reaktion folgt.

Blockierung (*blocking*) Die Tendenz, dass ein Stimulus beim Konditionieren verhindert, dass ein weiterer Stimulus auf den gleichen US konditioniert wird.

Diskriminationslernen (*discrimination learning*) Lernen, auf verschiedene Stimuli auch unterschiedlich zu reagieren.

Fester Intervallplan (*fixed interval schedule*) Verstärkung wird auf die erste Reaktion nach Verstreichen eines festen Zeitintervalls gegeben. Zum Beispiel wird genau alle 3 min verstärkt (s. auch variabler Intervallplan).

Fester Quotenplan (*fixed ratio schedule*) Verstärkung wird erst nach Ausführung einer festen Anzahl von Reaktionen gegeben. Zum Beispiel wird genau jede dritte Reaktion verstärkt (s. auch variabler Quotenplan).

Generalisationsgradient (*generalization gradient*) Die Tendenz, auch auf Reize zu reagieren, die dem konditionierten Reiz (CS) ähnlich sind, wobei diese Tendenz mit zunehmender Unähnlichkeit graduell schwächer wird.

Gesetz der Wirkung (*law of effect*) Die Annahme, dass Verstärkung für Lernen erforderlich ist.

Implizites Lernen (*implicit learning*) Lernen in Situationen, in denen die Person Strukturen einer relativ komplexen Reizumgebung lernt, ohne dies notwendigerweise zu beabsichtigen, und in einer Weise, dass das resultierende Wissen schwer zu verbalisieren ist.

Intermittierende Verstärkung (*partial reinforcement schedule*) Verstärkungsplan, bei dem im Unterschied zur kontinuierlichen Verstärkung nicht jede Reaktion verstärkt wird.

Kausallernen (*response-outcome learning*) Lernen der kausalen Struktur von Ereignissen.

Klassisches Konditionieren (*classical conditioning*) Die Prozedur, in der ein Organismus eine konditionierte Reaktion (CR) auf einen neutralen Reiz (CS) zeigt, wenn dieser CS mit einem biologisch bedeutsamen unkonditionierten Stimulus (US) kontingent ist, der eine unkonditionierte Reaktion (UR) auslöst.

Konditionieren höherer Ordnung (*second order conditioning*) Paradigma des klassischen Konditionierens, in dem zunächst eine Assoziation zwischen einem neutralen CS1 mit einem US gelernt wird, gefolgt von dem Lernen einer Assoziation zwischen einem neutralen CS2 zu dem CS1 (s. auch sensorisches Vorkonditionieren).

Konditionierte Inhibition (*conditioned inhibition*) Die bedingte Erwartung, dass ein CS mit der Abwesenheit des US assoziiert ist.

Konditionierte Reaktion (CR, *conditioned response*) Die Reaktion, die beim klassischen oder instrumentellen Konditionieren gelernt wird.

Konditionierter Reiz (CS, *conditioned stimulus*) Der Reiz, der den unkonditionierten Stimulus (US) beim klassischen Konditionieren signalisiert, d. h. mit ihm kontingent ist.

Konfiguraler Hinweisreiz (*configural cue*) Reizkombinationen, die als gemeinsames Element mit anderen Reizen oder Reaktionen assoziiert werden.

Kontiguität (*contiguity*) Das räumlich-zeitlich benachbarte Auftreten zweier Elemente.

Kontingenz (*contingency*) Der Zusammenhang im Auftreten zweier Ereignisse.

Latentes Lernen (*latent learning*) Lernen, das sich nicht unmittelbar im Verhalten zeigt, sondern erst zu einem späteren Zeitpunkt bei passender Gelegenheit im Verhalten manifest wird.

Lernen (*learning*) Lernen ist ein Prozess, der als Ergebnis von Erfahrungen relativ langfristige Änderungen im Verhaltenspotenzial erzeugt.

Löschung (*extinction*) Die Prozedur beim Konditionieren, den unkonditionierten Reiz (US) oder den Verstärker nicht mehr darzubieten; dies führt zum Ausbleiben der konditionierten Reaktion (CR).

Negative Verstärkung (*negative reinforcement*) Prozedur des instrumentellen Konditionierens, bei der ein aversiver Stimulus durch eine Reaktion verhindert werden kann.

Operantes Konditionieren (*operant conditioning*) Lernprozedur, das die Häufigkeit einer Reaktion verändert (instrumentelles Lernen).

Positive Verstärkung (*positive reinforcement*) Prozedur des instrumentellen Konditionierens, bei der ein wünschenswerter Stimulus durch eine Reaktion erzeugt werden kann.

Sekundäre (generalisierte) Verstärker (*generalized reinforcers*) Ursprünglich neutraler Stimulus, der mit einem biologisch bedeutsamen primären Verstärker assoziiert wird und dadurch selbst als Verstärker wirken kann.

Selbstausformung (*autoshaping*) Das experimentelle Phänomen, dass Tiere spontan artspezifische Reaktionen auf Reize ausführen, die Verstärkern vorausgehen.

Sensorisches Vorkonditionieren (*sensory preconditioning*) Paradigma des klassischen Konditionierens, bei dem zunächst eine Assoziation zwischen zwei neutralen Reizen (CS1 und CS2) und danach eine Assoziation zwischen CS1 und einem US gelernt wird (s. auch Konditionieren höherer Ordnung).

Unkonditionierte Reaktion (UR, *unconditioned response*) Die Reaktion, die normalerweise von allein auf den konditionierten Reiz (US) auftritt.

Unkonditionierter Reiz (US, *unconditioned stimulus*) Der biologisch bedeutsame Stimulus, der dem konditionierten Reiz (CS) im Paradigma des klassischen Konditionierens folgt.

Variabler Intervallplan (*variable interval schedule*) Verstärkung wird auf die erste Reaktion nach Verstreichen eines variablen Zeitintervalls gegeben. Zum Beispiel wird alle 2–4 min, mit einem Mittelwert von 3 min, verstärkt (s. auch fester Intervallplan).

Variabler Quotenplan (*variable ratio schedule*) Verstärkung wird erst nach Ausführung einer variablen Anzahl von Reaktionen gegeben. Zum Beispiel wird jede zweite bis vierte Reaktion verstärkt, im Schnitt jede dritte (s. auch fester Quotenplan).

Verstärker (*reinforcer*) Reiz, der die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Reaktion in einem operanten Konditionierungsparadigma ändert.

Weiterführende Literatur

Abrahamse, E. L., Jimenez, L., Verwey, W. B., & Clegg, B. A. (2010). Representing serial action and perception. *Psychonomic Bulletin and Review, 17,* 603-623. (Ausführliche Übersicht zu den Mechanismen des Sequenzlernens.)

Anderson, J. R. (2000). *Learning and memory: An integrated approach* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons. (Leicht verständliches Lehrbuch, das einen aktuellen Überblick vermittelt und dabei Lern- und Gedächtnisforschung stark aufeinander bezieht.)

Boddez, Y., Haesen, K., Baeyens, F., & Beckers, T. (2014). Selectivity in associative learning: A cognitive stage framework for blocking and cue competition phenomena. *Frontiers in Psychology, 5*, 1305. (Übersicht zum assoziativen Lernen in einer Open-Access-Zeitschrift, d.h. mit kostenlosem Online-Zugang.)

Domjan, M. (2005). Pavlovian conditioning: A functional perspective. *Annual Review of Psychology, 56*, 179-206. (Diskussion biologischer Randbedingungen beim Lernen.)

Kiesel, A. & Koch, I. (2012). *Lernen. Grundlagen der Lernpsychologie.* Wiesbaden: VS Verlag. (Allgemeine Darstellung der psychologischen Lernforschung in kompaktem Format.)

Miller, R. R., Barnet, R. C. & Grahame, N. J. (1995). Assessment of the Rescorla-Wagner model. *Psychological Bulletin*, *117*,

363–386. (Kritische Diskussion des wohl einflussreichsten Modells in der Forschung zum assoziativem Lernen.)

Mitchell, C. J., De Houwer, J., & Lovibond, P. F. (2009). The propositional nature of human associative learning. *Behavioral and Brain Sciences, 32*, 183-198. (Umfassende Darstellung und Diskussion von assoziationistischen vs. nichtassoziationistischen [propositionalen] Ansätzen zur Erklärung des assoziativen Lernens.)

Perruchet, P. & Pacton, S. (2006). Implicit learning and statistical learning: One phenomenon, two approaches. *Trends in Cognitive Sciences, 10*, 233-238. (Diskussion von impliziten Lernprozessen in sprachlichen und nichtsprachlichen Bereichen.)

Rünger, D., & Frensch, P. A. (2010). Defining consciousness in the context of incidental sequence learning: Theoretical considerations and empirical implications. *Psychological Research, 74*, 121-137. (Kritische Diskussion der Frage nach der Unbewusstheit des impliziten Lernens, wobei die Position vertreten wird, dass globale Verfügbarkeit als subjektives Kriterium für Bewusstheit ein valides Unterscheidungskriterium für implizites vs. explizites Lernen ist.)

Schwarb, H. & Schumacher, E. H. (2012). Generalized lessons about sequence learning from the study of the serial reaction time task. *Advances in Cognitive Psychology, 8*, 165-178. (Übersicht zum Sequenzlernen in einer Open-Access-Zeitschrift, d.h. mit kostenlosem Online-Zugang.)

Shanks, D. R. (2010). Learning: From association to cognition. *Annual Review of Psychology, 61*, 273-301. (Darstellung der wichtigsten Phänomene und Theorien im Bereich des assoziativen und impliziten Lernens.)

Shanks, D. R. & St. John, M. F. (1994). Characteristics of dissociable learning systems. *Behavioral and Brain Sciences, 17*, 367–447. (Methodenkritischer, umfassender Übersichtsaufsatz zum impliziten Lernen mit einem anschließenden Diskussionsforum.)

Danksagung

Wir danken Viktoria Fedosejew, die uns tatkräftig bei der Erstellung des Manuskripts sowie der Gestaltung der Grafiken unterstützt hat.

Literatur

Abrahamse, E. L., Jimenez, L., Verwey, W. B., & Clegg, B. A. (2010). Representing serial action and perception. *Psychonomic Bulletin and Review*, *17*, 603–623.

Alberini, C. M., & LeDoux, J. L. (2013). Memory reconsolidation. *Current Biology*, *23*, 746–750.

Anderson, J. R. (2000). *Learning and memory: An integrated approach* (2. Aufl.). New York: John Wiley & Sons.

Balsam, P. D., & Tomie, A. (Hrsg.). (1985). *Context and Learning*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Bandura, A. (1965). Influence of model's reinforcement contingencies on the acquisition of imitative responses. *Journal of Personality and Social Psychology*, *1*, 589–595.

Bandura, A. (1976). *Lernen am Modell: Ansätze einer sozial-kognitiven Lerntheorie*. Stuttgart: Klett.

Bekkering, H., Wohlschläger, A., & Gattis, M. (2000). Imitation of gestures is goal-directed. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *58*, 153–164.

Berry, D. C., & Broadbent, D. E. (1984). On the relationship between task performance and associated verbalizable knowledge. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *39A*, 585–609.

Berry, D. C., & Broadbent, D. E. (1988). Interactive tasks and the implicit-explicit distinction. *British Journal of Psychology*, *79*, 251–272.

Boddez, Y., Haesen, K., Baeyens, F., & Beckers, T. (2014). Selectivity in associative learning: A cognitive stage framework for blocking and cue competition phenomena. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1305.

Bolles, R. C. (1972). Reinforcement, expectancy, and learning. *Psychological Review*, *79*, 394–409.

Bouton, M. E. (1993). Context, time, and memory retrieval in the interference paradigms of Pavlovian learning. *Psychological Bulletin*, *114*, 80–99.

Bouton, M. E. (2004). Context and behavioral processes in extinction. *Learning & Memory*, *11*, 485–494.

Bouton, M. E., Mineka, S., & Barlow, D. H. (2001). A modern learning theory perspective on the etiology of panic disorder. *Psychological Review*, *108*, 4–32.

Bower, G. H., & Hilgard, E. R. (1983). *Theorien des Lernens I* (5. Aufl.). Stuttgart: Klett-Cotta.

Bower, G. H., & Hilgard, E. R. (1984). *Theorien des Lernens II* (3. Aufl.). Stuttgart: Klett-Cotta.

Brass, M., & Heyes, C. (2005). Imitation: Is cognitive neuroscience solving the correspondence problem? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 489–495.

Breland, K., & Breland, M. (1961). The misbehavior of organisms. *American Psychologist*, *16*, 661–664.

Brewer, W. F. (1974). There is no convincing evidence for operant or classical condition in adult humans. In W. B. Weimer, & C. S. Palermo (Hrsg.), *Cognition and the symbolic processes* (S. 1–42). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Brown, P. L., & Jenkins, H. M. (1968). Auto-shaping of the pigeon's key-peck. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *11*, 1–8.

Buchner, A., & Frensch, P. A. (2000). Wie nützlich sind Sequenzlernaufgaben? Zum theoretischen Status und der empirischen Befundlage eines Forschungsparadigmas. *Psychologische Rundschau*, *51*, 10–18.

Buchner, A., Funke, J., & Berry, D. (1995). Negative correlations between control performance and verbalizable knowledge: Indicators for implicit learning in process control tasks? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *48A*, 166–187.

Cleeremans, A., Destrebecqz, A., & Boyer, M. (1998). Implicit learning: News from the front. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 406–416.

Clegg, B. A., DiGirolamo, G. J., & Keele, S. W. (1998). Sequence learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 275–281.

Colwill, R. M., & Rescorla, R. A. (1990). Effect of reinforcer devaluation on discriminative control of instrumental behavior. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *16*, 372–389.

Curran, T. (1998). Implicit sequence learning from a cognitive neuroscience perspective: What, how and where? In M. A. Stadler, & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 365–400). Thousand Oaks, CA: Sage.

De Houwer, J. (2009). The propositional approach to associative learning as an alternative for association formation models. *Learning & Behavior*, *37*, 1–20.

De Houwer, J., & Beckers, T. (2002). A review of recent developments in research and theories on human contingency learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55B*, 289–310.

De Houwer, J., Barnes-Holmes, D., & Moors, A. (2013). What is learning? On the nature and merits of a functional definition of learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*, 631–642.

Destrebecqz, A., & Cleeremans, A. (2001). Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure. *Psychonomic Bulletin & Review*, *8*, 343–350.

Dienes, Z., & Berry, D. (1997). Implicit learning: Below the subjective threshold. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*, 3–23.

Domjan, M. (2005). Pavlovian conditioning: A functional perspective. *Annual Review of Psychology*, *56*, 179–206.

Fanselow, M. S., & Poulos, A. M. (2005). The neuroscience of mammalian associative learning. *Annual Review of Psychology*, *56*, 207–234.

Ferster, C. S., & Skinner, B. F. (1957). *Schedules of reinforcement*. New York: Appleton-Century-Crofts.

Field, A. P. (2000). I like it, but I'm not sure why: Can evaluative conditioning occur without conscious awareness? *Consciousness and Cognition*, *9*, 13–36.

Fitzgerald, R. D., Martin, G. K., & O'Brien, J. H. (1973). Influence of vagal activity on classically conditioned heart rate in rats. *Journal of Comparative Physiological Psychology*, *83*, 485–491.

Gallistel, C. R., & Gibbon, J. (2000). Time, rate, and conditioning. *Psychological Review*, *107*, 289–344.

Garcia, J., & Koelling, R. A. (1966). Relation of cue to consequence in avoidance learning. *Psychonomic Science*, *4*, 123–124.

Gergely, G., Bekkering, H., & Király, I. (2002). Rational imitation in preverbal infanct. *Nature*, *415*, 755.

Gluck, M. A., & Bower, G. H. (1988). From conditioning to category learning: An adaptive network model. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*, 227–247.

Gorn, G. J. (1982). The effects of music in advertising on choice behavior: A classical conditioning approach. *Journal of Marketing*, *46*, 94–101.

Goschke, T. (1998). Implicit learning of perceptual and motor sequences. In M. A. Stadler, & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 401–444). Thousand Oaks, CA: Sage.

Gould, J. L., & Gould, C. G. (1997). *Bewusstsein bei Tieren: Ursprünge von Denken, Lernen und Sprechen*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Grice, G. R. (1948). The relation of secondary reinforcement to delayed reward in visual discrimination learning. *Journal of Experimental Psychology*, *38*, 1–16.

Güntürkün, O. (1996). Lernprozesse bei Tieren. In J. Hoffmann, & W. Kintsch (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie* (Bd. 7, S. 85–192). Göttingen: Hogrefe.

Guthrie, E. R. (1952). *The psychology of learning (rev. edn.)*. New York: Harper & Row.

Guttman, N., & Kalish, H. I. (1956). Discriminability and stimulus generalization. *Journal of Experimental Psychology*, *51*, 79–88.

Gynther, M. D. (1957). Differential eyelid conditioning as a function of stimulus similarity and strength of response to the CS. *Journal of Experimental Psychology*, *53*, 408–416.

Haider, H., Eichler, A., & Lange, T. (2011). An old problem: How can we distinguish between conscious and unconscious knowledge acquired in an implicit learning task? *Consciousness and Cognition*, *20*, 658–672.

Hall, G. (1991). *Perceptual and associative learning*. Oxford: Clarendon.

Hammerl, M., & Grabitz, H.-J. (1997). Unbewußte Evaluationsprozesse. *Sprache & Kognition*, *16*, 159–165.

Harris, J. A. (2006). Elemental representations of stimuli in associative learning. *Psychological Review*, *113*, 584–605.

Hazeltine, E., Grafton, S. T., & Ivry, R. (1997). Attention and stimulus characteristics determined the locus of motor sequence encoding: A PET study. *Brain*, *120*, 123–140.

Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley.

Hendrickx, H., De Houwer, J., Bayens, F., Eelen, P., & Van Avermaet, E. (1997). Hidden covariation detection might be very hidden indeed. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *23*, 201–220.

Hintzman, D. L. (1984). MINERVA 2: A simulation model of human memory. *Behavior Research Methods*, *16*, 96–101.

Hoffmann, J. (1993). Unbewußtes Lernen – eine besondere Lernform? *Psychologische Rundschau*, *44*, 75–89.

Hoffmann, J., & Koch, I. (1998). Implicit learning of loosely defined structures. In M. A. Stadler, & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 161–199). Thousand Oaks, CA: Sage.

Hoffmann, J., Sebald, A., & Stöcker, C. (2001). Irrelevant response effects improve serial learning in serial reaction time tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *27*, 470–482.

Hofmann, W., De Houwer, J., Perugini, M., Baeyens, F., & Crombez, G. (2010). Evaluative conditioning in humans: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *136*, 390–421.

Holland, P. C. (1985). The nature of conditioned inhibition in serial and simultaneous feature negative discriminations. In R. R. Miller, & N. E. Spear (Hrsg.), *Information processing in animals: Conditioned inhibition* (S. 267–297). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Holland, P. C., & Rescorla, R. A. (1975). The effects of two ways of devaluing the unconditioned stimulus after first- and second-order appetitive conditioning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *1*, 355–363.

Holyoak, K. J., Koh, K., & Nisbett, R. E. (1989). A theory of conditioning: Inductive learning with-in rule-based default hierarchies. *Psychological Review*, *96*, 315–340.

Hsiao, A. T., & Reber, A. S. (1998). The role of attention in implicit sequence learning: Exploring the limits of the cognitive unconscious. In M. A. Stadler, & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbook of implicit learning* (S. 471–495). Thousand Oaks, CA: Sage.

Hughes, M. W., Schuster, J. W., & Nelson, C. M. (1993). The acquisition of independent dressing skills by students with multiple disabilities. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, *5*, 233–252.

Hull, C. L. (1931). Goal attraction and directing ideas conceived as habit phenomena. *Psychological Review*, *38*, 487–506.

Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior*. New York: Appleton-Century-Crofts.

Hull, C. L. (1952). *A behavior system*. New Haven: Yale University Press.

Hütter, M., Sweldens, S., Stahl, C., Unkelbach, C., & Klauer, K. C. (2012). Dissociating contingency awareness and conditioned attitudes: Evidence of contingency-unaware evaluative conditioning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *141*, 539–557.

Jacob, P., & Jeannerod, M. (2005). The motor theory of social cognition: A critique. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 21–25.

Jamieson, R. K., Crump, M. J., & Hannah, S. D. (2012). An instance theory of associative learning. *Learning & Behavior*, *40*, 61–82.

Jenkins, H. M., & Harrison, R. H. (1962). Generalization gradients of inhibition following auditory discrimination learning. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *5*, 435–441.

Jiménez, L., Méndez, C., & Cleeremans, A. (1996). Comparing direct and indirect measures of sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 948–969.

Kamin, L. J. (1968). „Attention-like" processes in classical conditioning. In M. R. Jones (Hrsg.), *Miami Symposium on the Prediction of Behavior: Aversive stimulation* (S. 9–31). Miami, FL: University of Miami Press.

Kamin, L. J. (1969). Predictability, surprise, attention, and conditioning. In B. A. Campbell, & R. M. Church (Hrsg.), *Punishment and aversive behavior* (S. 279–296). New York: Appleton-Century-Crofts.

Kandel, E. R., & Hawkins, R. D. (1992). Molekulare Grundlagen des Lernens. *Spektrum der Wissenschaft*, *11*, 66–76.

Keele, S. W., Ivry, R. B., Mayr, U., Hazeltine, E., & Heuer, H. (2003). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychological Review*, *110*, 316–339.

Kehoe, E. J., & Gormezano, I. (1980). Configuration and combination laws in conditioning with compound stimuli. *Psychological Bulletin*, *87*, 351–387.

Kiesel, A., & Koch, I. (2012). *Lernen. Grundlagen der Lernpsychologie*. Wiesbaden: VS Verlag.

Koch, I. (2001). Intentional and automatic activation of task set. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*, 1474–1486.

Koch, I. (2008). Konditionieren und implizites Lernen. In J. Müsseler (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (2. Aufl. S. 338–374). Heidelberg: Spektrum.

Koch, I., & Hoffmann, J. (2000). The role of stimulus-based and response-based spatial information in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 863–882.

Köhler, W. (1950). Simple structural functions in the chimpanzee and in the chicken. In W. D. Ellis (Hrsg.), *A source book on Gestalt psychology* (S. 217–227). New York: Humanities Press.

Kruschke, J. K. (1992). ALCOVE: An exemplar-based connectionist model of category learning. *Psychological Review*, *99*, 22–44.

Lachnit, H. (1993). *Assoziatives Lernen und Kognition*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Lagnado, D. A., Waldmann, M. R., Hagmayer, Y., & Sloman, S. A. (2007). Beyond covariation: Cues to causal structure. In A. Gopnik, & L. Schulz (Hrsg.), *Causal learning: Psychology, philosophy, and computation* (S. 154–172). Oxford: Oxford University Press.

LeDoux, J. (1998). *The emotional brain*. London: Weidenfeld & Nicolson.

Levey, A. B., & Martin, I. (1975). Classical conditioning of human 'evaluative' responses. *Behaviour Research and Therapy*, *13*, 221–226.

Lewicki, P. (1986). Processing information about covariation that cannot be articulated. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *12*, 135–146.

Lewicki, P., Hill, T., & Czyzewska, M. (1992). Nonconscious acquisition of information. *American Psychologist*, *47*, 796–801.
Light, J. S., & Gantt, W. H. (1936). Essential part of reflex arc for establishment of conditioned reflex. Formation of conditioned reflex after exclusion of motor peripheral end. *Journal of Comparative Psychology*, *21*, 19–36.
Linden, & Hautzinger, M. (2011). *Verhaltenstherapiemanual*. Heidelberg: Springer.
Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, *109*, 376–400.
Lovibond, P. F., & Shanks, D. R. (2002). The role of awareness in Pavlovian conditioning: Empirical evidence and theoretical implications. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *28*, 3–26.
Macfarlane, D. A. (1930). The role of kinesthesis in maze learning. *California University Publication Psychology*, *4*, 277–305.
Mackintosh, N. J. (1975). A theory of attention: Variations in the associability of stimuli with reinforcement. *Psychological Review*, *82*, 276–298.
McAllister, W. R. (1953). Eyelid conditioning as a function of the CS-UCS interval. *Journal of Experimental Psychology*, *45*, 417–422.
McDougall, W. (1908). *An introduction to social psychology*. London: Methuen.
Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, *198*, 75–78.
Meltzoff, A. N., & Prinz, W. (Hrsg.). (2002). *The imitative mind: Development, evolution, and brain bases*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
Miller, N. E., & Dollard, J. (1941). *Social learning and imitation*. New Haven: Yale University Press.
Miller, R. R., & Matzel, L. D. (1988). The comparator hypothesis: A response rule for the expression of association. In G. H. Bower (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 22, S. 51–92). San Diego: Academic Press.
Miller, R. R., Barnet, R. C., & Grahame, N. J. (1995). Assessment of the Rescorla-Wagner model. *Psychological Bulletin*, *117*, 363–386.
Mitchell, C. J., De Houwer, J., & Lovibond, P. F. (2009). The propositional nature of human associative learning. *Behavioral and Brain Sciences*, *32*, 183–198.
Morgan, C. L. (1896). *Habit and instinct*. London: Arnold.
Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*, *20*, 750–756.
Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*, 1–32.
Nissen, M. J., Willingham, D., & Hartman, M. (1989). Explicit and implicit remembering: When is learning preserved in amnesia? *Neuropsychologia*, *27*, 341–352.
Nosofsky, R. M. (1984). Choice, similarity, and the context theory of classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 104–114.
O'Keefe, J., & Nadel, L. (1979). The hippocampus as a cognitive map. *Behavioral and Brain Sciences*, *2*, 487–533.
Olson, M. A., & Fazio, R. H. (2001). Implicit attitude formation through classical conditioning. *Psychological Science*, *12*, 413–417.
O'Reilly, R. C., & Rudy, J. W. (2001). Conjunctive representations in learning and memory: Principles of cortical and hippocampal function. *Psychological Review*, *108*, 311–345.
Papini, M. R., & Bitterman, M. E. (1990). The role of contingency in classical conditioning. *Psychologial Review*, *97*, 396–403.
Parrott, K. A., Schuster, J. W., Collins, B. C., & Gassaway, L. J. (2000). Simultaneous prompting and instructive feedback when teaching chained tasks. *Journal of Behavioral Education*, *10*, 3–19.
Pascual-Leone, A., Grafman, J., & Hallet, M. (1994). Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. *Science*, *263*, 1287–1289.
Pawlow, I. P. (1927). *Conditioned reflexes*. Oxford: Oxford University Press.
Pearce, J. M. (1997). *Animal learning and cognition: an introduction* (2. Aufl.). Hove: Psychology Press.
Pearce, J. M. (2002). Evaluation and development of a connectionist theory of configural learning. *Animal Learning & Behavior*, *30*, 73–95.
Pearce, J. M., & Bouton, M. E. (2001). Theories of associative learning in animals. *Annual Review of Psychology*, *52*, 111–139.
Pearce, J. M., & Hall, G. (1980). A model for Pavlovian learning: Variations in the effectiveness of conditioned but not of unconditioned stimuli. *Psychological Review*, *87*, 532–552.
Pearce, J. M., Nicholas, D. J., & Dickinson, A. (1982). Loss of associability by a conditioned inhibitor. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *33B*, 149–162.
Perrig, W. J. (1996). Implizites Lernen. In J. Hoffmann, & W. Kintsch (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie* (Bd. 7, S. 203–234). Göttingen: Hogrefe.
Perruchet, P., & Amorim, M.-A. (1992). Conscious knowledge and changes in performance in sequence learning: Evidence against dissociation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*, 785–800.
Perruchet, P., & Pacton, S. (2006). Implicit learning and statistical learning: One phenomenon, two approaches. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 233–238.
Pineño, O., & Miller, R. R. (2007). Comparing associative, statistical, inferential reasoning, and hybrid accounts of human contingency learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*, 310–329.
Pleyers, G., Corneille, O., Luminet, O., & Yzerbyt, V. (2007). Aware and (dis)liking: Item-based analyses reveal that valence acquisition via evaluative conditioning emerges only when there is contingency awareness. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *33*, 130–144.
Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, *9*, 129–154.
Prokasy, W. F., Grant, D. A., & Myers, N. A. (1958). Eyelid conditioning as a function of UCS intensity and intertrial interval. *Journal of Experimental Psychology*, *55*, 242–246.
Rashotte, M. E., Griffin, R. W., & Sisk, C. L. (1977). Second-order conditioning of the pigeon's keypeck. *Animal Learning and Behavior*, *5*, 25–38.
Rauch, S. L., Savage, C. R., Brown, H. D., Curran, T., Alpert, N. M., Kendrick, A., Fischman, A. J., & Kosslyn, S. M. (1995). A PET investigation of implicit and explicit sequence learning. *Human Brain Mapping*, *3*, 271–286.
Rauch, S. L., Whalen, P. J., Savage, C. R., Curran, T., Kendrick, A., Brown, H. D., Bush, G., Breiter, H. C., & Rosen, B. R. (1997). Striatal recruitment during an implicit sequence learning task as measured by functional magnetic resonance imaging. *Human Brain Mapping*, *5*, 124–132.
Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *6*, 855–863.
Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, *118*, 219–235.
Reber, P. J., & Squire, L. R. (1994). Parallel brain systems for learning with and without awareness. *Learning & Memory*, *1*, 217–229.
Reed, J., & Johnson, P. (1994). Assessing implicit learning with indirect tests: Determining what is learned about sequence structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 585–594.
Rescorla, R. A. (1968). Probability of shock in the presence and absence of CS in fear conditioning. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *66*, 1–5.
Rescorla, R. A. (1988). Pavlovian conditioning: It's not what you think it is. *American Psychologist*, *43*, 151–160.
Rescorla, R. A. (1998). Instrumental learning: Nature and persistence. In M. Sabourin, F. Craik, & M. Robert (Hrsg.), *Advances in psychological science* Biological and cognitive aspects, (Bd. 2, S. 239–257). Hove, England: Psychology Press.
Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations on the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. H. Black, & W. F. Prokasy (Hrsg.), *Classical conditioning: II. Current research and theory* (S. 64–99). New York: Appleton-Century-Crofts.
Rizley, R. C., & Rescorla, R. A. (1972). Associations in higher order conditioning and sensory preconditioning. *Journal of Comparative Physiological Psychology*, *81*, 1–11.
Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, *27*, 169–192.
Robertson, E. M. (2007). The serial reaction time task: Implicit motor skill learning? *The Journal of Neuroscience*, *27*, 10073–10075.
Rose, M., Haider, H., & Büchel, C. (2010). The emergence of explicit memory during learning. *Cerebral Cortex*, *20*, 2787–2797.
Rünger, D., & Frensch, P. A. (2010). Defining consciousness in the context of incidental sequence learning: Theoretical considerations and empirical implications. *Psychological Research*, *74*, 121–137.

Schedlowski, M., & Pacheco-López, G. (2010). The learned immune response: Pavlov and beyond. *Brain, Behavior, and Immunity*, *24*, 176–185.
Schmajuk, N. A., & Holland, P. C. (Hrsg.). (1998). *Occasion Setting: Associative learning and cognition in animals*. Washington, DC: American Psychological Association.
Schwarb, H., & Schumacher, E. H. (2012). Generalized lessons about sequence learning from the study of the serial reaction time task. *Advances in Cognitive Psychology*, *8*, 165–178.
Seligman, M. E. P. (1970). On the generality of the laws of learning. *Psychological Review*, *77*, 406–418.
Shanks, D. R. (1995). *The psychology of associative learning*. Cambridge: University Press.
Shanks, D. R. (2005). Implicit learning. In K. Lamberts, & R. Goldstone (Hrsg.), *Handbook of Cognition* (S. 202–220). London: Sage.
Shanks, D. R. (2010). Learning: From association to cognition. *Annual Review of Psychology*, *61*, 273–301.
Shanks, D. R., & Darby, R. J. (1998). Feature- and rule-based generalization in human associative learning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *24*, 405–415.
Shanks, D. R., & Dickinson, A. (1991). Instrumental judgment and performance under variations in action-outcome contingency and contiguity. *Memory & Cognition*, *19*, 353–360.
Shanks, D. R., & Johnstone, T. (1999). Evaluating the relationship between explicit and implicit knowledge in a sequential reaction time task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *25*, 1435–1451.
Shanks, D. R., & John, St. M. F. (1994). Characteristics of dissociable learning systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *17*, 367–447.
Siegel, S., Hearst, E., George, N., & O'Neal, E. (1968). Generalization gradients obtained from individual subjects following classical conditioning. *Journal of Experimental Psychology*, *78*, 171–174.
Skinner, B. F. (1938). *The behavior of organisms*. New York: Appleton-Century-Crofts.
Skinner, B. F. (1948). *Walden Two*. New York: Macmillan.
Skinner, B. F. (1950). Are theories of learning necessary? *Psychological Review*, *57*, 193–216.
Spada, H., Rummel, N., & Ernst, A. (2006). Lernen. In H. Spada (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (3. Aufl. S. 343–434). Bern: Huber.
Spence, K. W. (1937). The differential response in animals to stimuli varying within a single dimension. *Psychological Review*, *44*, 430–444.
Staddon, J. E. R., & Cerutti, D. T. (2003). Operant conditioning. *Annual Review of Psychology*, *54*, 115–144.
Staddon, J. E. R., & Simmelhag, V. L. (1971). The „superstition" experiment: A reexamination of its implications for the principles of adaptive behavior. *Psychological Review*, *78*, 3–43.
Stadler, M. A. (1997). Distinguishing implicit and explicit learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*, 56–62.
Stadler, M. A., & Frensch, P. A. (Hrsg.). (1998). *Handbook of implicit learning*. Thousand Oaks, CA: Sage.
Stahl, C., Unkelbach, C., & Corneille, O. (2009). On the respective contributions of awareness of unconditioned stimulus valence and unconditioned stimulus identity in attitude formation through evaluative conditioning. *Journal of Personality and Social Psychology*, *97*, 404–420.
Stuart, E. W., Shimp, T. A., & Engle, R. W. (1987). Classical conditioning of consumer attitudes: Four experiments in an advertising context. *Journal of Consumer Research*, *14*, 334–349.
Swartzentruber, D. (1995). Modulatory mechanisms in Pavlovian conditioning. *Animal Learning & Behavior*, *23*, 123–143.
Tarpy, R. M., & Sawabini, F. L. (1974). Reinforcement delay: A selective review of the last decade. *Psychological Bulletin*, *81*, 984–997.
Thompson, R. F. (2005). In search of memory traces. *Annual Review of Psychology*, *56*, 1–23.
Thorndike, E. L. (1911). *Animal intelligence: Experimental studies*. New York: Macmillan.
Thorndike, E. L. (1913). *Educational psychology: The psychology of learning*. Bd. 2. New York: Teacher's College.
Tolman, E. C. (1932). *Purposive behavior in animals and men*. New York: Century.
Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, *55*, 189–208.
Tolman, E. C., & Honzik, C. H. (1930). Insight in rats. *University of California Publications in Psychology*, *4*, 215–232.
Urcuioli, P. J. (2005). Behavioral and associative effects of differential outcomes in discrimination learning. *Learning & Behavior*, *33*, 1–21.
Wagner, A. R. (1978). Expectancies and the priming of STM. In S. H. Hulse, H. Fowler, & W. K. Honig (Hrsg.), *Cognitive aspects of animal behavior* (S. 177–209). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Wagner, A. R. (1981). SOP: A model of automatic memory processing in animal behavior. In N. E. Spear, & R. R. Miller (Hrsg.), *Information processing in animals: Memory mechanisms* (S. 5–47). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Wagner, A. R. (2003). Context-sensitive elemental theory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *23B*, 7–29.
Wagner, A. R. (2008). Evolution of an elemental theory of Pavlovian conditioning. *Learning and Behavior*, *36*, 253–265.
Wagner, A. R., & Brandon, S. E. (1989). Evolution of a structured connectionist model of Pavlovian conditioning (AESOP). In S. B. Klein, & R. R. Mowrer (Hrsg.), *Contemporary learning theories: Pavlovian conditioning and the status of traditional learning theory* (S. 149–189). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Waldmann, M. R., & Hagmayer, Y. (2013). Causal reasoning. In D. Reisberg (Hrsg.), *Oxford Handbook of Cognitive Psychology* (S. 733–752). New York: Oxford University Press.
Wasserman, E. A., & Miller, R. R. (1997). What's elementary about associative learning. *Annual Review of Psychology*, *48*, 573–607.
Wasserman, E. A., Elek, S. M., Chatlosh, D. C., & Baker, A. G. (1993). Rating causal relations: Role of probability in judgments of response-outcome contingency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *19*, 174–188.
Watson, J. B., & Rayner, R. (1920). Conditioned emotional reactions. *Journal of Experimental Psychology*, *17*, 187–194.
Wollny, R. (2007). *Bewegungswissenschaft: ein Lehrbuch in 12 Lektionen*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
Wolpe, J. B. (1958). *Psychotherapy by reciprocal inhibition*. Stanford, CA: Stanford University Press.
Zießler, M., & Nattkemper, D. (2001). Learning of event sequences is based on response-effect learning: Further evidence from a serial reaction task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *27*, 595–613.
Zimmer-Hart, C. L., & Rescorla, R. A. (1974). Extinction of Pavlovian conditioned inhibition. *Journal of Comparative Physiological Psychology*, *86*, 837–845.

Kategorisierung und Wissenserwerb

Michael R. Waldmann

11.1 Einleitung: Funktionen von Kategorien – 358

11.2 Die mentale Repräsentation natürlicher Kategorien – 359
11.2.1 Ähnlichkeitsbasierte Ansätze – 359
11.2.2 Kritik ähnlichkeitsbasierter Theorien – 370
11.2.3 Die Theoriensicht – 372

11.3 Arten von Kategorien – 374
11.3.1 Natürliche Arten vs. Artefakte – 374
11.3.2 Kausale Kategorien – 375
11.3.3 Andere Arten von Kategorien – 377

11.4 Relationen zwischen Kategorien – 377
11.4.1 Taxonomien – 378
11.4.2 Nichthierarchische Kategorienstrukturen – 381

11.5 Der Erwerb von Kategorien – 381
11.5.1 Konnektionistische Modelle – 381
11.5.2 Wissensbasierte Lerntheorien – 384

11.6 Die Nutzung von Kategorien – 384
11.6.1 Der Einfluss von Zielen und pragmatischen Kontexten – 385
11.6.2 Konzeptuelle Kombination – 386
11.6.3 Sprache und Kategorien – 386
11.6.4 Kategorien und Induktion – 388

11.7 Anwendungsbeispiele – 389

11.8 Ausblick – 390

11.9 Weiterführende Informationen – 391

Literatur – 394

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_11

Im Blickfang

Konzepte und Misskonzeptionen

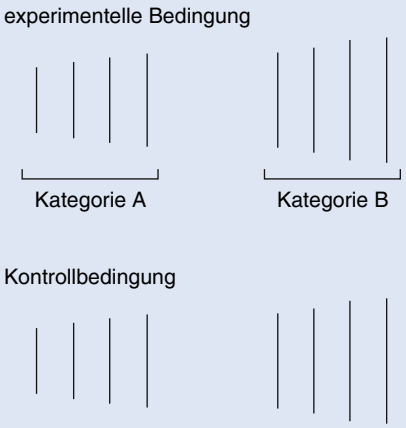
Obgleich Kategorien zentral sind für menschliche Informationsverarbeitung, können sie auch zu Problemen führen. Es ist möglich, dass wir falsche oder zu umfassende Kategorien bilden und damit die Ähnlichkeit bzw. Verschiedenheit von Dingen oder Personen übertreiben (Medin et al. 2005).

Ein klassisches Beispiel für die Auswirkungen von Kategorien stammt von Tajfel und Wilkes (1963). In einem Experiment haben sie Versuchsteilnehmern vier kürzere Linien, die sie als Kategorie A, und vier längere Linien, die sie als Kategorie B bezeichnet haben, gezeigt (◘ Abb. 11.1). Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die die acht Linien ohne die Kategorienbezeichnungen A und B erhielten, tendierte die Experimentalgruppe dazu, die Linien innerhalb der beiden Kategorien A und B als ähnlicher in ihrer Länge wahrzunehmen, als die Kontrollgruppe. Sie übertrieben also die objektiven Unterschiede der Kategorienmitglieder.

Diese Tendenz kann von großer Bedeutung im Bereich sozialer Kategorienbildung sein (vgl. auch Devine 1989). In einer Studie hat Hirschfeld (1994, 1996) die Entwicklung der Kategorie der Rasse untersucht. Er hat einer jüngeren Gruppe von Kindern aus der Mittelschicht in den USA (Sieben- und Achtjährigen) und einer älteren Gruppe (Elf- und Zwölfjährigen) Bilder von vier Paaren gezeigt, bei denen die Partner entweder beide schwarz oder beide weiß oder gemischt waren. Die Kinder wuchsen in einer Umgebung auf, in der es wenige Schwarze gab. Jedes Kind sollte dann aus einer Reihe von Bildern von Babys dasjenige heraussuchen, das vermutlich zu dem jeweiligen Paar gehörte. Alle Kinder wählten das schwarze Baby für das schwarze Paar und das weiße Baby für das weiße Paar. Interessant waren nun aber die Befunde zu dem gemischten Paar. Während die jüngeren Kinder keine klare Präferenz zeigten, tendierten die älteren Kinder stark dazu, das schwarze Baby diesem Paar zuzuschreiben. In einer Kontrollbedingung mit Tieren mit verschiedener Haar- und Hautfarbe machten sie diesen Fehler nicht. Die Befunde sprechen also dafür, dass die Jugendlichen das in ihrer Kultur übliche Rassenstereotyp übernommen haben, dem zufolge Kinder von gemischten Paaren als Schwarze angesehen werden. Hirschfeld befragte auch Großstadtkinder aus einer Schule mit Schwarzen und Weißen. Bei diesen Kindern wurde bevorzugt die korrekte Wahl getroffen. Die Befunde sind also abhängig vom kulturellen Umfeld.

Obgleich diese Beispiele eher die negativen Seiten von Kategorien betonen, sollte klar sein, dass Kategorien eine unabdingbare kognitive Funktion haben, ohne die Informationsverarbeitung unmöglich wäre. Manche Studien haben ein optimistischeres Bild gezeichnet, indem sie zeigten, dass wir Stereotype (z. B. des Geschlechts) besonders stark verwenden, wenn wir über keine anderen, spezifischeren Informationen verfügen (Locksley et al. 1980). In den letzten Jahren gibt es ein wachsendes Interesse von Kognitions- und Sozialpsychologen an der Frage, wann wir Informationen auf der Ebene von Individuen im Unterschied zu Gruppen aktivieren (z. B. Barsalou et al. 1998; Fiske et al. 1987).

Zusammenfassend dienen Kategorien einer Vielzahl ganz unterschiedlicher Funktionen, die in mannigfacher Weise interagieren können. Kategorien sind nicht nur die Basis von Klassifikation, sie spielen auch eine zentrale Rolle in einer Reihe wichtiger kognitiver Prozesse. Neben ihren vielfältigen adaptiven Funktionen können Kategorien allerdings auch zu Verzerrungen der Übereinstimmungen und Unterschiede der von ihnen zusammengefassten Objekte führen.



◘ **Abb. 11.1** Stimuli wie die aus der Studie von Tajfel und Wilkes (1963). (Aus Medin et al. 2005)

11.1 Einleitung: Funktionen von Kategorien

Wir benutzen **Kategorien**, um Gruppen von Objekten oder Ereignissen wie Hunde, Vögel, Junggesellen, Autos, Computer, Geburtstage oder Kriege aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten zusammenzufassen. Kategorien können konkrete Objekte wie etwa Pflanzen bezeichnen, sie können sich aber auch auf abstrakte Gebilde wie Demokratie beziehen. Wir können auch Kategorien kombinieren, um so zu einer schier endlosen Zahl neuer Kategorien zu kommen, z. B. „Tennisbälle", „Autoreparaturen", „Haustiere" oder „Internetkaufhäuser". Wozu benötigen wir aber Kategorien? Das Kapitel gibt einen umfassenden Überblick über aktuelle Theorien und empirische Untersuchungen zur menschlichen Kategorienbildung.

Eine der wichtigsten **Funktionen von Kategorien** besteht darin, dass sie uns ermöglichen, neue Erfahrungen mit bereits vorhandenem Wissen in Kontakt zu bringen. Ohne Kategorien wären wir nicht in der Lage, uns in der Welt zu orientieren und von Erfahrungen zu profitieren. Wäre jedes Ereignis einzigartig, wüssten wir nicht, was wir tun sollten und welche Vorhersagen wir machen könnten. Erst die Zuordnung zu einer Klasse ähnlicher Objekte oder Ereignisse erlaubt es uns, angemessen zu reagieren. Eine Maus, die ein Tier als Katze kategorisiert, wird sich anders verhalten, als wenn sie es einer anderen, weniger ge-

fährlichen Tierkategorie zuordnet. Ein Arzt, der einen Patienten untersucht, wird in Abhängigkeit davon, welcher Krankheitskategorie er diesen Patienten zuordnet, unterschiedliche Verlaufsprognosen machen und verschiedene Therapiestrategien initiieren.

Lange Zeit wurde *Klassifikation*, also die Zuordnung von Objekten und Ereignissen zu mentalen Repräsentationen von Kategorien, als die wichtigste, wenn nicht die einzige Funktion von Kategorien angesehen (Kruschke 2005; Medin und Heit 1999; Medin et al. 2005; Murphy 2002; Rips et al. 2012). Wie die genannten Beispiele von Kategoriennutzung allerdings deutlich machen, leisten Kategorien wesentlich mehr als bloße Klassenbildung.

Kategorisierung erlaubt es, bereits vorhandenes Wissen auf neue Erfahrungen anzuwenden. Klassifiziert man ein wahrgenommenes Objekt beispielsweise als Telefon, dann versetzt uns dies in die Lage, die Bestandteile dieses Objekts zu verstehen und angemessen mit ihm zu interagieren. Kategorien sind also auch die Grundlage von *Verstehen*.

Eine weitere wichtige Funktion von Kategorien ist ihre Rolle, die sie beim *Lernen* spielen. Neue Erfahrungen werden auf bereits vorhandenes Wissen bezogen, sie dienen aber auch dazu, die Wissensbasis zu modifizieren, die der Kategorisierung zugrunde liegt. Kategorien werden nicht nur auf Erfahrungen angewandt, sondern aufgrund von Erfahrungen auch erworben oder modifiziert.

Eine vierte Funktion von Kategorien betrifft die Unterstützung von *Inferenzen*. In Abhängigkeit davon, ob wir ein Tier als Hund oder als Wolf kategorisieren, werden wir unterschiedliche Erwartungen über das Verhalten des Tieres haben. Ein anderes Beispiel sind Krankheitsdiagnosen, die unterschiedliche Erwartungen über die Wirksamkeit von Therapien erzeugen.

Kategorien spielen auch in *Erklärungen* eine wichtige Rolle. Die Kategorisierung eines Symptommusters als AIDS vermittelt gleichzeitig Wissen über die Ursachen der beobachteten Merkmale und über weitere kausale Effekte dieser Erkrankung, die in der Zukunft zu erwarten sind.

Auch unser *Denken* beruht in hohem Maße auf Kategorien. Sowohl deduktive als auch induktive Schlüsse beziehen sich auf Kategorien von Objekten und Ereignissen. Bei deduktiven Schlüssen inferieren wir von Eigenschaften einer Kategorie auf einen Einzelfall (z. B. „Alle Raben sind schwarz. Also ist der weiße Vogel, den du gefunden hast, kein Rabe."), während induktive Schlüsse hypothetische Folgerungen von Einzelfällen auf die vermutlich zugrunde liegende Kategorie beinhalten (z. B. „Dieses Säugetier hat eine Milz. Also haben vermutlich alle Säugetiere eine Milz.").

Kategorien sind auch bei *Planungen und Prozessen der Handlungssteuerung* beteiligt. Planen wir etwa eine Campingreise, müssen wir uns über die Dinge Gedanken machen, die wir bei einer solchen Reise mitnehmen sollten (Barsalou 1983). Analog werden wir bei der Handlungsvorbereitung Kategorien aktivieren, die die Ziele zusammenfassen, die man mit den zur Wahl stehenden Handlungen erreichen kann.

Schließlich spielen Kategorien auch eine zentrale Rolle in der *Kommunikation* und in der *Sprache*. Sprache erlaubt es uns, unser über gemeinsame Kategorien repräsentiertes Wissen zu kommunizieren. Sprache ermöglicht es aber auch, vorhandenes kategoriales Wissen durch indirektes Lernen zu modifizieren. Der Hinweis eines Freundes, dass man sich in der Gegenwart von Klapperschlangen besser nicht bewegt, ermöglicht es uns, unser Verhalten zu verändern, auch wenn wir zuvor nie einer Klapperschlange begegnet sind.

In manchen Texten wird zwischen Kategorien, die sich auf Klassen in der Welt beziehen, und Konzepten, die die mentale Repräsentation dieser Klassen bezeichnen, unterschieden (z. B. Smith und Medin 1981). In diesem Kapitel wird hingegen zwischen diesen beiden Begriffen nicht differenziert, da sich zunehmend die Sicht durchsetzt, dass Kategorien Produkte der Interaktion von Strukturen in der Welt und informationsverarbeitenden Systemen sind (▶ Abschn. 11.6).

11.2 Die mentale Repräsentation natürlicher Kategorien

Das zahlenmäßig dominierende Forschungsfeld im Bereich der Kategorisierungsforschung beschäftigt sich mit der Frage, wie Kategorien kognitiv repräsentiert sind und wie neue Objekte bereits vorhandenen Kategorien zugeordnet werden (Überblicke in Eckes 1991; Hoffmann 1993; Komatsu 1992; Kruschke 2005; Medin et al. 2005; Murphy 2002; Rips et al. 2012; Smith und Medin 1981; Sternberg und Ben-Zeev 2001). Dabei ging man, ähnlich wie in anderen Gebieten der Kognitionspsychologie, lange Zeit davon aus, dass die semantischen Inhalte kognitiver Repräsentationen, also die Inhalte von Kategorien, psychologisch weniger wichtig sind als die Struktur der Repräsentationen. Hinter dieser Forschungsstrategie verbirgt sich die Annahme, dass es allgemeine Repräsentationsstrukturen und -prozesse gibt, die unabhängig von den Inhalten sind, die sie vermitteln.

11.2.1 Ähnlichkeitsbasierte Ansätze

Wie ordnen wir nun konkrete Objekte oder Ereignisse Kategorien zu? Die Antwort einer großen Zahl ansonsten konkurrierender Ansätze klingt einfach. Wir fassen diejenigen Objekte oder Ereignisse zu einer Kategorie zusammen, die sich ähnlich sind. Dieses Verfahren erzeugt Klassen, bei denen die **Ähnlichkeit** innerhalb der Kategoriengrenzen maximiert und die Ähnlichkeit zwischen Kategorien minimiert wird (Rosch 1978). Eine für die Kategorienforschung hochrelevante Frage ist nun, wie Ähnlichkeit kognitiv bestimmt wird. Auch wenn das Konzept der Ähnlichkeit den Kern vieler Theorien zur Kategorisierung darstellt, gibt es dennoch ganz unterschiedliche Sichtweisen darüber, wie Kategorien repräsentiert werden und wie Ähnlichkeit ermittelt wird.

▪ Die klassische Sicht

Die **klassische Sicht**, die bis in die 1960er Jahre dominierte, geht davon aus, dass Konzepte durch definierende Merkmale ausgezeichnet sind, die die notwendigen und hinreichenden Bedingungen der Kategorienzugehörigkeit spezifizieren (z. B. Bourne 1970; Bruner et al. 1956; Hull 1920). Ein Dreieck lässt sich beispielsweise als geschlossene geometrische Form mit drei Seiten,

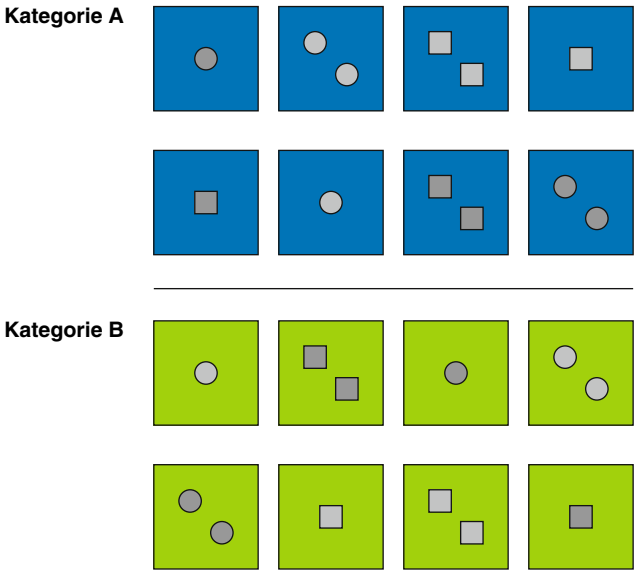


Abb. 11.2 Einfache Kategorienstruktur, bei der sich die beiden Kategorien anhand des Merkmals „Farbe des Hintergrunds" differenzieren lassen. (Aus Ashby und Ell 2001, S. 204)

die drei Winkel umschließen, deren Summe 180° beträgt, definieren. Gemäß dieser Sicht legen Konzepte auf der Basis solcher Definitionen fest, ob ein Gegenstand zu dem Konzept gehört oder nicht. Alle Mitglieder sind gleich gute Exemplare für die jeweilige Kategorie, und Kategorienlernen besteht darin, die definitorischen Merkmale der Kategorie zu entdecken. Diese Lernprozesse wurden häufig mit künstlichem Versuchsmaterial (z. B. geometrischen Figuren) untersucht, da dies ein höheres Maß der experimentellen Kontrolle ermöglichte (z. B. Bruner et al. 1956). Abb. 11.2 zeigt ein einfaches Beispiel für Kategorien, die sich auf der Basis einer definitorischen Regel trennen lassen. Objekte mit dunklem Hintergrund gehören zu Kategorie A und solche mit hellem Hintergrund zu Kategorie B. Regeln können auch komplizierter sein. Eine relativ schwierig zu erlernende Regel könnte etwa sein, dass Objekte in einer Kategorie entweder rund oder dunkel sind, aber nicht beides (*disjunktive Regel*).

In der Forschung, die im Rahmen der klassischen Sicht durchgeführt wurde, wurde eine Vielzahl solcher Regeln untersucht. Darüber wurde aber lange Zeit versäumt, die Frage zu stellen, ob natürliche, im Alltag gebräuchliche Kategorien (z. B. „Lebewesen", „Fahrzeuge", „Personentypen") tatsächlich auf der Basis von definitorischen Merkmalen repräsentiert werden. Untersuchungen, die sich dieser Frage widmeten, kamen nämlich nahezu einhellig zu dem Ergebnis, dass es unplausibel ist anzunehmen, dass Konzepte gemäß der klassischen Sicht repräsentiert werden.

Probleme der klassischen Sicht So konnten etwa McCloskey und Glucksberg (1978) zeigen, dass eine große Uneinigkeit bei ihren Probanden über die Frage bestand, ob bestimmte Objekte einer bestimmten Kategorie angehören oder nicht. Dieser Befund legt nahe, dass die Kategoriengrenzen eher unscharf sind. Ebenso problematisch für die klassische Sicht ist der Sachverhalt, dass es große interindividuelle Variabilität bei der Festlegung der für bestimmte Kategorien relevanten Merkmale gibt und dass viele der genannten Merkmale nicht notwendig und hinreichend für die Kategorien waren (Barsalou 1989; Hampton 1979).

Ein weiteres Problem für die klassische Sicht waren Befunde, die zeigten, dass Kategorien nicht diskret sind, sondern dass verschiedene Exemplare der Kategorie als mehr oder weniger stark der Kategorie zugehörig empfunden werden. Mit einer Reihe von Methoden konnte so gezeigt werden, dass es Unterschiede im Ausmaß der Typikalität von Exemplaren gibt. So werden beispielsweise ein Tisch oder ein Sofa als typischeres Möbelstück empfunden als ein Teppich oder Telefon. Ein Rotkehlchen gilt als typischerer Vogel als ein Huhn usw. Unterschiedliche Typikalität kann nicht nur mithilfe verbaler Einschätzungen auf Rating-Skalen gemessen werden, sie drückt sich auch in Reaktionszeitmaßen (z. B. die gemessene Latenz der Antwort auf Satzverifikationsfragen wie „Ist ein Huhn ein Vogel?"), in Priming-Verfahren oder in der Reihenfolge der Nennung von Kategorienexemplaren aus (z. B. Barsalou und Sewell 1985; Hampton 1979; McCloskey und Glucksberg 1979; Rosch et al. 1976a). Typische Exemplare werden generell schneller beurteilt und früher genannt als atypische (zu Priming-Verfahren s. auch ▶ Kap. 13).

Unter Beschuss kam die klassische Sicht aber auch aufgrund philosophischer Analysen (Fodor 1998; Quine 1960; Putnam 1975). So ist fragwürdig, ob Konzepte, die natürliche Arten (z. B. Lebewesen, Pflanzen) bezeichnen, definitorische Merkmale haben, die Bestandteil unserer Repräsentation sind. In der Regel verwenden wir Kategorien im Alltag, ohne die genaue wissenschaftliche Basis für die Kategorisierung zu kennen (man denke etwa an Fische oder Pflanzen). Und selbst Experten sind sich darüber im Klaren, dass künftige Forschung zu einer Veränderung des Wissens über einzelne natürliche Arten und damit auch zu veränderten Kriterien für die Kategorisierung führen kann. Man geht hier also eher davon aus, dass Konzepte theorienähnliche Gebilde sind, die Hypothesen und Annahmen ausdrücken, ohne sich ein für alle Mal auf bestimmte definitorische Relationen festzulegen. Dies gilt in besonderem Maße auch für wissenschaftliche Konzepte (z. B. „Spezies"), die in der Regel nicht definitorisch festgelegt werden, sondern in Abhängigkeit vom gerade aktuellen wissenschaftlichen Paradigma und von wissenschaftlichen Entdeckungen sukzessive präzisiert und verändert werden (Sokal 1974; Kuhl und Waldmann 1985). Selbst ein scheinbar problemlos zu definierendes Konzept wie „Junggeselle" zeigt, dass es gar nicht so leicht ist, alle definitorischen Merkmale zu nennen. Schlägt man als Definition beispielsweise „unverheirateter, erwachsener Mann" vor, dann müsste auch der Papst als Junggeselle bezeichnet werden.

Obwohl regelbasierte Theorien aufgrund dieser Argumente lange Zeit für tot erklärt wurden, wächst das Interesse an elaborierteren Versionen von Regeltheorien in den letzten Jahren wieder. Fific et al. (2010) haben eine Theorie vorgestellt, die davon ausgeht, dass Kategorisierung auf der Basis komplexer logischer Regeln erfolgt (z. B. Objekte in Kategorie A sind „mindestens 3 cm lang *und* mindestens 2 cm breit"). Anders als die traditionellen regelbasierten Theorien werden aber weitere Annahmen über den Informationsverarbeitungsprozess gemacht. So wird, in Anlehnung an die Theorie der Entscheidungsgrenzen (s. unten) postuliert, dass die Überprüfung der Regel umso schwieriger ist, je näher sich das Objekt an der in der Kategorisierungsregel spe-

Tab. 11.1 Symptome von drei Patienten (Exemplare), die an der Krankheit Erkältung (Kategorie) leiden. Der Prototyp enthält die charakteristischen Symptome

Exemplare		Prototyp
Peter	Rhinoviren, Fieber, Schnupfen, Müdigkeit, Kopfschmerzen	Bakterien, Viren, Fieber, Schnupfen, Husten, Müdigkeit
Anna	Bakterien, Husten, Schnupfen, Müdigkeit, Augenentzündung, Unterkühlung	
Johann	Adenoviren, Bakterien, Fieber, Schnupfen, Husten, Halsschmerzen, Durchfall	

zifizierten Grenze (z. B. 3 cm Länge) befindet. Außerdem werden unterschiedliche Modelle untersucht, die sich darin unterscheiden, ob die einzelnen Dimensionen parallel oder seriell verarbeitet werden und ob der Prozess komplexe Regeln immer vollständig testet oder gelegentlich auch vorzeitig abbricht (*Stoppregel*).

Die Prototypensicht

Eine Alternative zur klassischen Sicht bieten Theorien, die von Smith und Medin (1981) unter dem Oberbegriff „probabilistische Sicht" oder **Prototypensicht** zusammengefasst wurden (vgl. auch Hampton 2006). Gemäß dieser Sicht werden Kategorien als Bündel von Merkmalen repräsentiert, die typisch oder charakteristisch für die Kategorie sind, aber nicht unbedingt notwendig oder hinreichend. So mag die Kategorie „Vogel" bei den meisten Menschen Merkmale wie „Nest bauen" oder „fliegen" beinhalten, auch wenn nicht alle Vögel all diese Merkmale haben (z. B. Pinguine, Straußenvögel). Die Grundidee des Prototypenansatzes soll anhand eines konkreten Beispiels skizziert werden. Tab. 11.1 listet die Symptome von drei Personen auf, die an einem grippalen Infekt erkrankt sind. Wie man sieht, gibt es kein einzelnes Merkmal, das von allen Personen geteilt wird. Es ist also nicht möglich, definitorische Merkmale zu finden, die die Kategorie „grippaler Infekt" beschreiben. Es gibt aber eine Reihe charakteristischer Merkmale, an der die Mehrzahl der Patienten leidet. Diese charakteristischen Merkmale sind Bestandteil des Prototyps (Tab. 11.1). Der Prototyp fasst die typischen Merkmale einer Kategorie zusammen, ohne dass es ein Exemplar geben muss, das ihm vollständig entspricht. Gemäß der Prototypensicht werden beim Erwerb der Kategorie die charakteristischen Merkmale der Exemplare registriert. Daraus wird der Prototyp gebildet, der die typischen Merkmale der Kategorie zusammenfasst. Neue Exemplare werden durch einen Ähnlichkeitsvergleich mit den Prototypen der einzelnen Kategorien klassifiziert. Die Symptome eines neuen Patienten würde man dieser Sicht zufolge mit den Prototypen unterschiedlicher Krankheiten vergleichen, und man würde diejenige Krankheit diagnostizieren, zu dessen Prototyp die größte Ähnlichkeit vorliegt.

Prototypenstrukturen wurden nicht nur mit verbalem, sondern auch mit visuellem Material untersucht. Abb. 11.3 zeigt eine bekannte Aufgabe mit abstrakten Stimuli, die von Posner und Keele (1968) entwickelt wurde. Dabei wird eine beliebige

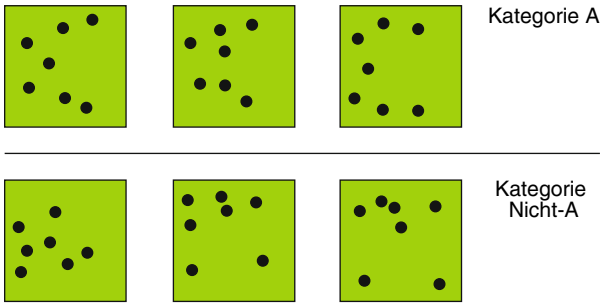


Abb. 11.3 Beispiel für visuelle Stimuli mit Prototypenstruktur. (Nach Posner und Keele 1968)

Anordnung von Punkten als Prototyp ausgewählt, und die Lernitems werden dadurch erzeugt, dass die Positionen nach Zufall räumlich leicht verschoben werden (Kategorie A). Andere Stimuli fungieren dann als Gegenkategorie Nicht-A. Wie man sieht, sind sich die Punktewolken innerhalb von Kategorie A untereinander ähnlicher, als sie zu den Punktwolken der Kategorie Nicht-A sind.

Die Aufnahme charakteristischer Merkmale erklärt auch, warum manche Exemplare als typischer empfunden werden als andere und warum Kategoriengrenzen unscharf sein können. Gründe dafür könnten sein, dass atypische Vertreter einer Kategorie (z. B. Straußenvögel) weniger für Vögel charakteristische Merkmale aufweisen als typische (z. B. Rotkehlchen) oder dass nicht zu einer bestimmten Kategorie (z. B. Fische) gehörige Exemplare (z. B. Wale) dennoch viele Merkmale mit dieser Kategorie teilen. Insbesondere Rosch und Mervis (1975) sind dieser Frage nachgegangen; sie konnten zeigen, dass die eingeschätzte Typikalität eines Exemplars exzellent durch die Anzahl der Merkmale vorhergesagt werden kann, die es mit anderen Mitgliedern der Kategorie teilt.

Gemäß der klassischen Sicht werden Kategorien als Definitionen repräsentiert. Wie kann man sich nun die Repräsentation gemäß der Prototypensicht vorstellen? Eine zentrale Idee in diesem Bereich geht auf das vom Philosophen Wittgenstein (1953/1971) entwickelte Konzept der *Familienähnlichkeit* zurück. Kategorien erlangen ihre Kohärenz dadurch, dass jedes Exemplar ein oder mehrere Merkmale mit anderen Exemplaren teilt, es aber kein einzelnes Merkmal oder Merkmalsbündel gibt, das von allen Exemplaren geteilt wird. Wittgenstein hat dies am Beispiel der Kategorie „Spiele" verdeutlicht, die eine Familienähnlichkeit vereint, ohne dass es Merkmale gibt, die alle Spiele besitzen.

Abb. 11.4 zeigt ein weiteres Beispiel für eine Prototypenorganisation von visuellen Stimuli. In Abb. 11.4A sieht man vier Gesichter, die alle voneinander verschieden sind, aber aufgrund der Überlappung mehrerer Merkmale eine Familienähnlichkeit aufweisen. Obgleich drei von vier Familienmitgliedern jeweils ein Merkmal (z. B. Form des Mundes) teilen, gibt es kein einzelnes Merkmal, das alle haben. Es gibt also kein notwendiges und hinreichendes Merkmal für diese Familie im Sinne der klassischen Sicht.

Eine Möglichkeit, wie man sich gemäß der Prototypensicht die mentale Repräsentation von Kategorien vorstellen kann, besteht darin, dass beim Lernen die charakteristischen Merkmale einer Kategorie abstrahiert und zu einer Repräsentation

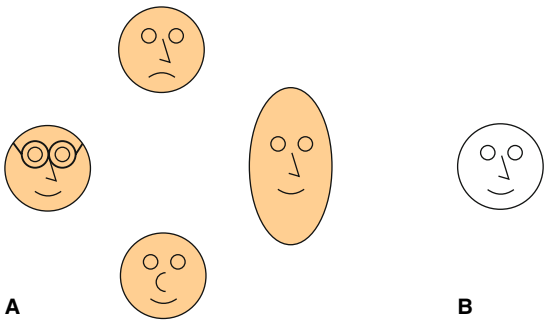


Abb. 11.4 Beispiel für Familienähnlichkeit. **A** Jedes Familienmitglied teilt mehrere Merkmale mit den anderen, ohne dass es ein einzelnes Merkmal gibt, das alle Familienmitglieder haben. **B** Der Prototyp enthält die typischen Merkmale der Familie. (Aus Medin et al. 2005)

des Prototyps der Kategorie zusammengeführt werden. Der Prototyp beinhaltet also alle typischen Merkmale, wobei es sein kann, dass kein konkretes Exemplar diesem Prototyp vollkommen entspricht. Der Prototyp für die Gesichter in Abb. 11.4A wäre etwa das Gesicht in Abb. 11.4B, das die charakteristische, modale Ausprägung aller Merkmale aufweist. Bei kontinuierlich variierenden Merkmalsdimensionen (z. B. Körpergröße) würde der Prototyp die mittlere Ausprägung dieser Dimension zeigen. Der Prototyp ist also eine Verkörperung der zentralen Tendenz einer Menge von sich ähnelnden Exemplaren. Es ist bei anderen Anordnungen von Exemplaren auch möglich, die einzelnen Merkmale gemäß ihrer Relevanz für die Kategorie zusätzlich zu gewichten. Häufig werden manche Merkmale von mehr Kategorienmitgliedern geteilt als andere und sollten deshalb auch ein höheres Gewicht erhalten (Smith und Medin 1981).

Kategorienrepräsentationen beruhen dieser Sicht zufolge also auf Abstraktionen über eine Reihe von konkreten Exemplaren. Kategorisierung wird dann als Ähnlichkeitsvergleich zwischen dem zu kategorisierenden Exemplar und der Prototypenrepräsentation vollzogen. Sieht man in einem Zoo beispielsweise ein neues Tier, dann könnte man die Merkmalsüberlappung zwischen diesem Tier und den Prototypenrepräsentationen für verschiedene Tiere (z. B. Vögel, Fische) vergleichen. Wird dabei ein bestimmter Schwellwert oder ein Kriterium für eine der Kategorien überschritten, dann wird das Tier dieser Kategorie zugeordnet.

Prototypisch organisierte Kategorien wurden häufig mit künstlich konstruiertem Material untersucht, bei dem sichergestellt werden kann, dass die Kategorie eine Familienähnlichkeitsstruktur hat (vgl. z. B. das in Abb. 11.3 dargestellte Material). Viele dieser Studien haben Befunde zutage gefördert, die konsistent mit der Prototypensicht sind. So hat sich gezeigt, dass typische Exemplare schneller gelernt und kategorisiert werden als atypische (Rosch und Mervis 1975). Dies liegt an der größeren Ähnlichkeit der typischen Exemplare zum Prototyp. Ein wichtiger Befund betrifft Transfertests, in denen nach Abschluss der Lernphase neue Exemplare zum Kategorisieren vorgelegt werden. Häufig wird hier gefunden, dass neue, bisher gar nicht beobachtete Exemplare, die dem Prototyp entsprechen, schneller der Kategorie zugewiesen und länger im Gedächtnis behalten werden als manche weniger typischen Exemplare, die in der Lernphase bereits gezeigt wurden (z. B. Homa und Vosburgh 1976; Medin und Schaffer 1978; Posner und Keele 1968, 1970).

Probleme der Prototypensicht Ähnlich wie bei der klassischen Sicht hat der Fokus auf artifizielles Labormaterial dazu geführt, dass viele Eigenschaften von natürlichen Kategorien vernachlässigt wurden. Ein Grundproblem der Prototypensicht ist etwa, dass nur die zentrale Tendenz einer Kategorie gespeichert wird, nicht aber Informationen über die Variabilität der Kategorienexemplare oder die relative Größe der einzelnen Kategorien. Es konnte aber gezeigt werden, dass diese Informationen berücksichtigt und bei der Kategorisierung genutzt werden (Estes 1986; Flannagan et al. 1986; Fried und Holyoak 1984; Medin und Schaffer 1978). Hinzu kommt, dass nicht immer die mittlere Ausprägung der Kategorien den Prototyp bestimmt, sondern gelegentlich auch Ideale. Der Prototyp einer Diät sind beispielsweise null Kalorien, was nicht dem mittleren Nährwert von Diäten entspricht. Auch biologische Kategorien (z. B. Bäume) werden eher mit Idealtypen als mit dem durchschnittlichen Phänotyp in Verbindung gebracht (Hampton 2006; Kim und Murphy 2011; Medin und Atran 2004).

Ein anderer Aspekt, der von der Prototypensicht vernachlässigt wird, sind Merkmalskorrelationen. So wissen wir beispielsweise, dass kleine Vögel eher singen als große oder dass Blutdruck und Herzerkrankung zusammenhängen, und sind durchaus in der Lage, dieses Wissen in der Lernphase zu erwerben und bei der Kategorisierung zu nutzen (Malt und Smith 1983; Medin et al. 1982).

Kontexteffekte stellen ein weiteres Problem für die Prototypensicht dar. Wie typisch ein Exemplar für eine Kategorie ist, hängt auch vom Kontext ab, in dem es präsentiert wird. So ist Kaffee zwar das sowohl für Fernfahrer als auch Sekretärinnen typischste Getränk, danach folgt aber Tee bei Sekretärinnen, während bei Fernfahrern Milch an zweiter Stelle kommt (Roth und Shoben 1983). Kategorienrepräsentationen, die von einer einheitlichen, am Prototyp orientierten Ähnlichkeitsstruktur ausgehen, können diese Effekte nicht erklären.

Schließlich macht die Prototypensicht Vorhersagen über die Lernschwierigkeit unterschiedlicher Kategorienstrukturen, die sich als problematisch erwiesen haben. Gemäß dieser Sicht beinhaltet der Kategorisierungsprozess eine additive Verknüpfung der gewichteten Merkmale. In der in Abb. 11.5 gezeigten Kategorienstruktur beispielsweise gehört ein Exemplar dann zu der Kategorie der Familie, wenn es mindestens drei der vier für die Kategorie relevanten, charakteristischen Merkmalsausprägungen (Nase, Kopf, Mund, Augen) aufweist, wobei gleichgültig ist, welche drei typischen Merkmale vorliegen. Die Merkmale werden also aufaddiert, und die Summe wird mit der Kriteriumsregel („mindestens drei der vier Merkmale“) verglichen. Kategorien, die nach einem solchen Konstruktionsprinzip strukturiert sind, nennt man *linear trennbar*.

In Abb. 11.5 wird die lineare Trennbarkeit mithilfe von zwei kontinuierlichen Merkmalen, die als Charakteristika von Tieren (Abb. 11.5A) oder Lebensmitteln (Abb. 11.5B) gesehen werden können, dargestellt. Geht man jeweils davon aus, dass jedes Exemplar nur mit den zwei in Abb. 11.5 genannten Merkmalen beschrieben wird, dann zeigt sich bei den Tieren, dass die Kategoriengrenze mithilfe einer Geraden festgelegt werden kann, die zwischen den Kategorien „Insekten“ und „Säugetiere“ trennt. Dies ist ein Beispiel für eine linear trennbare Kategorie. Hier ist

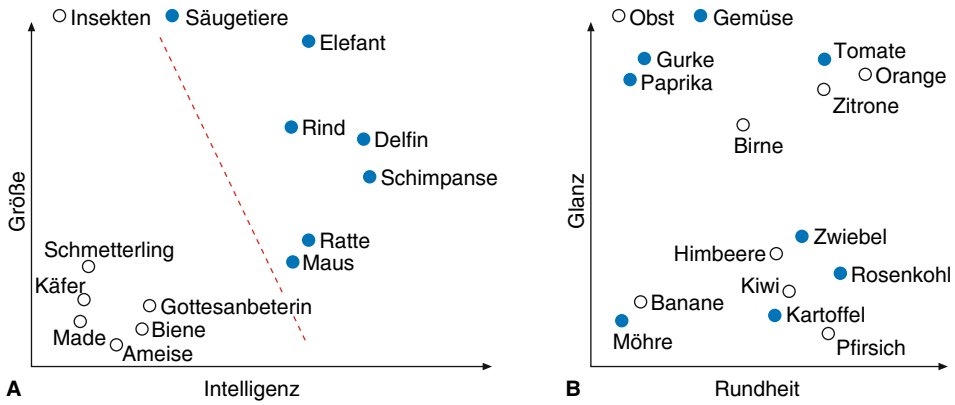


Abb. 11.5 Beispiel für linear (**A**) und nichtlinear trennbare (**B**) Kategorienstrukturen. (Nach Sternberg und Ben-Zeev 2001)

es möglich, eine Gleichung zu formulieren, die die Kategoriengrenze (die Gerade) als lineare Funktion der beiden gewichteten Merkmale erzeugt. Bei Kategorien mit drei Merkmalen würde lineare Trennbarkeit bedeuten, dass sich eine lineare Gleichung finden lässt, die eine Fläche im dreidimensionalen Raum erzeugt, die die kontrastierenden Kategorien trennt. Dieses Prinzip lässt sich auf einen m-dimensionalen Merkmalsraum erweitern.

Bei der in Abb. 11.5B abgebildeten Kategorienstruktur (Früchte vs. Gemüse) ist dies nicht möglich; hier hat man es also mit einer *nichtlinear trennbaren* Kategorie zu tun. Für diese Struktur lassen sich keine Prototypen für die beiden Kategorien finden, die die Eigenschaft haben, dass alle Exemplare der jeweiligen Kategorie dem eigenen Prototyp näher sind als dem Prototyp der Gegenkategorie. Es gibt keine lineare Gleichung, mit der es möglich wäre, die beiden Kategorien voneinander zu trennen. Prototypentheorien implizieren aufgrund ihrer Kernannahmen, dass Kategorien linear trennbar sind, dass sich also die Kategorienexemplare um den jeweiligen Prototyp scharen. Damit sagen diese Theorien vorher, dass nur linear trennbare Kategorisierungsaufgaben erlernbar sein sollten. Viele Theorien des maschinellen Lernens teilen mit der Prototypensicht die Annahme, dass nichtlinear trennbare Kategorien gar nicht oder vergleichsweise schwer zu erlernen sein sollten (Minsky und Papert 1969/1988).

Diese Vorhersage wurde allerdings empirisch nicht generell bestätigt. So haben Medin und Schwanenflugel (1981) keinen Unterschied in der Lernschwierigkeit bei linear und nichtlinear trennbaren Kategorien gefunden (vgl. auch Kemler-Nelson 1984). Es gibt aber auch Gegenbefunde, die die Allgemeinheit dieses Befunds infrage stellen (Smith et al. 1997).

Die Exemplarsicht

Exemplartheorien verkörpern einen gegenüber der Prototypensicht radikal unterschiedlichen Ansatz, denn sie gehen *nicht* davon aus, dass beim Lernen eine abstrakte Repräsentation des Prototyps aufgebaut wird. Vielmehr wird angenommen, dass wir uns beim Lernen einer Kategorie die einzelnen Exemplare zusammen mit der Kategorienbezeichnung einprägen. Ein neues Exemplar wird nun dadurch kategorisiert, dass es uns an diese früher gesehenen Exemplare mehr oder weniger erinnert und dass wir annehmen, es gehöre vermutlich der gleichen Kategorie an wie diejenigen Exemplare, denen es insgesamt am ähnlichsten ist. Ähnlichkeitsvergleiche werden also mit einzelnen oder mehreren Kategorienexemplaren, nicht mit abstrakten Prototypen vollzogen. So kann es sein, dass wir ein bestimmtes Tier als Nagetier klassifizieren, weil es uns u. a. an eine Maus erinnert, von der wir bereits wissen, dass sie zu den Nagetieren gehört, während wir ein anderes Tier in die gleiche Klasse einordnen, weil es u. a. Eichhörnchen ähnlich ist. Dabei muss man sich den Prozess nicht so vorstellen, dass einzelne Exemplare nacheinander und einzeln ins deklarative Gedächtnis gerufen werden. Vielmehr gehen die meisten Theorien davon aus, dass beim Kategorisieren eine Vielzahl ähnlicher Exemplare parallel im Gedächtnis aktiviert wird. Wie würde dieser Ansatz die Kategorisierungssituation in Tab. 11.1 darstellen? Anstatt einen Prototyp zu abstrahieren, würden Vertreter dieser Sicht postulieren, dass man sich die Symptommuster der unterschiedlichen Personen einzeln einprägt. Der Lernprozess besteht also darin, dass man sich die Exemplare, die man beobachtet, einzeln merkt. Begegnet einem nun ein neues Exemplar, beispielsweise ein neuer Patient, dann wird dieses Exemplar mit allen Exemplaren der unterschiedlichen Kategorien verglichen (z. B. den drei Personen in Tab. 11.1 für die Kategorie „grippaler Infekt“). Diejenige Kategorie wird am Ende gewählt, zu dessen Exemplaren die Gesamtähnlichkeit des neuen Exemplars am höchsten ist.

Die meisten in der Literatur postulierten Exemplartheorien gehen davon aus, dass diejenigen Exemplare, die dem zu klassifizierenden Objekt am ähnlichsten sind, den größten Einfluss auf die Kategorisierungsentscheidung haben (Brooks 1978; Medin und Schaffer 1978; Nosofsky 1986). Dies wurde in einer Reihe von empirischen Untersuchungen bestätigt. Ein Beispiel aus der Medizin stammt von Brooks et al. (1991). Sie konnten zeigen, dass Diagnosen dermatologischer Erkrankungen in hohem Maße dadurch beeinflusst werden, ob die Ärzte bereits Patienten mit ähnlichen Symptomen gesehen haben. Die Diagnosen hingen also davon ab, welche Patienten die Ärzte zuvor gesehen hatten. Interessanterweise nahm der Einfluss spezifischer ähnlicher Exemplare mit zunehmender Erfahrung der Ärzte nicht ab.

Obgleich die Grundannahme von Exemplartheorien, dass wir beim Lernen keine abstrakte Kategorienrepräsentation ausbilden, zunächst wenig plausibel erscheint, hat eine große Zahl von empirischen Untersuchungen zeigen können, dass diese Theorien eine Vielzahl von Befunden, die problematisch für Prototypentheorien sind, erklären können (z. B. Estes 1986; Medin und Schaffer 1978; Nosofsky 1988, 1991; Nosofsky und Palmeri 1997; Rehder und Hoffman 2005).

Ein Vorzug von Kategorisierung im Sinne der Exemplartheorien besteht darin, dass dabei mehr Informationen behalten werden als bei Prototypenansätzen, bei denen am Ende des Lernprozesses häufig nur noch der abstrakte Prototyp übrig bleibt, der so etwas wie einen Mittelwert ausdrückt (vgl. aber Fried und Holyoak 1984; Smith und Minda 1998, 2000). Bei Exemplartheorien hingegen werden die Lernexemplare mit den unterschiedlichen Kategorienexemplaren verglichen. Auf diese Weise erlauben es Exemplartheorien, Sensibilität für die Variabilität der Lernexemplare zu erklären. Auch die Berücksichtigung von Merkmalskorrelationen lässt sich besser mit diesem Ansatz erklären, weil die in unterschiedlichen Exemplaren verkörperten Merkmalsbeziehungen erhalten bleiben. Schließlich sagen Exemplartheorien nicht generell vorher, dass linear trennbare Kategorien leichter zu lernen sind als nichtlineare, da der Lernprozess es aufgrund der getrennten Speicherung von Einzelexemplaren nicht erfordert, eine lineare Kategoriengrenze zwischen die Kategorien zu ziehen (Nosofsky et al. 1994a; Medin und Schwanenflugel 1981).

Selbst der scheinbar für Prototypentheorien überzeugendste Befund, die leichtere Klassifizierung eines neuen, dem Prototyp entsprechenden Exemplars, lässt sich mit diesem Ansatz erklären. In der Regel sind typische Exemplare einer großen Zahl von Exemplaren der eigenen Kategorie ähnlich, während sie Exemplaren anderer Kategorien eher unähnlich sind. Dies bewirkt eine schnelle und korrekte Klassifizierung typischer Exemplare. Im Gegensatz dazu sind atypische Exemplare an den Randbereichen der Kategorie weniger Exemplaren der eigenen Kategorie, aber dafür häufig Exemplaren anderer Kategorien ähnlich. Dies führt zu höherer Unsicherheit und verlängerter Latenzzeit bei der Kategorisierungsentscheidung (ausführlichere Darstellung derartiger Theorien in ▶ Zur Vertiefung 11.1). In einer Analyse einer Reihe natürlicher Kategorien haben Voorspoels et al. (2008) gezeigt, dass Exemplarmodelle Typikalitätseinschätzungen besser erklären können als Prototypentheorien.

Probleme der Exemplarsicht Obgleich die Exemplarsicht viele der Defizite von Prototypentheorien überwindet und sich empirisch vergleichsweise gut bewährt hat, lässt sich einwenden, dass sie möglicherweise unrealistische Annahmen an unsere Speicherkapazität stellt. Ist es wirklich plausibel, dass wir jedes einzelne erlebte Objekt speichern, und, wenn nein, wie entscheiden wir, welche Exemplare wir speichern und welche wir nur als Wiederholung eines bereits gespeicherten Exemplars ansehen? Dazu sagt die Theorie bisher wenig.

Ein weiteres Problem dieses Ansatzes ist, dass er im Grunde keine Aussagen darüber macht, warum es bestimmte Kategorien gibt und was diesen Kategorien ihre Kohärenz verleiht. Gemäß einem Exemplaransatz spricht nichts dagegen, für ein Experiment zwei Exemplare von Fahrzeugen und zwei von Lebewesen zu einer gemeinsamen Kategorie A zusammenzufassen. Es ist klar, dass die Kategorien, die wir normalerweise im Alltag erwerben, mehr sind als beliebige Zusammenfassungen von Exemplaren. Smith (2014) behauptet, dass die meisten natürlichen Konzepte eine Prototypenstruktur haben. Es gibt also Argumente sowohl für Prototypen als auch für Exemplartheorien.

▪ Theorie der Entscheidungsgrenzen

Dieser vergleichsweise neue Ansatz (*decision bound theory*) basiert auf einer Weiterentwicklung der Signalentdeckungstheorie (Maddox und Ashby 1993; Ashby und Maddox 2005; ▶ Kap. 2). Bisher wurde diese Theorie vorwiegend anhand von wahrnehmungsnahen, visuellen Kategorien untersucht, deren Merkmalsdimensionen kontinuierlich variieren können. Typische Aufgaben sind die Klassifikation von Rechtecken, die sich in Länge und Breite unterscheiden, und die Klassifikation von Kreisen unterschiedlicher Größe, die eine radiale Linie mit variierender Orientierung beinhalten. In den Lernaufgaben werden diese Stimuli zusammen mit Informationen über ihre Kategorienzugehörigkeit (z. B. A vs. B) gezeigt. Dabei können mehr oder weniger komplexe Kategorisierungsregeln konstruiert werden. Außerdem wurden im Rahmen dieser Theorie häufig Aufgaben untersucht, bei denen sich die Kategorien überlappen, sodass gleichartige Exemplare verschiedenen Kategorien angehören, was eine fehlerfreie Performanz unmöglich macht und die Aufgabe sehr erschwert.

Die Grundannahme der Theorie der Entscheidungsgrenzen ist, dass die perzeptuelle Information über einen Stimulus mit einer gewissen Variabilität behaftet ist. Diese Annahme hat zur Folge, dass die perzeptuelle Identifikation eines bestimmten Stimulus ähnliche Prozesse erfordert wie die Kategorisierung von Stimuli. In beiden Aufgaben müssen variable Stimuli auf einzelne Reaktionen (z. B. Namen von Einzelobjekten oder Kategorienbezeichnungen) abgebildet werden.

Während nun Exemplartheorien davon ausgehen, dass beim Kategorisieren die gesehenen, einzelnen Exemplare abgespeichert und neue Exemplare mit den bereits gesehenen Exemplaren verglichen werden, postuliert die Theorie der Entscheidungsgrenzen einen einfacheren Prozess. Ähnlich wie das generalisierte Kontextmodell (▶ Zur Vertiefung 11.1) geht sie davon aus, dass Beobachter die Stimuli in einem geometrischen Ähnlichkeitsraum repräsentieren. Ziel des Lernprozesses ist es nun, diskriminative Funktionen zu finden, die diesen Raum in verschiedene Regionen aufspalten. Jede Teilregion ist mit einer eigenen Reaktion assoziiert, die sich beispielsweise auf verschiedene Kategorien beziehen kann. So kann z. B. jedes Mal, wenn ein Objekt in eine Region A dieses multidimensionalen Raumes fällt, der Beobachter mit der Antwort, dass das Objekt zur A-Kategorie gehört, reagieren. Die Grenzen dieser Regionen nennt man Entscheidungsgrenzen (*decision bounds*). Ein einfaches Beispiel für eine Entscheidungsgrenze wäre etwa die Linie in ◘ Abb. 11.5A. Die Theorie ist aber nicht auf linear trennbare Strukturen beschränkt, da sie nicht postuliert, dass Entscheidungsgrenzen Geraden sein oder fehlerfreie Trennbarkeit garantieren müssen. Ziel des Lernprozesses ist lediglich die Konstruktion einer möglichst optimalen Grenze (s. unten).

◘ Abb. 11.8 veranschaulicht eine typische Aufgabe, in der Linien unterschiedlicher Länge (X-Achse) und Orientierung (Y-Achse) zur Kategorisierung vorgegeben wurden. Wie man sieht, wurde eine große Zahl von verschiedenen Stimuli gezeigt, die entweder zu einer fiktiven Kategorie A (repräsentiert als schwarze Kreuze) oder Kategorie B (graue Kreise) gehörten. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, Linien, die bezüglich ihrer Länge und Orientierung den Positionen der Kreuze

Zur Vertiefung 11.1

Beispiel für eine Exemplartheorie – das generalisierte Kontextmodell (GCM)

Alle Exemplartheorien vereint die Annahme, dass die Speicherung und der Zugriff auf einzelne Exemplare zentral sind für den Kategorisierungsprozess. Ausgearbeitete Theorien beinhalten aber eine Reihe von Zusatzannahmen über die Art des Zugriffs auf den Exemplarspeicher, die über die empirische Bewährung des Modells mitentscheiden. So gibt es eine Reihe unterschiedlicher Möglichkeiten, wie man sich den Prozess des Ähnlichkeitsvergleichs vorstellen kann, ohne dass dadurch die zentrale Eigenschaft des Modells, ein Exemplarmodell zu sein, tangiert würde. Um eine bessere Vorstellung über die Komponenten formaler Kategorisierungstheorien zu geben, wird hier das von Nosofsky (1984, 1991) entwickelte **generalisierte Kontextmodell (GCM)** herausgegriffen, da es das derzeit wohl am besten empirisch bewährte Exemplarmodell ist. Das GCM ist als mathematisches Modell formalisiert, wird im Folgenden allerdings nur qualitativ beschrieben; eine präzisere Darstellung findet sich beispielsweise in Nosofsky und Johansen (2000).

Das GCM geht, wie manche andere konkurrierende Theorien auch, von einem multidimensionalen Skalierungsansatz der Modellierung von Ähnlichkeit aus. Gemäß diesem Ansatz lassen sich Exemplare in einem multidimensionalen, psychologischen Raum lokalisieren, bei dem die Achsen die Merkmalsdimensionen der Kategorien repräsentieren. In dem in Abb. 11.6 gezeigten Beispiel sind Tiere in einem zweidimensionalen Raum platziert, der durch die Merkmale „Größe" und „Intelligenz" aufgespannt ist. In realistischen Modellierungen muss man natürlich viele weitere Dimensionen annehmen, die einen multidimensionalen Raum bilden. Je weiter zwei Exemplare in diesem Raum voneinander entfernt sind, desto unähnlicher sind sie sich. Eine weitere wichtige Annahme ist, dass dieser multidimensionale Raum durch selektive Aufmerksamkeit auf bestimmte Merkmalsdimensionen modifiziert werden kann. Dieser Annahme liegt die Beobachtung zugrunde, dass Lernende in der Lage sind, bestimmten Merkmalsdimensionen besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden, wenn dies die Klassifikationsleistung verbessert.

Eine kritische weitere Annahme betrifft nun die Bestimmung der Ähnlichkeit. Dabei geht das GCM zunächst davon aus, dass ein Beobachter den Ähnlichkeitsraum durch selektive Aufmerksamkeit verändern kann.

In Abb. 11.6A beispielsweise ist Objekt i in etwa gleich ähnlich zu den Exemplaren der Kategorie X und O. Man kann aber sehen, dass die horizontale Dimension wesentlich wichtiger für die Separierung der beiden Kategorien ist als die vertikale. Ein aufmerksamer Beobachter wird diesen Sachverhalt bemerken und der horizontalen Dimension mehr Beachtung schenken. *Selektive Aufmerksamkeit* für Dimensionen bedeutet, dass auch kleine Unterschiede auf diesen Dimensionen besser erkennbar sind. Grafisch lässt sich dies veranschaulichen, indem man in dem multidimensionalen Raum diejenigen Dimensionen dehnt, die beachtet werden, während man diejenigen Dimensionen staucht, die weniger Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Dehnung führt zu einer Verdeutlichung der Unterschiede. Man kann in Abb. 11.6B sehen, wie dieser Prozess die Kategorisierung optimiert, indem die beiden Kategorien weiter voneinander entfernt werden. In dem durch selektive Aufmerksamkeit veränderten Raum ist nun Objekt i eindeutig näher bei den Exemplaren der Kategorie X. Formal lässt sich dies mithilfe von Aufmerksamkeitsparametern für die einzelnen Merkmalsdimensionen ausdrücken, die je nach Ausprägung zu einer Stauchung (d. h. Verringerung der Aufmerksamkeit) oder Streckung (d. h. Vergrößerung der selektiven Aufmerksamkeit) der Dimensionen führen.

Abb. 11.6 gibt ein Beispiel für den Kategorisierungsprozess. In diesem zweidimensionalen Beispiel gibt es zwei Kategorien X und O. Die Exemplare X2 und O4 sind nahe beieinander, sich also ähnlich, während die Exemplare X5 und O2 sich eher unähnlich sind, da sie relativ weit voneinander entfernt sind. Möchte nun ein Beobachter Item i klassifizieren, dann würde er gemäß dem GCM die Ähnlichkeit von i zu allen X-Exemplaren und getrennt davon zu allen O-Exemplaren aufsummieren. Die Klassifikationsentscheidung ist von der relativen Größe dieser Summen abhängig.

Diese Distanz muss nun noch übersetzt werden in ein Ähnlichkeitsmaß. Das GCM stützt sich hier auf die Literatur zur Stimulusgeneralisierung, insbesondere auf das von Shepard (1958, 1987) entdeckte *Universale Gesetz der Generalisierung*. Shepard ging davon aus, dass jeder Organismus mit der Aufgabe der Generalisierung konfrontiert ist. Erfährt ein Vogel beispielsweise, dass ein bestimmter Wurm zu Übelkeit führt, dann ist die Frage kritisch, welche anderen ähnlichen Würmer zu ähnlichen Konsequenzen (der *consequential region* eines Objekts) führen. Shepard konnte mathematisch ableiten und empirisch belegen, dass der optimale Generalisierungsgradient eine negativ exponentielle Funktion der psychologischen Distanz ist. Abb. 11.7 gibt ein Beispiel für diese Funktion. Wie man sehen kann, führt eine solche Funktion dazu, dass nur sehr nahe Items als ähnlich empfunden werden, während die Ähnlichkeit mit zunehmender Distanz stark abnimmt.

Das GCM sowie alle anderen Kategorisierungstheorien beinhaltet also eine Reihe von verschiedenen, prinzipiell unabhängig voneinander variierbaren Annahmen, die alle zusammen zum Erfolg der Theorie beitragen.

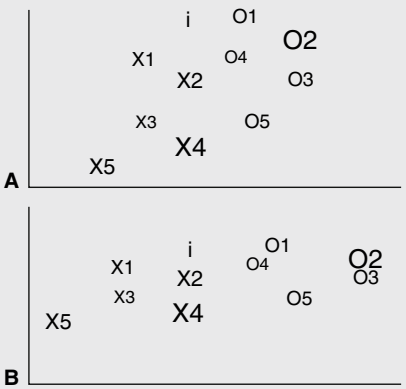


Abb. 11.6 Schematische Kategorienstruktur zur Demonstration des GCM. X sind Exemplare von Kategorie X und O Exemplare von Kategorie O. **A** zeigt eine Repräsentation mit gleicher Aufmerksamkeit auf die beiden Dimensionen, in **B** wird die horizontale Dimension mit selektiver Aufmerksamkeit versehen. (Aus Nosofsky und Johansen 2000)

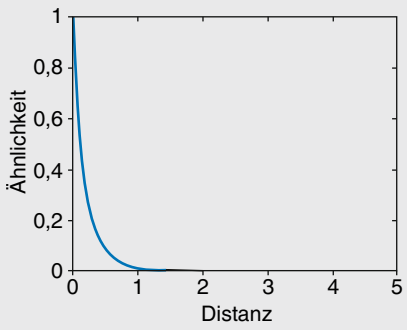


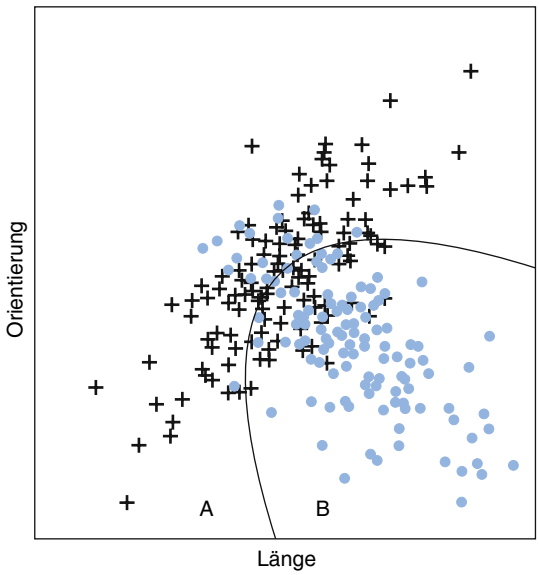
Abb. 11.7 Illustration des exponentiellen Gradienten, der die Beziehung zwischen Distanz und Ähnlichkeit ausdrückt. (Aus Nosofsky und Johansen 2000)

entsprachen, als zu Kategorie A gehörig zu klassifizieren und die restlichen der Kategorie B zuzuordnen. Man kann sehen, dass die beiden Kategorien getrennte Regionen bilden, die sich allerdings überschneiden. Es ist daher nicht möglich, die beiden Kategorien fehlerfrei zu klassifizieren. Die beste Diskriminierung in zwei Regionen liefert die eingezeichnete Kategoriengrenze, die die Form einer quadratischen Funktion hat.

Kategorisierung besteht dieser Theorie zufolge also nicht in einem Ähnlichkeitsvergleich mit einer Menge von Exemplaren oder einem Prototyp (dem Mittelpunkt der Entscheidungsregion), sondern darin, dass der Beobachter entscheidet, in welche Region der jeweilige Stimulus fällt und die dementsprechende Kategorienentscheidung trifft. In gewissem Sinne kann man diese Theorie als *regelbasiert* bezeichnen, da es beim Lernen um den Erwerb von Entscheidungsregeln geht, die die Kategorisierungsantwort festlegen. Diese Regeln sind aber, anders als bei der klassischen Sicht, nicht notwendigerweise definitorische Festlegungen, die eindeutig und fehlerfrei die Kategorienzugehörigkeit bestimmen. Die Regeln zielen vielmehr auf möglichst fehlerfreie, wenn auch nicht unbedingt perfekte Diskriminierung der Kategorien. Die Befunde zu Typikalitätsunterschieden und zu unsicheren Urteilen lassen sich im Rahmen dieses Ansatzes so erklären, dass Objekte, die nahe der Entscheidungsgrenzen liegen, schwieriger zu klassifizieren sind als Objekte, die eher zentral platziert sind.

Grundsätzlich können Entscheidungsgrenzen zwischen Kategorien unendlich viele Formen annehmen, sodass weitere einschränkende Annahmen gemacht werden müssen. Eine wichtige Theorie, die von Maddox und Ashby (1993) vorgeschlagen wurde, postuliert die Annahme von quadratischen Entscheidungsgrenzen (wie etwa in ◘ Abb. 11.8). Diese Theorie geht von rationalen Überlegungen aus. Es lässt sich nämlich zeigen, dass unter der Annahme, Kategorien seien hinsichtlich ihrer Merkmale in der Regel multivariat normal verteilt, die optimale Entscheidungsgrenze, die Kategorisierungen mit dem geringsten Fehler zulässt, eine quadratische Form annimmt. (In dem speziellen Fall, dass die Merkmale der Kategorien identische Varianzen und Kovarianzen haben, ist die optimale Entscheidungsgrenze linear.) Die Grundidee ist demzufolge, dass unser kognitives System von der Evolution mit einem Bias in Richtung quadratischer oder linearer Entscheidungsgrenzen ausgestattet ist.

Dabei sagt die Theorie nicht vorher, dass wir bei jeder Aufgabe die optimalen Entscheidungsgrenzen finden. Aufgrund von Limitationen unserer Informationsverarbeitungskapazität und fehlendem Wissen über Eigenschaften der beobachteten Kategorien kann es zu suboptimalem Verhalten insbesondere bei sehr komplexen, nichtlinearen Kategorien kommen. In diesem Sinne konnten Maddox und Ashby (1993) zeigen, dass ihre Probanden bei einfachen Kategorien mit einer linearen Entscheidungsgrenze die optimale lineare Funktion lernen, bei komplexeren Kategorien aber suboptimal bleiben. Dennoch zeigte sich hier, dass die Probanden versuchen, eine Entscheidungsgrenze anzuwenden, die zwar nicht exakt der optimalen Funktion entspricht, aber im Sinne des postulierten angeborenen Bias eine quadratische Form aufweist. Wurde die Komplexität noch weiter gesteigert, sodass beispielsweise vier Kategorien mit paarweise quadratischen Funktionen separiert werden mussten, dann zeigte sich, dass dies die Möglichkeiten der Versuchsteilnehmer übersteigt. In dieser



◘ **Abb. 11.8** Darstellung der Merkmale von Versuchsmaterial, das zur Prüfung der Theorie der Entscheidungsgrenzen verwendet wurde. Jedes Kreuz (Kategorie A) und jeder Punkt (Kategorie B) entspricht einer Linie mit bestimmter Länge und Orientierung. Die beiden Kategorien überschneiden sich, die optimale Entscheidungsgrenze ist quadratisch. (Aus Ashby und Ell 2001)

Situation fallen sie auf eine einfachere Strategie der linearen Trennung der vier Kategorienzonen zurück (Ashby et al. 2001).

Die Theorie der Entscheidungsgrenzen wurde in den letzten Jahren insbesondere gegenüber Exemplartheorien getestet, wobei bislang kein Konsens darüber erzielt wurde, welche Theorie überlegen ist. Der Schwerpunkt empirischer Überprüfung sind dabei die Vorhersagen bezüglich Suboptimalität beim Kategorisieren, bei denen sich die konkurrierenden Ansätze am stärksten unterscheiden. Während hier Anhänger der Theorie der Entscheidungsgrenzen eindeutige Belege für ihren Ansatz sehen, gibt es zu dieser Annahme auch heftige Gegenpositionen (McKinley und Nosofsky 1995; Nosofsky und Johansen 2000; ▶ Zur Vertiefung 11.2). Rouder und Ratcliff (2004) konnten zeigen, dass vermutlich beide Positionen Recht haben. Hat man es mit wenigen, eher unähnlichen Exemplaren zu tun, dann fanden sie eine Überlegenheit von Exemplartheorien, während die Theorie der Entscheidungsgrenze besser abschnitt, wenn die Exemplare innerhalb der Kategorien ähnlich und leicht verwechselbar waren.

Probleme der Theorie der Entscheidungsgrenzen Unabhängig von diesen empirischen Tests muss man dennoch die Frage stellen, ob die Theorie der Entscheidungsgrenzen nicht zu stark auf die Art des Versuchsmaterials hin abgestimmt wurde und deshalb vielleicht primär Geltung bei elementaren visuellen Kategorien beanspruchen kann. Bislang ist unklar, wie sich diese Theorie auf komplexere natürliche Kategorien anwenden lässt. Ein weiteres Problem dieses Ansatzes ist, dass er zwar sehr gut in der Lage sein mag, Entscheidungsreaktionen vorherzusagen, dass es aber unklar ist, wie man sich die Repräsentation von Kategorien vorstellen soll. Im Fokus des Ansatzes sind die Entscheidungskriterien und nicht so sehr die Kategorien, die relativ beliebig als Zonen in einem multidimensionalen Ähnlichkeitsraum charakterisiert werden.

Zur Vertiefung 11.2

Die richtige Theorie möge sich bitte erheben

Angesichts der großen Zahl konkurrierender Theorien zur Kategorisierung stellt sich die Frage, welche nun richtig ist. Viele Jahre ist man so vorgegangen, dass man aus den einzelnen konkurrierenden Theorien (z. B. Prototypen vs. Exemplartheorien) divergierende Vorhersagen abgeleitet und experimentell überprüft hat. Dies ist eine am Beginn eines Forschungsparadigmas durchaus sinnvolle Strategie, aber in den letzten Jahren wurde zunehmend klar, dass diese Strategie unbefriedigend ist. So kann auf diese Weise nicht bestimmt werden, welche Aspekte der Theorie für den jeweiligen Erfolg verantwortlich sind. Am Beispiel des generalisierten Kontextmodells (GCM; ▶ Zur Vertiefung 11.1) kann man sehen, dass Exemplarspeicherung nur eine von vielen Annahmen ist, die zum Erfolg der Theorie beitragen. Andere davon unabhängige Annahmen, z. B. zur aufmerksamkeitsbasierten Gewichtung von Dimensionen, oder die Annahme der mit wachsender Distanz exponentiell sinkenden Ähnlichkeit zwischen Reizen sind ebenso wichtig. Smith und Minda (2000) konnten zeigen, dass viele Befunde, die scheinbar eindeutig Exemplartheorien bestätigt haben, genauso gut durch ein Prototypenmodell erklärt werden können, wenn man statt der in diesem Modell üblichen linearen Ähnlichkeitsregel die exponentielle Funktion des GCM integriert und die Annahme macht, dass die in der Lernphase erlebten Exemplare einen gewissen Gedächtnisvorteil gegenüber den nicht gesehenen haben.

Ein weiteres Problem beim Modellvergleich besteht darin, dass verschiedene Modelle unterschiedliche Anzahlen von freien Parametern haben. So hat das GCM etwa Parameter für die Aufmerksamkeitsgewichte bei der Ähnlichkeitsbestimmung. Diese Parameter werden aus den Daten geschätzt und erzeugen aufgrund ihrer freien Bestimmbarkeit eine gewisse Flexibilität bei der Datenanpassung. Modelle, die von multiplen Systemen ausgehen (s. unten), haben aufgrund ihrer erweiterten Struktur in der Regel zusätzliche freie Parameter, sodass dies allein schon erklären kann, warum sie scheinbar überlegen sind bei der Erklärung von Daten. Nosofsky und Johansen (2000) konnten demgegenüber zeigen, dass bestimmte Zusatzannahmen bei der Bestimmung der Parameter des GCM und ein weiterer Parameter für die Modellierung der Antwortentscheidungen ausreichen, um viele für die Theorie scheinbar kritische Befunde zu erklären. Sie betonen allerdings, dass dies noch nicht bedeutet, dass die Theorie, die nur von einem einzelnen System ausgeht, richtig ist (vgl. auch Newell et al. 2011). Es zeigt nur, dass man auch vorschnell komplexere Theorien akzeptieren kann. Neben Experimenten, die auf die Überprüfung spezifischer Annahmen von Theorien zielen, bieten in Zukunft voraussichtlich neurowissenschaftliche Studien eine wichtige weitere Datenquelle für die Theoriendiskriminierung (z. B. Ashby et al. 1998; Ashby und Ennis 2006; Seger und Miller 2010).

Theorien multipler Systeme

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Theorien vorgeschlagen, die von multiplen Kategorisierungssystemen ausgehen. Zunehmend mehr Ansätze postulieren, dass verschiedene Systeme, beispielsweise ein regel- und ein exemplarbasiertes System, bei einer Kategorisierungsaufgabe zusammenarbeiten oder dass es interindividuelle oder auch übungsabhängige intraindividuelle Unterschiede bei der Nutzung der einzelnen Systeme gibt. Solche komplexen Modelle sind nicht nur empirisch häufig den einfachen Theorien überlegen (vgl. aber Newell et al. 2011; Nosofsky und Johansen 2000), sie werden auch durch neuere neurowissenschaftliche Studien gestützt. Uneinigkeit besteht derzeit allerdings darüber, welche der Systeme nebeneinander bestehen.

Regeln und Prototypen Die Probleme der klassischen Sicht und die der Prototypensicht veranlasste eine Reihe von Forschern, beide Ansätze zu kombinieren (Armstrong et al. 1983; Landau 1982; Miller und Johnson-Laird 1976; vgl. auch Weinert und Waldmann 1988). Gegen Prototypentheorien wurde eingewendet, dass sie dem Sachverhalt nicht gerecht werden, dass manche Konzepte, etwa Familienkategorien (z. B. „Großvater“) oder mathematische Konzepte (z. B. „ungerade Zahl“), eindeutig definierbar sind und diese Definitionen auch von Versuchsteilnehmern generiert werden können. Auf der anderen Seite stehen aber Befunde, die zeigen, dass selbst diese Kategorien Typikalitätsgradienten aufweisen. So wird eine 7 als ein typischerer Vertreter der Kategorie „ungerade Zahl“ angesehen als beispielsweise eine 87. Diese Unterschiede zeigen sich auch in indirekten Maßen wie Reaktionszeiten (Armstrong et al. 1983).

Man hat deshalb einen dualen Ansatz vorgeschlagen, der zwei Ebenen der Kategorienrepräsentation vorsieht: einen zentralen Kernbereich, der die Definition beinhaltet und vorwiegend bei Denkprozessen eingesetzt wird, und eine oberflächliche, prototypenbasierte Identifikationsprozedur, die bei der Kategorisierung von Objekten genutzt wird. Eine Einschränkung dieses Ansatzes ist allerdings, dass er sich nur auf Konzepte anwenden lässt, die einen definitorischen Kern haben, was sicherlich nur auf eine Minderzahl zutrifft. Außerdem teilt er mit den Prototypentheorien alle Probleme bei der Erklärung von Kategorisierungsphänomenen.

Prototypen und Exemplare Dieser Ansatz geht von der naheliegenden Annahme aus, dass Beobachter sowohl in der Lage sind, Prototypen zu abstrahieren als auch Exemplare zu speichern. Smith et al. (1997) vermuteten, dass die Wahl der Lernstrategie von der Art der zu erlernenden Kategorien gesteuert wird (vgl. auch Medin et al. 1984). In ihren Experimenten zeigte sich, dass Exemplartheorien immer dann überlegen waren, wenn die Kategorien klein, hochdifferenziert und wenig kohärent waren, wenn also ein hohes Maß an Unähnlichkeit innerhalb der Kategorie besteht. In solchen Situationen bilden Prototypen keine gute Repräsentation der Gesamtkategorie, sodass es den Lernenden offenbar sinnvoller erscheint, auf das Einprägen der wenigen Einzelexemplare zurückzufallen (für eine andere Sicht dieser Daten vgl. Nosofsky und Johansen 2000). Sind die Kategorien hingegen eher groß und vergleichsweise kohärent, dann zeigten sich interindividuelle Unterschiede: Etwa die Hälfte der Versuchsteilnehmer wurde besser durch einen Prototypenansatz charakterisiert (▶ Zur Vertiefung 11.2).

Regeln und Exemplare Ein Beispiel für eine Theorie, die eine regelbasierte Komponente mit Exemplarspeicherung kombiniert, stammt von Nosofksy et al. (1994b). Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass Exemplartheorien zu große Ansprüche an die Speicherkapazität des Lernenden stellen. Ihr *rule-plus-exception*-Modell (RULEX) geht demgegenüber davon aus, dass Lernen ein sequenzieller Prozess ist. In einem ersten Lernschritt wird nach einer einfachen, auf einer einzelnen Dimension basierenden

Regel gesucht, die die Kategorien trennt. Gibt es eine solche Regel nicht, sucht RULEX nach einer partiell erfolgreichen einfachen Regel. (Gibt es keine hinreichend erfolgreiche partiell gültige Regel, dann sucht RULEX zusätzlich konjunktive Regeln, die Konjunktionen von Dimensionen involvieren.) RULEX könnte beispielsweise in einer Lernaufgabe zu der einfachen Regel kommen, dass die meisten Exemplare von Kategorie A rund und die von Kategorie B eckig sind. Findet es eine solche Regel, die hinreichend viele Exemplare erfolgreich klassifiziert, versucht RULEX, Ausnahmen von dieser Regel zu memorieren. Nur selten werden dabei vollständige Lernexemplare gespeichert. Auch hier versucht RULEX möglichst ökonomisch zu sein und nur mit partiellen Beschreibungen der Ausnahmen auszukommen. So könnte RULEX speichern, dass eckige und blaue Objekte (mit beliebigen anderen Merkmalen) allerdings auch zu Kategorie A gehören. Neue Exemplare werden in der umgekehrten Reihenfolge dieser Schritte kategorisiert. Wird RULEX mit einem zu kategorisierenden Testexemplar konfrontiert, sucht es zunächst die (partiell) gespeicherten Ausnahmen ab, dann die konjunktiven Regeln (falls vorhanden) und schließlich die einfachen Regeln.

RULEX wurde gegenüber dem generalisierten Kontextmodell (GCM) getestet und erwies sich als gleichwertig bei der Erklärung von Gruppendaten. Als größter Vorzug wurde aber gesehen, dass es besser als das GCM in der Lage ist, interindividuelle Unterschiede bei den Kategorisierungen zu erklären (für eine Kritik an dieser Schlussfolgerung vgl. aber Nosofsky und Johansen 2000).

Erickson und Kruschke (1998) haben ebenfalls ein Modell vorgeschlagen, das eine Regel und eine Exemplarkomponente verknüpft. Bei der empirischen Überprüfung ihrer Theorie machten sich diese beiden Forscher einen wichtigen Vorzug abstrakter Regeln bei der Generalisation des erlernten Wissens zunutze: Regeln erlauben die Extrapolation auf Exemplare, die nicht im Bereich der Lernexemplare liegen. Dies lässt sich am besten an einem artifiziellen Beispiel verdeutlichen (vgl. auch Marcus 1998). Angenommen, wir haben gelernt, dass ein Rechteck immer zu Kategorie A gehört, wenn seine Länge doppelt so hoch ist wie seine Breite; ansonsten gehört es zu Kategorie B. Nun kann es sein, dass wir in der Trainingsphase Rechtecke zwischen 1 und 20 cm Länge und Breite gesehen haben. Exemplartheorien haben kaum Probleme mit der Klassifikation neuer Rechtecke, die innerhalb dieses Trainingsbereichs (d. h. zwischen 1 und 20 cm) liegen. Sie sind in der Lage, Interpolationen durchzuführen.

Anders sieht es hingegen bei Rechtecken außerhalb des Trainingsbereichs aus (z. B. ein 80 cm langes und 40 cm breites Rechteck). Während wir auf der Basis der Regel eindeutig sagen können, dass dieses Rechteck zu Kategorie A gehört, würde eine Exemplartheorie vermutlich versagen, weil sie einfach versuchen würde, die Ähnlichkeit dieses neuen Exemplars zu den bereits gesehenen zu bestimmen. In ihren Experimenten konnten die beiden Forscher zeigen, dass sowohl regelbasierte Extrapolationen als auch exemplarbasierte Ähnlichkeitsvergleiche das Kategorisierungsverhalten steuern.

Explizite und implizite Regeln Der letzte Ansatz, der hier erwähnt werden soll, stellt eine Erweiterung der Theorie der Entscheidungsgrenzen dar. Ashby et al. (1998) haben eine durch neuropsychologische Daten inspirierte Theorie vorgeschlagen, die von zwei parallelen, miteinander in Wettbewerb stehenden Lernsystemen ausgeht (vgl. auch Ashby et al. 2001; Ashby und Ennis 2006). Dabei spielen die subcorticalen Basalganglien eine wichtige Rolle, die Input- und Output-Strukturen und dopaminproduzierende Zellen haben. Das *implizite System* operiert weitgehend jenseits des Bewusstseins und lernt Kategorien im Sinne der Theorie der Entscheidungsgrenzen (▶ Abschn. 11.2.1). Dieses System, das von Ashby und Mitarbeitern primär im Striatum (Putamen und Nucleus caudatus), dem Input-Bereich der Basalganglien, angesiedelt wird, fasst also Stimuli zu kategorialen Zonen zusammen. Das Striatum ist stark, insbesondere mit dem Cortex, vernetzt, woher es zahlreiche Inputs erhält. Die Entscheidungsgrenzen, die beim Lernen erworben werden, können komplexen (wenn auch manchmal suboptimalen) Funktionen entsprechen, die von den Lernenden zwar gelernt, aber nicht verbalisiert werden können. Ashby und Mitarbeiter gehen hier deshalb von implizitem (bzw. prozeduralem) Lernen aus. Ein Beispiel für eine Aufgabe, die eher von dem impliziten Lernsystem bewältigt werden kann, findet sich in ◘ Abb. 11.9. Solche Aufgaben erfordern die komplexe Verknüpfung mehrerer gewichteter Dimensionen, was die Kapazität des bewussten regelverarbeitenden Systems übersteigt.

Parallel zu diesem impliziten Lernsystem wird von Ashby und Mitarbeitern ein *explizites System* postuliert. Das explizite System verwendet dem Bewusstsein zugängliche Regelhypothesen, die relativ einfach verbalisierbar sind. Dabei kommen primär einfache Hypothesen infrage, die sich auf die trennbaren, leicht verbalisierbaren Dimensionen beziehen (also auf die Achsen im geometrischen Raum, der das Lernmaterial beschreibt, z. B. Länge, Breite). Eine solche Regel könnte beispielsweise lauten: „Antworte mit A, wenn das Rechteck eher eine große Länge hat." Ein weiteres Beispiel für eine Aufgabe, die sich leicht durch explizites Regellernen bearbeiten lässt, findet sich in ◘ Abb. 11.2. Hier müssen die Probanden lediglich lernen, dass sich die beiden Kategorien in der Farbe des Hintergrunds unterscheiden, auf dem die Stimuli präsentiert wurden. Es handelt sich also um eine einfache eindimensionale Regel.

Ashby et al. (1998) vermuten, dass die Auswahl der Regelhypothesen im Wesentlichen vom präfrontalen Cortex und dem anterioren Cingulum gesteuert wird, wobei sie annehmen, dass die exakten Entscheidungsgrenzen für jede Regel wiederum im Striatum (insbesondere dem Nucleus caudatus) bestimmt werden (◘ Abb. 11.9).

Ashby et al. (1998) haben diese Annahmen im Rahmen eines konnektionistischen Lernmodells (COVIS; *competition between verbal and implicit systems*) formalisiert, das von einem Wettbewerb zwischen dem expliziten und dem impliziten Lernsystem ausgeht. Während das implizite System optimale oder bei komplexen Aufgaben gelegentlich auch suboptimale, komplexe Entscheidungsgrenzen aus den Lerndaten abstrahiert, testet das explizite System verschiedene alternative Regelhypothesen. Diejenige explizite Hypothese setzt sich allmählich durch, die zur relativ größten Zahl korrekter Kategorisierungen führt. Die Kategorisierung der Objekte wird dann von beiden Systemen, dem expliziten und dem impliziten, beeinflusst, wobei dasjenige System bei der jeweiligen Kategorisierungsentscheidung dominiert, das eine Entscheidung mit größerer Zuversicht zulässt. Es kann

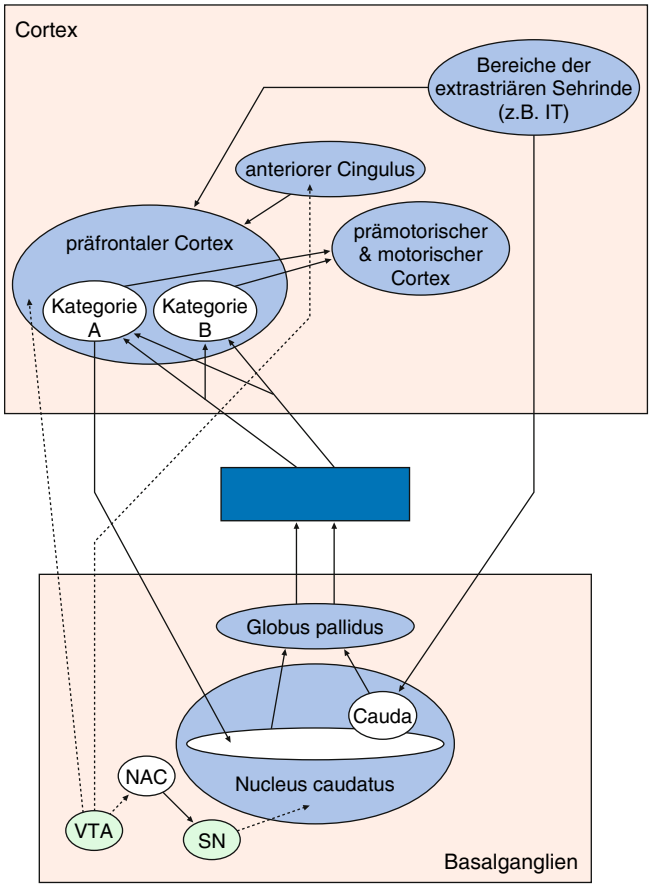


Abb. 11.9 Schematische Darstellung der neuropsychologischen Grundlagen von COVIS (Ashby et al. 1998). Die gestrichelten Linien bezeichnen Dopaminprojektionen. *VTA* = Area tegmentalis ventralis (*ventral tegmental area*), *SN* = Substantia nigra, *NAC* = Nucleus accumbens, *IT* = inferotemporaler Cortex. (Nach Ashby et al. 1998, Abb. 2)

also sein, dass manche Objekte eher vom expliziten, andere eher vom impliziten System kategorisiert werden.

In dem Grenzfall, dass die expliziten Hypothesen keine zutreffenden Kategorisierungen erlauben, werden alle Entscheidungen vom impliziten System getroffen. Eine interessante Vorhersage macht das Modell allerdings für den Fall, dass sich die Entscheidungsgrenzen des impliziten und des expliziten Systems unterscheiden, beide Systeme aber relativ gute Leistungen erbringen. Angenommen, die Aufgabe besteht darin, Rechtecke zu klassifizieren, und die optimale Entscheidungsgrenze wird durch eine Diagonale in dem zweidimensionalen Ähnlichkeitsraum festgelegt, der die Achsen Länge und Breite hat. Die dominierende verbale Hypothese, die ebenfalls viele akkurate Kategorisierungen erlaubt, liegt parallel zu einer der beiden Achsen, verwendet also eine der beiden Dimensionen allein. Für diesen Fall macht COVIS die interessante Vorhersage, dass die Entscheidungsgrenze, die vom Lernenden am Ende der Lernphase genutzt wird, eine Gerade sein sollte, die zwischen den beiden Geraden liegt, die vom impliziten und vom expliziten System generiert wurden. Es sollte sich also ein Kompromiss herausschälen. Diese Gerade ist flacher als die optimale implizite Entscheidungsfunktion und damit suboptimal. Ashby et al. (1998) haben tatsächlich in einem Experiment solche suboptimalen Entscheidungsgrenzen nachgewiesen (für eine alternative Sicht dieser Befunde vgl. aber Nosofsky und Johansen 2000).

Eine Reihe von experimentellen Befunden mit Verhaltenslernmaßen spricht für die Existenz paralleler Systeme. Die typische Forschungsstrategie ist es, nach einer Variable zu suchen, die nur eines der beiden Systeme beeinflusst, aber das andere unberührt lässt. So haben beispielsweise Zeithamova und Maddox (2006) gezeigt, dass eine Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch eine Zweitaufgabe die Leistung des bewussten expliziten, aber nicht des impliziten Lernsystems beeinträchtigt. Eine andere Vorhersage der Theorie, die sich ebenfalls bestätigen ließ, besagt, dass ein zeitlicher Abstand von beispielsweise 2,5 s zwischen Lernexemplar und Rückmeldung über die Richtigkeit der Kategorisierungsentscheidung nur das implizite, aber nicht das explizite System beeinträchtigen sollte (Maddox und Ing 2005). Dies liegt daran, dass beim bewussten Regellernen das Arbeitsgedächtnis genutzt wird, das den zeitlichen Abstand überbrücken kann, während beim impliziten prozeduralen Lernen eine raumzeitliche Nähe der relevanten Informationen erforderlich ist.

Trotz dieser Befunde, die für eine Zwei-System-Theorie sprechen, mehren sich in den letzten Jahren kritische Stimmen, die argumentieren, dass man die vorliegenden Befunde auch mit Theorien erklären kann, die nur von einem einzelnen System ausgehen (z. B. Lewandowsky et al. 2012; Newell et al. 2011; Stanton und Nosofsky 2007). Bisher hat sich keine der beiden konkurrierenden Positionen klar durchgesetzt.

Neurowissenschaftliche Evidenz für multiple Systeme Neuropsychologische Untersuchungen mit Patienten und Studien mit bildgebenden Verfahren haben in den letzten Jahren zusätzliche Hinweise auf die Existenz multipler Kategorisierungssysteme gegeben (Überblick in Seger und Miller 2010). Generell entsteht das Bild, dass bei jeder Aufgabe mehrere Gehirnbereiche zusammenwirken, dass es aber auch aufgabenspezifische Muster gibt. So haben Smith et al. (1998) eine Kategorisierungsbedingung, in der eine bestimmte Regel anzuwenden war, mit einer Kontrollbedingung verglichen, in der erwartet wurde, dass die Versuchsteilnehmer eher auf Exemplarvergleiche zurückgreifen würden. Die Aufgabe wurde ursprünglich von Allen und Brooks (1991) entwickelt und untersucht. Während des Lernens wurde eine Positronenemissionstomografie (PET; ▶ Kap. 2) durchgeführt, die zeigte, dass bei beiden Aufgaben eine große Zahl von Gehirnregionen aktiv war. Ein interessanter Befund war, dass in der Regelbedingung 14 von 23 signifikant aktiven Regionen nur in dieser Bedingung aktiviert waren. Zu den spezifischen Regionen gehören der linke Parietallappen und der präfrontale Cortex – Bereiche, die mit selektiver Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis in Zusammenhang gebracht werden. Dieses Muster ist konsistent mit der Annahme, dass *Regellernen* ein bewusster, analytischer Prozess ist, während *Exemplarlernen* eher auf visuell-perzeptive Areale und Gedächtnisregionen rekurriert.

Während Smith et al. (1998) zwischen Regel- und Exemplarlernen unterscheiden, verwenden andere Forscher eher die Dichotomie zwischen **explizitem** und **implizitem Kategorienlernen** (Ashby et al. 1998; Ashby und Ell 2001; Ashby und Ennis 2006). Abb. 11.9 veranschaulicht die neurowissenschaftlichen Grundlagen, die der Architektur des von Ashby et al. (1998) ent-

wickelten konnektionistischen Lernmodells COVIS zugrunde gelegt wurden. Explizites Lernen entspricht weitgehend bewusstem Regellernen. Ashby und Ell (2001) kommen aufgrund eines Literaturüberblicks zur Schlussfolgerung, dass explizites Lernen wesentlich durch ein Zusammenspiel zwischen präfrontalem Cortex und dem Striatum (insbesondere dem Nucleus caudatus) gesteuert wird.

Dass implizites Kategorienlernen jenseits des Bewusstseins und expliziter Regellernprozesse möglich ist, haben neuropsychologische Studien mit Amnestikern gezeigt, die aufgrund von Schädigungen der medial-temporalen (z. B. Hippocampus) oder diencephalischen Areale keine bewusste (explizite) Erinnerung an die Lernitems hatten. Trotz dieses Defizits zeigte sich in einer Prototypenlernaufgabe mit artifiziellem Lernmaterial, dass die Amnestiker nahezu ebenso gut wie Gesunde in der Lage waren, die Kategorisierungsaufgabe zu lernen (Knowlton und Squire 1993).

Welche Bereiche sind nun aber für das implizite Lernen verantwortlich? In den letzten Jahren zeigte eine Reihe von Befunden, dass es keinen einheitlichen Gehirnbereich gibt, der für implizites Lernen verantwortlich ist, sondern dass man eher davon ausgehen muss, dass es aufgabenabhängige Interaktionen gibt. So werden einfache motorische Assoziationsprozesse mit dem Cerebellum in Zusammenhang gebracht, während bei der Konditionierung emotionaler Reize die Amygdala eine wichtige Rolle spielt (Beggs et al. 1999).

Was nun den Bereich des impliziten Lernens von Kategorien betrifft, mehren sich Befunde, die von einer Beteiligung des Striatum, der Input-Region der Basalganglien, ausgehen (Übersicht in Ashby et al. 1998; Ashby und Ell 2001). In einer neuropsychologischen Studie von Knowlton et al. (1996a), in der die Probanden lernen sollten, probabilistische Hinweisreize (Muster auf Karten) für die Vorhersage einer fiktiven Wetterlage zu nutzen, zeigte sich, dass Amnestiker gut in der Lage waren, diese Aufgabe zu meistern. An der Parkinson-Krankheit leidende Patienten hingegen, die mit einer neuronalen Degeneration der Substantia nigra und des Striatum einhergeht, lernten die Aufgabe nicht. Sie waren im Gegensatz zur Amnestikergruppe hingegen in der Lage, sich an die Items in einer Wiedererkennensaufgabe bewusst zu erinnern. Stützende Befunde für die Beteiligung des Striatum beim Kategorisieren ergab auch eine Studie mit Patienten, die an der Huntington'schen Erkrankung litten, die ebenfalls das Striatum schädigt. Auch diese Patienten waren nicht in der Lage, die probabilistische Wettervorhersageaufgabe zu lernen, obwohl sie eine andere implizite Lernaufgabe, den Erwerb von Regeln einer artifiziellen Grammatik, lernen konnten (Knowlton et al. 1996b).

Belege für die Rolle des Zusammenspiels eines expliziten und eines impliziten Lernsystems stammen auch aus einer Studie von Poldrack et al. (1999), die die Wettervorhersageaufgabe bei gesunden Probanden eingesetzt und während des Lernens eine funktionale Kernspintomografie (fMRI; ▶ Kap. 2) durchgeführt haben. Diese Studie deutet auf ein Zusammenwirken des linken, dorsolateralen präfrontalen Cortex und des Striatum (insbesondere des Nucleus caudatus), wobei mit zunehmendem Lernen die Aktivierung des präfrontalen Bereichs schwächer wurde. Ashby et al. (1998) sehen dies als Beleg für ihre Hypothese, dass am Anfang des Lernens das explizite, verbale System dominiert, während später die Verarbeitung vom impliziten System übernommen wird. Neuere Studien an Parkinsonpatienten aus der Arbeitsgruppe um Ashby qualifizieren diese Befunde (Ashby und Ennis 2006). Während leichte Aufgaben auch von Parkinsonpatienten zu bewältigen sind, scheitern diese primär an komplexen impliziten oder an regelbasierten Aufgaben, bei denen viele irrelevante Merkmale mittels selektiver Aufmerksamkeit ausgeblendet werden müssen (Ashby et al. 2003; Filoteo et al. 2005; Price et al. 2009). Dies erklären Ashby und Mitarbeiter mit den spezifischen Schädigungen des Striatum bei Parkinsonpatienten, die sich von denen bei Huntingtonpatienten unterscheiden, die im Allgemeinen generelle Lerndefizite aufweisen.

Im Vergleich zur dominierenden Rolle des präfrontalen Cortex bei expliziten und den Basalganglien bei impliziten und expliziten Kategorienlernprozessen spielen andere Gehirnbereiche, die man mit Lernen in Verbindung bringt, eine eher untergeordnete Rolle. So konnten Knowlton et al. (1994) zeigen, dass die medialen Temporallappen, die eine bedeutende Rolle beim expliziten Erinnern spielen, in späten Phasen des Kategorienlernens involviert sein können, wenn die Probanden versuchen, sich die Lernexemplare einzeln einzuprägen. Der visuelle Cortex ist eine weitere Region, deren Aktivierung man bei Aufgaben nachweisen konnte, in denen Probanden visuell dargebotene Prototypenstrukturen (◘ Abb. 11.3) lernten, wie sie etwa von Posner und Keele (1968) untersucht wurden (Ashby und Ell 2001).

11.2.2 Kritik ähnlichkeitsbasierter Theorien

Die bisher besprochenen Theorien vereint die Grundannahme, dass Kategorisierung auf Ähnlichkeit basiert. Diejenigen Objekte und Ereignisse werden zusammengefasst, die sich untereinander ähnlich sind, und Kategorisierung beruht darauf, dass man die Ähnlichkeit zwischen neuen Objekten und den bereits vorhandenen Kategorien bestimmt.

Es mehren sich allerdings Stimmen, die die fundamentale Rolle von Ähnlichkeit infrage stellen (Medin et al. 2005; Goldstone und Son 2005). Ein Problem entsteht dadurch, dass Ähnlichkeit sehr variabel und kontextabhängig sein kann. So konnten Medin und Shoben (1988) zeigen, dass im Kontext von Haar die Farbe Grau als ähnlicher zu Weiß als zu Schwarz empfunden wird, während im Kontext von Wolken Grau näher an Schwarz heranrückt. Dies ist ein Beispiel von *Kontextsensitivität*, die durch Hintergrundtheorien über den der Haarfarbe zugrunde liegenden Alterungsprozess bzw. über die Beziehung der Wolkenfarbe zum Wetter erzeugt wird.

Ein noch radikaleres Beispiel von Kontextsensitivität stammt von Medin et al. (1993). In einer Studie wurde gezeigt, dass selbst die Art der Merkmale eines Objekts, die in einem Ähnlichkeitsvergleich berücksichtigt werden, davon abhängen kann, welche Merkmale das Vergleichsobjekt hat (◘ Abb. 11.10). Objekt B wird als dreizackig wahrgenommen, wenn es mit A verglichen wird, aber als vierzackig, wenn es mit C verglichen wird. Andere Beispiele von Kontextsensitivität wurden im Zusammenhang mit Tverskys (1977) einflussreichem *Kontrastmodell der Ähnlichkeit* untersucht. Dieses Modell geht davon aus, dass die Ähnlichkeit zweier Objekte eine gewichtete Funktion der gemeinsamen

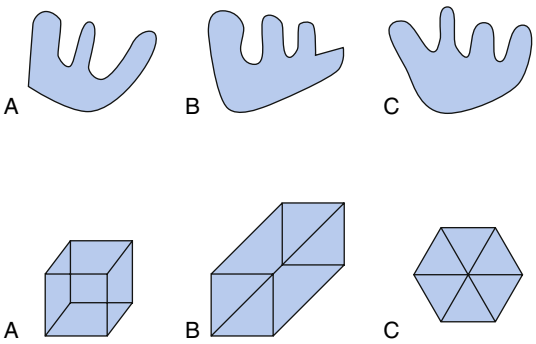


Abb. 11.10 Stimuli aus der Studie von Medin et al. (1993). Die Versuchsteilnehmer sahen bei jedem Set entweder Stimuli A und B oder B und C. Die Aufgabe bestand darin, die gemeinsamen und distinkten Merkmale zu nennen. (Aus Medin et al. 2005)

Merkmale und der für jedes Objekt distinkten, einzigartigen Merkmale ist, wobei Tversky folgende Funktion zugrunde legt:

$$S(\mathrm{A},\mathrm{B}) = \theta f(\mathrm{A} \cap \mathrm{B}) - \alpha f(\mathrm{A} - \mathrm{B}) - \beta f(\mathrm{B} - \mathrm{A}).$$

Diese Gleichung modelliert die Ähnlichkeit S von A und B als eine Funktion der gemeinsamen Merkmale (A ∩ B), der Merkmale von A, die B nicht hat (A–B) und der Merkmale von B, die A nicht hat (B–A), wobei f eine monoton wachsende Funktion ist und θ, α, β Gewichtungsparameter für die einzelnen Komponenten bezeichnen.

Tversky konnte zeigen, dass sowohl die Gewichtung der einzelnen Merkmale als auch die Gewichtung der für die beiden Objekte distinkten Merkmale variabel und kontextabhängig sind. So werden ein Amerikaner aus Maine und einer aus Florida als unähnlicher angesehen, wenn sie sich in Washington begegnen, als wenn sie sich in Tokio treffen. Ein anderes Beispiel sind Richtungsasymmetrien, die schwer vereinbar sind mit geometrischen Ähnlichkeitsmodellen, wie sie in vielen Kategorisierungsmodellen verwendet werden. Die Ähnlichkeit eines Granatapfels zu einem Apfel wird höher eingestuft als die Ähnlichkeit eines Apfels zu einem Granatapfel. Während geometrische Modelle von einer Symmetrie der Ähnlichkeit ausgehen, kann das Kontrastmodell diesen Befund erklären, wenn es von einer unterschiedlichen Gewichtung der distinkten Merkmale von Apfel und Granatapfel ausgeht (vgl. auch Goldstone und Son 2005; Smith 1995).

Philosophen haben auf ein weiteres Problem des Ähnlichkeitskonzepts aufmerksam gemacht (Goodman 1972). Solange man keine Einschränkungen für die Auswahl der Merkmale macht, kann man verschiedene Objekte beliebig ähnlich oder unähnlich machen. Die Anzahl gemeinsamer oder verschiedener Merkmale zweier Objekte ist grundsätzlich unendlich groß. Dies haben Murphy und Medin (1985) am Beispiel von Pflaumen und Rasenmäher demonstriert. Beide wiegen weniger als 1000 kg, hören schlecht, lassen sich auf der Erde finden, haben Teile und können von Elefanten getragen werden. Solche Merkmale werden natürlich von Versuchsteilnehmern nie genannt, was zeigt, dass die in Befragungsstudien (z. B. Rosch und Mervis 1975) ermittelten Merkmalslisten von Vorwissen und weiteren Faktoren abhängig sind und nicht einfach Auflistungen der objektiv möglichen Merkmale darstellen. Keil (1981) konnte dementsprechend zeigen, dass Versuchsteilnehmer wichtige Merkmale oft nicht nennen, obwohl sie ihr Kategorisierungsverhalten bestimmen. So finden sich die Merkmale „hat ein Herz", „atmet" und „ist ein physikalisches Objekt" selten in den frei generierten Listen von Versuchsteilnehmern, möglicherweise weil diese Merkmale als selbstverständlich angesehen werden.

Nicht alle ähnlichkeitsbasierten Theorien gehen davon aus, dass Kategorisierungen dieselbe Art von Ähnlichkeitsvergleich zugrunde liegt wie freien Ähnlichkeitsvergleichen, wie sie etwa Tversky (1977) modelliert hat (Nosofsky und Johansen 2000). Wie wir in ▶ Zur Vertiefung 11.1 bereits gesehen haben, postuliert das generalisierte Kontextmodell (GCM) beispielsweise, dass Kategorisierung eine selektive Aufmerksamkeit auf relevante Merkmale bedingen kann, was zu einer Verzerrung des zugrunde gelegten geometrischen Ähnlichkeitsraumes und damit zu einer Veränderung der Ähnlichkeitsbeziehungen führt (für empirische Evidenz vgl. auch Goldstone 1994a).

Die bisher diskutierten Ähnlichkeitsmodelle gehen alle von stabilen Merkmalen der Kategorienexemplare aus. Die Annahme stabiler Merkmale wurde in den letzten Jahren allerdings ebenfalls infrage gestellt. In einer Reihe von Experimenten konnte gezeigt werden, dass es auch lernabhängige (top-down) Einflüsse auf die Art der wahrgenommenen Merkmale gibt (Übersicht in Schyns et al. 1998). So fanden Goldstone und Steyvers (2001), dass in einer Aufgabe, in der die Versuchsteilnehmer lernten, computergenerierte Gesichter in vom Versuchsleiter vorgegebene Klassen einzuteilen, während des Lernprozesses neue, vorher nicht genutzte Gesichtermerkmale abstrahiert wurden, die den Lernprozess erleichterten (vgl. auch Schyns und Rodet 1997). Kategorien können also nicht nur die selektive Aufmerksamkeit steuern, sondern auch zu einer Neustrukturierung des repräsentierten Merkmalsraumes führen.

Abb. 11.11 zeigt das Material von Goldstone und Steyvers, das bezüglich der zwei künstlich generierten Dimensionen A und B angeordnet ist. Die Pole der beiden Dimensionen sind durch die Gesichter 1 bis 4 veranschaulicht. Die Stimuli in der *Mitte* sind gemorphte Mischungen dieser vier Gesichter. Für die Lernaufgabe wurden den Probanden in einem Experiment acht dieser Gesichter präsentiert, die in zwei beliebige Kategorien A und B klassifiziert werden sollten. Dabei verlief für verschiedene Versuchsgruppen die Kategoriengrenze entweder horizontal, sodass nur Dimension B relevant war, oder vertikal, sodass nur Dimension A relevant war. Den Probanden wurde eine große Zahl von Lerndurchgängen gezeigt, in denen sie die einzelnen Gesichter sahen und nach ihrer Kategorisierungsentscheidung (A oder B) eine Rückmeldung darüber erhielten, ob die vorgenommene Kategorisierung richtig oder falsch war. Die Forscher konnten zeigen, dass die Probanden nach etwa 200 Lerndurchgängen die künstlich erzeugten Dimensionen A und B gelernt hatten und bei neuen Kategorisierungen in Abhängigkeit von der Lernbedingung nutzten. Sie erlernten also neue dimensionale Merkmale, die sie vor dem Versuch noch nicht verwendet hatten, da diese neuen Merkmale die Probanden in die Lage versetzten, die Kategorien optimal zu differenzieren. Merkmalsrepräsentationen sind also nicht immer die Basis von Kategorisierung, sie können auch im Rahmen von Lernaufgaben erworben werden (vgl. auch Folstein et al. 2012).

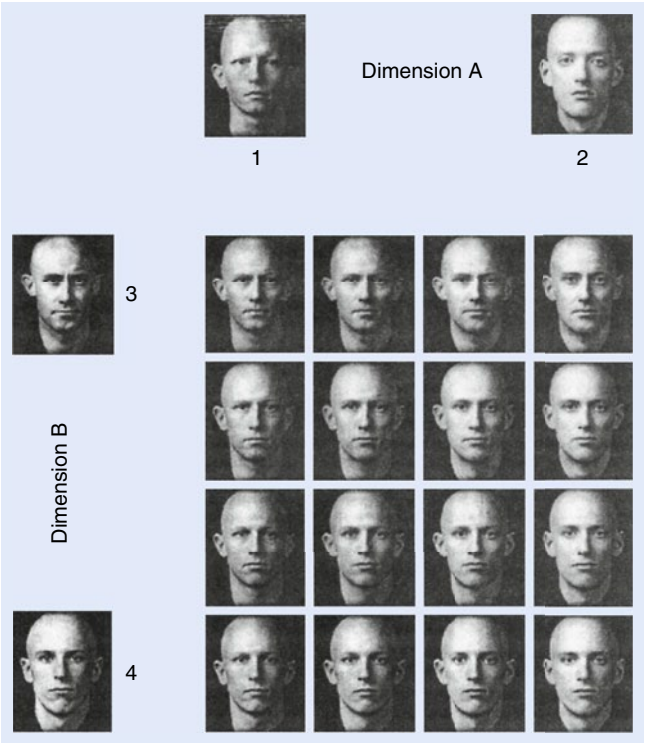


Abb. 11.11 Versuchsmaterial aus der Studie von Goldstone und Steyvers (2001, S. 120)

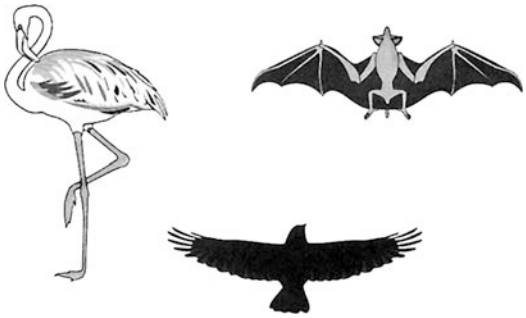


Abb. 11.12 Versuchsmaterial aus der Studie von Gelman und Markman (1986)

Selbst wenn es einmal möglich sein sollte, das Ähnlichkeitskonzept befriedigend zu beschreiben, bedeutet dies noch nicht, dass dadurch Kategorisierung vollständig beschrieben ist. Ein Beispiel für die mögliche Entkoppelung von Ähnlichkeit und Kategorisierung stammt von Rips (1989). Er hat Versuchsteilnehmer gebeten, sich ein rundes Objekt vorzustellen, das einen Durchmesser von 7,5 cm hat. Eine Gruppe wurde gebeten, die Ähnlichkeit dieses Objekts zu einem Geldstück (einem 25-Cent-Stück) und zu einer Pizza einzuschätzen, während eine andere Gruppe, die Kategorisierungsgruppe, gefragt wurde, ob das Objekt eher eine Pizza oder ein Geldstück sei. Die Befunde zeigten eine interessante Dissoziation. Während das Objekt als dem Geldstück ähnlicher empfunden wurde, gab die Kategorisierungsgruppe dennoch an, dass es vermutlich eher eine Pizza sei. Rips erklärt dies damit, dass die Versuchsteilnehmer Vorwissen nutzten, das ihnen sagte, dass die Größe einer Pizza flexibler sei als die von Geldstücken (vgl. auch Smith und Sloman 1994).

Ein weiteres Beispiel für die mögliche Entkoppelung von Ähnlichkeit und Kategorisierung stammt von Gelman und Markman (1986). Die beiden Forscherinnen legten Kindern Bilder von drei Tieren vor: einem Flamingo, einer Amsel und einer Fledermaus (Abb. 11.12), wobei die Amsel und die Fledermaus oberflächlich ähnlicher aussahen als die Amsel und der Flamingo. Wurde den Kindern gesagt, dass der Flamingo und die Amsel Vögel seien, also zu derselben Kategorie gehören, dann schlossen selbst Vierjährige, dass diese beiden Exemplare eher weitere, nicht sichtbare Merkmale (z. B. über die Fütterungsmethode) teilen als die beiden oberflächlich ähnlichen Tiere, die nicht als zur gleichen Kategorie gehörig bezeichnet wurden. Diese Studie zeigt, dass auch junge Kinder in der Lage sind, Oberflächenähnlichkeit zugunsten anderer Grundlagen der Kategorisierung zu ignorieren.

Zusammenfassung Die diskutierten Argumente zeigen, dass das Ähnlichkeitskonzept bislang keineswegs befriedigend theoretisch aufgeklärt ist. Ähnlichkeit ist nicht nur eine mögliche Ursache von Kategorien, es gibt auch Belege, die zeigen, dass sie ein Produkt von Kategorisierungsprozessen sein kann. Dies muss aber nicht bedeuten, dass man das Ähnlichkeitskonzept vollständig fallen lassen sollte. Viele Forscher gehen davon aus, dass basale, perzeptive Ähnlichkeitsvergleiche eine zentrale Rolle beim Kategorisieren spielen, selbst wenn wir noch keine vollständige Theorie dessen haben, wie diese Vergleiche genau vollzogen werden. Es ist aber klar, dass eine befriedigende theoretische Klärung des Konzepts der Ähnlichkeit eine schwierige, bisher nur ansatzweise gelöste Aufgabe für die aktuelle Forschung darstellt (vgl. auch Goldstone 1994b; Goldstone und Barsalou 1998; Goldstone und Son 2005; Medin et al. 1993; Smith und Samuelson 1997).

11.2.3 Die Theoriensicht

Die Probleme ähnlichkeitsbasierter Theorien haben eine Reihe von Kognitions- und auch kognitiven Entwicklungspsychologen zu einer alternativen Sichtweise gebracht, die davon ausgeht, dass Konzepte wissensbasiert sind und von intuitiven Theorien über die Welt beeinflusst werden (Carey 1985; Gopnik und Meltzoff 1997; Medin et al. 2005; Murphy und Medin 1985; Waldmann 1996a, b). Diese Beziehung wurde in den ähnlichkeitsbasierten Theorien, deren empirische Forschung häufig auf artifiziellem Lernmaterial beruhte, häufig nicht gesehen oder bewusst ausgeblendet. Sieht man sich aber natürliche Kategorien wie das Konzept „Lebewesen“ oder „Fahrzeug“ an, dann wird klar, dass man sich die Repräsentation solcher Kategorien nicht einfach als Bündel von unabhängigen Merkmalen vorstellen kann, sondern dass die Merkmale häufig durch kausale oder funktionale Relationen verknüpft sind. Die Merkmale „kann fliegen“ und „hat Flügel“ beim Konzept „Rotkehlchen“ stehen in einer relationalen Beziehung, die einen Teil unseres Konzeptwissens ausmacht.

Murphy und Medin (1985) gehen deshalb davon aus, dass Kategorisierung ein Prozess ist, der der Beziehung von wissenschaftlicher Theorie zu empirischen Daten eher entspricht als einfachen Ähnlichkeitsvergleichen. Kategorien spielen dabei die Rolle von intuitiven Theorien und die Lernexemplare die Rolle

von Daten, für die man entscheiden muss, ob sie zu der Theorie passen. Dabei geht es nicht nur darum zu bestimmen, ob in den Daten die von der Theorie geforderten Merkmale vorhanden sind, sondern auch darum zu entscheiden, ob die von der Theorie postulierten explanatorischen Relationen vorliegen. So sind wir beispielsweise in der Lage, das Konzept „Betrunkener" auf eine Person anzuwenden, die auf einer Party in einen Swimmingpool springt, weniger weil dies ein charakteristisches Merkmal von Betrunkenen ist, sondern weil wir eine abstrakte Theorie haben, die solches Verhalten als mögliche Konsequenz des Alkoholpegels erklärt (Medin et al. 2005).

Eine wichtige Besonderheit der Beziehung von Theorien und Daten ist, dass diese beiden Komponenten nicht unabhängig voneinander sind. Die Art und Weise, wie Daten beschrieben werden, ist zum Teil abhängig von den Theorien, die man an sie heranträgt. Dies hat eine Studie von Wisniewski und Medin (1994) gezeigt, in der Versuchsteilnehmer Kinderzeichnungen kategorisieren sollten (Abb. 11.13). Dabei zeigte sich, dass die Probanden andere Merkmale in den Zeichnungen fanden, wenn sie dachten, sie wären zum Teil von hochintelligenten Kindern produziert worden, als wenn sie die Hypothese hatten, dass sie von intellektuell normalen Kindern gezeichnet wurden. Ein Merkmal wie „ungewöhnliche und kreative Perspektive", das von manchen Versuchsteilnehmern verwendet wurde, die dachten, hochbegabte Kinder hätten die Bilder gezeichnet, ist ein hochtheoretischer Begriff, dessen Anwendung auf eine Kinderzeichnung eine Reihe von Inferenzen erfordert. Dieses Beispiel belegt erneut, dass Merkmale nicht objektiv vorfindliche Eigenschaften der Daten sind, sondern eine Konstruktion, die aus der Interaktion von Theorie (top-down) und Daten (bottom-up) resultiert.

Eine wichtige Funktion von Theorien ist, dass sie eine Begründung dafür liefern, warum wir bestimmte Kategorien haben und was ihre *Kohärenz* ausmacht. Eine Reihe von Untersuchungen hat gezeigt, dass man durch die Aktivierung von Vorwissen Lernende dazu bringen kann, eine kohärente Kategorie zu sehen, die sie ohne dieses Wissen eher nicht wahrgenommen hätten. Dabei stellte sich heraus, dass das Ausmaß von Kohärenz einen wichtigeren Einfluss auf die Lernschwierigkeit von Kategorien hat als abstrakte Merkmale des Lernmaterials wie etwa dessen lineare Trennbarkeit. Ein Beispiel dafür ist eine Studie von Wattenmaker et al. (1986). In dieser Untersuchung wurde Versuchsteilnehmern Lernmaterial vorgelegt, das nicht automatisch ein bestimmtes relevantes Vorwissen aktiviert. So sollten die Versuchsteilnehmer etwa Personen klassifizieren, die mithilfe von mehreren Verhaltensmerkmalen beschrieben wurden (z. B. „ging nie nach Einbruch der Dunkelheit in den Park"). Die Personenkategorien waren so konstruiert, dass sie entweder linear oder nichtlinear trennbar waren. Es zeigte sich, dass ohne weitere Instruktion die nichtlinearen Strukturen etwas leichter zu lernen waren. Wurde den Versuchsteilnehmern allerdings gesagt, bei einer der beiden Klassen handle es sich um Personen, die einen bestimmten Charakterzug hatten (z. B. Ehrlichkeit), dann war die linear trennbare Struktur leichter zu lernen. Diese Struktur war so konstruiert, dass sich alle Merkmale in einer Kategorie häuften, die typisch waren für den erwähnten Charakterzug. Das Aufsummieren von Evidenz ist eine Strategie, die zu linear trennbaren Kategorien

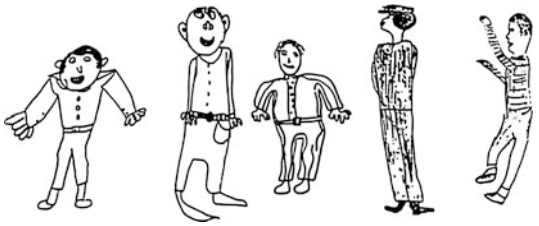


Abb. 11.13 Kinderzeichnungen aus der Studie von Wisniewski und Medin (1994), die von den Probanden kategorisiert werden sollten

führt. In diesem Experiment führte das Vorwissen also dazu, dass zunächst unverbunden erscheinende Merkmale einen gemeinsamen thematischen oder funktionalen Bezug erhielten.

Nicht jedes Wissen ist so strukturiert, dass es das Aufsummieren von Evidenz (und damit lineare Trennbarkeit) nahelegt. In einem weiteren Experiment haben Wattenmaker et al. (1986) Versuchsteilnehmern wiederum Beschreibungen unterschiedlicher Personen vorgelegt. Als alternative Merkmale wurden benutzt „arbeitet gerne innen" vs. „arbeitet gerne außen", „arbeitet in einer kleinen Gruppe" vs. „arbeitet in einer großen Gruppe", „arbeitet das ganze Jahr" vs. „arbeitet nicht im Winter". Die Aufgabe bestand darin zu lernen, welche der Personen Maler und welche Bauarbeiter sind. Das erste Merkmal jedes Merkmalspaares ist typisch für Maler, das zweite ist typisch für Bauarbeiter. Linear trennbare Kategorien, die in den beiden Klassen die typischen Merkmale der beiden Berufe enthielten, sollten deshalb vergleichsweise leicht zu lernen sein. Dies war auch einer der in diesem Experiment erzielten Befunde. Das Muster kehrte sich allerdings um, wenn man den Versuchsteilnehmern den Hinweis gab, dass es zwei Klassen von Malern gibt: Maler, die im Inneren arbeiten, und solche, die Außenarbeiten durchführen. Dieser Hinweis sensitivierte die Versuchsteilnehmer für Korrelationen zwischen dem ersten und dritten Merkmal. Maler, die im Inneren arbeiten, haben typischerweise die beiden Merkmale „arbeitet gerne innen" und „arbeitet das ganze Jahr", während die andere Klasse eher die Merkmale „arbeitet gerne außen" und „arbeitet nicht im Winter" hat. Für Versuchsteilnehmer, die den Hinweis auf die beiden Klassen von Malern erhielten, war nun die nichtlinear trennbare Struktur einfacher zu lernen, da diese Struktur die nahegelegte korrelative Beziehung zwischen den beiden Merkmalen verkörperte (vgl. auch Pazzani 1991).

Das eben geschilderte Experiment hat gezeigt, dass die relative Schwierigkeit verschiedener Kategorienstrukturen mit dem Vorwissen interagiert. Wattenmaker (1995) hat nun die Hypothese formuliert, dass es allgemeine bereichsspezifische Unterschiede der Kategorienstruktur gibt, die mit stabilen Strukturunterschieden zwischen verschiedenen Domänen zu tun haben. Er hat eine Reihe von Experimenten durchgeführt, die nahelegt, dass soziale Kategorien wie etwa Personenkategorien eher Theorien beinhalten, die mit linear trennbaren Kategorien verträglich sind. Kategorien wie „Wissenschaftler" oder „Extravertierter" sind häufig dadurch charakterisiert, dass man charakteristische Merkmale aufsummiert und umso eher die Kategorie anwendet, je mehr dieser Merkmale vorliegen. Anders sieht es aus in Objektdomänen. Eine Kategorie wie „Fahrzeug" ist eher durch komplexe Relationen zwischen den Merkmalen charakterisiert,

was dazu führt, dass lineare Trennbarkeit bei diesen Kategorien weniger häufig zu finden ist. Wattenmaker geht also davon aus, dass wir allgemeines Wissen über strukturelle Domänenunterschiede haben, die wir beim Lernen nutzen.

Die Bedeutung von Theorien bei der Kategorisierung wird auch durch Studien unterstrichen, die die zentrale Rolle aktiver Erklärungsprozesse beim Lernen deutlich machen. So haben Williams und Lombrozo (2013) gezeigt, dass der Einfluss von Vorwissen über die Kategorien beim Lernen und bei der Generalisierung auf neue Exemplare verstärkt wird, wenn die Probanden gebeten wurden, die Kategorienzugehörigkeit von Lernexemplaren aktiv zu erklären. Die Erklärungsprozesse führten dazu, dass relevante Merkmale ein stärkeres Gewicht erhielten.

Probleme der Theoriensicht Ein grundlegendes Defizit aktueller Untersuchungen zur Theoriensicht ist, dass nur ansatzweise klar ist, wie die zugrunde liegenden Annahmen in eine formal präzisierte Theorie zu übersetzen sind, die sich empirisch testen lässt. Im Gegensatz zu den formal stringenten Theorien ähnlichkeitsbasierter Ansätze liegen in diesem Bereich häufig nur qualitative Überlegungen vor (s. aber ▶ Abschn. 11.5 für erste Versuche in Richtung einer Theoriebildung).

Eine zweite offene Frage ist, wie man sich den Erwerb des Vorwissens vorstellen soll, das die Kategorisierungsprozesse beeinflusst. Ist es nicht die plausibelste Annahme, dass am Anfang des Lernprozesses ähnlichkeitsbasierte Konzepte stehen, die dann die Basis für komplexere theoretische Strukturen bilden? Manche Forscher sind deshalb der Meinung, dass die Theoriensicht vorschnell die Bedeutung ähnlichkeitsbasierter oder wahrnehmungsnaher Kategorien infrage gestellt hat (vgl. Goldstone 1994b; Smith und Samuelson 1997). Es gibt aber auch Ansätze, vorwiegend im Bereich der Entwicklungspsychologie (z. B. Carey 1985; Gopnik und Meltzoff 1997; Keil 1989), die davon ausgehen, dass die Annahme plausibler ist, dass quasitheoretisches Wissen den Lernprozess von Anfang an unser Lernen in der Ontogenese beeinflusst (▶ Zur Vertiefung 11.3).

Schließlich wurde auch kritisch eingewendet, dass das Ähnlichkeitskonzept im Rahmen der Theoriensicht vorschnell aufgegeben wurde (Goldstone 1994b; Hahn und Chater 1997). Es wird allerdings gefordert, dass man die klassischen, auf einfachen unabhängigen Merkmalen basierenden Ähnlichkeitstheorien zumindest erweitern muss. Die Studien zur Theoriensicht haben gezeigt, dass relationale Merkmale eine wichtige Rolle bei der Repräsentation von Konzepten spielen, die bei der Bestimmung von Ähnlichkeit eine große Bedeutung haben (Medin et al. 1993). Manche Konzepte wie „Barriere", „Falle" oder „Sieb" sind geradezu dadurch charakterisiert, dass der Kern ihrer Bedeutung durch Relationen zu anderen Objekten charakterisiert ist (Barr und Caplan 1987; Goldstone 1996; Goldwater und Markman 2011).

In manchen Untersuchungen wurde gezeigt, dass Relationen beim Ähnlichkeitsvergleich gelegentlich wichtiger sein können als die Merkmale, die durch diese Relationen verknüpft werden. Dies bringt den Ähnlichkeitsbegriff in Richtung des Konzepts von Analogien. Und tatsächlich finden sich in der Literatur Vorschläge, Theorien des analogen Transfers auf Konzepte anzuwenden (Gentner und Markman 1997).

11.3 Arten von Kategorien

Ein auffälliges Merkmal ähnlichkeitsbasierter Theorien ist, dass sie in der Regel nicht zwischen unterschiedlichen Typen von Kategorien unterscheiden. Die meisten Theorien, die im Rahmen dieses Ansatzes entwickelt wurden, gehen davon aus, dass es für die Modellierung von Kategorisierungsprozessen gleichgültig ist, worauf sich Kategorien beziehen. Konsequenterweise wurden häufig artifizielle Stimuli als Untersuchungsmaterial verwendet. Im Rahmen der Theoriensicht hingegen wurde zunehmend Interesse daran entwickelt, sich unterschiedliche Kategorien, die wir in unserem Alltag verwenden, genauer anzusehen, um die Frage zu untersuchen, ob verschiedene Inhaltsbereiche auch einhergehen mit Unterschieden in der Struktur und der Verarbeitung von Kategorien. In diesem Abschnitt werden nur einige wichtige Beispiele für Typen von Kategorien diskutiert (Überblick in Medin et al. 2000).

11.3.1 Natürliche Arten vs. Artefakte

Eine wichtige Unterscheidung, die im Rahmen der Theoriensicht gemacht wurde, ist die zwischen **natürlichen Arten** (*natural kinds*), die sich auf in der Natur vorfindliche Objekte wie Tiere, Mineralien, Pflanzen, Flüssigkeiten usw. beziehen, und **Artefakten**, die Objekte bezeichnen, die von Menschen geschaffen wurden (z. B. Auto, Regenschirm, Vase). Eine große Zahl von Untersuchungen hat sich mit der Frage auseinandergesetzt, ob diese beiden Objektbereiche unterschiedlich repräsentiert werden.

Natürliche Arten Viele Untersuchungen zu natürlichen Arten wurden von der Position des **psychologischen Essenzialismus** (Medin und Ortony 1989) inspiriert, die davon ausgeht, dass Menschen sich so verhalten, als hätten die Dinge, die sie umgeben, eine tiefer liegende Essenz, die sie zu den Dingen macht, die sie sind (vgl. auch Putnam 1975). Unabhängig davon, ob der Essenzialismus eine wissenschaftlich haltbare Position ist, lässt sich zeigen, dass Menschen in vielen Kulturen daran glauben, dass es tiefer liegende wesentliche Eigenschaften gibt, die die wahrnehmbaren Oberflächenmerkmale beeinflussen (Atran 1990, 1998). In unserer Kultur werden biologische Kategorien (z. B. „Geschlecht") mit genetischen Merkmalen zusammengebracht oder Objektkategorien mit chemischen Eigenschaften, die stärker als Oberflächenmerkmale über Kategorienzugehörigkeit entscheiden. Dabei muss man nicht davon ausgehen, dass wir genaue Vorstellungen von der Essenz haben. Für die Annahme des psychologischen Essenzialismus reicht es auch, dass wir an eine innere Essenz glauben (sozusagen an einen Essenz-Platzhalter), auch wenn wir sonst nichts darüber wissen (Gelman 2003).

Belege für psychologischen Essenzialismus wurden mit Studien beigebracht, die die Versuchsteilnehmer mit fiktiven Objekttransformationen konfrontierten. So konnte Rips (1989) zeigen, dass Probanden einen fiktiven Vogel, der durch Umweltgifte bedingt das Aussehen eines Insekts angenommen hat, zwar als dem Insekt ähnlicher einschätzen, ihn aber immer noch als Vogel bezeichnen würden. Ähnlich konnte Keil (1989) zeigen, dass ein Waschbär, dessen Äußeres so verändert wurde, dass er wie ein Stinktier aussieht, dennoch weiterhin als Waschbär

klassifiziert wird. Die Versuchsteilnehmer glaubten anscheinend, dass die inneren Merkmale wichtiger sind als das Äußere des Tieres. Schließlich lässt sich auch die bereits erwähnte Studie von Gelman und Markman (1986) im Sinne eines psychologischen Essenzialismus interpretieren. In ihr wurde gezeigt, dass bereits Vierjährige Inferenzen eher auf der Basis der Kategorienbezeichnung als auf der der äußerlichen Ähnlichkeit machen (◘ Abb. 11.12).

Obwohl diese Studien eindeutig die Bedeutung tiefer liegender Merkmale belegen, sind die Fragen, welche Rolle daneben die Oberflächenmerkmale spielen und wie homogen die angenommene Essenz ist, aktuelle Themen der Forschung (Rips 2001). Malt (1994) ist beispielsweise den Fragen nachgegangen, welche Flüssigkeiten Amerikaner im Alltag als Wasser bezeichnen, als wie typisch die unterschiedlichen Exemplare eingeschätzt werden und ob die Befunde durch eine essenzialistische Heuristik, die Wasser mit H_2O in Verbindung bringt, erklärbar sind. Der Hauptbefund dieser Studie ist, dass diese unterschiedlichen Maße für Kategorienzugehörigkeit nicht konvergieren. Tee wird beispielsweise nicht als Wasser bezeichnet, obgleich dieses Getränk von den Probanden mit einem höheren H_2O-Gehalt in Verbindung gebracht wird als Meerwasser, das als Wasser bezeichnet wird. Umgekehrt wird Mineralwasser, dem ein hoher Gehalt an H_2O zugeschrieben wird, eher als untypisches Wasser eingeschätzt. Diese Studie zeigt, dass andere Faktoren wie der Gebrauch, der typische Ort und die Quelle der Flüssigkeit einen ebenso wichtigen Einfluss auf die Kategorisierung haben wie die chemische Zusammensetzung (kritische Befunde in Hampton et al. 2007).

Strevens (2000) kritisiert den Essenzialismus ebenfalls. Er geht davon aus, dass man die meisten Befunde zum Essenzialismus damit erklären kann, dass die Probanden an innere, nicht beobachtbare Ursachen der beobachtbaren Merkmale glauben, ohne dass man unterstellen muss, dass sie diese inneren Ursachen mit einer Essenz in Verbindung bringen. Diese Position ist allerdings sehr nah an der Annahme von Essenz-Platzhaltern (vgl. auch Waldmann und Hagmayer 2006).

Neben der Annahme einer inneren Essenz spielen auch funktionale Merkmale eine wichtige Rolle bei der Kategorisierung von natürlichen Arten. So konnten Lombrozo und Rehder (2012) zeigen, dass Merkmale insbesondere dann als relevant angesehen wurden, wenn sie mit einer Erklärung eingeführt wurden, die ihre biologische Funktion deutlich machte (z. B. Camouflage als Funktion der Fellfarbe von Zebras). In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass bei natürlichen Arten funktionale im Unterschied zu anderen Merkmalen als hochdiagnostisch und evolutionsgeschichtlich stabil angesehen wurden. Dies erklärt ihre Bedeutung bei der Kategorisierung.

Artefakte Im Gegensatz zu natürlichen Arten werden Artefakte nicht mit einer inneren Essenz in Verbindung gebracht, sondern primär mit funktionalen Merkmalen. Ein Stuhl beispielsweise ist eher durch seine Funktion charakterisiert, eine Sitzgelegenheit zu schaffen, als durch die innere Zusammensetzung seines Materials. So konnten Barton und Komatsu (1989) beispielsweise zeigen, dass die Veränderung der molekularen Struktur (eine Ziege mit veränderten Chromosomen vs. ein Reifen, der nicht aus Gummi gemacht ist) eher die Kategorisierung der natürlichen Arten veränderte als die der Artefakte, während das Umgekehrte für funktionale Merkmale galt (eine Ziege, die keine Milch mehr gibt vs. ein Reifen, der nicht mehr rollen kann).

In den letzten Jahren gab es eine Debatte darüber, ob die objektive Funktion von Artefakten tatsächlich das entscheidende, charakterisierende Merkmal ist. So wurde vorgeschlagen, dass nicht die objektive Funktion, sondern die vom Macher des Objekts intendierte Funktion entscheidend ist. Ein kaputter Stuhl wird immer noch als Stuhl bezeichnet, und ein Objekt, das wie ein Regenschirm aussieht, aber von der Firma als Lampenschirm gedacht ist, wurde in Experimenten von Rips (1989) eher als Lampenschirm gesehen. Diese Theorie erklärt auch, warum wir Fußböden nicht als Stuhl oder Schatten als Uhren bezeichnen, obwohl diese die entsprechenden Funktionen unter Umständen erfüllen können.

Aber selbst diese Charakterisierung reicht nicht aus. Malt und Johnson (1992) haben gefunden, dass neben der intendierten Funktion auch die physikalischen Eigenschaften des Objekts entscheidend sind. So wird ein Gegenstand, der wie ein Boot aussieht und als Boot funktioniert, auch als Boot klassifiziert, selbst wenn man sagt, dass es nicht als solches vom Erbauer intendiert wurde. Umgekehrt wird eine Gummikugel, die an einer Gruppe von Delfinen befestigt wird, nicht als Boot angesehen, selbst wenn diese Anordnung diese Funktion erfüllt. Es sieht also so aus, dass bei der Klassifikation die Relation der intendierten Funktion zu dem Design des Objekts entscheidend ist (Bloom 2000). Ein Objekt wird dann als bestimmtes Artefakt kategorisiert, wenn sich sein Design am besten dadurch erklären lässt, dass man dem Erschaffer des Objekts eine bestimmte Intention unterstellt. Dies ist auch eine Form von Essenzialismus, aber ein Essenzialismus, der sich nicht auf materielle Eigenschaften, sondern auf inferierte Intentionen bezieht.

11.3.2 Kausale Kategorien

Eine andere Möglichkeit, die Unterschiede zwischen verschiedenen Kategorien wie natürlichen Arten und Artefakten zu begründen, besteht darin, dass man von Unterschieden in der zugrunde liegenden kausalen Struktur ausgeht. So hat Ahn (1998) die Hypothese formuliert, dass die Zentralität von Kategorienmerkmalen von ihrem *kausalen Status* abhängt (Überblick in Ahn und Kim 2001). Ahn geht davon aus, dass generell Merkmale, die Ursachen bezeichnen, eine größere Bedeutung haben als Merkmale, die Effekte bezeichnen. Zur Stützung dieser Hypothese haben Ahn et al. (2000) Probanden Kategorienexemplare mit drei Merkmalen vorgelegt (z. B. Tiere, die Früchte essen, klebrige Füße haben und Nester auf Bäumen bauen). Einem Teil der Versuchsteilnehmer wurde mitgeteilt, dass die drei Merkmale eine kausale Kette bilden. So wurde ihnen gesagt, dass das Essen von Früchten zu klebrigen Füßen führt, was es den Tieren erleichtert, Nester auf Bäumen zu bauen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Probanden neue Exemplare von Tieren, die nur zwei der drei kritischen Merkmale haben, eher als zu der Kategorie zugehörig einschätzten, wenn der terminale Effekt der Kette fehlt, als wenn die initiale Ursache fehlt, wobei die Befunde zum Fehlen

des mittleren Effekts dazwischenlagen (s. auch Anwendungsbeispiel in ▶ Abschn. 11.7).

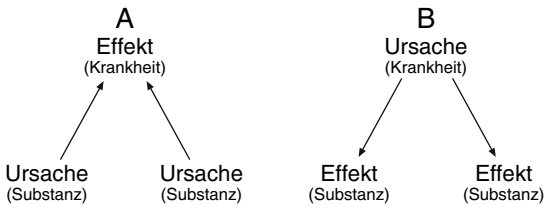
Die kausale Statushypothese ist allerdings nicht unumstritten. Rehder und Hastie (2001) haben eine Studie vorgelegt, die gezeigt hat, dass bei Kategorien, die multiple Ursachen eines gemeinsamen Effekts verknüpfen (wie etwa bei vielen Krankheiten), der Effekt zentraler ist als die alternativen Ursachen. Rehder und Kim (2006) replizierten diesen Befund und erklärten ihn als Konsequenz der stärkeren Aktivierung des Effekts, wenn mehrere im Vergleich zu einer einzelnen Ursache vorliegen. Auch andere Befunde dieser Studie stellen die kausale Statushypothese infrage.

Rehder und Kim (2010) haben deshalb der kausalen Statushypothese eine Kohärenzhypothese gegenübergestellt. Die Kohärenzhypothese besagt, dass bei kausalen Kategorien weniger das Vorliegen einzelner kausaler Merkmale (z. B. der Ursache), sondern das Vorhandensein von Mustern von Merkmalen entscheidend ist, die von dem Kausalmodell vorhergesagt werden. So sollte eine Ursache einhergehen mit ihren Effekten. Fehlen die Effekte, dann entsteht der Eindruck von Inkohärenz. Kategorien, die konsistent mit den Relationen sind, die von dem zugrunde liegenden Kausalmodell vorhergesagt werden, also kohärent sind, sollten dieser Hypothese zufolge als typischer eingeschätzt werden, was durch die Experimente von Rehder und Kim belegt wurde.

Der Einfluss von Kausalwissen wirkt sich auch auf andere Maße der Kategorienstruktur aus. So haben Medin et al. (1987) ihren Versuchsteilnehmern Exemplare von Begriffen vorgelegt, deren Merkmale in probabilistischer Beziehung zu zwei Kategorien standen. Die Aufgabe bestand darin, die Exemplare nach Belieben in zwei Kategorien zu sortieren. Dabei zeigte sich, dass die Versuchsteilnehmer eher auf der Basis korrelierter Symptome sortierten, wenn die Symptome kausal verknüpft werden konnten (z. B. Ohrenschmerzen – Schwindel), als wenn es sich um nicht kausal aufeinander beziehbare Symptome handelte (z. B. Halsschmerzen – Hautausschlag).

Schließlich konnte auch gezeigt werden, dass die kausale Struktur von Kategorien den Lernprozess beeinflusst. Murphy und Allopenna (1994) ließen ihre Probanden Kategorien von neuen Tieren lernen, die Merkmale hatten, die entweder kausal (z. B. scharfe Zähne – Fleischesser) oder nicht kausal (z. B. spitze Ohren – Flecken) verknüpft waren. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Kategorien mit kausal verknüpften Merkmalen schneller gelernt wurden als solche mit kausal unverbundenen Merkmalen und dass das Vorliegen kausal verbundener Merkmale einen großen Einfluss auf Typikalitätseinschätzungen hatte, selbst wenn die Merkmale eher selten vorkamen (vgl. auch Pazzani 1991).

Waldmann et al. (1995) gingen einen Schritt weiter. Während etwa die Studie von Murphy und Allopenna (1994) und ähnliche Untersuchungen den Einfluss von bereits vorhandenem bereichsspezifischen Wissen belegten, interessierten sich Waldmann et al. (1995) dafür, ob auch abstraktes Wissen über die Kausalstruktur den Lernprozess beeinflussen kann (vgl. auch Waldmann und Holyoak 1992; Waldmann 1996a, 1997, 2000, 2001). In diesen Experimenten erhielten die Versuchsteilnehmer generell identische Lernexemplare mit identischen Merkmalen und identischen Kategorien. Der einzige Unterschied bestand darin, ob die Merkmale als Ursache der Kategorien (*Gemeinsamer-Effekt-Modell*) oder als Effekte der Kategorien (*Gemeinsame-Ursache-Modell*) beschrieben wurden (◘ Abb. 11.14).



◘ **Abb. 11.14** Gemeinsamer-Effekt-Modell (**A**) mit mehreren Ursachen einer Krankheit vs. Gemeinsame-Ursache-Modell (**B**) mit mehreren Effekten einer Krankheit. (Waldmann 2000)

Ein konkretes Beispiel dafür sind etwa die Untersuchungen von Waldmann (2000), in denen die Probanden Informationen über das Vorhandensein oder die Abwesenheit von drei Substanzen im Blut einzelner Patienten erhielten. Die Aufgabe bestand darin, die Patienten in solche zu klassifizieren, die an einer neuartigen Blutkrankheit („Midosis") litten oder nicht erkrankt waren. Manipuliert wurde in den eingangs gegebenen Instruktionen, ob die Substanzen aus der Nahrung kamen und damit potenzielle Ursachen der Erkrankung waren (◘ Abb. 11.14A) oder ob gesagt wurde, dass die Substanzen von der Krankheit im Blut produziert würden, also Effekte seien (◘ Abb. 11.14B). Da weder die Substanzen näher charakterisiert waren noch die Krankheit bekannt war, hatten die Probanden kein Vorwissen über die Aufgabe. Der einzige Unterschied zwischen den Bedingungen bestand in der abstrakten Struktur des instruierten Kausalmodells.

In einer Reihe von Studien konnte gezeigt werden, dass identische Lernaufgaben zu unterschiedlichem Lernen führen in Abhängigkeit von der eingangs instruierten Kausalstruktur. So haben Waldmann et al. (1995) mit Merkmalen, die kontinuierlich variierten, gezeigt, dass die Probanden leichter eine nichtlinear trennbare Struktur mit korrelierten Merkmalen lernten, wenn sie dachten, die Merkmale repräsentierten Effekte; umgekehrt war die linear trennbare Struktur leichter, wenn die Lernenden dachten, die Merkmale wären Ursachen. Dieser Befund lässt sich aus der Struktur der kontrastierten Kausalmodelle vorhersagen. Während Gemeinsame-Ursache-Modelle eine Korrelation der durch die gemeinsame Ursache bedingten unabhängigen Effekte implizieren, drücken Gemeinsamer-Effekt-Modelle eher die Annahme aus, dass die alternativen Ursachen unabhängig voneinander den Effekt beeinflussen.

Andere Experimente zum Erwerb kausaler Kategorien (z. B. der oben beschriebenen fiktiven Krankheit) haben weitere Belege für den Einfluss von **Kausalmodellen** erbracht. So konnte gezeigt werden, dass die Versuchsteilnehmer davon ausgehen, dass mehrere Ursachen im Wettbewerb in Bezug auf die Erklärung des Effekts stehen, während mehrere Effekte einer gemeinsamen Ursache nicht miteinander im Wettbewerb in Bezug auf ihre diagnostische Aussagekraft sind (Waldmann und Holyoak 1992; Waldmann 2000, 2001; Waldmann et al. 2006). Diese Abhängigkeit der Kompetition der Kategorienmerkmale vom kausalen Status steht im Widerspruch zu den Annahmen assoziationistischer und konnektionistischer Lerntheorien, die in der Regel einen kompetitiven Lernmechanismus unabhängig von der Art

der Merkmale annehmen (nähere Erläuterung von kompetitivem Lernen in ▶ Abschn. 11.5).

Belege für die Rolle von Kausalmodellen auf die Kategorisierung stammen auch von Rehder (2003a, b; Rehder und Hastie 2001; Rehder und Kim 2006). Ähnlich wie Waldmann et al. (1995) fand er Belege für Sensitivität für Merkmalskorrelationen, die sich aus der Struktur der Kausalmodelle ergaben. Außerdem konnte er zeigen, dass die eingeschätzte Typikalität von Exemplaren davon abhing, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie von dem zugrunde gelegten Kausalmodell generiert werden konnten. Zusammengenommen belegen diese Untersuchungen, dass nicht nur bereichsspezifisches Wissen den Lernprozess beeinflussen kann, sondern auch vergleichsweise abstraktes Wissen über die Struktur von Kausalmodellen (vgl. auch Rips 2001).

Kausalmodelle beschreiben nicht nur die interne Repräsentationsstruktur natürlicher Kategorien, sie können auch erklären, warum wir bestimmte Kategorien gegenüber Alternativen bevorzugen. So haben Lien und Cheng (2000) experimentell gezeigt, dass Probanden diejenigen Kategorien bevorzugt lernen, die ihnen die beste kausale Vorhersage ermöglichen. So präferieren wir beispielsweise Krankheitskategorien, die uns die beste Vorhersage von Symptomen ermöglichen, gegenüber solchen mit schwächerer Vorhersagekraft (vgl. auch Kemp et al. 2010).

Während die bisher beschriebenen Studien in diesem Abschnitt die Frage ins Auge fassten, wie vorhandene kausale Theorien das Lernen und die Nutzung von Kategorien beeinflussen, haben Waldmann und Hagmayer (2006) die umgekehrte Frage gestellt, ob die Art der bereits vorhandenen Kategorien nicht auch einen Einfluss darauf hat, welche kausalen Theorien gelernt werden. Ein vereinfachtes Beispiel erläutert diese Frage. Angenommen, wir beobachten in einer Lernaufgabe, dass rote und große Früchte eine neuartige Allergie hervorrufen, während grüne und kleine zu keiner Krankheit führen. Nun werden wir gefragt, ob eine neue rote und kleine Frucht eher zu der Allergie führen wird oder nicht. Waldmann und Hagmayer (2006) konnten mit komplexeren Aufgaben zeigen, dass die Beantwortung dieser Frage davon abhängt, ob wir zuvor gelernt haben, Früchte eher nach Farbe oder eher nach Größe zu kategorisieren. Bei Kategorisierung nach Farbe sollte man schließen, dass voraussichtlich ein kausaler Effekt eintreten wird, während bei Kategorisierung nach Größe die umgekehrte Schlussfolgerung resultieren sollte. Trotz gleicher kausaler Beobachtungen tendieren wir zu unterschiedlichen Antworten in Abhängigkeit davon, wie wir unsere Welt kategorisieren. Dabei übernehmen wir allerdings nicht generell früher gelernte Kategorien. Beliebige Kategorien, die keinen inhaltlichen Bezug zu dem kausalen Effekt haben, werden nicht berücksichtigt. Sagen wir etwa ein Krankheitssymptom vorher (z. B. Allergie), dann greifen wir auf Kategorien von natürlichen Arten zurück, die potenzielle Verursacher von Krankheiten sind (z. B. Viren), während wir Kategorien vernachlässigen, die nichts mit Krankheiten zu tun haben. Waldmann und Hagmayer (2006) interpretieren dies als einen weiteren Beleg für den psychologischen Essenzialismus (vgl. auch Hagmayer et al. 2011). Insgesamt zeigen die Studien zu kausalen Kategorien, dass die Beziehung zwischen Kausalwissen und Kategorienbildung bidirektional ist.

11.3.3 Andere Arten von Kategorien

Die Kategorienforschung hat viele Jahre so getan, als seien Objektkategorien, die sich durch Nomen benennen lassen, die einzige Art von Kategorien. In den letzten Jahren kommen aber zunehmend auch andere Kategorientypen in den Blick, die andere Theorien erfordern. So haben Gentner (1981) und Mitarbeiter ihr Augenmerk auf die Unterscheidung zwischen Nomen und Verben gelegt. Während Nomen eher Cluster von korrelierten Merkmalen bezeichnen, die zu perzeptuellen Chunks führen, beziehen sich Verbkategorien eher auf zeitlich ausgedehnte Ereignisse, die kausale Relationen zwischen Objekten, Aktivität oder Veränderungen codieren (vgl. auch Kersten 1998; Zaki und Homa 1999).

Ereignisbezogene Relationen wurden auch in der Arbeitsgruppe von Klix und van der Meer (Klix et al. 1987; van der Meer 1986) untersucht. In diesen Studien wurde gezeigt, dass zwischenbegriffliche Relationen häufig als „Geschehenstypen" in Form ereignisbezogener Netzwerke repräsentiert werden. Der Geschehenstyp Schule wird etwa als Netzwerk konzeptualisiert, in denen die Konzepte „Lehrer", „Schüler", „Unterricht", „Wissen", „Pause" usw. durch ereignisbezogene Relationen verknüpft sind (vgl. auch Barsalou und Sewell 1985; Waldmann 1990). Lin und Murphy (2001) haben ebenfalls in einer groß angelegten Studie gezeigt, dass die herkömmliche Sicht, Kategorien bei Erwachsenen seien vorzugsweise als taxonomische Hierarchien abgespeichert, falsch ist. In einer Serie von zehn Experimenten konnten sie zeigen, dass thematische, ereignisbezogene Relationen (z. B. Hund – Knochen) einen deutlichen Einfluss auf Kategorisierungsverhalten (z. B. Sortieren, induktives Denken, Kategorisierungsentscheidungen) haben. Bei vielen Probanden hatten diese Relationen einen stärkeren Einfluss als die entsprechenden taxonomischen Beziehungen (z. B. Hund – Katze).

Ein weiterer Bereich, der bisher kaum untersucht ist, sind abstrakte Kategorien wie „Gerechtigkeit" oder „Zeit". Hierzu gibt es wenig Forschung. Ein Ansatz postuliert, dass solche Begriffe in Analogie zu konkreten, perzeptiven Kategorien verstanden werden (Barsalou 1999; Lakoff und Johnson 1980). So gibt es Belege dafür, dass wir in vielen Fällen das Konzept der „Zeit" mit Rückgriff auf räumliche Beziehungen verstehen.

Eine wichtige aktuelle Debatte betrifft die Frage, ob Kategorien nach Inhaltsbereichen differenziert werden müssen. Während die traditionellen Ansätze der Kognitionspsychologie davon ausgingen, dass die Repräsentation und Verarbeitung von Kategorien weitgehend unabhängig vom konkreten Inhalt sind, den die Kategorien bezeichnen, findet sich seit einigen Jahren gehäuft die Position in der Literatur, dass es angeborene bereichsspezifische Constraints gibt, die den Lernprozess steuern. Dieser Ansatz wird vor allem von Entwicklungspsychologen vertreten (▶ Zur Vertiefung 11.3). Auch neuropsychologische Untersuchungen liegen zur Frage der Domänenspezifität kategorialen Wissens vor (▶ Zur Vertiefung 11.4).

11.4 Relationen zwischen Kategorien

Kategorien existieren nicht isoliert, sondern sie stehen in Relationen zu anderen Kategorien. Schwerpunkt der bisherigen

Zur Vertiefung 11.3

Domänenspezifität von Kategorien – entwicklungspsychologische Evidenz

Während sich die Mehrzahl kognitionspsychologischer Theorien der Vorstellung von bereichsübergreifenden Lernmechanismen, die Wissen in ganz unterschiedlichen Bereichen erwerben können, verbunden fühlt, haben sich viele kognitive Entwicklungspsychologen einem anderen Trend in den Kognitionswissenschaften angeschlossen. Basierend auf evolutionspsychologischen Überlegungen wurde die Annahme solcher Allzweckmechanismen infrage gestellt. Das Gehirn wird hier eher in Analogie zu einem Schweizer Taschenmesser als System gesehen, das aus spezialisierten Mechanismen besteht, die auf spezifische Domänen beschränkt sind (Tooby und Cosmides 1992). Lernen und Konzepterwerb werden demnach nicht durch allgemeine Mechanismen gesteuert, sondern durch bereichsspezifische Prinzipien und Vorannahmen angeleitet (Überblick in Hirschfeld und Gelman 1994; ▶ Zur Vertiefung 11.4).

Ein Kriterium für die Abgrenzung von Domänen ist, ob die jeweiligen Konzepte und Kategorien in unterschiedliche Arten kausaler Erklärungsmuster eingebettet sind. Auf der Basis dieses Kriteriums hat eine Reihe von Psychologen postuliert, dass es angeborenes Wissen über allgemeine Bereiche wie Physik, Biologie oder Psychologie gibt (Carey 1985; Gelman 2003; Gopnik und Meltzoff 1997; Keil 1989; Waldmann 1996b; Wellman und Gelman 1992). Dieses Wissen ist im Säuglingsalter zunächst nur sehr allgemein und unvollständig, bietet aber einen konzeptuellen Rahmen für den Erwerb weiteren spezifischeren Wissens. So haben beispielsweise Säuglingsstudien gezeigt, dass bereits nach wenigen Monaten Wissen über manche Eigenschaften von physikalischen Objekten nachgewiesen werden kann, wie etwa darüber, dass sich Objekte gegenseitig nicht durchdringen können oder dass Kontakt bei der Übertragung kausaler Kräfte nötig ist (Baillargeon 1998; Spelke et al. 1992; Gopnik und Meltzoff 1997). Darüber hinaus können Säuglinge Lebewesen von unbelebten Objekten u. a. auf der Basis dessen unterscheiden, dass sich Lebewesen selbstständig fortbewegen und sich gegenseitig über eine Distanz beeinflussen können (Spelke et al. 1995; vgl. auch Pauen 2000).

Eine aktuelle Debatte in diesem Forschungsfeld betrifft die Frage, ob in der frühen Kindheit zwischen Psychologie und Biologie unterschieden wird. Während Carey (1985) davon ausgeht, dass junge Kinder biologische Eigenschaften im Rahmen einer intuitiven Psychologie organisieren, bei der alle Induktionen am Menschen als Prototyp ausgerichtet sind, postuliert Keil (1989), dass es neben einer frühkindlichen Psychologie auch eine, wenngleich sehr rudimentäre, Biologie gibt. So konnten Springer und Keil (1989) zeigen, dass Vorschulkinder denken, dass sich biologische, aber nicht psychologische Merkmale vererben lassen. Neuere interkulturelle Studien deuten ebenfalls darauf hin, dass die von Carey gefundene Entwicklungsabfolge nur in westlichen industriellen Gesellschaften zu finden und damit kulturabhängig ist (Medin et al. 2010).

Obgleich nativistische Positionen in der Entwicklungspsychologie eine große Bedeutung haben, gibt es auch eine Reihe von Gegenpositionen, die die Annahme von angeborenem Bereichswissen und das Herunterspielen bereichsübergreifender, auf Ähnlichkeit basierender Mechanismen kritisiert (z. B. Jones und Smith 1993; Smith und Samuelson 1997). So kann in der Regel selbst bei Säuglingsstudien nicht ausgeschlossen werden, dass rudimentäres Wissen in den ersten Monaten gelernt wurde (anstatt angeboren zu sein). Auch die Frage, wie Domänen voneinander abzugrenzen sind, ist angesichts vieler Ähnlichkeiten und Überlappungen der Domänen schwierig. Selbst wenn man von angeborenem Domänenwissen ausgeht, ist noch weitgehend unklar, wie Wissen und Kategorien im Rahmen von Domänen genau erworben werden, welche Form von Transfer und Interaktion es zwischen Domänen gibt und welche Rolle domänenübergreifende Kompetenzen spielen (z. B. kausales, logisches oder mathematisches Denken; vgl. auch Medin et al. 2000).

Forschung zu diesem Thema sind taxonomische Beziehungen. Es lassen sich aber auch andere Strukturen auf der Basis anderer Relationstypen postulieren. So können Begriffe kausal oder funktional verknüpft sein (▶ Abschn. 11.3), sie können in Teil-Ganzes-Beziehungen stehen oder Bestandteil typischer Ereignisfolgen sein (Hoffmann 1993). Im Folgenden werden die am häufigsten untersuchten Strukturen diskutiert (vgl. auch Medin et al. 2000; Medin et al. 2005).

11.4.1 Taxonomien

Häufig sind Kategorien taxonomisch auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen angeordnet. Auf jeder Ebene gehört ein Exemplar zu einer aus einer Reihe alternativer, wechselseitig sich ausschließender Kategorien (◘ Abb. 11.16). So kann ein Pudel als Hund, Säugetier und Lebewesen kategorisiert werden. Dies bedeutet gleichzeitig, dass der Hund kein Reptil oder keine Pflanze ist. Zwischen den Ebenen besteht *Klasseninklusion*. So sind alle Typen von Hunden Säugetiere, aber nicht alle Säugetiere Hunde.

Ein Beispiel für eine frühe, einflussreiche Theorie zur Repräsentation taxonomischen Wissens stammt von Collins und Quillian (1969). Diese Theorie geht davon aus, dass taxonomisches Wissen als hierarchisches Netzwerk von Knoten repräsentiert wird. Auf der obersten Ebene befinden sich Knoten, die übergeordnete Kategorien (z. B. „Tiere“) bezeichnen. Eine Ebene darunter sind dann die Knoten für die Kategorien, die den diesen untergeordneten Kategorien zugeordnet sind (z. B. „Vögel“, „Hunde“). Dann folgen die spezifischen Kategorien (z. B. „Rotkehlchen“, „Pudel“). Jedem Knoten sind diejenigen Eigenschaften zugeordnet, die auf die entsprechenden Kategorien und alle untergeordneten Kategorien zutreffen. „Fliegt“ steht beispielsweise beim Knoten „Vogel“ und trifft damit auch auf alle darunterliegenden Knoten zu. Sollte eine spezifische Vogelgattung (z. B. Straußenvogel) dieses Merkmal nicht aufweisen, kann man an der entsprechenden Stelle eine Ausnahme auflisten („fliegt nicht“). Die Annahme, dass Merkmale in der Regel nur einmal auf der höchsten Kategorienebene gespeichert werden, wurde aus Gründen der Sparsamkeit gemacht und in einer Vielzahl von Experimenten getestet (kritische Diskussion dieser Theorie in Rips et al. 2012).

Eine wichtige Beobachtung ist, dass es eine psychologisch privilegierte Ebene der **Taxonomien** gibt, bei der uns eine Reihe von Aufgaben am leichtesten fällt. Diese Ebene ist die mittlere Beschreibungsebene, die als Ebene der **Basiskategorien** bezeichnet wurde (Rosch et al. 1976b). Sehen wir beispielsweise ein bestimmtes vierbeiniges Tier, dann tendieren wir dazu, es primär als Hund und nicht als Tier oder als Pudel zu bezeichnen. „Hund“ ist eine Kategorie auf der Ebene der Basiskategorien, während „Tier“ eine übergeordnete und „Pudel“ eine untergeordnete Kategorie ist.

Zur Vertiefung 11.4

Kategorienspezifische Defizite

Beobachtungen an Patienten mit selektiven Gehirnschädigungen können Hinweise darauf geben, wie Kategorien repräsentiert werden (Übersicht in Mahon und Caramazza 2009). Eine wichtige Beobachtung ist, dass es Patienten gibt, die selektive kategorienspezifische Ausfallerscheinungen haben. So berichteten Warrington und Shallice (1984) über Patienten, die Schwierigkeiten hatten, Lebewesen (Tiere oder Pflanzen) zu identifizieren und zu benennen, während sie kaum Probleme mit unbelebten Dingen (z. B. Artefakten wie Schere, Uhr, Stuhl) hatten (vgl. auch Sartori und Job 1988). Auch der umgekehrte Fall mit besserer Performanz bei unbelebten Dingen als bei Lebewesen wurde berichtet, wenngleich solche Patienten deutlich seltener zu beobachten sind.

Wie kommt es zu diesen Asymmetrien? Eine Hypothese, die durch evolutionstheoretische Überlegungen motiviert ist, geht davon aus, dass die Fähigkeit, andere Lebewesen (z. B. Feinde oder Nahrungsmittel) schnell und effektiv zu erkennen, eine Möglichkeit darstellt, eine erhöhte Überlebenschance zu garantieren (▶ Zur Vertiefung 11.3). Dies könnte nach Ansicht einiger Forscher der Grund dafür sein, dass sich in unserem Gehirn in der Evolution lokationsweise neuroanatomische Subsysteme herausgebildet haben, die auf die Erkennung von Lebewesen spezialisiert sind (Caramazza und Shelton 1998). Diese Position postuliert also eine strikte Domänenspezifität des Kategorisierungssystems mit einer angeborenen Spezialisierung von Gehirnregionen auf inhaltliche Bereiche (◘ Abb. 11.15).

Häufiger wird in der Literatur allerdings die alternative Sicht vertreten, dass unterschiedliche Gehirnbereiche auf verschiedene Merkmalstypen spezialisiert sind. So haben Warrington und Shallice (1984) die Hypothese formuliert, dass sensorische Merkmale getrennt von funktionalen Merkmalen gespeichert werden. Ihrer Ansicht nach sind sensorisch-visuelle Merkmale (Form, Farbe usw.) wichtiger, um belebte Dinge (natürliche Arten) zu identifizieren, während funktionale Merkmale, die den Zweck eines Objekts bezeichnen, eine größere Rolle bei Artefakten spielen. Läsionen in Gehirnbereichen, die visuelle Merkmale codieren, sollten deshalb zu einem selektiven Defizit für Lebewesen führen. Eine ähnliche Sicht wurde auch von anderen Neuropsychologen vertreten. So geht etwa Damasio (1990) davon aus, dass Artefakte häufiger manipuliert werden als natürliche Arten, weshalb kinästhetische und motorische Merkmale bei der Repräsentation von Artefakten eine größere Rolle spielen sollten als bei Lebewesen.

Eine interessante Methode zur Modellierung von **kategorienspezifischen Defiziten** haben Farah und McClelland (1991) eingesetzt (◘ Abb. 11.15). Sie haben ein konnektionistisches Netzwerk entwickelt, das zwei periphere Input-Bereiche hat, eines, das verbale Benennungen produziert, und ein zweites, das Objekte visuell repräsentiert. Jedes Objekt und jede Benennung wurde durch eine verteilte Repräsentation auf 24 Knoten codiert. Diese beiden Bereiche sind nun mit einem semantischen System verbunden, das Knoten enthält, die entweder visuelle (links) oder funktionale (rechts) Merkmale repräsentieren. Beide Bereiche sind aber miteinander verknüpft. Auf der Basis einer empirischen Untersuchung gingen Farah und McClelland (1991) dabei von einem 3 : 1-Verhältnis für visuelle gegenüber funktionalen Merkmalen aus (60 visuelle, 20 funktionale) und von einem größeren Prozentsatz visueller Merkmale bei der Repräsentation von Lebewesen (7,7 : 1) im Vergleich zu Artefakten (1,4 : 1). Dieses Computermodell wurde zunächst trainiert, 20 Objekte zu benennen, indem man die Objekte auf der visuellen Input-Seite (rechts) und die Namen auf der verbalen Input-Seite (links) als Muster von Aktivierungen nacheinander paarweise encodierte. Für jedes der vorgegebenen Paare von Objekt und Namen wurden dann die assoziativen Verbindungen zwischen den Knoten nach einer konnektionistischen Lernregel (▶ Abschn. 11.5) so lange modifiziert, bis die 20 Objekte korrekt benannt wurden. Danach haben Farah und McClelland (1991) das Netzwerk selektiv „geschädigt", um den Einfluss von Gehirnläsionen zu simulieren. Das Modell reproduziert eine Reihe von Befunden aus der Literatur. So zeigt es Probleme bei der Identifikation von Lebewesen, wenn das visuelle System geschädigt ist, und Probleme bei Artefakten, wenn das funktionale System betroffen ist. Probleme mit der Benennung von Lebewesen waren allerdings deutlich häufiger, weil Artefakte auf der Basis visueller Merkmale selbst dann noch relativ gut identifiziert werden konnten, wenn alle funktionalen Merkmale ausfielen, während die Läsion des visuellen Systems für Lebewesen nicht durch andere Merkmale kompensiert werden konnte.

Auch der Versuch, kategorienspezifische Defizite durch eine Unterscheidung zwischen sensorischen und funktionalen Merkmalen zu erklären, ist nicht unumstritten. So haben Tyler und Moss (2001) ebenfalls ein konnektionistisches Modell entwickelt, das von einem einheitlichen Speicher ausgeht. Unterschiede zwischen Domänen erklären sie durch verschiedene Strukturen der Merkmalsverteilung. Lebewesen zeichnen sich durch eine größere Zahl gemeinsamer, überlappender Merkmale aus als Artefakte. Artefakte hingegen weisen eine größere Zahl an distinkten Merkmalen auf, die sie von anderen Artefakten unterscheiden. Hinzu kommt, dass bei Artefakten eine stärkere Korrelation zwischen funktionalen und sensorischen Merkmalen besteht (z. B. Form eines Messers – schneiden) als bei Lebewesen. Diese Unterschiede in der Struktur der Kategorien können selektive Defizite bedingen. So erklärt dieses Modell, warum Patienten Lebewesen häufig noch erkennen, aber nicht benennen können, weil Benennung den Zugriff auf distinkte Merkmale erfordert. Dieses Muster wird bei Artefakten weniger häufig beobachtet, da bei diesen distinkte und funktionale Merkmale stärker korreliert sind. Auch dieses Modell erklärt allerdings nicht alle Befunde. Zurzeit zeichnet sich die Sicht ab, dass kategorienspezifische Defizite eine Reihe ganz verschiedener Ursachen haben können, die in komplexer Weise zusammenwirken (für ein vergleichsweise komplexes Modell vgl. Humphreys und Forde 2001).

Eine Reihe von Studien hat die psychologische Sonderstellung der Basiskategorien belegt (Hoffmann 1993; Rosch et al. 1976b). So werden Objekte primär auf der Basisebene benannt. Sollen Probanden entscheiden, ob ein bestimmtes Objekt zu einer Kategorie gehört, dann gelingt ihnen dies in der Regel am schnellsten, wenn Basiskategorien verwendet werden. Basiskategorien sind auch die ersten Kategorien, die in der Entwicklung gelernt werden (Mervis und Crisafi 1982; Weinert und Waldmann 1988).

Es gibt unterschiedliche Annahmen darüber, was Basiskategorien auszeichnet. Rosch et al. (1976b) gehen davon aus, dass Basiskategorien eine besonders hohe Familienähnlichkeit aufweisen. So sind sich Hunde im Vergleich zu Tieren untereinander vergleichsweise ähnlich, während der Ähnlichkeitszuwachs, der auf der untergeordneten Ebene (Pudel) erreicht wird, relativ gering ist. Andere haben darauf hingewiesen, dass auf dieser Ebene die Vorhersagbarkeit zwischen Merkmalen und Kategorien sowohl in die Merkmals-Kategorien-Richtung (*cue validity*) als auch in die Kategorien-Merkmals-Richtung (*category validity*) simultan besonders groß ist (Corter und Gluck 1992). Schließlich wurde darauf hingewiesen, dass Basiskategorien die höchste Ebene von Objekten darstellen, die auf der globalen Ebene gleichartig aussehen (Hoffmann und Zießler 1982, 1983), die relativ viele gleichartige Teile aufweisen (z. B.

Zur Vertiefung 11.4 (*Fortsetzung*)

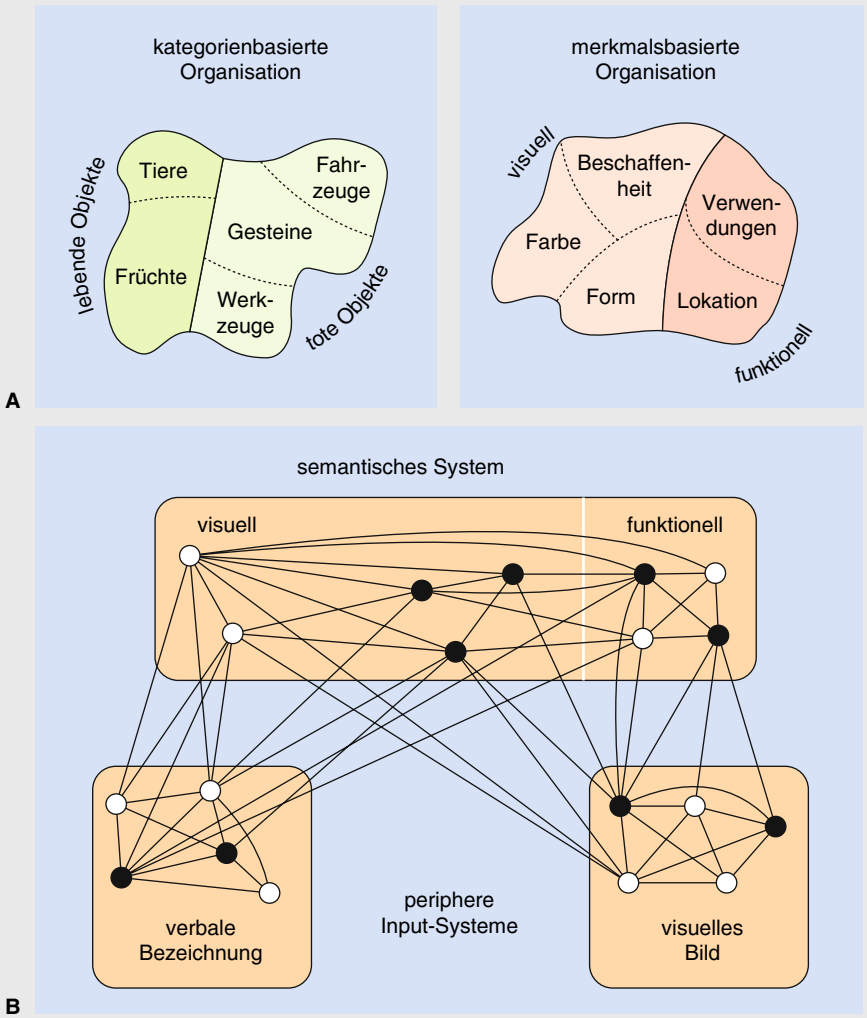


Abb. 11.15 **A** Zwei Hypothesen zur Organisation von semantischem Wissen: Kategorienbasierte Organisation unterstellt, dass verschiedene Inhaltsbereiche in unterschiedlichen Gehirnregionen abgespeichert sind. Merkmalsbasierte Organisation hingegen geht von einer Lokalisation verschiedener Merkmalstypen aus. **B** Architektur des konnektionistischen Modells von Farah und McClelland (1991). (Nach Gazzaniga et al. 1998)

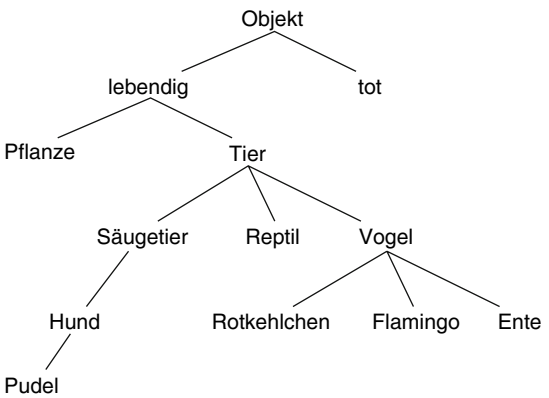


Abb. 11.16 Taxonomische Hierarchie zwischen Kategorien. (Nach Medin et al. 2005)

Autos, aber nicht alle Fahrzeuge haben Räder; Tversky und Hemenway 1984) und die gleichartigen Zwecken dienen (Murphy und Wisniewski 1989).

Es gibt allerdings einige Evidenz dafür, dass die Basisebene mit dem Ausmaß von Expertise in einem Bereich variieren kann. So sind Hunde die Basisebene für die meisten Menschen, während sich für Experten in einem Bereich die Basisebene auf die untergeordnete Ebene (z. B. Pudel) verschiebt (Tanaka und Taylor 1991). Die Basisebene scheint also auch vom Vorwissen der Kategorisierer beeinflusst zu werden. Diese Hypothese ist auch konsistent mit einer Reihe von interkulturellen Studien. Während Rosch et al. (1976b) für amerikanische Studenten gefunden haben, dass die Basisebene auf der Ebene von Kategorien wie „Vogel", „Hund" oder „Baum" liegt, haben Anthropologen die Entdeckung gemacht, dass in anderen Kulturen (z. B. die Itzaj-Maya) häufig die für uns untergeordnete Ebene („Rotkehlchen", „Pudel", „Eiche") die primäre Ebene der Kategorisierung ist (Atran 1990; Berlin et al. 1973). Eine mögliche Erklärung für diese Divergenz mag sein, dass Menschen, die wie die Itzaj-Maya im Regenwald von Guatemala leben, Biologieexperten sind im Vergleich zu amerikanischen Studierenden.

Eine interessante Inkonsistenz zwischen diesen Überlegungen über den Einfluss von Expertise auf die Basisebene zeigt sich aber, wenn man ein anderes Maß für die Bestimmung der Basisebene verwendet. Coley et al. (1997) haben induktive Argumente von der Sorte „Alle Forellen haben Enzym X. Wie wahrscheinlich ist es, dass alle Fische Enzym X haben?“ untersucht (▶ Abschn. 11.6.4). Die Forschungsfrage war, welche Ebene induktiv privilegiert wird. Für amerikanische Versuchsteilnehmer wurde beispielsweise vorhergesagt, dass die Kategorie der Fische die Basisebene darstellt, für die die Probanden davon ausgehen sollten, dass sie viele Merkmale mit untergeordneten Kategorien teilt. Sie sollten also relativ zuversichtlich beim Schluss von Forellen auf Fische sein, diese Zuversicht sollte aber überproportional abfallen beim Schluss von der untergeordneten Ebene (Forelle) auf die vergleichsweise heterogene übergeordnete Ebene (Tiere). Bei den Itzaj-Maya hingegen erwartete man, dass die untergeordnete Ebene (z. B. Forelle) privilegiert sein sollte, wo für diese Population die Basisebene liegt. Für diese Gruppe wurde erwartet, dass sie zuversichtlich sein sollte, wenn es um die Generalisierung von Merkmalen von speziellen Forellentypen auf Forellen im Allgemeinen geht, aber ihre Zuversicht überproportional stark abfallen sollte bei Schlüssen auf die übergeordnete Kategorie der Fische. Im Widerspruch zu den Erwartungen fand sich allerdings, dass für beide Personengruppen die untergeordnete Ebene eine induktive Sonderstellung hatte. Auch amerikanische Studierende hatten überproportional mehr Zutrauen zu einem Schluss von speziellen Forellen auf alle Forellen als auf die Kategorie der Fische.

Dies ist angesichts der Unterschiede der Basisebene überraschend. Eine mögliche Erklärung für die Divergenz zwischen Basisebene und der induktiv privilegierten Ebene bei den Studierenden mag sein, dass diese zwar kein tieferes Wissen über Bäume und Tiere, aber dennoch Metawissen darüber haben, dass unterschiedliche Bäume viele Unterschiede haben dürften, auch wenn die Studierenden diese konkret nicht benennen können. Die Studie macht aber auch deutlich, dass Eigenschaften wie der Ort der Basisebene nicht aufgabeninvariant sind – ein Thema, das ausführlicher in ▶ Abschn. 11.6 besprochen wird.

11.4.2 Nichthierarchische Kategorienstrukturen

Viele Kategorien, die wir benutzen, lassen sich nicht in eine taxonomische Hierarchie bringen. Dies gilt vor allem für soziale Kategorien. So kann eine Person als „Frau“, „Liberale“, „Psychologin“ und „Tennisspielerin“ gleichzeitig kategorisiert werden, ohne dass es eine Über- oder Unterordnung gibt. Ein solches Nebeneinander möglicher Kategorien nennt man auch **Kreuzklassifikationen** (*cross classifications*). Angesichts dieser potenziellen Kompetition zwischen Kategorisierungen ist die Frage interessant, welche Kategorie wir bevorzugen. Srull und Wyer (1979) haben gezeigt, dass Häufigkeit und Rezenz der Kategorienaktivierung eine wichtige Rolle spielen. Sie konnten zeigen, dass eine Aufgabe, in der eine bestimmte Personenkategorie („feindselig“) nahegelegt wurde, dazu führte, dass in einer anderen Aufgabe eine Person später eher mit dieser Kategorie in Zusammenhang gebracht wurde, obwohl die beiden Aufgaben vollkommen unverbunden waren und die Informationen über diese Person auch anders hätten interpretiert werden können. Es gibt außerdem Hinweise darauf, dass manche der Kategorien automatisch, auch gegen den Willen der Versuchsteilnehmer, aktiviert werden (z. B. Rasse- oder Geschlechtsstereotype; Bargh 1994; Greenwald und Banaji 1995) und dass die Aktivierung einer Kategorie andere mögliche konkurrierende Kategorien hemmt (Macrae et al. 1994; Übersicht in Macrae und Bodenhausen 2000).

Ross und Murphy (1999) sind einem anderen Typ von Kreuzklassifikationen nachgegangen: der Konkurrenz zwischen taxonomischen und **ereignisbezogenen Kategorien**. So lassen sich Nahrungsmittel taxonomischen (z. B. „Getränke“, „Früchte“, „Gemüse“) als auch ereignisbezogenen Skriptkategorien (z. B. „Desserts“, „Snacks“, „Appetizer“, „Frühstück“) zuweisen. Die Studie zeigte, dass beide Kategorientypen generiert und genutzt wurden, wobei allerdings die taxonomischen Kategorien häufiger aktiviert wurden als die Skriptkategorien. Beide Kategorientypen wurden auch für induktive Schlüsse verwendet, wobei die Nutzung des jeweiligen Kategorientyps vom Typ der Inferenz abhing (▶ Abschn. 11.6). Die hier näher besprochenen Kategorienrelationen stellen nur zwei Beispiele aus der großen Zahl möglicher Relationen dar. Eine offene Frage dabei ist, wie man sich die Repräsentation und den Zugriff auf eine Wissensbasis vorstellen sollte, die alle diese gleichzeitig möglichen Relationen beinhaltet.

11.5 Der Erwerb von Kategorien

Bisher haben wir uns mit der Repräsentation und Nutzung bereits vorhandener Kategorien befasst. Offen bleibt dabei, wie diese Kategorien gelernt werden. Dazu wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Theorien entwickelt, die hier nur paradigmatisch diskutiert werden kann (vgl. auch Kruschke 2005; Medin und Heit 1999).

11.5.1 Konnektionistische Modelle

Die meisten Theorien des Erwerbs von Kategorien basieren auf der Konzeption ähnlichkeitsbasierter Theorien, die den Lernprozess unabhängig von Vorwissen modellieren. Dabei dominieren in den letzten Jahren **konnektionistische Lernmodelle**, die von assoziativen Lernprozessen ausgehen, wie man sie auch bei basalen Lernprozessen des klassischen und instrumentellen Konditionierens unterstellt (vgl. aber Anderson 1991; ▶ Kap. 10).

◘ Abb. 11.17 verdeutlicht einige alternative konnektionistische Modelle (vgl. auch Nosofsky et al. 1992): Modell I entspricht einer verallgemeinerten Form von Glucks und Bowers (1988a, b) Komponenten-Merkmals-Modell (*component-cue network model*). Auf der linken Seite befindet sich die Ebene der Input-Knoten, die die Merkmale des Lern-Inputs codieren (A, B, C). Dieses Modell sieht nur Codierungen der einfachen Merkmale vor. Auf der rechten Seite befinden sich die Output-Knoten R1 und R2, die beispielsweise zwei unterschiedliche Kategorien codieren können. Schließen diese Kategorien sich gegenseitig aus, kann man eine binäre Kategorisierungsentscheidung auch mit einem Knoten modellieren. Das Netzwerk reduziert sich

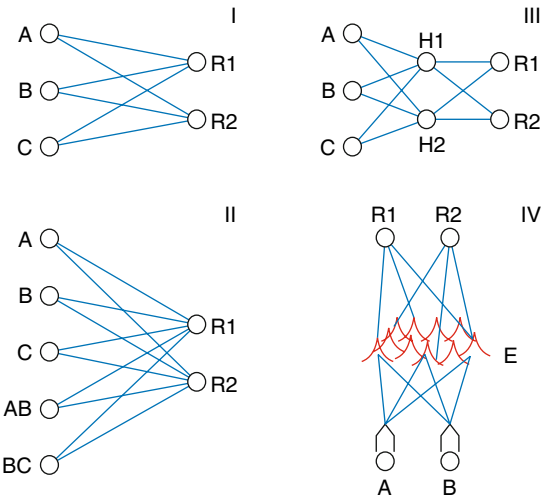


Abb. 11.17 Schematische Darstellung verschiedener konnektionistischer Netzwerkmodelle. *I* = Komponenten-Merkmals-Modell, *II* = konfigurales Merkmalsmodell, *III* = Backpropagation-Modell, *IV* = ALCOVE (*attention learning covering map*)

dann zu einer assoziativen Struktur, die mit dem Standardfall der Rescorla-Wagner-Theorie des klassischen Konditionierens (Rescorla und Wagner 1972; ▶ Kap. 10), einer der einflussreichsten Lerntheorien, korrespondiert. Ein Beispiel für eine Aufgabe sind Krankheitsklassifikationen, bei denen die Input-Knoten die jeweiligen Symptome eines Patienten codieren (z. B. Fieber, Übelkeit, Schnupfen) und der Output die zu diagnostizierende Krankheit (z. B. Grippe).

Die Assoziationsgewichte (Linien), die Input und Output verknüpfen, werden in diesen Modellen mit der Deltaregel gelernt. Gemäß dieser Regel wird der Output-Knoten bei jedem Lerndurchgang auf der Grundlage der Summe der Assoziationsgewichte der vorhandenen Merkmale, also beispielsweise der bei dem jeweiligen Patienten vorliegenden Symptome, aktiviert. Fehlerfrei ist der Lerndurchgang, wenn die Aktivierung des Output-Knotens 1 beträgt, wenn die Rückmeldung ergibt, dass die Krankheit bei dem Patienten tatsächlich vorliegt, und wenn die Aktivierung dieses Knotens 0 beträgt, wenn der Patient gemäß der Rückmeldung gesund ist. Fehlerfrei ist die Vorhersage also immer dann, wenn der durch die Symptome vorhergesagte Wert des Output-Knotens dem in der Rückmeldung vermittelten richtigen Wert entspricht. Weichen die vorhergesagten Werte davon ab, werden die Assoziationsgewichte der vorhandenen Symptome in Abhängigkeit von der Größe des Vorhersagefehlers in Richtung Minimierung dieses Fehlers modifiziert. Es handelt sich also um eine Fehlerkorrekturregel, die in Abhängigkeit davon Lernprozesse initiiert, wie überraschend die Kategorienrückmeldung (z. B. „der Patient ist gesund") im Vergleich zur Vorhersage auf der Basis der beobachteten Symptome ist. Es lässt sich zeigen, dass dieser Lernprozess bei linear trennbaren Prototypenkategorien am Ende des Lernprozesses zu fehlerfreien Klassifikationen führt.

Da die Output-Aktivierung immer auf der Basis der Summe der Assoziationsgewichte der vorhandenen Merkmale vorhergesagt wird, impliziert diese Regel Kompetition zwischen Merkmalen um die Vorhersage der Kategorie. Erlaubt eines der Merkmale beispielsweise nahezu perfekte Klassifikationen, dann werden die Gewichte der anderen Merkmale kaum verändert, auch wenn diese individuell sehr prädiktiv für die Kategorie wären (Diskussion kritischer Befunde in ▶ Abschn. 11.3; Waldmann 1996a).

Liegen mehrere Output-Knoten vor, benötigt man noch eine Wahlregel, die festlegt, wie die Reaktion bestimmt wird. Typischerweise werden die Output-Aktivierungen in eine Exponentialfunktion eingespeist. Die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Reaktion ist dann eine Funktion der relativen Stärke des jeweiligen Outputs (Nosofsky et al. 1992). Nosofsky (1992) sowie Massaro und Friedman (1990) haben bewiesen, dass Komponenten-Merkmals-Modelle an der Lernasymptote formal äquivalent sind mit denjenigen Prototypentheorien, die, ähnlich wie das generalisierte Kontextmodell (GCM), eine exponentielle Ähnlichkeitsregel verwenden (▶ Zur Vertiefung 11.1). Es gibt eine Reihe von Varianten des Komponenten-Merkmals-Modells (z. B. bezüglich der Codierung des Inputs, des Kontexts). Diese Modelle vereint, dass sie, ähnlich wie die einfache Rescorla-Wagner-Theorie und Prototypentheorien, nicht in der Lage sind, das Lernen nichtlinear trennbarer Kategorien zu erklären. Dies liegt primär daran, dass der Input nur einfache Merkmale codiert und nicht sensitiv ist für Merkmalskonfigurationen.

Dieses Defizit wird in Modell II behoben, dem von Gluck und Bower (1988b) vorgeschlagenen konfiguralen Merkmalsmodell (*configural-cue model*). Dieses Modell ist im Grunde eine Wiederauflage des *unique-cue model* von Rescorla (1973). Die einfache Deltaregel wird beibehalten, aber der Input wird um Knoten erweitert, die Merkmalskonfigurationen codieren (z. B. AB, BC). Ein Grundproblem dieses Modells ist die explosiv anwachsende Menge von Input-Knoten, wenn man nicht nur Konfigurationen von Paaren, sondern alle möglichen Konfigurationen (z. B. auch ABC) zulässt. Gluck und Bower (1988b) haben deshalb viele ihrer Simulationen mit der Restriktion versehen, nur paarweise Konfigurationen zuzulassen, was allerdings den Erwerb einer Dreifachinteraktion unmöglich macht.

Modell III in Abb. 11.17 repräsentiert einen Typ konnektionistischer Netzwerke, der zu den wichtigsten innerhalb der aktuellen konnektionistischen Bewegung gehört. Ähnlich wie die einfachen Netzwerke codieren diese komplexeren Netzwerke nur einfache Merkmale (A, B, C) auf der Input-Ebene. Auch die Output-Ebene ist vergleichbar. In dem Beispiel gibt es wieder zwei Reaktionsknoten, R1 und R2, die etwa zwei sich wechselseitig ausschließende Kategorien repräsentieren können. Neu ist die mittlere Ebene (*hidden layer*) mit vermittelnden Knoten (*hidden nodes*), H1 und H2. Diese Knoten können so trainiert werden, dass sie konfigurale Beziehungen im Input repräsentieren. Eine der einflussreichsten Lernregeln, die dafür entwickelt wurde, ist *Backpropagation* (Rumelhart et al. 1986). Backpropagation kann als Verallgemeinerung der Deltaregel angesehen werden. Backpropagation-Netzwerke besitzen typischerweise vermittelnde Knoten, deren Aktivierung einer linear-sigmoiden Funktion folgt. Die Aktivierung ist abhängig vom Input und den assoziativen Gewichten zwischen Input und den vermittelnden Knoten. Die Output-Aktivierung ist eine Funktion der Aktivierung der vermittelnden Knoten und der assoziativen Gewichte zwischen den beiden Ebenen. Analog zur Deltaregel werden die Gewichte

proportional zum Fehler am Output modifiziert. Dabei werden die Fehlerinformationen zunächst bis zur Ebene der vermittelnden Knoten und dann bis zur Input-Ebene zurückübertragen.

Dieses Modell ist in der Lage, konfigurale nichtlineare Aufgaben zu bewältigen (Rumelhart et al. 1986), an denen die früheren Modelle mit nur einer Input- und Output-Schicht gescheitert waren (Minsky und Papert 1969/1988). Gerade diese Leistung gehört zu den wichtigsten Gründen, warum konnektionistische Modelle neuerdings wieder ernst genommen werden, nachdem sie fast 20 Jahre in der kognitionspsychologischen Forschung wenig beachtet wurden. Backpropagation-Netzwerke haben also das Potenzial, schwierige konfigurale Aufgaben zu lernen. Aber sind sie auch ein plausibles psychologisches Modell für Lernprozesse?

Auf den ersten Blick erscheinen diese Modelle wenig vielversprechend. Eine ihrer augenfälligsten Eigenschaften ist, dass sie relativ viel Zeit benötigen, um manche konfigurale Aufgaben zu lösen, die Probanden eher leichtfallen (Nosofsky et al. 1994; Kruschke 1992). Ein weiteres Problem von Backpropagation-Modellen ist ihre Neigung zu *katastrophischer Interferenz* (McCloskey und Cohen 1989). Einmal Gelerntes wird schnell wieder vergessen, wenn neue, mit dem alten Lernmaterial inkompatible Lernaufgaben präsentiert werden. Die Ursache dafür liegt wiederum in der Aktivierungsfunktion der vermittelnden Knoten. Aufgrund ihrer linearen Kontur sind sie sensitiv für eine große Zahl von Input-Knoten. Dies führt sehr schnell dazu, dass eine große Zahl gelernter Gewichte in Richtung der neuen Beziehungen modifiziert wird (Kruschke 1992).

Eines der erfolgreichsten und einflussreichsten konnektionistischen Modelle menschlicher Kategorisierung ist Kruschkes (1992) ALCOVE-Modell (*attention learning covering map*). Es lässt sich als konnektionistische Implementation eines Exemplarmodells des Begriffslernens beschreiben, wobei es viele Annahmen des generalisierten Kontextmodells (GCM; Nosofsky 1986) implementiert (▶ Zur Vertiefung 11.1). Dabei werden die Annahmen von Exemplartheorien (insbesondere des GCM) mit konnektionistischen Lernmechanismen verknüpft.

Modell IV in ◘ Abb. 11.17 zeigt die Architektur von ALCOVE. Auf den ersten Blick handelt es sich um ein konnektionistisches Netzwerk, ähnlich wie es auch in den Backpropagation-Modellen Verwendung findet. Die Input-Ebene (A, B) aktiviert über vermittelnde Knoten (E1, E2) die beiden Reaktionsknoten R1 und R2. Auch die Lernregel ist ähnlich. Wieder wird eine von der Deltaregel abgeleitete Regel eingesetzt, bei der die assoziativen Gewichte in Abhängigkeit vom Fehler beim Output modifiziert werden. Zwischen den Gewichten besteht Kompetition. Der entscheidende Unterschied besteht in der Aktivierungsfunktion der vermittelnden Knoten und der Bedeutung der Gewichte.

Die vermittelnden Knoten (E1, E2) repräsentieren einzelne Lernexemplare. Für jedes Lernexemplar wird im Netzwerk ein eigener Knoten angelegt. Die Input-Knoten codieren die Ausprägungen der zu kategorisierenden Exemplare auf unterschiedlichen Merkmalsdimensionen. Greift man wieder auf eine geometrische Veranschaulichung zurück, kann man die Exemplarknoten als Punkte in einem von den Dimensionen aufgespannten Raum betrachten. Die Aktivierung der Exemplarknoten ist nun eine Funktion der Ähnlichkeit mit dem Lern-Input, wobei die im GCM verwendete exponentielle Ähnlichkeitsfunktion verwendet wird. Diese Funktion impliziert einen exponentiell abfallenden Ähnlichkeitsgradienten, was zu der diamantenen Form (in ◘ Abb. 11.17 nur zweidimensional) der rezeptiven Felder der Exemplarknoten führt. Anders als die linearen vermittelnden Knoten bei Backpropagation-Netzwerken besitzen die Exemplarknoten also nur ein eingeschränktes rezeptives Feld. Sie werden nur von Lern-Inputs aktiviert, die ihnen vergleichsweise ähnlich sind. Eine wichtige Eigenschaft ist dabei allerdings, dass das System interaktiv ist. Ein Lernexemplar aktiviert meistens nicht nur einen Exemplarknoten, sondern in Abhängigkeit von der Ähnlichkeit mehrere Knoten. Die Aktivierung der Exemplarknoten ist wiederum über assoziative Verbindungen mit den Reaktionsknoten auf der Output-Ebene verbunden.

Eine weitere Besonderheit von ALCOVE sind die an der Input-Ebene befindlichen Aufmerksamkeitsgewichte. Mithilfe dieser Gewichte lässt sich die psychologische Relevanz der unterschiedlichen Merkmalsdimensionen variieren. Denkt man an den geometrischen Merkmalsraum, dann bewirken diese Gewichte eine Dehnung oder Schrumpfung entlang der jeweiligen Dimensionsachse (▶ Zur Vertiefung 11.1). Wird die Achse aufgrund zunehmender selektiver Aufmerksamkeit gedehnt, dann bewirkt dies, dass die Lernexemplare entlang dieser Merkmalsdimension leichter diskriminierbar sind. Der Raum lässt sich allerdings nur entlang der Achsen dehnen, nicht in der Diagonale. Entscheidend ist nun, dass in ALCOVE nicht nur die assoziativen Gewichte zwischen Exemplarknoten und Reaktionsknoten gemäß der erweiterten Deltaregel gelernt werden, sondern auch die Aufmerksamkeitsgewichte. Ähnlich wie bei Backpropagation wird hier der beim Output erzielte Fehler als Modifikationsgrundlage für die Aufmerksamkeitsgewichte herangezogen. Gerade die Fähigkeit, in Abhängigkeit vom Lernmaterial die selektive Aufmerksamkeit zu optimieren, ist ein zentraler Grund für den Erfolg von ALCOVE bei der Simulation von Kategorienlernen.

ALCOVE wurde auf eine Vielzahl von Aufgaben aus der Kategorisierungsforschung mit vergleichsweise großem Erfolg angewandt (Kruschke 1992; Nosofsky und Kruschke 1992; Nosofsky et al. 1992), wenngleich es auch kritische Befunde gibt (z. B. Macho 1997). Um weitere Befunde, wie etwa die Interaktion von regelbasiertem und exemplarbasiertem Kategorisieren zu modellieren, hat Kruschke (2001) eine Reihe von erweiterten konnektionistischen Modellen entwickelt, die eine Exemplarlernkomponente mit zusätzlichen Lernmodulen verknüpfen (vgl. auch Erickson und Kruschke 1998; ▶ Abschn. 11.2).

Ein vielversprechendes neueres Modell des Kategorienlernens (SUSTAIN, Supervised and Unsupervised STratified Adaptive Incremental Network) wurde von Love et al. (2004) präsentiert. Anders als die bisher diskutierten Modelle kann SUSTAIN auch Kategorien bilden, wenn dem Lernenden keine Rückmeldung über die richtige Kategorienzugehörigkeit in der Lernphase gegeben wird (*Lernen ohne Supervision*). SUSTAIN organisiert die Lernexemplare in diesem Fall auf der Basis ihrer Ähnlichkeit. Dabei bevorzugt es zunächst einfache Clusterstrukturen. Es startet mit einem einzelnen Cluster, fügt dann aber weitere hinzu, wenn die Exemplare dem Anfangscluster nicht ähneln oder wenn eine Rückmeldung über die richtige Kategorienzugehörigkeit (*Lernen mit Supervision*) gegeben

wird. SUSTAIN kann also Lernen mit und ohne Supervision kombinieren. Ähnlich wie ALCOVE lernt SUSTAIN auch, die Aufmerksamkeit optimal auf Merkmalsdimensionen zu lenken. Da Lernen mit Supervision und ähnlichkeitsgesteuerte Kategorienbildung kombiniert werden, hängt das Resultat des Lernens auch von der Reihenfolge des Lern-Inputs und der Rückmeldungen ab. Damit kann es, anders als die bisher diskutierten Modelle, auch den Einfluss verschiedener Merkmale der Lernaufgabe und des pragmatischen Kontexts erfolgreich modellieren (z. B. Kategorien vs. Inferenzlernen; ausführliche Diskussion in ▶ Abschn. 11.6.1).

11.5.2 Wissensbasierte Lerntheorien

Angesichts der großen Zahl ausgearbeiteter ähnlichkeitsbasierter Lerntheorien ist es nicht verwunderlich, dass sich einige Modellierer bemüht haben, Wissenseffekte in diese Modelle zu integrieren (Heit 1997; Medin und Heit 1999). So haben beispielsweise Choi et al. (1993) einfache konnektionistische Modelle zugrunde gelegt und dabei die naheliegende Annahme getestet, dass im Fall von Vorwissen die Assoziationsgewichte nicht bei null starten, sondern bei Werten, die den früheren Lernerfahrungen entsprechen. Auf diese Weise ließen sich Vorwissenseffekte über einfache artifizielle Kategorien erklären; ihr Modell ist aber im Wesentlichen darauf beschränkt, Vorwissen über assoziative Beziehungen zwischen Merkmalen und Kategorie zu modellieren. Kruschke (1993) hat analog versucht, Vorwissen auf der Basis voreingestellter Aufmerksamkeitsgewichte in sein Modell ALCOVE zu integrieren.

Ein anderes Beispiel für diese Strategie, das auf Exemplartheorien basiert, ist die Integrationstheorie von Heit (1994). Dieses Modell geht von der Annahme aus, dass Kategorisierungsentscheidungen nicht nur auf aktuell erlebten Exemplaren beruhen, sondern dass Exemplare aus früheren, anderen Lernkontexten ebenfalls rekrutiert werden. Zieht man beispielsweise in eine neue Stadt und möchte entscheiden, ob eine Person ein Jogger ist, dann wird man gemäß dieser Theorie diese Person nicht nur mit anderen Joggern aus dieser Stadt vergleichen, sondern auch mit Joggern aus den anderen Städten, in denen man gelebt hat. Auf diese Weise können frühere Lernerfahrungen den aktuellen Lernprozess mit beeinflussen.

Ein Problem dieser Ansätze besteht allerdings darin, dass es nicht klar ist, welche Vorerfahrungen aktuell herangezogen werden. Außerdem ist es in diesen Theorien schwierig, komplexere Formen von Vorwissen wie etwa Wissen über Kausalität auszudrücken. Es wurden deshalb auch Modelle vorgeschlagen, die eher der Theoriensicht zuzurechnen sind. Eine aus der Künstlichen-Intelligenz-Forschung stammende Technik (*explanation-based learning*) verwendet Regeln, die theoretische Annahmen über die Kategorie ausdrücken. Kategorisierung besteht dann darin, dass man überprüft, ob das Lernexemplar die in der Theorie spezifizierten Bedingungen erfüllt (Mooney 1993; Pazzani 1991). Besagt meine Theorie über Becher etwa, dass sie in die Hand genommen werden können sollen, kann ich das Gewicht und das Vorhandensein eines Griffes als kritische Merkmale auszeichnen, auf die ich bei der Klassifikation achte. Bislang liegen allerdings nur wenige empirische Untersuchungen zu diesem Ansatz vor.

Ein Problem aller bisher diskutierten Ansätze besteht darin, dass sie spezifisches Vorwissen, das in früheren Lernkontexten erworben wurde, vergleichsweise gut berücksichtigen können, dass sie aber keine Möglichkeit bieten, abstraktes Vorwissen auszudrücken, wie es etwa Waldmann et al. (1995) für den Bereich kausaler Kategorien nachgewiesen haben (▶ Abschn. 11.3). Eine vielversprechende Möglichkeit, kausale Kategorien zu modellieren, bieten formale Methoden der Analyse von kausalen Netzwerken (Pearl 2000). Solche Bayes-Netzwerke, wie sie in einfachster Form in ◘ Abb. 11.14 zu sehen sind, vereinfachen die Repräsentation von Kausalwissen, weil sie es ermöglichen, die statistischen Beziehungen zwischen allen Merkmalspaaren auf der Basis von Wissen über die Stärke der Kausalpfeile und der Häufigkeiten der exogenen Ursachen abzuleiten. Da die Anzahl möglicher statistischer Relationen zwischen allen Ereignissen die Anzahl direkter Kausalbeziehungen und exogener Ursachen übersteigt, ergibt sich ein deutlicher computationaler Gewinn. Insbesondere ist es möglich, auch die indirekten Beziehungen abzuschätzen, wie etwa die statistische Beziehung zwischen mehreren Effekten einer gemeinsamen Ursache (Überblick in Hagmayer und Waldmann 2006; Waldmann und Hagmayer 2013). Waldmann et al. (1995) sowie Hagmayer und Waldmann (2000) haben gezeigt, dass Probanden tatsächlich sensitiv sind für solche strukturellen Implikationen von Kausalwissen (vgl. auch Rehder und Hastie 2001). Eine auf Bayes-Netzwerken basierende Lerntheorie wurde in den letzten Jahren von einer Reihe von Forschern als Modelle menschlichen Lernens vorgeschlagen (Gopnik et al. 2004; Oppenheimer et al. 2013; Lagnado et al. 2007; Rehder 2003a, b; Rehder und Kim 2010; Sloman 2005). Im Rahmen dieses Ansatzes wurden auch formale Modelle der Integration von kausalem Vorwissen und Lernen entwickelt, bei denen abstraktes Vorwissen über kausale Strukturen mit der Verarbeitung des Lern-Inputs interagieren (Lagnado et al. 2007; Tenenbaum und Griffiths 2007; Waldmann und Martignon 1998).

Insgesamt lässt sich also sagen, dass wissensbasiertes Lernen bisher nur ansatzweise modelliert wurde und ein Desiderat zukünftiger Forschung bleibt. Viele wichtige Aspekte von Wissen wie etwa die von Wisniewski und Medin (1994) nachgewiesene enge Koppelung zwischen Theorien und der Beschreibung der Daten werden bislang von keiner Theorie ins Auge gefasst.

11.6 Die Nutzung von Kategorien

Im Mittelpunkt der Kategorisierungsforschung steht von jeher die Frage, wie Kategorien gebildet werden und welche Eigenschaften sie haben. Dieser Forschungsstrategie liegt die Annahme zugrunde, dass Kategorien unabhängig von ihren Nutzungskontexten stabil und invariant sind. Begründet wurde diese Position häufig mit dem Argument von Rosch und Mervis (1975), dass unsere Konzepte mentale Repräsentationen von Merkmalskorrelationen sind, die sich objektiv in unserer Umwelt finden lassen. Diese naive Widerspiegelungstheorie wurde in den letzten Jahren zunehmend infrage gestellt (Überblick über die konkurrierenden Positionen in Malt 1995). So hat man begonnen zu untersuchen,

welche Funktionen Kategorien erfüllen können. Dabei hat sich herausgestellt, dass es häufig eine Wechselwirkung zwischen den Kontexten der Kategoriennutzung und der Kategorienstruktur gibt, die die traditionelle Strategie der Untersuchung von Kategorien infrage stellt. Auch ethnologische und anthropologische Untersuchungen über Kategorien in anderen Kulturen haben das Augenmerk zunehmend auf kontextuelle Einflussfaktoren gerichtet. Dabei wurde deutlich, dass Kategorisierung ein wesentlich komplexerer Prozess ist, als es frühere Theorien vermuten ließen (vgl. auch Solomon et al. 1999).

11.6.1 Der Einfluss von Zielen und pragmatischen Kontexten

Barsalou (1983, 1985, 1987) war einer der Ersten, der gezeigt hat, dass Kategorien ad hoc im Hinblick auf aktuelle Ziele gebildet werden können. Typische Beispiele solcher **Ad-hoc-Kategorien** sind etwa „Dinge, die man auf einen Campingtrip mitnimmt" oder „Dinge, die man aus einem brennenden Haus trägt". Barsalou konnte zeigen, dass solche Kategorien wie natürliche Kategorien Typikalitätsgradienten aufweisen. Die Basis solcher Einschätzungen sind allerdings nicht Ähnlichkeitsvergleiche zwischen den Exemplaren, sondern ein Vergleich mit einem Idealexemplar. Die Kategorie „Nahrung, die man bei einer Diät zu sich nimmt" wird beispielsweise mit dem Ideal von null Kalorien verglichen und nicht mit dem Prototyp der typischerweise verzehrten Diätnahrungsmittel. Ad-hoc-Kategorien sind allerdings, möglicherweise aufgrund ihrer seltenen Aktivierung und der geringeren Überlappung der Merkmale der Exemplare, weniger stabil und kohärent als die herkömmlicherweise untersuchten natürlichen Kategorien. Denkt man etwa an die Dinge, die man aus einem brennenden Haus trägt, dann lassen sich wenige Gemeinsamkeiten zwischen den Objekten finden, und die Kategorie würde einem spontan nicht in den Sinn kommen, wenn man diese Dinge vor Augen hätte (vgl. auch Kim und Murphy 2011).

Während Barsalou zielbezogene Kategorien nur als eine von mehreren Formen von Kategorisierung ansieht, vertritt Hoffmann (1993) die extreme Sicht, dass Kategorien generell funktional äquivalente Objekte zusammenfassen, die im Zusammenhang mit Handlungszielen austauschbar sind. Kategorisierung wird in diesem Ansatz also der antizipativen Handlungssteuerung untergeordnet.

Ein Beleg für den Einfluss von Handlungszielen, die mit unterschiedlichen Formen von Expertise einhergehen, sind die Studien von Medin et al. (1997). Diese Forscher haben Baumexperten untersucht und gefunden, dass Landschaftsgärtner Bäume anders sortieren als Biologen. Während die Biologen zu einer wissenschaftlichen Taxonomien entsprechenden Anordnung neigten, tendierten die Landschaftsgärtner dazu, die Bäume im Hinblick auf ihre Nutzung und Anordnung in Parkanlagen zu ordnen. Lynch et al. (2000) und Atran (1998) haben zudem gefunden, dass Baumexperten Typikalität anders einschätzen als Laien. Während Laien in der Regel den Prototypen mit mittleren Ausprägungen in allen Merkmalen als typischsten Baum ansehen, neigen Experten und auch Itzaj-Maya dazu, ein Ideal, etwa den größten Baum, als Vergleichsmaßstab heranzuziehen. Diese Studien zeigen, dass Ideale nicht nur bei Ad-hoc-Kategorien, sondern auch bei natürlichen Kategorien Typikalitätsurteile steuern können (vgl. auch Kim und Murphy 2011).

Weitere Belege für den Einfluss des Kontexts zeigen interkulturelle Studien im Bereich biologischen Wissens (Medin und Atran 2004). Bailenson et al. (2002) haben amerikanische Studierende und amerikanische Vogelexperten mit Probanden der Itzaj-Maya-Gruppe im Hinblick auf ihre Kategorisierung von Vögeln verglichen. Dabei zeigten sich große Ähnlichkeiten in der Kategorisierung zwischen den Vogelexperten und den Itzaj-Maya, die sich beide von den Studierenden unterschieden. Auch wenn die beiden ähnlichen Gruppen sich in den genauen Begründungen für die Kategorisierung unterschieden, könnte man aus diesen und den früheren interkulturellen Befunden schließen, dass nicht generelle kulturelle Unterschiede, sondern die Ausprägung von Expertise in einer Kultur der entscheidenden Faktor ist. Dieser Hypothese sind in einer weiteren Studie Medin et al. (2006) nachgegangen. Sie haben Wissen über Fische bei Experten aus verschiedenen amerikanischen Kulturbereichen (Mehrheitskultur vs. Menominee-Indianer) verglichen. Beide Gruppen hatten vergleichbar viel Erfahrung mit Fischen, sodass Unterschiede nicht auf Expertise zurückgeführt werden können. Die Befunde belegen eindeutig Kulturunterschiede. So zeigten die Sortierungen der Menominee-Indianer eine größere Berücksichtigung ökologischer Merkmale, wie der Orte, an denen die Fische zu finden sind. Die Beziehung zwischen Fischen wurden von dieser Gruppe auch eher reziprok und positiv (Fische helfen anderen Fischen) gesehen, während in der Mehrheitskultur der Bezug auf die Ziele der Fischer dominierte (vgl. auch Shafto und Coley 2003).

Ein Beispiel dafür, wie die Nutzung von Kategorien deren Repräsentation verändern kann, stammt aus den Untersuchungen von Ross (1997). In diesen Experimenten lernten Versuchsteilnehmer, fiktive Krankheiten auf der Basis von Symptomen zu klassifizieren. Nach der Diagnose der Erkrankung sollten sich die Probanden zusätzlich für eine Therapie entscheiden. Für diese Entscheidung waren nur einige der für die Diagnose relevanten Symptome wichtig. Sollten nun die Versuchsteilnehmer neue Patienten diagnostizieren, zeigte sich, dass sie nun den therapierelevanten Symptomen besondere Beachtung schenkten und sie für wichtiger und auch für häufiger vorkommend hielten als die für die Therapieentscheidung irrelevanten Symptome. Die Nutzung der Kategorien veränderte also die Repräsentation, obwohl Diagnose und Therapieentscheidung zunächst als unabhängig voneinander zu lernende Aufgaben eingeführt wurden. Ahn und Kim (2001) reinterpretieren diese Befunde allerdings im Hinblick auf Annahmen über Kausalität. Es wäre denkbar, dass die Probanden schlossen, dass die Symptome, die über die Therapie entscheiden, eher indikativ sind für die zentralen Ursachen der Erkrankung als die anderen Symptome, da es ja Ziel jeder Therapie ist, die Krankheit zu heilen und nicht nur einige Symptome zum Verschwinden zu bringen.

Markman und Ross (2003) plädierten auf der Grundlage dieser und ähnlicher Befunde dafür, mehr als bisher zu untersuchen, wie verschiedene Lernformen die Art der gebildeten Kategorien beeinflussen. Ein Beispiel für diese Forschung sind die Studien von Yamauchi und Markman (1998, 2000), die herkömmliche

Kategorisierungsaufgaben, bei denen die Probanden Exemplare Kategorien zuordnen sollten, mit Inferenzaufgaben verglichen, bei denen die Probanden von gegebenen Merkmalen und Kategorien andere Merkmale vorhersagen sollten. Ein Beispiel für die erste Aufgabe wäre, die politische Partei einer Person aus Informationen über Einstellungen zu Abtreibung und Genfood zu erschließen. Eine entsprechende Inferenzaufgabe wäre, die Einstellung zu Genfood aus der Parteizugehörigkeit und der Einstellung zu Abtreibung vorherzusagen. Trotz der großen Ähnlichkeit der Aufgaben zeigten sich deutliche psychologische Unterschiede. Während die Versuchsteilnehmer bei Kategorisierungsaufgaben besonders auf Merkmale achteten, die diagnostisch zwischen den Kategorien differenzierten, dominierte der Fokus bei den Inferenzaufgaben auf prototypische Merkmale und auf die Ähnlichkeitsstruktur der Zielkategorie (weitere Unterschiede in Markman und Ross 2003).

Schließlich besteht eine weitere Funktion von Kategorien in ihrer Kommunizierbarkeit. Markman und Makin (1998) sind der Frage nachgegangen, welchen Einfluss Kommunikation auf die Bildung von Kategorien haben kann. In ihrem Experiment sollten Versuchsteilnehmer LEGO-Modelle entweder allein und zusammen mit einer anderen Person bauen. In der Bedingung mit den Personenpaaren musste immer eine Person die Anweisungen geben und die andere Person diese Anweisungen ausführen. Die Befunde zeigten, dass Personen, die zusammengearbeitet hatten, später die LEGO-Bauteile ähnlicher sortierten als die Einzelpersonen. Die Kommunikation zwischen den Versuchsteilnehmern führte also zu Gemeinsamkeiten der Kategorisierung der Umwelt.

11.6.2 Konzeptuelle Kombination

Konzepte können auch kombiniert werden. So ist es uns möglich, die Konzepte „Erdbeere“ und „Allergie“ zu dem Konzept „Erdbeerallergie“ zusammenzufügen und damit einen Sachverhalt ausdrücken, der durch die Elemente allein nicht bezeichnet wird. Diese Möglichkeit der Kombination ermöglicht ein hohes Maß an Produktivität bei der Nutzung kategorialen Wissens. Bislang gibt es keine Theorie der **konzeptuellen Kombination**, die allen Phänomenen gerecht wird (vgl. auch Medin et al. 2005). Ursprünglich hatte man gehofft, ein Modell zu finden, das die Bedeutung des kombinierten Konzepts allein als Funktion der Bedeutung seiner Elemente ausdrückt. Ein Beispiel für diese Art von Modell ist das *selektive Modifikationsmodell* von Smith und Osherson (1984), das sich auf Adjektiv-Nomen-Kombinationen bezieht. Gemäß diesem Modell wird ein Konzept wie „brauner Apfel“ so verstanden, dass man zunächst den Prototyp von Apfel aktiviert, um dann die prototypische Farbe („Rot“) durch „Braun“ zu ersetzen. Dieses Modell erlaubt es beispielsweise, Typikalitätseinschätzungen für zahlreiche Konzeptkombinationen zu erklären (Smith et al. 1988).

Es gibt aber auch Befunde, die dieses Modell nicht erklärt. So haben beispielsweise Medin und Shoben (1988) gezeigt, dass sich bei manchen Konzepten die Typikalität der kombinierten Konzepte nicht aus den Elementen vorhersagen lässt. So werden kleine Löffel als typischer eingeschätzt für die Kategorie „Löffel“ als große Löffel. Ebenso sind metallene Löffel typischer als Holzlöffel. Dennoch halten die meisten Urteiler große hölzerne Löffel für typischer als kleine hölzerne und große metallene Löffel. Man könnte die Theorie natürlich retten, indem man postuliert, dass wir Konzepte wie „Holzlöffel“ getrennt und unabhängig von den Komponenten lernen. Dies würde aber angesichts der vielen Kombinationsmöglichkeiten von Konzepten als generelle Strategie zu Schwierigkeiten führen. Ein weiteres Problem des selektiven Modifikationsmodells besteht darin, dass Kombinationen gelegentlich Merkmale aufweisen, die keines der Elemente hat. Haustiervögel leben in der Regel in Käfigen, was weder typisch für Haustiere noch für Vögel ist (Hampton 1996; Murphy 1988).

Schließlich lässt sich zeigen, dass es mehrere unterschiedlicher Strategien gibt, um kombinierte Begriffe zu verstehen (Wisniewski und Gentner 1991; Wisniewski und Love 1998). Kombinationen zweier Nomen werden häufig so verstanden, dass man eine auffällige Eigenschaft eines Nomens auf das andere überträgt. Dies funktioniert am besten, wenn die beiden Nomen Objekte bezeichnen, die vergleichbare, korrespondierende Merkmale haben (z. B. das Fellmuster bei Tieren; *alignable features*). Ein „Zebrapferd“ wird deshalb spontan als Pferd mit Streifen interpretiert. Liegt eine solche Korrespondenz der Merkmale nicht vor (*non-alignable features*), dann wird eher nach einer Relation gesucht, die die Merkmale verknüpfen könnte. So wird beispielsweise ein „Zebrahaus“ eher als Haus für Zebras verstanden und nicht als Haus mit Streifen.

11.6.3 Sprache und Kategorien

Sprache ermöglicht es Menschen, ihr Wissen untereinander zu kommunizieren. Die enge Verbindung von Wörtern und Konzepten hat viele Psychologen beschäftigt (▶ Kap. 13). Sind Wörter einfach sprachliche Benennungen von sprachunabhängigen Konzepten und Kategorien oder hängen unsere Konzepte und Kategorien davon ab, welche Sprache wir sprechen? Die radikalste Sichtweise, die heutzutage niemand mehr vertritt, besagt, dass Denken ohne Sprache nicht möglich sei (Bloom 2000). Diese Sicht würde die wenig plausible Implikation haben, dass man Tieren, Babys oder Aphasikern Denkfähigkeit absprechen müsste (Pinker 1994).

Eine demgegenüber abgemilderte Sicht wurde u. a. von Whorf (1956) formuliert. Er hat die Doktrin des **linguistischen Determinismus** entwickelt, dem zufolge Sprache unser Denken determiniert. Er ging zwar davon aus, dass es vorsprachliches Denken gibt, war aber der Meinung, dass dieses Denken so lange unstrukturiert und chaotisch sei, bis es durch die Muttersprache strukturiert wird. Ein berühmtes Beispiel von Whorf ist der Kontrast zwischen Eskimos und Amerikanern. Während Eskimos über mehrere Wörter für verschiedene Formen von Schnee verfügen, verwenden Amerikaner nur ein Wort (Kritik an dieser Position in Pullum 1991).

Auch Whorfs Sicht wurde mittlerweile weitgehend aufgegeben (Bloom 2000). So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass der Umstand, dass in einer Sprache nur wenige Farbbezeichnungen existieren, keineswegs bedeutet, dass nicht viel mehr Farben perzeptuell und kategorial diskriminiert werden können. Es

konnte beobachtet werden, dass der Erwerb einer Fremdsprache mit mehr Farbbezeichnungen kaum Probleme bereitet. Ein Beispiel für die potenzielle Unabhängigkeit von Sprache und vorsprachlichen Kategorien stammt aus einer interkulturellen Studie von Malt et al. (1999). In dieser Studie wurde untersucht, wie Behälter in unterschiedlichen Kulturen kategorisiert werden. Interessanterweise zeigte sich eine Dissoziation zwischen Ähnlichkeitsurteilen und Benennungen. Während es zwischen Englisch, Chinesisch und Spanisch deutliche Unterschiede darin gibt, welche Behälter die gleiche Bezeichnung erhalten, ergaben sich kaum Unterschiede in den Ähnlichkeitseinschätzungen der Probanden. Dabei zeigte sich auch, dass Benennungen nicht unbedingt auf der Basis großer Ähnlichkeit vollzogen werden. Pillenbehälter werden im Englischen beispielsweise als Flaschen bezeichnet, obwohl sie wenig Ähnlichkeit zu Flaschen haben. Eine mögliche Erklärung für diese Divergenzen ist, dass Benennungen auch von kommunikativen Funktionen und kulturellen Traditionen beeinflusst werden und nicht nur von perzeptiven Faktoren. Diese Befunde zeigen, dass unterschiedliche Kategorien in der sprachlichen Kommunikation und beim Objekterkennen genutzt werden können, und belegen die enge Verbindung von Kategorien und deren Nutzung (vgl. auch Smith und Samuelson 1997).

Aber auch die radikale Gegensicht zum linguistischen Determinismus, dass unsere Kategorien vollkommen unabhängig von Sprache seien, wird nicht mehr von allen Psychologen geteilt. Diese Sicht wurde von Fodor (1975) formuliert, der Spracherwerb praktisch als Erwerb einer zweiten Sprache ansah. Seiner Sicht zufolge kommen alle Kinder mit Konzepten (*mentalese*) auf die Welt, die beim Spracherwerb mit Wörtern in Verbindung gebracht werden. Fodor argumentierte, dass nur so erklärbar ist, warum Kinder relativ schnell alle Sprachen der Welt erwerben können.

Wie kann man sich also das Wechselspiel von Sprache und Kategorien nach derzeitigem Erkenntnisstand vorstellen? Eine gemäßigtere Sicht, die in den letzten Jahren zunehmend empirisch gestützt wird, geht von einer wechselseitigen, wenngleich grundsätzlich reversiblen Beeinflussung zwischen Sprache und Denken aus. So wird vermutet, dass die linguistischen Kategorien der Muttersprache bestimmte Erfahrungsdimensionen zugunsten anderer hervorheben und damit das Denken in subtiler Weise beeinflussen (Slobin 1996; Hunt und Agnolli 1991). Anders als Whorf (1956) geht man allerdings davon aus, dass dieser Einfluss nicht rigide ist und dass die Kategorien durch weitere Erfahrungen (z. B. Zweitspracherwerb) modifiziert werden können.

Ein Beispiel für diese Interaktion zwischen Sprache und Denken stammt aus der Forschung von Boroditsky (2001; vgl. aber January und Kako, 2007, für erfolglose Replikationsversuche dieser Studie und die Antwort von Boroditsky et al. 2010). Sie hat sich mit der Frage beschäftigt, wie wir in verschiedenen Kulturen über Zeit denken. Generell neigen wir dazu, zeitliche Relationen mithilfe von Wörtern auszudrücken, die auch räumliche Beziehungen benennen. Im Englischen beispielsweise werden Präpositionen wie „before“ und „behind“ verwendet, um zukünftige von vergangenen Ereignissen zu unterscheiden. Man drückt also Zeit mithilfe von Begriffen aus, die auch horizontale räumliche Relationen beschreiben. Interessanterweise unterscheidet sich die Sprache Mandarin in dieser Beziehung vom Englischen. In dieser Sprache werden neben den horizontalen räumlichen Relationen auch vertikale zur Beschreibung von Zeit benutzt. „Oben“ entspricht hier zukünftigen und „unten“ vergangenen Ereignissen.

Boroditsky (2001) ist nun der Frage nachgegangen, ob diese Unterschiede in der Sprache sich auch im Denken niederschlagen. Sie hat dazu eine Aufgabe entwickelt, die erfordert, auf Relationsausdrücke so schnell wie möglich zu antworten (z. B. „März ist früher als April“), die mit nichträumlichen Begriffen formuliert wurden. Interessanterweise zeigen die Befunde, dass Amerikaner schneller die temporale Frage beantworten konnten, wenn sie direkt zuvor die Voraufgabe mit horizontalen Relationen bearbeitet hatten, während bei Mandarin die Antwortzeit am kürzesten war, wenn sie vorher die Voraufgabe mit vertikalen Relationen bekamen (Abb. 11.18). Dies lässt sich als Effekt der Muttersprache auf die Art und Weise erklären, wie über Zeit spontan gedacht wird. Dieser Einfluss ist aber nicht absolut und irreversibel. In einer weiteren Studie konnte Boroditsky (2001) nämlich auch zeigen, dass Amerikaner nach kurzem Training ähnliche Effekte zeigten wie Sprecher des Mandarin.

Boroditsky et al. (2003) präsentieren Untersuchungen zum Einfluss des grammatikalischen Geschlechts von Nomina. Sie haben sich solche Nomina ausgesucht, die in verschiedenen Sprachen mit einem unterschiedlichen grammatikalischen Geschlecht versehen werden (z. B. ist Apfel im Deutschen männlich, im Spanisch aber weiblich). Die Untersuchung wurde mit Deutschen und Spaniern in englischer Sprache durchgeführt. In der Studie zeigte sich, dass Äpfel im Deutschen eher mit männlichen Attributen, im Spanischen eher mit weiblichen assoziiert werden. Wurde ein bestimmter Apfel mit einem Eigennamen versehen (z. B. „This apple is called Patrick/Patricia“), konnten sich die Deutschen eher den männlichen, die Spanier eher den weiblichen Namen merken.

Andere Beispiele für die Beziehung zwischen Muttersprache und Denken wurden in dem Bereich räumlicher Relationen gefunden. So konnte Levinson (1996) zeigen, dass Holländer (wie auch Deutsche) räumliche Relationen eher situationsspezifisch beschreiben (für eine Studie über räumliche Präpositionen im Koreanischen vgl. Bowerman 1996). Im Holländischen werden in der Regel intrinsische Bezugssysteme verwendet, die die Position von Objekten relativ zu anderen Objekten in der Szene beschreiben („Der Junge steht vor dem Lastwagen“), oder es werden Bezugssysteme zugrunde gelegt, die relativ zu der Perspektive des Betrachters konstruiert werden („Der Junge steht links vom Lastwagen“). Demgegenüber verwendet man im Tzeltan-Dialekt, einer Sprache, die in Mexiko gesprochen wird, absolute Koordinaten, die in etwa unseren Himmelsrichtungen entsprechen („Der Junge steht südlich vom Lastwagen“).

Levinson (1996) konnte zeigen, dass diese sprachlichen Unterschiede beeinflussten, wie Probanden aus den beiden Kulturen

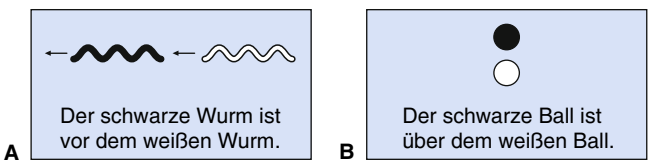


Abb. 11.18 Beispiele für die horizontale (**A**) und vertikale (**B**) Voraufgabe aus der Studie von Boroditsky (2001)

Objekte räumlich anordneten. Sollten etwa in einem Experiment vier Objekte, die nebeneinander auf einem Tisch lagen, auf einem räumlich anders orientierten Tisch in gleicher Weise angeordnet werden, wählten die Holländer die gleiche relative Anordnung (rechts – links), während Sprecher des Tzeltan die Objekte so platzierten, dass ihre Position der gleichen Himmelsrichtung entsprach wie beim ersten Tisch. Gegen die Interpretation, dass es sich um einen Einfluss der Sprache handelt, lässt sich allerdings einwenden, dass auch andere Faktoren eine Rolle spielen könnten wie etwa die unterschiedliche Ökologie. Holländer halten sich mehr in kleineren Räumen auf als Sprecher des Tzeltal, sodass relative Positionierungen für Holländer sinnvoller erscheinen (Bloom 2000). Dass es sich nicht um irreversible Unterschiede handelt, zeigt sich daran, dass die beiden Sprachgruppen natürlich auch in anderen Bezugssystemen denken können.

Die bisher diskutierten Studien legen die Sicht nahe, dass unser kognitives System flexibel genug ist, um die Semantik ganz unterschiedlicher Sprachen zu erwerben. Dabei kann die jeweilige Sprache dazu führen, dass bestimmte Unterscheidungen in den Vordergrund geschoben werden, während andere in den Hintergrund treten. Damit kann Sprache bestimmte Denkweisen nahelegen. Solche Einflüsse sind aber nicht spezifisch für Sprache, sondern finden sich auch bei anderen Lernaufgaben, die Kategorien generieren und auf diese Weise Denk- und Wahrnehmungsprozesse beeinflussen (vgl. z. B. die oben diskutierte Studie von Goldstone und Steyvers 2001).

Als mögliche Ausnahme dieser Generalisierung wird in letzter Zeit mathematisches Denken diskutiert. Nach Dehaene (1997) gibt es zwei kognitive Systeme, die mit Zahlen operieren. Ein primitives System, das sich auch bei Tieren findet, ist in der Lage, approximative Vergleiche von Mengen mit unterschiedlicher Anzahl von Elementen zu machen. Dieses System, das sprachunabhängig ist, funktioniert allerdings nur, wenn die Zahlen vergleichsweise klein sind, etwa einstellige Ziffern. Operationen mit großen Zahlen (z. B. 212 – 18 = ?) sind hingegen nicht mit diesem System zu bewältigen. Nach Dehaene (1997) setzen solche exakten Operationen mit großen Zahlen sprachliche Repräsentationssysteme voraus, die nur Menschen zur Verfügung stehen. Gestützt wird diese Hypothese durch neuropsychologische Befunde, die zeigen, dass der Verlust der Fähigkeit zum mathematischen Denken häufig mit dem Verlust der Sprachfähigkeit einhergeht (Bloom 2000). Außerdem konnten Studien mit bilingualen Sprechern (Russisch und Englisch) zeigen, dass exakte mathematische Operationen leichter in der Sprache durchgeführt können, in der sie trainiert wurden (unabhängig von der Muttersprache), während approximative Mengenvergleiche sprachunabhängig gleich gut bewältigt werden können (Spelke und Tsivkin 2001). Diese Befunde deuten darauf hin, dass bestimmte Formen des Denkens erst durch das Medium von Sprache ermöglicht werden.

11.6.4 Kategorien und Induktion

Ein letztes Beispiel für die Nutzung von Kategorien soll die Rolle von Kategorien beim induktiven Schließen sein (Überblick in Heit 2000; Hayes und Heit 2013). Osherson et al. (1990) haben ein einflussreiches Modell der **kategorienbasierten Induktion** (*similarity-coverage model*) entwickelt (für ein alternatives Modell vgl. Sloman 1993). Die Hauptidee ist, dass die Ähnlichkeit zwischen Exemplaren und Kategorien den Induktionsprozess steuert. Ein Beispiel für induktive Schlüsse ist etwa ein Argument mit der Prämisse „Rotkehlchen haben Eigenschaft X“ und entweder der Konklusion „Straußenvögel haben Eigenschaft X“ oder der Konklusion „Alle Vögel haben die Eigenschaft X“. Für X werden Eigenschaften gewählt, bei denen die Probanden nicht wissen, ob sie auf die Aussagen zutreffen oder nicht (z. B. „haben eine hohe Konzentration von Kalium im Blut“; *blank predicates*). Die Aufgabe besteht darin zu entscheiden, welches Argument stärker ist. In dem Beispiel finden Versuchsteilnehmer in der Regel den Schluss auf Straußenvögel schwächer als den Schluss auf alle Vögel (s. unten).

Die Stärke eines Arguments wird in diesem Modell von zwei Faktoren beeinflusst: der Ähnlichkeit zwischen der Kategorie in der Prämisse und der Kategorie in der Konklusion und der Ähnlichkeit der Kategorie in der Prämisse zur niedrigsten taxonomischen Kategorie, die noch die Kategorien in Prämisse und Konklusion umspannt (*coverage*). Beispielsweise ist die niedrigste umspannende Kategorie von Rotkehlchen und Straußenvogel die Kategorie der „Vögel“, während es bei Rotkehlchen und Schäferhunden „Säugetiere“ wären.

Das Zutrauen in ein Urteil basiert auf einer Gewichtung dieser beiden Faktoren. So wird die Argumentstärke zwischen der Prämisse über Rotkehlchen und der Konklusion über Vögel so bestimmt, dass man zunächst die Ähnlichkeit von Rotkehlchen zu Vogel bestimmt (die perfekt ist, weil Rotkehlchen Vögel sind) und dann die Ähnlichkeit zu anderen Exemplaren der Kategorie „Vogel“ abschätzt. („Vogel“ ist die niedrigste Kategorie, die die Kategorien „Rotkehlchen“ und „Vogel“ umspannt.) Daraus folgt, dass ein Argument von Rotkehlchen auf Vögel als stärker empfunden wird als ein Argument von Straußenvögeln auf Vögel, weil Rotkehlchen typischere Vögel sind und damit eine höhere Ähnlichkeit zu anderen Exemplaren haben. Das Modell macht auch die interessante Vorhersage, dass ein Schluss von Rotkehlchen auf Straußenvögel als stärker eingeschätzt werden sollte als ein Schluss von Straußenvögeln auf Rotkehlchen – ein Muster, das in empirischen Studien auch gefunden wurde. Wieder liegt der Grund in der unterschiedlichen Typikalität des in der Prämisse erwähnten Exemplars für die niedrigste umspannende taxonomische Kategorie („Vögel“).

Viele Vorhersagen des Modells sind intuitiv plausibel, manche sind allerdings auch überraschend. So sagt es vorher, dass ein Argument von der Prämisse „Alle Rotkehlchen haben X“ auf „Alle Vögel haben X“ als stärker empfunden werden sollte als auf die Konklusion „Alle Straußenvögel haben X“. Diese widerspricht normativen Prinzipien, weil aus logischen Gründen alles, was auf alle Vögel zutrifft, automatisch auch auf Straußenvögel zutreffen muss. Der Grund für die vorhergesagte Asymmetrie ist, dass Rotkehlchen aufgrund ihrer hohen Typikalität der Kategorie „Vögel“ als ähnlicher empfunden werden als der atypischen Subkategorie „Straußenvögel“. Die empirischen Befunde bestätigen diese Vorhersage.

Eine andere intuitiv plausible Vorhersage des Modells betrifft Argumente mit mehreren Prämissen. Hier sagt das Modell

einen Unterschiedlichkeitseffekt vorher. So wird das Argument „Jaguare haben X und Leoparden haben X“ auf „Alle Säugetiere haben X“ als schwächer empfunden als das gleiche Argument, bei dem „Leoparden“ durch „Mäuse“ ausgetauscht wurde. Der Grund dafür ist, dass im zweiten Fall unterschiedlichere Tiere genannt werden, die die umfassende Kategorie der Säugetiere besser abdecken (d. h. eine höhere Gesamtähnlichkeit zu den Exemplaren dieser Kategorie haben). Tatsächlich ließen sich die vorhergesagten Effekte bei studentischen Versuchsteilnehmern finden (Heit 2000).

In den letzten Jahren wurden zunehmend Zweifel an der Generalität des Modells von Osherson et al. (1990) laut. So zeigten sich Unterschiede im induktiven Denken, wenn man Experten in einer Domäne untersucht (Überblick in Coley et al. 1999; Heit 2000). Vergleicht man etwa ein Argument wie „Krankheit A findet sich bei Trauerweiden und Föhren“ mit dem Argument „Krankheit B findet sich bei der Papierbirke und der Flussbirke“, dann sagt das Modell von Osherson et al. (1990) vorher, dass man aufgrund der größeren Unterschiedlichkeit der betroffenen Bäume Krankheit A eher bei allen Bäumen vermuten würde. Tatsächlich halten studentische Versuchsteilnehmer aus Michigan das erste Argument für stärker. Anders sieht es aus, wenn man Baumexperten untersucht oder wenn man (mit Material, das auf ihren ökologischen Kontext zugeschnitten ist) Mitglieder der Itzaj-Maya untersucht, die man ebenfalls als Experten für ihre Ökologie betrachten kann. Hier findet man eine Präferenz für die engere Kategorie (also das Argument mit Krankheit B). Der Grund für diese überraschende Wahl ist, dass Experten eher dazu neigen, kausale ökologische Argumente zu verwenden, während Laien mangels Vorwissen eher auf allgemeine Ähnlichkeitsbeziehungen zurückfallen müssen (vgl. auch Proffitt et al. 2000). So wurde bei dem Baumbeispiel von manchen Experten bei der Begründung für Krankheit B etwa gesagt, dass Birken sehr anfällig für Krankheiten und weit verbreitet seien, sodass man sich gut vorstellen könne, dass sich die Krankheit schnell auf andere Bäume ausbreitet. Ähnlich fanden auch Bailenson et al. (2002) bei den untersuchten Vogelexperten (Itzaj-Maya bzw. amerikanische Experten) kaum Hinweise für die Berücksichtigung von Typikalität und Ähnlichkeit, sondern wieder vorwiegend kausales ökologisches Denken. Diese Befunde legen nahe, dass die ähnlichkeitsbasierten Theorien induktiven Denkens eher für Laien, wie etwa amerikanische Studierende, zugeschnitten sind, während sie das Denken von Experten und von Menschen in anderen Kulturen, die mehr Wissen haben, nicht abbilden (Medin und Atran 2004).

In der Forschung zum induktiven Schließen lässt sich eine ähnliche Entwicklung erkennen wie in der allgemeinen Kategorisierungsforschung. Während anfangs ähnlichkeitsbasierte Theorien im Vordergrund standen, stehen in den letzten Jahren Theorien im Mittelpunkt, die die Rolle kausaler und funktionaler Beziehungen ins Zentrum des Interesses stellen.

Beispiele für die Rolle von Kausalwissen lassen sich finden, wenn man sich die Rolle der Prädikate in induktiven Argumenten ansieht (also das X in den Beispielen oben). Darüber sagt das Modell von Osherson et al. (1990) nichts, da es auf die vorkommenden Objektkategorien fokussiert und mit inhaltlich unspezifischen (bzw. unvertrauten) Prädikaten operiert (Heit 2000). Verwendet man aber vertraute Prädikate, dann zeigt sich auch hier ein Einfluss auf die Einschätzung der induktiven Stärke. So empfinden Versuchsteilnehmer das Argument von „Viele ehemalige Kriminelle sind Leibwächter“ auf „Viele Kriegsveteranen sind Leibwächter“ als überzeugender als das Argument „Viele ehemalige Kriminelle sind arbeitslos“ auf „Viele Kriegsveteranen sind arbeitslos“. Da die gleichen Personenkategorien verwendet werden, muss der Unterschied an den Prädikaten liegen. Nach Sloman (1994) besteht der Grund für den Unterschied darin, dass man sich im ersten Fall eine kausale Erklärung zurechtlegen kann („Kriminelle und Veteranen sind kräftig und kampferprobt“), die den induktiven Schluss plausibel macht (vgl. auch Heit und Rubinstein 1994).

Ein weiterer Beleg für die Rolle kausalen Wissens auf induktives Schließen stammt von Rehder (2009). In seinen Experimenten legte er Probanden beispielsweise Beschreibungen von unterschiedlichen Fahrzeugen vor, die sich mehr oder weniger ähnelten. Wurden die Versuchsteilnehmer gefragt, für wie wahrscheinlich sie es einschätzen, dass ein Fahrzeug ein bestimmtes neues Merkmal mit einem anderen Fahrzeug teilt (z. B. Vibrationen beim Bremsen), dann zeigte sich, dass die Probanden die Wahrscheinlichkeit für höher einschätzten, wenn sich die Fahrzeuge ähnelten. Wussten sie aber, dass dieses neue Merkmal vom Vorliegen einer spezifischen Ursache abhängt, dann war es für den induktiven Schluss vor allem wichtig, dass dieses Ursachenmerkmal bei beiden Fahrzeugen vorlag, während die globale Ähnlichkeit der Fahrzeuge in den Hintergrund trat.

Ein Modell, das ebenfalls theoretisches Wissen bei induktivem Denken berücksichtigt, stammt von Medin et al. (2003). Dieses Modell („Relevanztheorie“) basiert nicht allein auf Wissen über Ähnlichkeit, sondern berücksichtigt auch kausale und funktionale Beziehungen zwischen Kategorien. Ein Beispiel dafür, wie Wissen über kausale Beziehungen induktives Denken beeinflusst, ist der Befund, dass wir eher von der Prämisse „Bananen haben das Enzym X“ als von der Prämisse „Mäuse haben das Enzym X“ auf die Schlussfolgerung „Affen haben Enzym X“ schließen, obwohl Mäuse Affen stärker ähneln als Bananen. Dies hat natürlich damit zu tun, dass wir eine kausale Theorie darüber haben, wie die Enzyme der Bananen in die Affen geraten. Auch die o. g. Befunde zur Rolle kausalen Wissens lassen sich mit diesem Modell erklären (vgl. auch Medin und Atran 2004).

Die komplexeste und bislang umfassendste Theorie des induktiven Schließens wurde von Kemp und Tenenbaum (2009) entwickelt. Es handelt sich um ein bayesianisches computationales Modell, das die Rolle unterschiedlicher Wissensstrukturen (z. B. taxonomisch, kausal, räumlich) bei induktiven Schlüssen berücksichtigt. Damit handelt es sich um ein Modell, das der Fülle von Einflussfaktoren am besten gerecht wird, die im Bereich induktives Schließen gefunden wurden.

11.7 Anwendungsbeispiele

Forschung über die Repräsentation und Nutzung von Kategorien ist vorwiegend Grundlagenforschung. Dennoch gibt es eine Reihe von Studien, die die Relevanz von Kategorien in verschiedenen Anwendungsbereichen belegt. Im Folgenden werden Bei-

spiele aus der klinischen Psychologie, der sozialpsychologischen Geschlechtsstereotypenforschung und der Ernährungspsychologie diskutiert.

Kategorien in der Klinischen Psychologie

Kategorien spielen eine wichtige Rolle in der Klinischen Psychologie. Der Prozess der Diagnose beinhaltet die Kategorisierung von Klienten, beispielsweise als depressive oder schizophrene Person. Eine Reihe von Studien hat sich mit der Frage beschäftigt, wie solche Kategorisierungen vorgenommen werden. Das DSM-IV beispielsweise legt implizit eine Prototypentheorie psychischer Krankheiten zugrunde. Die Richtlinien beschreiben Krankheiten als Liste von Merkmalen, die charakteristisch, aber nicht notwendig sind. Liegt eine hinreichende Anzahl von kritischen Merkmalen vor, dann soll der Klient mit dem entsprechenden diagnostischen Label beschrieben werden. Kim und Ahn (2002) haben allerdings gezeigt, dass selbst erfahrene Psychotherapeuten sich nicht an diese Richtlinien halten, sondern eher psychologische Kategorien verwenden, die den Vorstellungen der theorienbasierten Kategorisierungssicht entsprechen. So haben sie sowohl klinischen Psychologen als auch Laien die typischen Symptome von Anorexiepatientinnen und -patienten vorgelegt und die Probanden gebeten anzugeben, wie diese Symptome ihrer Meinung nach kausal verknüpft seien. Hier zeigten sich deutliche interindividuelle Unterschiede in den intuitiven Anorexietheorien. In einer späteren Testphase präsentierten die Untersucherinnen den Probanden dann fiktive Patientinnen und Patienten, die nur einzelne dieser Symptome aufwiesen. Die Befunde zeigen, dass die klinischen Psychologen ihre eigene intuitive Krankheitstheorie bei der Diagnose verwendeten. Im Sinne der kausalen Statushypothese wurden Patientinnen und Patienten als typischer für die Krankheit eingeschätzt, die kausal zentrale im Vergleich zu kausal periphere Merkmale aufwiesen. Nicht präsentierte kausal zentrale Symptome wurden fälschlicherweise später eher erinnert als periphere. Dies macht deutlich, dass die klinischen Psychologinnen und Psychologen nicht nur Symptome im Hinblick auf ihre Anwesenheit checkten, wie es der DSM vorschreibt, sondern ihre subjektiven kausalen Theorien nutzten.

Geschlechtsstereotype

Selbstkategorisierungen können einen starken Einfluss auf das eigene Verhalten haben. In einer klassischen Serie von Studien haben Steele und Aronson (1995) gezeigt, dass afroamerikanische Studierende niedrigere Leistungen als weiße Studierende zeigen, wenn vor dem Test in der Instruktion ein negatives Stereotyp über die Leistungsfähigkeit dieser Gruppe angesprochen wurde. Dieses Phänomen nennt man Bedrohung durch ein Stereotyp (*stereotype threat*). Durch die Aktivierung des Stereotyps wird die Angst induziert, das eigene Verhalten könnte tatsächlich das Stereotyp bestätigen, was sich im Sinne einer selbsterfüllenden Prophezeiung leistungsmindernd auswirkt. Dieses Phänomen ist für unterschiedliche soziale Kategorien belegt, u. a. auch für Geschlechtskategorien. Mit einer subtilen Manipulationstechnik haben Inzlicht und Ben-Zeev (2000) beispielsweise gezeigt, dass weibliche Studierende in einem Mathematiktest schlechter abschnitten, wenn sie den Test zusammen mit männlichen Studierenden durchführen mussten, als wenn sie ihn in einer geschlechtshomogenen Gruppe durchführten. Allein die Anwesenheit von männlichen Studierenden hat anscheinend das Stereotyp aktiviert, dass Frauen schlechter in Mathematik seien. Die Hypothese, dass sich hier die Wirksamkeit eines Stereotyps manifestiert, wurde auch dadurch bestätigt, dass der leistungsmindernde Effekt in gemischten Gruppen nicht auftrat, wenn es um einen Test verbaler Fähigkeiten ging. In dieser Fähigkeit werden in der Regel keine Geschlechtsunterschiede von den weiblichen Versuchsteilnehmern erwartet.

Nahrungskategorien und Diät

Viele Menschen haben das Ziel, sich gesund zu ernähren und Übergewicht zu vermeiden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen sie Nahrungsmittel nach Merkmalen kategorisieren, die für dieses Ziel relevant sind. Eine Reihe von psychologischen Studien hat demonstriert, wie leicht wir uns dabei in die Irre führen lassen. So haben beispielsweise Schuldt und Schwarz (2010) ihren Versuchspersonen ein Label gezeigt, das Informationen über die Zusammensetzung von Oreo-Cookies auflistete. Unter anderem war da zu lesen, dass eine Portion Cookies ca. 160 Kalorien enthält. Die wesentliche Manipulation bestand nun darin, ob man zusätzlich las, dass die Cookies aus „Biomehl und Biozucker" (*organic*) hergestellt wurden oder ob die Beschreibung diesen Zusatz nicht enthielt. Diese Manipulation hatte einen deutlichen Einfluss darauf, wie die Cookies in Bezug auf ihren Kaloriengehalt eingeschätzt wurden. Obwohl die Versuchsteilnehmer kurz zuvor lasen, dass eine Portion 160 Kalorien enthält, wurde der allgemeine Kaloriengehalt der Bio-Cookies niedriger eingeschätzt als der der regulären. Außerdem unterschied sich die Gruppe, die die Information über die biologisch angebauten Inhaltsstoffe erhielt, auch in der Beurteilung dessen, wie häufig man Cookies essen darf. Sie gab im Vergleich zur Kontrollgruppe an, dass man Bio-Cookies häufiger essen dürfe. In einer weiteren Studie wurde zudem gezeigt, dass die Versuchsteilnehmer eher der Meinung waren, dass eine Person, die ihr Gewicht reduzieren will, auf Sport verzichten kann, wenn sie Bio-Desserts (Cookies, Eiscreme) zu sich nahm im Vergleich zu konventionell hergestellten Desserts.

11.8 Ausblick

Ausgangspunkt dieses Kapitels war die Überlegung, dass Kategorien es uns erlauben, verschiedene Objekte oder Ereignisse zu einer gemeinsamen Klasse zusammenzufassen. Dies versetzt uns in die Lage, bereits erworbenes Wissen auf neue Erfahrungen anzuwenden. Ein zentrales Forschungsthema betraf dabei die Frage, nach welchen Prinzipien wir unsere Erfahrungen zu Klassen zusammenfassen. Die klassische Sicht, die davon ausging, dass unsere Konzepte analog zu Definitionen repräsentiert werden, wurde bald aufgegeben und durch die Annahme ersetzt, dass unser kognitives System versucht, globale Ähnlichkeitsbeziehungen in der Welt durch seine Kategorien abzubilden. So erfolgreich die Ansätze, die ähnlichkeitsbasierte Kategorisierung annehmen, auch sind, erwiesen sie sich als zumindest unvollständig. Es wurde klar, dass die Frage, was Ähnlichkeit ist, kei-

neswegs einfach zu klären ist. Herkömmliche Theorien gingen von zu einfachen Annahmen aus, die erst langsam durch verbesserte Theorien ersetzt werden. Ein weiteres Manko früherer Ansätze ist, dass man sich zunächst fast ausschließlich auf die Beziehung zwischen der objektiven Welt und den sie abbildenden Konzepten als Basis von Kategorisierung konzentriert hat und dabei annahm, dass Kategorien kontextinvariante Repräsentationen von korrelativen Strukturen in der Umwelt darstellen. In den letzten Jahren wurde hingegen zunehmend klar, dass der Kontext der Nutzung von Kategorien, also ein Faktor, der von Menschen an die Kategorisierungsaufgabe herangetragen wird, mindestens ebenso bedeutend ist wie der Einfluss von Strukturen in der Welt. In gewissem Sinne ist natürlich immer schon klar gewesen, dass Ähnlichkeitsbeziehungen nicht ohne Bezug auf die perzeptiven Fähigkeiten unseres kognitiven Systems bestimmt werden können. Dennoch konnte darüber hinaus in den letzten Jahren gezeigt werden, dass bereichsspezifisches und abstraktes Vorwissen und die Zwecke der Kategoriennutzung einen großen Einfluss auf die Art der Kategorienbildung haben. Kategorien lassen sich häufig als Kompromisse zwischen verschiedenen Nutzungsanforderungen verstehen. Kategorien lassen sich also weder als reines Abbild der Struktur der Umwelt noch als umweltunabhängige Konstruktion der sie nutzenden Menschen betrachten, sondern sie sind ein variables Produkt der Interaktion dieser beiden Komponenten. Es ist zu erwarten, dass die Interaktion zwischen Kategorien und ihrer Nutzung ein zentraler Fokus der Forschung bleiben wird.

Das verstärkte Interesse an der Nutzung von Kategorien erklärt auch das neu erwachte Interesse an anthropologischen Studien und der Nutzung von Kategorien im Alltag. Nisbett et al. (2001) haben die provozierende Hypothese aufgestellt, dass viele Befunde der Kognitionspsychologie vielleicht nur für westliche Kulturen Geltung beanspruchen können (vgl. auch Henrich et al. 2010; Medin und Atran 2004). Eine interessante Forschungsfrage ist deshalb, ob es interkulturelle Unterschiede gibt in der Art und Weise, wie die Welt repräsentiert wird. Murphy (2003) erinnert ebenfalls daran, dass viele Studien zur Kategorisierung mit künstlichem Material im Labor durchgeführt werden, wobei nicht immer klar ist, inwiefern sich diese Lernsituationen auf Lernen im Alltag übertragen lassen. Die Befunde zur Nutzung von Kategorien machen deutlich, dass die Art der Kategorisierungsaufgabe und der Exemplare einen großen Einfluss auf die resultierende Repräsentation haben kann (vgl. auch Markman und Ross 2003).

Ein weiteres interessantes aktuelles Forschungsfeld betrifft bisher vernachlässigte Typen von Kategorien. Objektkategorien wurden häufig untersucht. Wenig weiß man allerdings über Ereigniskategorien oder abstrakte Kategorien. Auch das Zusammenspiel zwischen kategorialen Repräsentationen und kausalem und funktionalem Wissen wird in letzter Zeit immer stärker untersucht.

Schließlich gibt es in der Kategorienforschung, wie in anderen Bereichen der Kognitionspsychologie, auch ein verstärktes Interesse an der Frage, wie Kategorien im Gehirn repräsentiert, gelernt und abgerufen werden. Vielversprechend scheinen hier Versuche, Computermodellierung und neurowissenschaftliche und experimentelle Methoden zusammenzuführen.

Wie sich alle in diesem Kapitel zusammengefassten Befunde einmal zu einer einheitlichen Theorie menschlichen Kategorisierens integrieren lassen, werden zukünftige Forschungen entscheiden müssen. Dabei ist absehbar, dass Methoden der Computermodellierung, der Neurowissenschaften und der Anthropologie die herkömmlichen verhaltensbezogenen psychologischen Untersuchungsstrategien ergänzen werden. Nur wenn man konvergierende Evidenz mit unterschiedlichen Methoden erhalten kann, wird es möglich sein, dem Ziel einer integrativen Theorie menschlichen Kategorisierens näherzukommen.

11.9 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Kategorien fassen Objekte aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten zusammen. Auf diese Weise können wir Wissen, das wir über eine Kategorie erworben haben, auf neue Erfahrungen anwenden. Kategorien spielen eine zentrale Rolle in einer Reihe kognitiver Prozesse.
- Ähnlichkeitsbasierte Theorien gehen davon aus, dass Ähnlichkeit zwischen Objekten oder Ereignissen der wichtigste Faktor der Kategorisierung ist. Der Einfluss von Vorwissen wird ausgeblendet. Derzeit konkurriert eine Reihe, in der Regel mathematisch formalisierte, Modelle um die Erklärung experimenteller Befunde.
- Ähnlichkeit ist ein hochkomplexes Konzept, das nur zum Teil geklärt ist. Vorwissen, Kontexteffekte und Relationen zwischen Merkmalen sind Faktoren, die in den bislang postulierten Theorien der Ähnlichkeit nur unzureichend berücksichtigt werden.
- Gemäß der Theoriensicht lassen sich Kategorien nicht als Bündel von Merkmalen verstehen, sondern als strukturierte Gebilde, die, ähnlich wie Theorien, funktionale oder kausale Relationen zwischen den Merkmalen spezifizieren. Vorwissen über eine Domäne ist ein wichtiger Einflussfaktor, der von ähnlichkeitsbasierten Theorien nur unzureichend berücksichtigt wird.
- Vielen Kategorisierungstheorien liegt die Annahme zugrunde, dass die Repräsentation von Kategorien gleich ist für unterschiedliche Inhaltsbereiche. Im Rahmen der Theoriensicht wurden allerdings Studien durchgeführt, die zeigen, dass unterschiedliche Kategorieninhalte verschieden repräsentiert werden.
- Kategorien können in einer Vielzahl von Relationen zueinander stehen. Sie können Teil einer hierarchischen taxonomischen Anordnung sein, sich aber auch in ereignisbezogenen Beziehungen befinden oder nichthierarchisch nebengeordnet sein.
- Eine Reihe von Theorien konkurriert darum, wie man den Erwerb von Kategorien modellieren soll. Konnektionistische Netzwerkmodelle, die den Lernprozess als Assoziationsvorgang ansehen, korrespondieren dabei mit ähnlichkeitsbasierten Kategorientheorien. Für die Theoriensicht werden derzeit ebenfalls formale Modelle des Lernens entwickelt (z. B. kausale Bayes-Netze).

- Kategorien dienen einer Reihe unterschiedlicher Funktionen. Dabei zeigt die Forschung, dass Kategorien nicht invariant sind, sondern sich in Abhängigkeit vom Kontext, in dem sie genutzt werden, aktuell oder dauerhaft verändern können.

Schlüsselbegriffe

Ad-hoc-Kategorien (*ad hoc categories*) Kategorien, die für einen bestimmten Zweck aktuell generiert werden (z. B. „Dinge, die man aus dem Haus trägt, wenn es brennt").

Ähnlichkeit (*similarity*) Ähnlichkeit von Objekten wurde lange Zeit als Basis der Kategorienbildung angesehen. In den letzten Jahren wird allerdings deutlich, dass Ähnlichkeit selbst ein hochkomplexes Produkt einer Reihe von Kontextfaktoren ist, die bisher nur ansatzweise erforscht sind.

Ähnlichkeitsbasierte Kategorisierungstheorien (*similarity-based categorization theories*) Oberbegriff zu einer Reihe von Theorien (klassische Sicht, Prototypentheorien, Exemplartheorien, Entscheidungsgrenzen), die davon ausgehen, dass Kategorisierung datengesteuert ist und von Ähnlichkeitsbeziehungen der Objekte oder Ereignisse determiniert wird.

Artefakte (*artefacts*) Kategorien, die sich auf von Menschen geschaffene Objekte beziehen (z. B. Fahrzeuge, Instrumente, Möbel).

Basiskategorien (*basic categories*) Psychologisch privilegierte Kategorienebene in Taxonomien. Kategorien auf dieser Ebene (z. B. Hund) werden als Erstes gelernt, am schnellsten benannt und zeichnen sich häufig durch gleichartiges Aussehen aus. In der Regel handelt es sich um die mittlere Ebene in Taxonomien. Expertise und Kultur können aber mit beeinflussen, welche Ebene die Basisebene ist.

Domänenspezifität (*domain specifity*) Annahme, dass kognitive Prozesse und Kategorien nicht bereichsübergreifend gleichartig sind, sondern bereichsspezifisch operieren.

Ereignisbezogene Kategorien (*event-related categories*) Kategorien, die Ereignisabläufe ausdrücken (z. B. Frühstück, Restaurantbesuch; auch Skriptkategorien genannt).

Exemplarsicht (*exemplar view*) Theorie der Kategorisierung, die davon ausgeht, dass beim Lernen die einzelnen Exemplare im Gedächtnis gespeichert werden. Kategorisierung wird auf der Basis von Ähnlichkeitsvergleichen mit den einzelnen Exemplaren vollzogen.

Explizites Kategorienlernen (*explicit learning of categories*) Bewusstes Suchen von Regeln, die die Kategorien unterscheiden (klassische Sicht). Solche Prozesse setzen vergleichsweise einfach strukturierte Kategorien voraus.

Funktionen von Kategorien (*functions of categories*) Klassifikation, Verstehen, Lernen, Inferenzen, Erklärungen, Vorhersage, Denken, Handlungsplanung, Sprache, Kommunikation.

Generalisiertes Kontextmodell (GCM) (*generalized context model*) Formal präzisierte Fassung einer Exemplartheorie der Kategorisierung.

Implizites Kategorienlernen (*implicit learning of categories*) Unbewusster Erwerb von Kategorienwissen; wird bei komplexen Kategorienstrukturen vermutet.

Kategorienbasierte Induktion (*category-based induction*) Schluss von bestimmten Kategorien (z. B. „Rotkehlchen haben X") auf andere mehr oder weniger ähnliche Kategorien (z. B. „Straußenvögel haben X"). Neben der Kategorienähnlichkeit beeinflussen aber auch kausale und funktionale Beziehungen die induktiven Schlussfolgerungen.

Kategorienspezifische Defizite (*category-specific deficits*) Klinische Beobachtung, dass es bei einzelnen Patienten mit Gehirnläsionen zu selektiven Problemen mit spezifischen Inhaltsbereichen kommen kann (z. B. Lebewesen vs. Artefakte).

Kausalmodelle (*causal models*) Ereignisstrukturen, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beinhalten. Kausalrelationen sind asymmetrisch, da Ursachen Wirkungen hervorrufen können, aber nicht umgekehrt. Kausale Kategorien beziehen sich häufig auf Kausalmodelle (z. B. Krankheiten, bei denen Symptome und Ursachen kausal verknüpft sind).

Kategorien (*categories*) Klassen von Objekten oder Ereignissen, die aufgrund von Gemeinsamkeiten zusammengefasst werden.

Klassische Sicht (*classical view*) Gemäß dieser Sicht werden Kategorien in Form von notwendigen und hinreichenden Merkmalen (d. h. Definitionen) repräsentiert. Diese Sicht wird durch eine Reihe empirischer Befunde (Prototypentheorie) infrage gestellt, wie etwa den Befund, dass nicht alle Exemplare als gleich typisch für eine Kategorie angesehen werden.

Konnektionistische Lernmodelle (*connectionist learning models*) Computermodelle des Lernens, die in Analogie zu neuronalen Netzwerken entwickelt wurden. Sie bestehen in der Regel aus Knoten, die Merkmale oder Kategorien codieren, und assoziativen Verbindungen, die Assoziationsstärken ausdrücken. Komplexere Modelle beinhalten auch vermittelnde weitere Knoten, die die Aufgabe haben, Merkmalskonfigurationen oder Lernexemplare zu repräsentieren. In den meisten Modellen wird eine Fehlerkorrektur-Lernregel angewandt, die die Assoziationsgewichte in Abhängigkeit von der Lernrückmeldung so modifiziert, dass die Fehler, die das Netzwerk macht, minimiert werden. Es handelt sich um assoziationistische Modelle, die dem Gedanken ähnlichkeitsbasierter Kategorisierungstheorien verhaftet sind.

Konzeptuelle Kombination (*conceptual combination*) Kombination von einfachen Konzepten zu komplexeren Konzepten (z. B. Haus + Tier = Haustier).

Kreuzklassifikationen (*cross classifications*) Nichthierarchische alternative Kategorisierungen des gleichen Objekts oder Ereignisses (z. B. Professorin, Psychologin, Tennisspielerin).

Linguistischer Determinismus (*linguistic determinism*) Von Whorf (1956) vertretene Sicht, dass Sprache unser Denken determiniert.

Natürliche Arten (*natural kinds*) Kategorien, die sich auf in der Natur vorgefundene Objekte beziehen (z. B. Tiere, Mineralien, Pflanzen).

Prototypensicht (*prototype theories, probabilistic view*) Theorie der Kategorisierung, die davon ausgeht, dass Kategorienrepräsentationen nicht nur notwendige und hinreichende, sondern auch charakteristische Merkmale enthalten. Kategorien sind Abstraktionen über Lernexemplare, die nur die charakteristischen Merkmale enthalten (Prototyp). Neue Exemplare werden auf der Basis von Ähnlichkeitsvergleichen zu den Prototypen klassifiziert.

Psychologischer Essenzialismus (*psychological essentialism*) Annahme, dass natürliche Arten sich durch eine gemeinsame, ihnen innewohnende Essenz auszeichnen, die entscheidend ist für die Kategorienzugehörigkeit.

Taxonomien (*taxonomies*) Hierarchische Anordnung von Kategorien in über- und untergeordnete Kategorien, wobei zwischen den Ebenen Klasseninklusion besteht (z. B. Tier – Hund – Pudel).

Theorie der Entscheidungsgrenzen (*decision boundaries*) Weiterentwicklung der Signalentdeckungstheorie. Die Theorie geht davon aus, dass sich Kategorienexemplare in einem multidimensionalen Merkmalsraum repräsentieren lassen. Kategorisierung besteht darin, dass man diesen Raum mithilfe von Grenzen in Segmente unterteilt, die den einzelnen Kategorien entsprechen.

Theoriensicht (*theory-based categorization view; theory theory*) Diese Sicht geht davon aus, dass die meisten Kategorien nicht als Bündel definitorischer oder charakteristischer Merkmale gespeichert werden, sondern als strukturierte Gebilde, die auch funktionale und kausale Relationen zwischen Merkmalen enthalten. Kategorisierung wird in Analogie zur Wissenschaft als Vergleich zwischen Daten (Lernexemplaren) und Theorien (Kategorien) konzeptualisiert. Empirisch stehen Untersuchungen zur Rolle des Vorwissens bei der Kategorisierung im Vordergrund.

▪ Weiterführende Literatur

Ashby, F. G. & Maddox, W. T. (2005). Human category learning. *Annual Review of Psychology, 56*, 149-178. (Zusammenfassung des aktuellen Forschungsstands zu den neurobiologischen Grundlagen der Kategorisierung.)

Bloom, P. (2000). *How children learn the meanings of words*. Cambridge: MIT Press. (Überblick über entwicklungspsychologische Befunde zum Verhältnis von Kategorien und Sprache.)

Bruner, J. S., Goodnow, J. & Austin, G. (1956). *A study of thinking*. New York: Wiley. (Klassischer Text zur klassischen Sicht der Kategorisierung.)

Gopnik, A. & Meltzoff, A. N. (1997). *Words, thoughts, and theories*. Cambridge, MA: MIT Press. (Darstellung der Theoriensicht anhand vorwiegend entwicklungspsychologischer Befunde.)

Hayes, B. & Heit, E. (2013). Induction. In Reisberg, D. (Ed.), *Oxford handbook of cognitive psychology* (pp. 618-634). Oxford: Oxford University Press. (Übersichtsartikel über induktives Denken mit Kategorien.)

Humphreys, G. W. & Forde, E. M. E. (2001). Hierarchies, similarity, and interactivity in object recognition: „Category-specific" neuropsychological deficits. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 453-509. (Umfassender Überblick über neuropsychologische Befunde und Theorien.)

Kruschke, J. K. (2005). Category learning. In K. Lamberts & R. L. Goldstone (Eds.), *The Handbook of Cognition, Ch. 7*, pp. 183-201. London: Sage. (Überblick über formale Theorien des Kategorisierens).

Medin, D. L. & Atran, S. (2004). The native mind: Biological categorization and reasoning in development and across cultures. *Psychological Review, 111*, 960-983. (Überblick über psychologische und anthropologische Forschung zur Repräsentation biologischer Kategorien.)

Medin, D. L. & Heit, E. J. (1999). Categorization. In: D. Rumelhart & B. Martin (Eds.), *Handbook of cognition and perception* (pp. 99-143). San Diego: Academic Press. (Einführung in Computermodelle der Kategorisierung.)

Medin, D. L., Lynch, E. B. & Solomon, K. O. (2000). Are there kinds of concepts? Annual *Review of Psychology, 51*, 121-147. (Übersicht über aktuelle Forschung zu Typen von Kategorien.)

Murphy, G. L. (2002). *The big book of concepts*. Cambridge, MA: MIT Press. (Übersicht über die Kategorisierungsforschung.)

Rips, L. J., Smith, E. E. & Medin, D. L. (2012). Concepts and categories: Memory, meaning, and metaphysics. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Eds.). *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning* (pp. 177-209). Oxford: Oxford University Press. (Überblick über konkurrierende Theorien).

Seger, C A. & Miller, E. K. (2010). Category learning in the brain. *Annual Review of Neuroscience, 33*, 203-219. (Übersicht über neurowissenschaftliche Ansätze)

Waldmann, M. R., Hagmayer, Y, & Blaisdell, A. P. (2006). Beyond the information given: Causal models in learning and reasoning. *Current Directions in Psychological Science, 15*, 307-311. (Übersicht über die Forschung zu kausalen Kategorien.)

▪ Danksagung

Ich danke M. Heydemann, J. Hoffmann, S. Macho für ihre zahlreichen hilfreichen Kommentare.

Literatur

Ahn, W. (1998). Why are different features central for natural kinds and artifacts? The role of causal status in determining feature centrality. *Cognition*, *69*, 135–178.

Ahn, W., & Kim, N. (2001). The causal status effect in categorization: An overview. *The Psychology of Learning and Motivation*, *40*, 23–65.

Ahn, W., Kim, N. S., Lassaline, M. E., & Dennis, M. J. (2000). Causal status as a determinant of feature centrality. *Cognitive Psychology*, *41*, 361–416.

Allen, S. W., & Brooks, L. R. (1991). Specializing the operation of an explicit rule. *Journal of Experimental Psychology: General*, *120*, 3–19.

Anderson, J. R. (1991). The adaptive nature of human categorization. *Psychological Review*, *98*, 409–429.

Armstrong, S. L., Gleitman, L. R., & Gleitman, H. (1983). What some concepts might not be. *Cognition*, *13*, 263–308.

Ashby, F. G., & Ell, S. W. (2001). The neurobiology of human category learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*, 204–210.

Ashby, F. G., & Ennis, J. M. (2006). The role of basal ganglia in category learning. In B. Ross (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 46, S. 1–36). New York: Academic Press.

Ashby, F. G., & Maddox, W. T. (2005). Human category learning. *Annual Review of Psychology*, *56*, 149–178.

Ashby, F. G., Alfonso-Reese, L. A., Turken, A. U., & Waldron, E. M. (1998). A neuropsychological theory of multiple systems in category learning. *Psychological Review*, *105*, 442–481.

Ashby, F. G., Waldron, E. M., Lee, W. W., & Berkman, A. (2001). Suboptimality in human categorization and identification. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 77–96.

Ashby, F. G., Noble, S., Filoteo, J., Waldron, E. M., & Ell, S. W. (2003). Category learning deficits in Parkinson's disease. *Neuropsychology*, *17*, 115–124.

Atran, S. (1990). *Cognitive foundations of natural history: Towards an anthropology of science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Atran, S. (1998). Folk biology and the anthropology of science: Cognitive universals and cultural particulars. *Behavioral and Brain Science*, *21*, 547–611.

Bailenson, J. N., Shum, M., Atran, S., Medin, D. L., & Coley, J. D. (2002). A bird's eye view: Biological categorization and reasoning within and across cultures. *Cognition*, *84*, 1–53.

Baillargeon, R. (1998). Infants' understanding of the physical world. In M. Sabourin, & F. Craik (Hrsg.), *Biological and cognitive aspects* Advances in psychological science, (Bd. 2, S. 503–529). Hove, UK: Psychology Press/Erlbaum.

Bargh, J. A. (1994). The four horsemen of automaticity: Awareness, intention, efficiency, and control in social cognition. In R. S. Wyer Jr., & T. K. Srull (Hrsg.), *Basic processes* Handbook of social cognition, (Bd. 1, S. 1–40). Hillsdale: Erlbaum.

Barr, R. A., & Caplan, L. J. (1987). Category representations and their implications for category structure. *Memory & Cognition*, *15*, 397–418.

Barsalou, L. W. (1983). Ad hoc categories. *Memory & Cognition*, *11*, 211–217.

Barsalou, L. W. (1985). Ideals, central tendency, and frequency of instantiation as determinants of graded structure in categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *11*, 629–654.

Barsalou, L. W. (1987). The instability of graded structure: Implications for the nature of concepts. In U. Neisser (Hrsg.), *Concepts and conceptual development: Ecological and intellectual factors in categorization* (S. 101–140). New York: Cambridge University Press.

Barsalou, L. W. (1989). Intraconcept similarity and its implications for interconcept similarity. In S. Vosniadon, & A. Ortony (Hrsg.), *Similarity and analogical reasoning* (S. 76–121). New York: Cambridge University Press.

Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 577–609.

Barsalou, L. W., & Sewell, D. R. (1985). Contrasting the representation of scripts and categories. *Journal of Memory and Language*, *24*, 646–665.

Barsalou, L. W., Huttenlocher, J., & Lamberts, K. (1998). Basing categorization on individuals and events. *Cognitive Psychology*, *36*, 203–272.

Barton, M. E., & Komatsu, L. K. (1989). Defining features of natural kinds and artifacts. *Journal of Psycholinguistic Research*, *18*, 433–447.

Beggs, J. M., Brown, T. H., Byrne, J. H., Crow, T., LeDoux, J. E., LeBar, K. S., & Thompson, R. F. (1999). Learning and memory: Basic mechanisms. In M. J. Zigmond, F. E. Bloom, S. C. Landis, & L. R. Squire (Hrsg.), *Fundamental neuroscience* (S. 1411–1486). New York: Academic Press.

Berlin, B., Breedlove, D., & Raven, P. (1973). General principles of classification and naming in folkbiology. *American Anthropologist*, *74*, 214–242.

Bloom, P. (2000). *How children learn the meanings of words*. Cambridge, MA: MIT Press.

Boroditsky, L. (2001). Does language shape thought? Mandarin and English speakers' conception of time. *Cognitive Psychology*, *43*, 1–22.

Boroditsky, L., Schmidt, L., & Phillips, W. (2003). Sex, syntax, and semantics. In D. Gentner, & S. Goldin-Meadow (Hrsg.), *Language in mind: Advances in the study of language and cognition*. Cambridge, MA.: MIT Press.

Boroditsky, L., Fuhrman, O., & McCormick, K. (2010). Do English and Mandarin speakers think differently about time? *Cognition*, *118*, 123–129.

Bourne, L. E. (1970). Knowing and using concepts. *Psychological Review*, *77*, 546–556.

Bowerman, M. (1996). Learning how to *structure space for language*. In P. Bloom, M. A. Peterson, L. Nadel, & M. F. Garrett (Hrsg.), *Language and space* (S. 385–436). Cambridge, MA: MIT Press.

Brooks, L. R. (1978). Nonanalytic concept formation and memory for instances. In E. Rosch, & B. B. Lloyd (Hrsg.), *Cognition and categorization* (S. 169–211). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Brooks, L. R., Norman, G. R., & Allen, S. W. (1991). Role of specific similarity in a medical diagnostic task. *Journal of Experimental Psychology: General*, *120*, 278–287.

Bruner, J. S., Goodnow, J., & Austin, G. (1956). *A study of thinking*. New York: Wiley.

Caramazza, A., & Shelton, J. R. (1998). Domain-specific knowledge systems in the brain: The animate-inanimate distinction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 1–34.

Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.

Choi, S., McDaniel, M. A., & Busemeyer, J. R. (1993). Incorporating prior biases in network models of conceptual rule learning. *Memory & Cognition*, *21*, 413–423.

Coley, J. D., Medin, D. L., & Atran, S. (1997). Does rank have its privilege? Inductive inferences within folkbiological taxonomies. *Cognition*, *64*, 73–112.

Coley, J. D., Medin, D. L., Proffitt, J. B., Lynch, E., & Atran, S. (1999). Inductive reasoning in folkbiological thought. In D. L. Medin, & S. Atran (Hrsg.), *Folkbiology* (S. 205–232). Cambridge, MA: MIT Press.

Collins, A. M., & Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *8*, 240–247.

Corter, J. E., & Gluck, M. A. (1992). Explaining basic categories: Feature predictability and information. *Psychological Bulletin*, *111*, 291–303.

Damasio, A. R. (1990). Category-related recognition deficits as a clue to the neural substrates of knowledge. *Trends in Neurosciences*, *13*, 95–98.

Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.

Devine, P. G. (1989). Stereotypes and prejudice: Their automatic and controlled components. *Journal of Personality and Social Psychology*, *56*, 5–18.

Eckes, T. (1991). *Psychologie der Begriffe*. Göttingen: Hogrefe.

Erickson, M. A., & Kruschke, J. K. (1998). Rules and exemplars in category learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 107–140.

Estes, W. K. (1986). Array models for category learning. *Cognitive Psychology*, *18*, 500–549.

Farah, M. J., & McClelland, J. L. (1991). A computational model of semantic memory impairment: Modality specificity and emergent category specificity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *120*, 339–357.

Fific, M., Little, D. R., & Nosofsky, R. M. (2010). Logical-rule models of classification response times: A synthesis of mental-architecture, random-walk, and decision-bound approaches. *Psychological Review*, *117*, 309–348.

Filoteo, J. V., Maddox, W. T., Salmon, D. P., & Song, D. D. (2005). Information-integration category learning in patients with striatal dysfunction. *Neuropsychology*, *19*, 212–222.

Fiske, S. T., Neuberg, S. L., Beattie, A. E., & Milberg, S. J. (1987). Category-based and attribute-based reactions to others: Some informational conditions of stereotyping and individuating processes. *Journal of Experimental Social Psychology*, *23*, 399–427.

Flannagan, M. J., Fried, L. S., & Holyoak, K. J. (1986). Distributional expectations and the induction of category structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *12*, 241–256.

Fodor, J. A. (1975). *The language of thought*. New York: Crowell.
Fodor, J. A. (1998). *Concepts: Where cognitive science went wrong*. Oxford: Clarendon.
Folstein, J. R., Gauthier, I., & Palmeri, T. J. (2012). How category learning affects object perception: Not all morphspaces stretch alike. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 807–820.
Fried, L. S., & Holyoak, K. J. (1984). Induction of category distributions: A framework for classification learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 234–257.
Gazzaniga, M., Ivry, R., & Manjun, G. (1998). *Cognitive Neuroscience*. New York: Norton.
Gelman, S. A., & Markman, E. M. (1986). Categories and induction in young children. *Cognition*, *23*, 183–208.
Gelman, S. A. (2003). The essential child: Origins of essentialism in everyday thought. New York: Oxford University Press. Gentner, D. (1981). Some interesting differences between nouns and verbs. Cognition and Brain Theory, 4, 161–178.
Gentner, D., & Markman, A. B. (1997). Structural alignment in analogy and similarity. *American Psychologist*, *52*, 45–56.
Gluck, M. A., & Bower, G. H. (1988a). From conditioning to category learning: An adaptive network model. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*, 227–247.
Gluck, M. A., & Bower, G. H. (1988b). Evaluating an adaptive network model of human learning. *Journal of Memory and Language*, *27*, 166–195.
Goldstone, R. L. (1994a). Influences of categorization on perceptual discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, *123*, 178–200.
Goldstone, R. L. (1994b). The role of similarity in categorization: Providing a groundwork. *Cognition*, *52*, 125–157.
Goldstone, R. L. (1996). Isolated and interrelated concepts. *Memory & Cognition*, *24*, 608–628.
Goldstone, R. L., & Barsalou, L. (1998). Reuniting perception and conception. *Cognition*, *65*, 231–262.
Goldstone, R. L., & Son, J. Y. (2005). Similarity. In K. J. Holyoak, & R. G. Morrison (Hrsg.), *The Cambridge handbook of thinking and reasoning* (S. 13–36). Cambridge: Cambridge University Press.
Goldstone, R. L., & Steyvers, M. (2001). The sensitization and differentiation of dimensions during category learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 116–139.
Goodman, N. (1972). Seven strictures on similarity. In N. Goodman (Hrsg.), *Problems and projects* (S. 437–446). New York: Bobbs-Merrill.
Goldwater, M., & Markman, A. (2011). Categorizing entities by common role. *Psychonomic Bulletin and Review*, *18*, 406–413.
Gopnik, A., & Meltzoff, A. N. (1997). *Words, thoughts, and theories*. Cambridge, MA: MIT Press.
Gopnik, A., Glymour, C., Sobel, D. M., Schulz, L. E., Kushnir, T., & Danks, D. (2004). A theory of causal learning in children: Causal maps and Bayes nets. *Psychological Review*, *111*, 3–32.
Greenwald, A. G., & Banaji, M. R. (1995). Implicit social cognition: Attitudes, self-esteem, and stereotypes. *Psychological Review*, *102*, 4–27.
Hagmayer, Y., & Waldmann, M. R. (2000). Simulating causal models: The way to structural sensitivity. In L. R. Gleitman, & A. K. Joshi (Hrsg.), *Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 214–219). Mahwah, NJ: Erlbaum.
Hagmayer, Y., & Waldmann, M. R. (2006). Kausales Denken. In J. Funke (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie „Denken und Problemlösen"* (Bd. C/II/8, S. 87–166). Göttingen: Hogrefe.
Hagmayer, Y., Meder, B., Sydow, M. von, & Waldmann, M. R. (2011). Category transfer in sequential causal learning: the unbroken mechanism hypothesis. *Cognitive Science*, *35*, 842–873.
Hahn, U., & Chater, N. (1997). Concepts and similarity. In K. Lamberts, & D. Shanks (Hrsg.), *Knowledge, concepts and categories* (S. 43–92). Hove, UK: Psychology Press.
Hampton, J. A. (1979). Polymorphous concepts in semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*, 441–461.
Hampton, J. A. (1996). Conjunctions of visually based categories: Overextension and compensation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 378–396.
Hampton, J. A. (2006). Concepts as prototypes. In B. Ross (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 46, S. 79–113). New York: Academic Press.
Hampton, J. A., Estes, Z., & Simmons, S. (2007). Metamorphosis: Essence, appearance and behavior in the categorization of natural kinds. *Memory & Cognition*, *35*, 1785–1800.
Hayes, B., & Heit, E. (2013). Induction. In D. Reisberg (Hrsg.), *Oxford handbook of cognitive psychology* (S. 618–634). Oxford: Oxford University Press.
Heit, E. (1994). Models of the effects of prior knowledge on category learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 1264–1282.
Heit, E. (1997). Knowledge and concept learning. In K. Lamberts, & D. Shanks (Hrsg.), *Knowledge, concepts and categories* (S. 7–41). Hove, UK: Psychology Press.
Heit, E. (2000). Properties of inductive reasoning. *Psychological Bulletin & Review*, *7*, 569–592.
Heit, E., & Rubinstein, J. (1994). Similarity and property effects in inductive reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 411–422.
Henrich, J., Heine, S. J., & Norenzayan, A. (2010). The weirdest people in the world? *Behavioral and Brain Sciences*, *33*, 61–83.
Hirschfeld, L. A. (1994). The child's representation of human groups. In D. L. Medin (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 31, S. 131–185). New York: Academic Press.
Hirschfeld, L. A. (1996). *Race in the making: Cognition, culture, and the child's construction of human kinds*. Cambridge, MA.: MIT Press.
Hirschfeld, L. A., & Gelman, S. A. (Hrsg.). (1994). *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*. Cambridge: Cambridge University Press.
Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.
Hoffmann, J., & Zießler, M. (1982). Begriffe und ihre Merkmale. *Zeitschrift für Psychologie*, *190*, 46–77.
Hoffmann, J., & Zießler, C. (1983). Objektidentifikation in künstlichen Begriffshierarchien. *Zeitschrift für Psychologie*, *191*, 135–167.
Homa, D., & Vosburgh, R. (1976). Category breadth and the abstraction of prototypical information. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *2*, 322–330.
Hull, C. L. (1920). Quantitative aspects of the evolution of concepts. *Psychological Monographs*, *28*(1), whole No. 123.
Humphreys, G. W., & Forde, E. M. E. (2001). Hierarchies, similarity, and interactivity in object recognition: „Categoryspecific" neuropsychological deficits. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 453–509.
Hunt, E., & Agnolli, F. (1991). The Whorfian hypothesis: A cognitive psychology perspective. *Psychological Review*, *98*, 377–389.
Inzlicht, M., & Ben-Zeev, T. (2000). A threatening intellectual environment: Why females are susceptible to experiencing problem-solving deficits in the presence of males. *Psychological Science*, *11*, 365–371.
January, D., & Kako, E. (2007). Re-evaluating evidence for linguistic relativity: Reply to Boroditsky (2001). *Cognition*, *104*, 4174–4126.
Jones, S. S., & Smith, L. B. (1993). The place of perceptions in children's concepts. *Cognitive Development*, *8*, 113–140.
Keil, F. C. (1981). Constraints on knowledge and cognitive development. *Psychological Review*, *88*, 199–227.
Keil, F. C. (1989). *Concepts, kinds, and conceptual development*. Cambridge, MA: MIT Press.
Kemler-Nelson, D. G. (1984). The effect of intention on what concepts are acquired. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *23*, 734–759.
Kemp, C., & Tenenbaum, J. B. (2009). Structured statistical models of inductive reasoning. *Psychological Review*, *116*, 20–58.
Kemp, C., Goodman, N. D., & Tenenbaum, J. B. (2010). Learning to learn causal models. *Cognitive Science*, *34*, 1185–1243.
Kersten, A. W. (1998). A division of labor between nouns and verbs in the representation of motion. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 34–54.
Kim, N. S., & Ahn, W. (2002). Clinical psychologists' theorybased representations of mental disorders predict their diagnostic reasoning and memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *131*, 451–476.
Kim, S., & Murphy, G. L. (2011). Ideals and category typicality. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *37*, 1092–1112.

Klix, F., Meer, E. van der, Preuß, M., & Wolf, M. (1987). Über Prozeß- und Strukturkomponenten der Wissensrepräsentation des Menschen. *Zeitschrift für Psychologie*, *195*, 39–61.

Knowlton, B. J., & Squire, L. R. (1993). The learning of categories: Parallel brain systems for item memory and category level knowledge. *Science*, *262*, 1747–1749.

Knowlton, B. J., Squire, L. R., & Gluck, M. A. (1994). Probablistic classification learning in amnesia. *Learning and Memory*, *1*, 106–120.

Knowlton, B. J., Mangels, J. A., & Squire, L. R. (1996a). A neostriatal habit learning system in humans. *Science*, *273*, 1399–1402.

Knowlton, B. J., Squire, L. R., Paulsen, J. S., Swerdlow, N. R., Swenson, M., & Butters, N. (1996b). Dissociations within nondeclarative memory in Huntington's disease. *Neuropsychology*, *10*, 538–548.

Komatsu, L. K. (1992). Recent view of conceptual structure. *Psychological Bulletin*, *112*, 500–526.

Kruschke, J. K. (1992). ALCOVE: An exemplar-based connectionist model of category learning. *Psychological Review*, *99*, 22–44.

Kruschke, J. K. (1993). Three principles for models of category learning. In G. V. Nakamura, R. Taraban, & D. L. Medin (Hrsg.), *Categorization by humans and machines* The psychology of learning and motivation, (Bd. 29, S. 283–326). San Diego: Academic Press.

Kruschke, J. K. (2001). Toward a unified model of attention in associative learning. *Journal of Mathematical Psychology*, *45*, 812–863.

Kruschke, J. K. (2005). Category learning. In K. Lamberts, & R. L. Goldstone (Hrsg.), *The Handbook of Cognition (Ch. 7)* (S. 183–201). London: Sage.

Kuhl, J., & Waldmann, M. R. (1985). Handlungspsychologie: Vom Experimentieren mit Perspektiven zu Perspektiven fürs Experimentieren. *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, *16*, 153–181.

Lagnado, D. A., Waldmann, M. R., Hagmayer, Y., & Sloman, S. A. (2007). Beyond covariation: Cues to causal structure. In A. Gopnik, & L. Schulz (Hrsg.), *Causal learning: Psychology, philosophy, and computation* (S. 154–172). Oxford: Oxford University Press.

Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press.

Landau, B. (1982). Will the real grandmother please stand up? The psychological reality of dual meaning representations. *Journal of Psycholinguistic Research*, *11*, 47–62.

Levinson, S. C. (1996). Frames of reference and Molyneux's question: Crosslinguistic evidence. In P. Bloom, M. A. Peterson, L. Nadel, & M. F. Garrett (Hrsg.), *Language and space* (S. 109–169). Cambridge, MA: MIT Press.

Lewandowsky, S., Yang, L.-X., Newell, B. R., & Kalish, M. (2012). Working memory does not dissociate between different perceptual categorization tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *38*, 881–904.

Lien, Y., & Cheng, P. W. (2000). Distinguishing genuine from spurious causes: a coherence hypothesis. *Cognitive Psychology*, *40*, 87–137.

Lin, E. L., & Murphy, G. L. (2001). Thematic relations in adults' concepts. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 3–28.

Locksley, A., Borgida, E., Brekke, N., & Hepburn, C. (1980). Sex stereotypes and social judgment. *Journal of Personality and Social Psychology*, *39*, 821–831.

Lombrozo, T., & Rehder, B. (2012). The role of functional features in biological kind concepts. *Cognitive Psychology*, *65*, 457–485.

Love, B. C., Medin, D. L., & Gureckis, T. M. (2004). SUSTAIN: A network model of category learning. *Psychological Review*, *111*, 309–332.

Lynch, E. B., Coley, J. D., & Medin, D. L. (2000). Tall is typical: Central tendency, ideal dimensions and graded category structure among tree experts. *Memory & Cognition*, *28*, 41–50.

Macho, S. (1997). The effect of relevance shifts in category acquisition: A test of neural networks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *23*, 30–53.

Macrae, C. N., & Bodenhausen, G. V. (2000). Social cognition: Thinking categorically about others. *Annual Review of Psychology*, *51*, 93–120.

Macrae, C. N., Milne, A. B., & Bodenhausen, G. V. (1994). Stereotypes as energy-saving devices: A peek inside the cognitive toolbox. *Journal of Personality and Social Psychology*, *66*, 37–47.

Maddox, W. T., & Ashby, F. G. (1993). Comparing decision bound and exemplar models of classification. *Perception & Psychophysics*, *53*, 49–70.

Maddox, W. T., & Ing, A. D. (2005). Delayed feedback disrupts the procedural-learning system but not the hypothesis testing system in perceptual category learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*, 100–107.

Mahon, B. Z., & Caramazza, A. (2009). Concepts and categories: A cognitive neuropsychological perspective. *Annual Review of Psychology*, *60*, 27–51.

Malt, B. C. (1994). Water is not H2O. *Cognitive Psychology*, *27*, 41–70.

Malt, B. C. (1995). Category coherence in cross-cultural perspective. *Cognitive Psychology*, *29*, 85–148.

Malt, B. C., & Johnson, E. C. (1992). Do artifact concepts have cores. *Journal of Memory and Language*, *31*, 195–217.

Malt, B. C., & Smith, E. E. (1983). Correlated properties in natural categories. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *23*, 250–269.

Malt, B. C., Sloman, S. A., Gennari, S., Shi, M., & Wang, Y. (1999). Knowing versus naming: Similarity and the linguistic categorization of artifacts. *Journal of Memory and Language*, *40*, 230–262.

Marcus, G. (1998). Rethinking eliminative connectionism. *Cognitive Psychology*, *37*, 243–282.

Markman, A. B., & Makin, V. S. (1998). Referential communication and category acquisition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 331–354.

Markman, A. B., & Ross, B. H. (2003). Category use and category learning. *Psychological Bulletin*, *129*, 592–615.

Massaro, D. W., & Friedman, D. (1990). Models of integration given multiple sources of information. *Psychological Review*, *97*, 225–252.

McCloskey, M., & Cohen, N. J. (1989). Catastrophic interference in connectionist networks: The sequential learning problem. In G. H. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 24, S. 109–165). New York: Academic Press.

McCloskey, M., & Glucksberg, S. (1978). Natural categories: Well-defined or fuzzy sets? *Memory & Cognition*, *6*, 462–472.

McCloskey, M., & Glucksberg, S. (1979). Decision processes in verifying category membership statements: Implications for models of semantic memory. *Cognitive Psychology*, *11*, 1–37.

McKinley, S. C., & Nosofsky, R. M. (1995). Investigations of exemplar and decision-bound models in large-size, ill-defined category structures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 128–148.

Medin, D. L., & Atran, S. (2004). The native mind: Biological categorization and reasoning in development and across cultures. *Psychological Review*, *111*, 960–983.

Medin, D. L., & Heit, E. J. (1999). Categorization. In D. Rumelhart, & B. Martin (Hrsg.), *Handbook of cognition and perception* (S. 99–143). San Diego: Academic Press.

Medin, D. L., & Ortony, A. (1989). Psychological essentialism. In S. Vosniadou, & A. Ortony (Hrsg.), *Similarity and analogical reasoning* (S. 179–195). Cambridge: Cambridge University Press.

Medin, D. L., & Schaffer, M. M. (1978). Context theory of classification learning. *Psychological Review*, *5*, 207–238.

Medin, D. L., & Schwanenflugel, P. J. (1981). Linear separability in classification learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *7*, 355–368.

Medin, D. L., & Shoben, E. J. (1988). Context and structure in conceptual combination. *Cognitive Psychology*, *20*, 158–190.

Medin, D. L., Altom, M. W., Edelson, S. M., & Freko, D. (1982). Correlated symptoms and simulated medical classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *8*, 37–50.

Medin, D. L., Altom, M. W., & Murphy, G. L. (1984). Given versus induced category representations: Use of prototype and exemplar information in classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 333–352.

Medin, D. L., Wattenmaker, W. D., & Hampson, S. E. (1987). Family resemblance, conceptual cohesiveness, and category construction. *Cognitive Psychology*, *19*, 242–279.

Medin, D. L., Goldstone, R. L., & Gentner, D. (1993). Respects for similarity. *Psychological Review*, *100*, 254–278.

Medin, D. L., Lynch, E. B., Coley, J. D., & Atran, S. (1997). Categorization and reasoning among tree experts: Do all roads lead to Rome? *Cognitive Psychology*, *32*, 49–96.

Medin, D. L., Lynch, E. B., & Solomon, K. O. (2000). Are there kinds of concepts? *Annual Review of Psychology*, *51*, 121–147.

Medin, D. L., Coley, J. D., Storms, G., & Hayes, B. (2003). A relevance theory of induction. *Psychonomic Bulletin and Review*, *3*, 517–532.

Medin, D. L., Ross, B. H., & Markman, A. B. (2005). *Cognitive psychology* (4. Aufl.). New York: John Wiley & Co..

Medin, D. L., Ross, N., Atran, S., Cox, D., Coley, J., Proffitt, J., & Blok, S. (2006). Folkbiology of freshwater fish. *Cognition*, *99*, 237–273.

Medin, D., Waxman, S., Woodring, J., & Washinawatok, K. (2010). Human-centeredness is not a universal feature of young children's reasoning: Culture and experience matter when reasoning about biological entities. *Cognitive Development*, *25*, 197–207.

Meer, E. van der (1986). What is invariant in event-related knowledge representation? In F. Klix, & H. Hagendorf (Hrsg.), *Human memory and cognitive capabilities: Mechanisms and performances (Part A)* (S. 339–352). Amsterdam: North Holland.

Mervis, C. B., & Crisafi, M. A. (1982). Order of acquisition of subordinate-, basic-, and superodinate-level categories. *Child Development*, *53*, 258–266.

Miller, G. A., & Johnson-Laird, P. N. (1976). *Language and perception*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Minsky, M. L., & Papert, S. A. (1969). *Perceptrons*. Cambridge, MA.: MIT Press. 1988

Mooney, R. J. (1993). Integrating theory and data in category learning. In G. V. Nakamura, R. Taraban, & D. L. Medin (Hrsg.), *Categorization by humans and machines* The psychology of learning and motivation, (Bd. 29, S. 189–218). San Diego: Academic Press.

Murphy, G. L. (1988). Comprehending complex concepts. *Cognitive Science*, *12*, 529–562.

Murphy, G. L. (2002). *The big book of concepts*. Cambridge, MA: MIT Press.

Murphy, G. L. (2003). Ecological validity and the study of concepts. In B. Ross (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 43, S. 1–41). New York: Academic Press.

Murphy, G. L., & Allopenna, P. D. (1994). The locus of knowledge effects in concept learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 904–919.

Murphy, G. L., & Medin, D. L. (1985). The role of theories in conceptual coherence. *Psychological Review*, *92*, 289–316.

Murphy, G. L., & Wisniewski, E. J. (1989). Categorizing objects in isolation and in scenes: What a superordinate is good for. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 572–586.

Newell, B. R., Dunn, J. C., & Kalish, M. (2011). Systems of category learning: Fact or fantasy? In B. H. Ross (Hrsg.), *The Psychology of Learning & Motivation* (Bd. 54, S. 167–215).

Nisbett, R. E., Peng, K., Choi, I., & Norenzayan, A. (2001). Culture and systems of thought: Holistic versus analytic cognition. *Psychological Review*, *108*, 291–310.

Nosofsky, R. M. (1984). Choice, similarity, and the context theory of classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 104–114.

Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification-categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, *115*, 39–57.

Nosofsky, R. M. (1988). Exemplar-based accounts of relations between classification, recognition, and typicality. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *14*, 700–708.

Nosofsky, R. M. (1991). Tests of an exemplar model for relating perceptual classification and recognition memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *17*, 3–27.

Nosofsky, R. M. (1992). Exemplars, prototypes, and similarity rules. In A. F. Healy, S. M. Kosslyn, & R. M. Shiffrin (Hrsg.), *From Learning theory to connectionist theory: Essays in honor of William K. Estes* (Bd. 1, S. 149–167). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Nosofsky, R. M., & Johansen, M. K. (2000). Exemplar-based accounts of „multiple system" phenomena in perceptual categorization. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7*, 375–402.

Nosofsky, R. M., & Kruschke, J. K. (1992). Investigations of an exemplar-based connectionist model of category learning. In D. L. Medin (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 28, S. 207–250). New York: Academic Press.

Nosofsky, R. M., & Palmeri, T. J. (1997). An exemplar-based random-walk model of speeded classification. *Psychological Review*, *104*, 266–300.

Nosofsky, R. M., Kruschke, J. K., & McKinley, S. (1992). Combining exemplar-based category representations and connectionist learning rules. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*, 211–233.

Nosofsky, R. M., Gluck, M. A., Palmeri, T. J., McKinley, S. C., & Glauthier, P. T. (1994a). Comparing models of rule-based classification learning: A replication and extension of Shepard, Hovland, and Jenkins (1961). *Memory & Cognition*, *22*, 352–369.

Nosofsky, R. M., Palmeri, T. J., & McKinley, S. C. (1994b). Ruleplus-exception model of classification learning. *Psychological Review*, *101*, 53–79.

Oppenheimer, D. M., Tenenbaum, J. B., & Krynski, T. R. (2013). Categorization as causal explanation: Discounting and augmenting in a Bayesian framework. *Psychology of Learning and Motivation*, *58*, 203–231.

Osherson, D. N., Smith, E. E., Wilkie, O., López, A., & Shafir, E. (1990). Category-based induction. *Psychological Review*, *97*, 185–200.

Pauen, S. (2000). Early differentiation within the animate domain: Are humans something special? *Journal of Experimental Child Psychology*, *75*, 134–151.

Pazzani, M. J. (1991). Influence of prior knowledge on concept acquisition: Experimental and computational results. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *17*, 416–432.

Pearl, J. (2000). *Causality. Models, reasoning, and inference*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pinker, S. (1994). *The language instinct*. New York: Harper Collins.

Poldrack, R. A., Prabhakaran, V., Seger, C. A., & Gabrieli, J. D. (1999). Striatal activation during acquisition of a cognitive skill. *Neuropsychology*, *13*, 564–574.

Posner, M. I., & Keele, S. W. (1968). On the genesis of abstract ideas. *Journal of Experimental Psychology*, *77*, 353–363.

Posner, M. I., & Keele, S. W. (1970). Retention of abstract ideas. *Journal of Experimental Psychology*, *83*, 304–308.

Price, A., Filoteo, J. V., & Maddox, W. T. (2009). Rule-based category learning in patients with Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, *47*, 1213–1226.

Proffitt, J. B., Medin, D. L., & Coley, J. D. (2000). Expertise and category-based induction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 811–828.

Pullum, G. K. (1991). *The great Eskimo vocabulary hoax, and other irreverent essays on the study of language*. Chicago, IL: University of Chicago Press.

Putnam, H. (1975). The meaning of „meaning". In H. Putnam (Hrsg.), *Mind, language, and reality. Philosophical papers* (Bd. 2, S. 215–271). London: Cambridge University Press.

Quine, W. V. O. (1960). *Word and object*. Cambridge, MA: MIT Press.

Rehder, B. (2003a). A causal-model theory of conceptual representation and categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*, 1141–1159.

Rehder, B. (2003b). Categorization as causal reasoning. *Cognitive Science*, *27*, 709–748.

Rehder, B. (2009). Causal-based property generalization. *Cognitive Science*, *33*, 301–343.

Rehder, B., & Hastie, R. (2001). Causal knowledge and categories: The effects of causal beliefs on categorization, induction, and similarity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 323–360.

Rehder, B., & Hastie, R. (2004). Category coherence and category-based property induction. *Cognition*, *91*, 113–153.

Rehder, B., & Hoffman, A. B. (2005). Thirty-something categorization results explained: Selective attention, eyetracking, and models of category learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*, 811–829.

Rehder, B., & Kim, S. W. (2006). How causal knowledge affects classification: A generative theory of categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 659–683.

Rehder, B., & Kim, S. (2010). Causal status and coherence in causal-based categorization. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 117–1206.

Rescorla, R. A. (1973). Evidence for the „unique stimulus" account of configural conditioning. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *85*, 331–338.

Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and non-reinforcement. In A. H.

Black, & W. F. Prokasy (Hrsg.), *Classical conditioning II. Current research and theory* (S. 64–99). New York: Appleton-Century-Crofts.
Rips, L. J. (1989). Similarity, typicality, and categorization. In S. Vosniadou, & A. Ortony (Hrsg.), *Similarity and analogical reasoning* (S. 2–59). Cambridge: Cambridge University Press.
Rips, L. J. (2001). Necessity and natural categories. *Psychological Bulletin*, *127*, 827–852.
Rips, L. J., Smith, E. E., & Medin, D. L. (2012). Concepts and categories: Memory, meaning, and metaphysics. In K. J. Holyoak, & R. G. Morrison (Hrsg.), *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning* (S. 177–209). Oxford: Oxford University Press.
Rosch, E. (1978). Principles of categorization. In E. Rosch, & B. B. Lloyd (Hrsg.), *Cognition and categorization* (S. 27–48). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Rosch, E., & Mervis, C. B. (1975). Family resemblances: Studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, *7*, 573–605.
Rosch, E., Simpson, C., & Miller, R. S. (1976a). Structural bases of typicality effects. Journal of Experimental Psychology. *Human Perception and Performance*, *2*, 491–502.
Rosch, E., Mervis, C. B., Gray, W. D., Johnson, D. M., & Boyes-Braem, P. (1976b). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, *8*, 382–439.
Ross, B. H. (1997). The use of categories affects classification. *Journal of Memory and Language*, *37*, 240–267.
Ross, B. H., & Murphy, G. L. (1999). Food for thought: Crossclassification and category organization in a complex realworld domain. *Cognitive Psychology*, *38*, 495–553.
Roth, E. M., & Shoben, E. J. (1983). The effect of context on the structure of categories. *Cognitive Psychology*, *15*, 346–378.
Rouder, J. N., & Ratcliff, R. (2004). Comparing categorization models. *Journal of Experimental Psychology: General*, *133*, 63–82.
Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning internal representations by error propagation. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, & P. D. P. R. Group (Hrsg.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Bd. 1, S. 318–362). Cambridge, MA: MIT Press.
Sartori, G., & Job, R. (1988). The oyster with four legs: A neuropsychological study on the interaction of visual and semantic information. *Cognitive Neuropsychology*, *5*, 105–132.
Schuldt, J. P., & Schwarz, N. (2010). The „organic" path to obesity? Organic claims influence calorie judgments and exercise recommendations. *Judgment and Decision Making*, *5*, 144–150.
Schyns, P. G., & Rodet, L. (1997). Categorization creates functional features. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *23*, 681–696.
Schyns, P. G., Goldstone, R. L., & Thibaut, J. P. (1998). The development of features in object concepts. *Behavioral and Brain Sciences*, *21*, 1–54.
Seger, C. A., & Miller, E. K. (2010). Category learning in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, *33*, 203–219.
Shafto, P., & Coley, J. D. (2003). Development of categorization and reasoning in the natural world: Novices to experts, naive similarity to ecological knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*, 641–649.
Shepard, R. N. (1958). Stimulus and response generalization: Tests of a model relating generalization to distance in psychological space. *Journal of Experimental Psychology*, *55*, 509–523.
Shepard, R. N. (1987). Toward a universal law of generalization for psychological science. *Science*, *237*, 1317–1323.
Slobin, D. (1996). From „thought and language" to „thinking for speaking.". In J. Gumperz, & S. Levinson (Hrsg.), *Rethinking linguistic relativity* (S. 70–96). Cambridge, MA: Cambridge University Press.
Sloman, S. A. (1993). Feature-based induction. *Cognitive Psychology*, *25*, 231–280.
Sloman, S. A. (1994). When explanations compete: The role of explanatory coherence on judgments of likelihood. *Cognition*, *52*, 1–21.
Sloman, S. A. (2005). *Causal models. How people think about the world and its alternatives*. Oxford: Oxford University Press.
Smith, E. E. (1995). Concepts and categorization. In E. E. Smith, & D. N. Osherson (Hrsg.), *Thinking. An invitation to Cognitive Science* (2. Aufl. S. 3–33). Cambridge, MA: MIT Press.
Smith, E. E., & Medin, D. L. (1981). *Categories and concepts*. Cambridge, MA.: Harvard University Press.
Smith, E. E., & Osherson, D. N. (1984). Conceptual combination with prototype concepts. *Cognitive Science*, *8*, 33–361.
Smith, E. E., & Sloman, S. A. (1994). Similarity versus rule-based categorization. *Memory & Cognition*, *22*, 377–386.
Smith, E. E., Osherson, D. N., Rips, L. J., & Keane, M. (1988). Combining prototypes: A selective modification model. *Cognitive Science*, *12*, 485–527.
Smith, E. E., Patalano, A. L., & Jonides, J. (1998). Alternative strategies of categorization. *Cognition*, *65*, 167–196.
Smith, J. D. (2014). Prototypes, exemplars, and the natural history of categorization. *Psychonomic Bulletin & Review*, *21*, 312–331.
Smith, J. D., Murray, M. J., & Minda, J. P. (1997). Straight talk about linear separability. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *23*, 659–680.
Smith, L. B., & Samuelson, L. K. (1997). Perceiving and remembering: Category stability, variability and development. In K. Lamberts, & D. Shanks (Hrsg.), *Knowledge, concepts and categories* (S. 161–195). Hove, UK: Psychology Press.
Sokal, R. R. (1974). Classification: Purposes, principles, progress, prospects. *Science*, *185*, 1115–1123.
Solomon, K. O., Medin, D. L., & Lynch, E. (1999). Concepts do more than categorize. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 99–105.
Spelke, E. S., & Tsivkin, S. (2001). Language and number: A bilingual training study. *Cognition*, *78*, 45–88.
Spelke, E. S., Breinlinger, K., Macomber, J., & Jacobson, K. (1992). Origins of knowledge. *Psychological Review*, *99*, 605–632.
Spelke, E. S., Phillips, A., & Woodward, A. L. (1995). Infants' knowledge of object motion and human action. In D. Sperber, D. Premack, & A. J. Premack (Hrsg.), *Causal cognition: A multidisciplinary debate* (S. 44–78). Oxford: Oxford University Press.
Springer, K., & Keil, F. C. (1989). On the development of biologically specific beliefs: the case of inheritance. *Child Development*, *60*, 637–648.
Srull, T. K., & Wyer, R. S. (1979). The role of category accessibility in the interpretation of information about persons: Some determinants and applications. *Journal of Personality and Social Psychology*, *37*, 1660–1672.
Stanton, R. D., & Nosofsky, R. M. (2007). Feedback interference and dissociations of classification: Evidence against the multiple-learning-systems hypothesis. *Memory & Cognition*, *35*, 17471–17758.
Steele, C. M., & Aronson, J. (1995). Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans. *Journal of Personality and Social Psychology*, *69*, 797–811.
Sternberg, R. J., & Ben-Zeev, T. (2001). *Complex cognition. The psychology of human thought*. New York: Oxford University Press.
Strevens, M. (2000). The essentialist aspect of näıve theories. *Cognition*, *74*, 149–175.
Tajfel, H., & Wilkes, A. L. (1963). Classification and quantitative judgment. *British Journal of Psychology*, *54*, 101–114.
Tanaka, J. W., & Taylor, M. (1991). Object categories and expertise: Is the basic level in the eye of the beholder? *Cognitive Psychology*, *23*, 457–482.
Tenenbaum, J. B., & Griffiths, T. L. (2007). Intuitive theories and rational causal inference. In A. Gopnik, & L. E. Schulz (Hrsg.), *Causal learning: Psychology, philosophy, and computation* (S. 301–322). Oxford: Oxford University Press.
Tooby, J., & Cosmides, L. (1992). The psychological foundations of culture. In J. Barkow, L. Cosmides, & J. Tooby (Hrsg.), *The adapted mind* (S. 19–136). Oxford: Oxford University Press.
Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, *84*, 327–352.
Tversky, B., & Hemenway, K. (1984). Objects, parts, and categories. *Journal of Experimental Psychology: General*, *113*, 169–193.
Tyler, L. K., & Moss, H. E. (2001). Towards a distributed account of conceptual knowledge. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*, 244–252.
Voorspoels, W., Vanpaemel, W., & Storms, G. (2008). Exemplars and prototypes in natural language concepts: A typicality-based evaluation. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*, 630–637.
Waldmann, M. R. (1990). *Schema und Gedächtnis*. Heidelberg: Asanger.
Waldmann, M. R. (1996a). Knowledge-based causal induction. In D. R. Shanks, K. J. Holyoak, & D. L. Medin (Hrsg.), *Causal learning* The psychology of learning and motivation, (Bd. 34, S. 47–88). San Diego: Academic Press.

Waldmann, M. R. (1996b). Wissensgeleitetes Lernen. In J. Hoffmann, & W. Kintsch (Hrsg.), *Lernen* Enzyklopädie – Kognition, (Bd. II, S. 323–355). Göttingen: Hogrefe.

Waldmann, M. R. (1997). Wissen und Lernen. *Psychologische Rundschau*, *48*, 84–100.

Waldmann, M. R. (2000). Competition among causes but not effects in predictive and diagnostic learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 53–76.

Waldmann, M. R. (2001). Predictive versus diagnostic causal learning: Evidence from an overshadowing paradigm. *Psychological Bulletin & Review*, *8*, 600–608.

Waldmann, M. R., & Hagmayer, Y. (2006). Categories and causality: The neglected direction. *Cognitive Psychology*, *53*, 27–58.

Waldmann, M. R., & Hagmayer, Y. (2013). Causal reasoning. In D. Reisberg (Hrsg.), *Oxford Handbook of Cognitive Psychology* (S. 733–752). New York: Oxford University Press.

Waldmann, M. R., & Holyoak, K. J. (1992). Predictive and diagnostic learning within causal models: Asymmetries in cue competition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*, 222–236.

Waldmann, M. R., & Martignon, L. (1998). A Bayesian network model of causal learning. In M. A. Gernsbacher, & S. J. Derry (Hrsg.), *Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 1102–1107). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Waldmann, M. R., Holyoak, K. J., & Fratianne, A. (1995). Causal models and the acquisition of category structure. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*, 181–206.

Waldmann, M. R., Hagmayer, Y., & Blaisdell, A. P. (2006). Beyond the information given: Causal models in learning and reasoning. *Current Directions in Psychological Science*, *15*, 307–311.

Warrington, E. K., & Shallice, T. (1984). Category-specific semantic impairment. *Brain*, *107*, 829–854.

Wattenmaker, W. D. (1995). Knowledge structures and linear separability: Integrating information in object and social categorization. *Cognitive Psychology*, *28*, 274–328.

Wattenmaker, W. D., Dewey, G. I., Murphy, T. D., & Medin, D. L. (1986). Linear separability and concept learning: Context, relational properties, and concept naturalness. *Cognitive Psychology*, *18*, 158–194.

Weinert, F. E., & Waldmann, M. R. (1988). Wissensentwicklung und Wissenserwerb. In H. Mandl, & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie. Ein Lehrbuch* (S. 161–199). München: Urban & Schwarzenberg.

Wellman, H. M., & Gelman, S. A. (1992). Cognitive development: Foundational theories of core domains. *Annual Review of Psychology*, *62*, 1070–1090.

Williams, J. J., & Lombrozo, T. (2013). Explanation and prior knowledge interact to guide learning. *Cognitive Psychology*, *66*, 55–84.

Whorf, B. L. (1956). *Language, thought, and reality*. Cambridge, MA: MIT Press.

Wisniewski, E. J., & Gentner, D. (1991). On the combinatorial semantics of noun pairs: minor and major adjustments to meaning. In G. B. Simpson (Hrsg.), *Understanding word and sentence* (S. 241–284). North Holland: Elsevier.

Wisniewski, E. J., & Love, B. C. (1998). Properties versus relations in conceptual combination. *Journal of Memory and Language*, *38*, 177–202.

Wisniewski, E. J., & Medin, D. L. (1994). On the interaction of theory and data in concept learning. *Cognitive Science*, *18*, 221–281.

Wittgenstein, L. (1953). *Philosophische Untersuchungen*. Frankfurt/Main: Suhrkamp. /1971

Yamauchi, T., & Markman, A. B. (1998). Category learning by inference and classification. *Journal of Memory and Language*, *39*, 124–148.

Yamauchi, T., & Markman, A. B. (2000). Inference using categories. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*, 776–795.

Zaki, S. R., & Homa, D. (1999). Concepts and transformational knowledge. *Cognitive Psychology*, *39*, 69–115.

Zeithamova, D., & Maddox, W. T. (2006). Dual-task interference in perceptual category learning. *Memory & Cognition*, *34*, 387–398.

Gedächtniskonzeptionen und Wissensrepräsentationen

Axel Buchner und Martin Brandt

12.1 Einleitung und Begriffsklärung – 402

12.2 Langzeitgedächtnis – 405

12.2.1 Systemorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis – 405

12.2.2 Prozessorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis – 412

12.2.3 Formale Gedächtnistheorien – 419

12.3 Arbeitsgedächtnis – 423

12.3.1 Das modulare Arbeitsgedächtnismodell – 423

12.3.2 Das Embedded-Processes-Modell – 425

12.4 Sensorisches Gedächtnis – 427

12.5 Anwendungsbeispiele – 428

12.6 Ausblick – 428

12.7 Weiterführende Informationen – 429

Literatur – 430

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_12

Im Blickfang

Psychologie der Zeugenaussage

Marvin Lamont Anderson wurde 1982 wegen Raub, Vergewaltigung und Entführung verurteilt. Im Jahr 2001 wurde er nach 19 Jahren Haft durch einen neuen DNA-Test frei gesprochen. Obwohl er ein Alibi für die Tatzeit hatte, wurde er vom Opfer identifiziert. Im Jahr 1992 gründeten Barry C. Scheck und Peter J. Neufeld von der Yeshiva-Universität in New York das Innocence Project. Ziel dieses Projekts ist es, verurteilte (vermeintliche) Straftäter wie Marvin Lamont Anderson darin zu unterstützen, ihre Unschuld zu beweisen. Bis heute sind hauptsächlich durch DNA-Analysen über 300 Verurteilte freigesprochen worden, von denen 18 im Todestrakt saßen. Der durchschnittliche Gefängnisaufenthalt für die unschuldig Verurteilten betrug 14 Jahre (► http://www.innocenceproject.org/).

Aus gedächtnispsychologischer Sicht besonders interessant, aber auch erschreckend ist die Tatsache, dass in 72 % der Fälle falsche Identifikationen durch Augenzeugen maßgeblich zur falschen Verurteilung beigetragen haben. Natürlich sind nicht alle dieser Fälle genuin über ein nicht korrekt funktionierendes Gedächtnis zu erklären, da in einigen Fällen Zeugen bewusst gelogen oder von der Polizei massiv zur Falschaussage gedrängt worden sind. Nichtsdestotrotz bleiben viele Fälle, in denen Zeugen nach bestem Wissen und Gewissen die falsche Person identifiziert haben. Wie kann es sein, dass sich Menschen sehr sicher sind, sich an eine Person zu erinnern, die – wie sich später herausstellt – gar nicht am Tatort gewesen sein kann?

Ganz offensichtlich funktioniert unser Gedächtnis nicht immer so gut wie wir es uns vorstellen. Zwar erleben wir alle, dass es uns manchmal nicht gelingt, eine vermeintlich im Gedächtnis enthaltene Information aus dem Gedächtnis wieder abzurufen. Ist die Suche nach einer bestimmten Information hingegen erfolgreich, dann vertrauen wir in der Regel darauf, dass die abgerufene Information auch stimmt. Wie das oben geschilderte Beispiel zeigt, ist das leider nicht immer richtig. Gedächtnispsychologen haben eine Vielzahl von standardisierten Untersuchungssituationen geschaffen, in denen sich Gedächtnisfehler relativ stabil und vorhersagbar produzieren lassen. Solche Gedächtnistäuschungen sind ein wichtiger Prüfstein für Theorien des Gedächtnisses und werden in diesem Kapitel diskutiert.

Im Fall von Marvin Lamont Anderson machte die Polizei übrigens schwere handwerkliche Fehler. Das Opfer sollte zunächst den vermeintlichen Täter anhand eines Fotos identifizieren. Da Anderson nie straffällig war, hatte die Polizei kein polizeiliches Identifizierungsfoto und behalf sich mit einem farbigen Foto von seinem Arbeitgeber. Dieses wurde dem Opfer mit sechs schwarz-weißen polizeilichen Identifizierungsfotos vorgelegt. Das farbige Foto stach also stark aus den anderen Alternativen heraus und wurde vom Opfer gewählt. In der anschließenden Gegenüberstellung war Anderson die einzige Person, von der das Opfer vorher ein Foto gesehen hatte. Es liegt also nahe, dass das Opfer in der Gegenüberstellung nicht den Täter wiedererkannt hat, sondern die Person gewählt hat, die ihm aufgrund des vorher gezeigten Fotos bekannt war. Deffenbacher et al. (2006) zeigten, dass alleine die Tatsache, dass einem Zeugen Fahndungsfotos gezeigt werden, die Fehler in späteren Gegenüberstellungen erhöhen, wenn Personen, deren Fotos gezeigt wurden, an der späteren Gegenüberstellung teilnehmen. Dies ist auch dann der Fall, wenn ein Zeuge den Verdächtigen auf dem Fahndungsfoto zunächst gar nicht identifiziert hat.

Dieses Beispiel zeigt auch, dass die Gedächtnispsychologie wichtige Anwendungen im Alltag hat, die darüber hinaus mit anderen Teilgebieten der Psychologie stark vernetzt sind. Eine ausführliche Übersicht über den Stand der Forschung zur Psychologie des Augenzeugens geben Wells et al. (2006).

12

12.1 Einleitung und Begriffsklärung

Dass es gut ist zu wissen, wie menschliches Gedächtnis funktioniert, ist offenkundig. Viele nützliche Entwicklungen wie etwa die Verbesserung von polizeilichen Verhörmethoden zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Zeugenaussagen oder effiziente Lernstrategien – wir werden später in diesem Kapitel noch näher darauf eingehen – beruhen auf empirisch fundierten Gedächtnistheorien.

Beim Thema „Gedächtnis“ denken die meisten Menschen zuerst an das **Langzeitgedächtnis**. Daher wird die Diskussion theoretischer Konzeptionen und formaler Modelle des Langzeitgedächtnisses hier auch den größten Raum einnehmen. Doch neben dem Langzeitgedächtnis werden noch weitere Gedächtnissysteme angenommen. Wenn wir z. B. eine Telefonnummer aus einem Adressverzeichnis ablesen und diese anschließend am Telefon eintippen, betrifft diese Leistung nicht das Langzeitgedächtnis, sondern das **Arbeitsgedächtnis**. Arbeits- und Langzeitgedächtnis funktionieren unterschiedlich. So kann im Arbeitsgedächtnis nur eine sehr begrenzte Menge an Information bereitgehalten werden und das auch nur für eine relativ kurze Zeit. Das ist einer der Gründe, warum seinerzeit Tastentelefone einen wesentlichen Fortschritt gegenüber Wählscheibentelefonen darstellten. Bei Tastentelefonen kann eine Telefonnummer schneller eingegeben werden und muss daher weniger lang im Arbeitsgedächtnis bereitgehalten werden. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Teile der Telefonnummer während des Wählens vergessen werden.

Die Trennung zwischen Arbeits- und Langzeitgedächtnis als zwei in ihrer Funktionsweise klar verschiedene Gedächtnissysteme orientiert sich an Broadbents (1958) einflussreichem Modell menschlicher Informationsverarbeitung (► Zur Vertiefung 12.1) und liegt auch Mehrspeichermodellen wie dem von Atkinson und Shiffrin (1968) zugrunde, das man heute als **modales Gedächtnismodell** (Murdock 1974) bezeichnet. Details dieses ursprünglich mathematisch formulierten Modells haben sich als empirisch nicht angemessen erwiesen, doch der Modellrahmen ist nach wie vor nützlich. ◘ Abb. 12.1 illustriert in vereinfachter Form eine aktualisierte Variante des modalen Modells, das wir hier als übergeordnetes Modell verwenden wollen.

In ◘ Abb. 12.1 findet sich neben dem Langzeit- und Arbeitsgedächtnis das **sensorische Gedächtnis**, dessen Komponenten auch als sensorische Register bezeichnet werden. In diesen Komponenten wird Information reizspezifisch für nur wenige Hundert Millisekunden bereitgehalten. Sie bilden gleichsam die Brücke zwischen Wahrnehmung und dem, was eher einer konventionellen Vorstellung von Gedächtnis entspricht. In dem Modell von Broadbent entsprechen die sensorischen Register der ersten präattentiven Stufe der Informationsverarbeitung. Wir werden am Ende dieses Kapitels auf das sensorische Gedächtnis zu sprechen kommen.

Zur Vertiefung 12.1

Broadbents Modell der Informationsverarbeitung

Donald Broadbent war ursprünglich Ingenieur. Als Pilot der Royal Air Force erlebte er mit, wie während des Zweiten Weltkrieges die kriegsbedingt forcierte technische Entwicklung auch das Flugpersonal zunehmend überforderte. Schnell wurde klar, dass die Ingenieurswissenschaften zur Bewältigung der ergonomischen Probleme wenig beitragen konnten. Mit dem Ziel, diese Probleme besser zu verstehen, wandte sich Broadbent der Psychologie zu und entwickelte ein Modell menschlicher Informationsverarbeitung. Dass Broadbents Modell starke Analogien zu damals verfügbaren Telekommunikationssystemen aufweist, passt gut zu der Tools-to-Theories-Heuristik (Gigerenzer 1991), nach der in der Wissenschaft bevorzugt physische und analytische „Werkzeuge" aus dem Bereich der täglichen Arbeit die metaphorischen Quellen für Theorieentwürfe bilden. Telekommunikationssysteme stellten damals einen Kristallisationspunkt des technischen Fortschritts dar und waren dem Ingenieur Broadbent natürlich in besonderer Weise vertraut.

Broadbents (1958) Modell sieht einen sequenziellen Informationsfluss durch eine Reihe von hintereinander geschalteten Systemen vor. Die erste Verarbeitungsstufe bildet ein präattentives Verarbeitungssystem, in dem in hochgradig automatisierter Form vor allem einfache physikalische Eigenschaften einer breiten Palette einlaufender Reize analysiert werden. Solch eine einfache physikalische Reizeigenschaft kann z. B. die klangliche Charakteristik der Stimme einer Person sein. Diese Stufe ist also so angelegt, dass mit begrenzten Verarbeitungsressourcen viele Reize in wenig aufwendiger Form analysiert werden können. Nachgeschaltet ist ein Filter, den nur wenige Reize für eine tiefer gehende Analyse passieren können. Der Filter kann sich nur auf das stützen, was auf dieser Verarbeitungsebene vorliegt, nämlich einfache physikalische Reizeigenschaften. Demnach wählt man z. B. die gesprochene Nachricht, der man zuhört, während man andere „überhört", anhand der klanglichen Eigenschaften der Sprecherstimme aus. Die Bedeutung des Gesagten soll keine Rolle spielen, denn Information über Bedeutung liegt auf dieser Analyseebene noch nicht vor.

Die weitergeleiteten Reize gelangen in einen Kurzzeitgedächtnisspeicher. Erst hier werden sie weiter – etwa hinsichtlich ihrer Bedeutung – analysiert. Die zweite Informationsverarbeitungsstufe ist also komplexer (man könnte auch von einer größeren **Verarbeitungstiefe** sprechen; ▶ Abschn. 12.2.2) und konzentriert die verfügbaren Ressourcen dabei auf wenige Reize.

Im Kurzzeitgedächtnis kann nur wenig Information bereitgehalten werden, und diese geht verloren, wenn sie nicht ständig wieder benutzt und dadurch aufgefrischt wird. Unter anderem darin unterscheidet sich das Kurzzeitgedächtnis vom Langzeitgedächtnis, in dem weitaus größere Informationsmengen für sehr lange Zeit verfügbar sind.

Dieses Modell von Broadbent bildet die Basis zahlreicher Mehrspeichermodelle, die man heute unter dem Begriff „modales Modell" zusammenfasst.

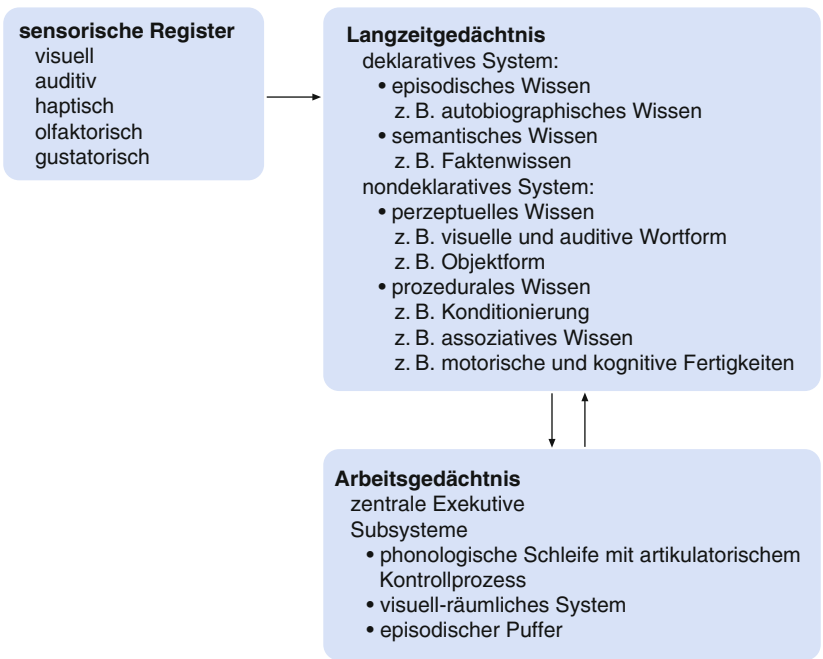


Abb. 12.1 Schematische Darstellung des modalen Gedächtnismodells

Die Unterscheidung von Langzeit-, Arbeits- und sensorischem Gedächtnis erscheint noch recht grob. Es überrascht daher nicht, dass zahlreiche Vorschläge dazu existieren, welche weiteren Unterformen von Gedächtnis innerhalb dieser Kategorien zu unterscheiden seien. Wir werden auf einige dieser Vorschläge eingehen. Zunächst ist es aber sinnvoll, drei Ebenen zu trennen, auf denen eine solche Unterscheidung angesiedelt sein kann: eine deskriptive, eine funktionale und eine neuronale Ebene.

1. *Deskriptive Ebene:* Hier werden Gedächtnissysteme aufgrund unterschiedlicher Anforderungen der Gedächtnisaufgabe oder aufgrund des zu verarbeitenden Materials unterschieden. Auf dieser Ebene können prinzipiell beliebige Formen von Gedächtnis unterschieden werden, z. B. ein Gedächtnis für Gesichter und eines für Telefonnummern. Manchmal mag das nützlich sein. So könnten wir gegenüber einer Person, die wir auf der Straße nicht wiedererkannt haben, erklären, unser Gesichtergedächtnis bereite leider gewisse Probleme, und damit implizieren, das übrige (selbstverständlich das „eigentliche") Gedächtnis funktioniere dagegen prima. Trotz der Freiheit bei der Postulierung von Gedächtnis-

formen auf deskriptiver Ebene sind natürlich nicht alle Vorschläge gleich plausibel. Die Idee eines Gedächtnisses für Telefonnummern z. B. erscheint etwas weit hergeholt. Wie sollte sich im Verlauf der Evolution ein solches spezifisches Gedächtnissystem herausgebildet haben? Der Vorschlag eines Telefonnummerngedächtnisses dürfte bereits an dieser Stelle wenig weitere Beachtung finden. Bei einem Gedächtnis für Gesichter stellt sich die Situation anders dar. Das Erinnern von Gesichtern könnte als eine für die menschliche Evolution in sozialen Gemeinschaften besonders zentrale Fähigkeit betrachtet werden, weil davon auch die soziale Einordnung des Gegenübers etwa als betrügerische oder vertrauenswürdige Person und damit die Evolution von Kooperation in sozialen Gemeinschaften profitieren würde (Bell und Buchner 2012, 2014). Insofern könnte die Herausbildung eines spezialisierten Gesichtserkennungssystems durchaus Vorteile mit sich gebracht haben. Auch existiert Evidenz, die mit der Annahme eines spezialisierten Gesichtergedächtnisses vereinbar wäre. Manche rechnen hierzu bereits den Befund, dass Menschen Gesichter ihrer eigenen Ethnizität besser wiedererkennen als Gesichter anderer Ethnizitäten (Meissner und Brigham 2001). Allerdings kann dieser Unterschied auch einfach mit Unterschieden in der Erfahrung beim Erkennen von Gesichtern aus verschiedenen ethnischen Gruppen zusammenhängen. Eine Person, die in Mitteleuropa lebt, hat einfach sehr viel mehr mitteleuropäische als asiatische Gesichter gesehen. Damit wäre das Gedächtnis für Gesichter nicht verschieden vom Gedächtnis für andere Dinge wie etwa die Stellung von Schachfiguren (Chase und Simon 1973): Mehr Erfahrung mit dem Gegenstandsbereich geht in beiden Fällen mit besserem Gedächtnis für die dazugehörenden Inhalte einher. Interessanter wären daher Befunde, die anzeigen, dass das Gedächtnis für Gesichter tatsächlich anders funktioniert als das Gedächtnis für andere Inhalte. Dies führt uns zu einer weiteren Ebene, auf der Gedächtnissysteme unterschieden werden können.

2. *Funktionale Ebene:* Man orientiert sich auf dieser Ebene nicht so stark an oberflächlichen Eigenschaften von Gedächtnisinhalten, sondern versucht, eine Unterscheidung anhand der Funktionsweise von Gedächtnissystemen zu erreichen. Funktionale Unterschiede von Gedächtnissystemen können beispielsweise in der Kapazität, in Charakteristika der Lern- und Vergessensraten oder in der evolutionären Genese der postulierten Systeme bestehen. H. D. Ellis und Young (1989) führen eine Reihe von Untersuchungen an, die zeigen, dass bereits Neugeborene eine deutliche Präferenz für „korrekt“ dargestellte Gesichter gegenüber Gesichtern mit unnatürlich arrangierten Elementen besitzen. Auch können schon Neugeborene auf der Basis von Gesichtsinformation Erstaunliches leisten. So scheinen sie anhand von Gesichtsausdrücken zwischen verschiedenen emotionalen Zuständen bei anderen Personen zu unterscheiden, und sie können schon sehr früh Gesichtsausdrücke imitieren. Diese Befundlage bietet zumindest eine gewisse Rechtfertigung für die Hypothese, es existiere ein besonderes Informationsverarbeitungssystem für Gesichter.

Eine häufig eingesetzte Methode zum experimentellen Nachweis unterschiedlicher Gedächtnissysteme auf der funktionalen Ebene ist das **Dissoziationsparadigma**. Dabei untersucht man, ob bestimmte Manipulationen unterschiedliche Effekte auf verschiedene Gedächtnisaufgaben haben. Stellen wir uns eine Untersuchung vor, bei der zwei Gedächtnistests (G_X und G_Y) und eine experimentelle Manipulation (M_A) eingesetzt werden. Stellen wir uns weiter vor, dass sich die Manipulation M_A auf die Leistung bei Test G_X, aber nicht bei Test G_Y auswirkt. Man könnte aus einem solchen Ergebnis schließen, dass die Manipulation M_A offenbar einen Aspekt von Gedächtnis beeinflusst, der von dem Gedächtnistest G_X, aber nicht von G_Y erfasst wird. Ein konkretes Beispiel soll das Prinzip des Dissoziationsparadigmas anschaulicher machen. Light und Singh (1987) verglichen die Leistungen älterer und jüngerer Personen (die Altersvariable entspricht damit der Manipulation M_A) in zwei verschiedenen Formen von Gedächtnistests. Bei der einen Form (G_X) mussten sich die Personen – wie etwa beim Wiedererkennen – an eine vorangegangene Lernepisode erinnern und das Gelernte abrufen („Haben Sie dieses Wort in der Lernphase gesehen?“). Bei der anderen Form (G_Y) war das nicht der Fall. Stattdessen sollten Bruchstücke von Wörtern einfach zu einem beliebigen sinnvollen Wort ergänzt werden. Typischerweise zeigt sich bei dieser Aufgabe, dass Personen für diese Wortergänzung überzufällig häufig solche Wörter wählen, die sie kurz zuvor in einem ganz anderen Zusammenhang gelesen haben, und zwar auch dann, wenn sie den Einfluss der vorangegangenen Lernerfahrung gar nicht bewusst bemerken. Bei Light und Singh zeigte sich nun, dass die älteren Personen beim Wiedererkennen schlechter waren als die jüngeren. Beim Wortergänzungstest aber zeigten beide Gruppen die gleiche Leistung. Aus einem solchen Befundmuster könnte man schließen, dass das Altern vor allem diejenigen Komponenten des Gedächtnisses betrifft, die an dem direkten Abruf von Information aus bestimmten Lernepisoden beteiligt sind. Jene Gedächtniskomponenten, die für die Erfahrungsnachwirkungen in der Wortergänzungsaufgabe notwendig sind, bleiben demnach im Alter unbeeinträchtigt. Die beiden Typen von Gedächtniskomponenten werden daher auch als *funktional unabhängig* betrachtet. Wie wir im Verlauf dieses Kapitels noch sehen werden, ist eine solche Interpretation dieser *einfachen Dissoziation* zwar attraktiv und häufig zu lesen, aber problematisch und auch unnötig (Ward et al. 2013a). Deswegen wird bisweilen versucht, eine *doppelte Dissoziation* nachzuweisen. Diese wäre gegeben, wenn sich zusätzlich zeigen würde, dass sich eine weitere Manipulation (M_B) nicht auf die Leistung bei Aufgabe G_X, aber auf die Leistung bei Aufgabe G_Y auswirkt. Bezogen auf unser Beispiel müssten wir also nach einer Manipulation suchen, die das Wiedererkennen nicht beeinflusst, wohl aber die Leistungen bei der Wortergänzungsaufgabe. Neben den Dissoziationsstudien spielen bei der Unterscheidung von Gedächtnissystemen auf funktionaler Ebene auch Untersuchungen von Gedächtnisleistungen in unterschiedlichen Aufgaben mit mathematischen Prozessmodellen (▶ Abschn. 12.2.3) eine bedeutende Rolle. Dabei zeigt sich

des Öfteren, dass Dissoziationen, die wie beschrieben oft als Belege für die Annahme funktional *verschiedener* Gedächtnissysteme interpretiert werden, auch innerhalb eines *einzigen, homogenen* Gedächtnissystems gefunden werden können (Hintzman 1990). So könnte es in unserem Beispiel so sein, dass die Erinnerung an spezifische Lernepisoden einfach schwerer ist als der Abruf von Gedächtnisinhalten in der Wortstammergänzungsaufgabe. Wenn die Leistung eines einheitlichen Gedächtnissystems im Alter nachlässt, dann ist zu erwarten, dass Einbußen bei der schwereren Aufgabe eher messbar sind als bei der leichten. Das Beispiel zeigt, dass von einem Dissoziationsbefund nicht zwingend auf die Beteiligung unterschiedlicher Gedächtnissysteme geschlossen werden kann.

3. *Neuronale Ebene*: Auf dieser Ebene werden Gedächtnissysteme auf der Basis unterschiedlicher beteiligter Hirnstrukturen definiert. Die Erkenntnisse stammen dabei meist aus Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren oder aus Untersuchungen von Patienten mit Läsionen in bestimmten Hirnarealen. Betrachten wir erneut das Beispiel des Gesichtergedächtnisses. Es könnte sein, dass einem Gesichtergedächtnis besondere Hirnstrukturen zugrunde liegen, die nicht an anderen Gedächtnisaufgaben beteiligt sind. Dafür spricht, dass bestimmte Hirnschädigungen mit selektiven Einbußen beim Gedächtnis für bekannte Personen einhergehen können (Kapur 1999). Auch der Befund, dass im temporalen Cortex von Schafen bestimmte Zellen bei der Präsentation von bekannten, nicht aber bei unbekannten Gesichtern von Schafen zu reagieren scheinen, kann so interpretiert werden (Kendrick und Baldwin 1987). Wenn genügend Befunde dieser Art zusammenkommen, dann könnte man auch auf einer neuronalen Ebene ein Gedächtnis für Gesichter von dem für andere Inhalte unterscheiden.

Zusammenfassend kann man also Folgendes sagen: Auf einer *deskriptiven* Ebene können prinzipiell beliebige Formen von Gedächtnis unterschieden werden. Interessanter, aber auch komplizierter wird es für die Gedächtnisforschung dann, wenn auf einer *funktionalen* Ebene mit wissenschaftlichen Methoden die Annahme erhärtet werden soll, dass die zunächst nur deskriptiv unterschiedenen „Gedächtnisse" tatsächlich verschiedene Arten von Informationen auf unterschiedliche Weise verarbeiten. Drittens können wir fragen, welchen Strukturen auf *neuronaler* Ebene verschiedene Gedächtnissysteme möglicherweise zugeordnet werden können.

Streng genommen kann man die funktionale und die neuronale Ebene unabhängig voneinander betrachten, in der Praxis aber werden beide Ebenen meistens zusammen diskutiert. Konkret ist es z. B. für die funktionale Ebene unerheblich, dass ein Gedächtnisverlust für berühmte Gesichter mit rechtstemporalen Läsionen, ein Gedächtnisverlust für berühmte Namen aber mit linkstemporalen Läsionen des Neocortex einherzugehen scheint (Eslinger et al. 1996). Beide Formen von Gedächtnis können prinzipiell dieselben Funktionscharakteristika aufweisen und somit trotz verschiedener Lokalisation nicht funktional verschieden sein. Tatsächlich aber wird ein Unterschied in der Lokalisation des neuronalen Substrats, das verschiedenen Formen von Gedächtnis zugrunde liegt, oft einfach gleichgesetzt mit einem funktionalen Unterschied in den betroffenen Gedächtnissystemen: Namens- und Gesichtergedächtnis gelten vielen als funktional verschieden, *weil* ihnen auf neuronaler Ebene verschiedene Hirnareale zugeordnet werden können. Das theoretische Postulat eines spezialisierten Gedächtnissystems sollte sich jedoch auf *allen* Analyseebenen bewähren.

12.2 Langzeitgedächtnis

In der Forschung zum Langzeitgedächtnis finden sich zwei dominierende Herangehensweisen. Zum einen kann man Gedächtnis, wie wir andeutungsweise schon gesehen haben, als eine Menge von verschiedenen *Systemen* betrachten (**Systemansatz**). Diesem Ansatz werden wir uns in ▶ Abschn. 12.2.1 zuwenden. Andererseits kann man aber auch, wie wir in ▶ Abschn. 12.2.2 sehen werden, die Betonung auf die Analyse von Gedächtnis*prozessen* legen (**Prozessansatz**). Daneben besteht ein weiterer wichtiger Zugang in der mathematischen Modellierung von Gedächtnis. Dabei müssen immer prozessuale *und* strukturelle Aspekte berücksichtigt werden. Allerdings ist man in diesem Ansatz in der Regel sehr sparsam mit dem Postulat unterschiedlicher Gedächtnisstrukturen. In diesem Sinne stehen häufig auch bei der formalen Modellierung prozessuale Gesichtspunkte im Vordergrund. Wir werden darauf in ▶ Abschn. 12.2.3 näher eingehen.

12.2.1 Systemorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis

In der Gedächtnisforschung wird häufig zwischen deklarativem und nondeklarativem Wissen unterschieden (J. R. Anderson 1976; Cohen und Squire 1980). Diese beiden Wissensformen werden verschiedenen Gedächtnissystemen zugeordnet. Auf deskriptiver Ebene umfasst das deklarative Gedächtnis verbalisierbares Wissen über Fakten und Ereignisse, also Wissen, über das Personen leicht Auskunft geben können. Diese Wissensform soll vor allem besonders flexibel und speziell zu Beginn eines Lernprozesses wichtig sein (Zola-Morgan und Squire 1993). Nach ausgedehnter Übung schließlich kann es schwierig werden, das erworbene Wissen zu verbalisieren. Das ist die Situation, in der Experten es oft einfacher finden, jemandem zu zeigen, wie etwas geht, statt dies mit Worten zu beschreiben. Dann ist, zumindest zu einem gewissen Grad, nondeklaratives (in diesem Fall: prozedurales) Wissen an die Stelle des deklarativen Wissens getreten.

Empirische Befunde, die traditionell im Sinne einer Trennung zwischen **deklarativem und nondeklarativem Gedächtnis** bewertet werden, betreffen die residualen Gedächtnisleistungen bei Personen, die nach einer Hirnschädigung als amnestisch gelten. Amnesie kann eine Vielzahl von heterogenen Ursachen haben – von Herpes-simplex-Encephalitis über mechanische Hirnverletzungen bis zu exzessivem, chronischem Alkoholkonsum (Cohen und Eichenbaum 1993). So heterogen wie die Ätiologien sind auch die Lokalisationen der resultierenden Hirnschädigungen, sodass bisweilen bezweifelt wird, ob es ver-

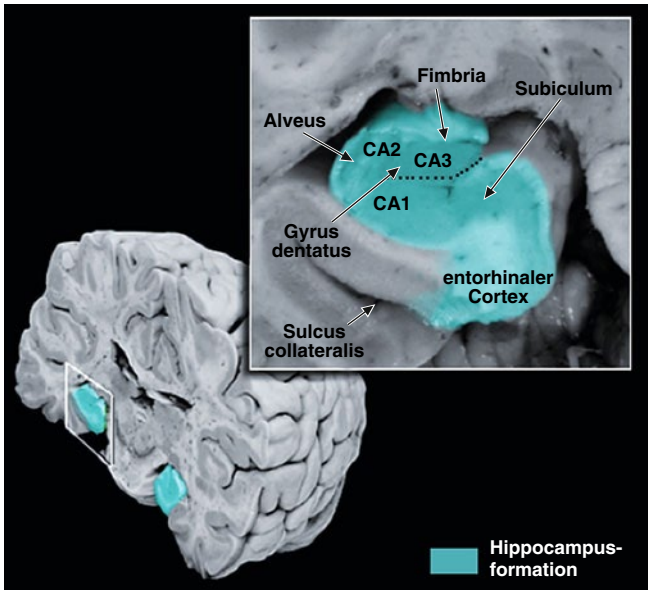


Abb. 12.2 Schematische Darstellung der Hippocampusformation

nünftig ist, Amnesie als ein einheitliches Syndrom zu bezeichnen (Downes und Mayes 1997). Zwar wird oft zwischen Amnesien als Folge von Schädigungen im medialen Temporallappen (primär in der Hippocampusformation; Abb. 12.2) und Amnesien als Folge von diencephalitischen Schädigungen unterschieden. Andere argumentieren jedoch, diese Unterscheidung sei nicht sinnvoll, weil die jeweils unterschiedlichen betroffenen Regionen Teile eines funktionalen zusammengehörenden hippocampal-diencephalitischen Systems seien (Aggleton und Brown 1999). Wieder andere argumentieren pragmatisch und verweisen darauf, dass die spezifische Charakteristik der Gedächtnisleistungen bei verschiedenen Ätiologien relativ ähnlich seien (Cohen und Eichenbaum 1993), weshalb man auf eine Unterscheidung zwischen ihnen verzichten könne.

Weil sein Fall so oft zur Illustration typisch amnestischer Gedächtnisleistungen zitiert wird, hat es der inzwischen verstorbene Henry Gustav Molaison, bekannt als Patient H.M., zu einer gewissen Berühmtheit gebracht. Als Nebenwirkungen einer Hirnoperation, bei der zur Bekämpfung von ansonsten therapieresistenten Krampfanfällen große Teile der medialen Temporallappen entfernt wurden, litt er unter retrograder und anterograder Amnesie. Die retrograde Amnesie äußerte sich darin, dass er einen Teil dessen, was er innerhalb von etwa elf Jahren vor der Operation gelernt hat, nicht erinnern konnte, früheres Wissen aber schon. Die anterograde Amnesie zeigte sich in seiner Unfähigkeit, neue Fakten zu erlernen und über eine Verzögerung hinweg zu behalten. Ein krasses Beispiel für das Gedächtnisdefizit von H.M. ist, dass er selbst Jahrzehnte nach der Operation nicht wusste, wie alt er war, wo er wohnte oder dass seine Eltern gestorben waren. Dem entspricht seine Leistung bei deklarativen Gedächtnistests, bei denen er nahezu keine Inhalte erinnern konnte. Andererseits wird berichtet, er sei in der Lage gewesen, Konversationen zu folgen, was als Zeichen der relativen Unversehrtheit seines Arbeitsgedächtnisses gewertet wird. Als besonders interessant gilt, dass er trotz seiner massiven Probleme bei deklarativen Gedächtnisinhalten bestimmte kognitive und motorische Fertigkeiten erwerben konnte. Hierzu gehören beispielsweise das „Spiegelzeichnen", das Lesen von spiegelverkehrtem Text, das Lösen des Turm-von-Hanoi-Problems und die Anwendung arithmetischer Regeln (Cohen und Eichenbaum 1993). Solche Aufgaben gelten gemeinhin als Prüfverfahren für nondeklaratives Wissen. Die Untersuchung amnestischer Patienten wie H.M. zeigt also eine Dissoziation in dem Sinne, dass nondeklarative Gedächtnisleistungen weit weniger von der amnestischen Erkrankung betroffen sind als deklarative. Das wird als Beleg für die funktionale Verschiedenheit der zugrunde liegenden Gedächtnissysteme gewertet.

Auch die Schlafforschung liefert Evidenzen zugunsten der Trennung von deklarativem und nondeklarativem Gedächtnis. Seit Langem wird die Rolle des Schlafes für Gedächtnisleistungen untersucht. Man geht dabei davon aus, dass Schlaf u. a. die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten fördert (Walker und Stickgold 2006). Für einen messbaren positiven Effekt von Schlaf auf das Gedächtnis reicht erstaunlicherweise schon ein kurzes Nickerchen von etwa 6 min (Lahl et al. 2008). Normaler Nachtschlaf wird oft als eine Abfolge verschiedener Schlafstadien beschrieben. Für die Gedächtnisforschung sind dabei der REM-Schlaf und der SWS-Schlaf besonders interessant (REM steht für *rapid eye movements*, also schnelle Augenbewegungen, die sich während dieser Schlafphase beobachten lassen; SWS steht für *slow wave sleep*, womit die Aktivitätsmuster im EEG gemeint sind). Während des Schlafens werden die verschiedenen Schlafstadien zyklisch durchlaufen. Vereinfacht ausgedrückt dauert ein Zyklus ungefähr 90 min und endet mit einer REM-Phase. REM- und SWS-Phasen sind nicht gleichmäßig über die nächtliche Schlafperiode verteilt. Vielmehr kommt SWS-Schlaf vor allem in der ersten Hälfte der Schlafperiode vor, während die REM-Phasen während der zweiten Hälfte der Schlafperiode immer länger werden.

Diesen Unterschied haben Plihal und Born (1997) ausgenutzt. Sie konnten zeigen, dass das Lernen und Erinnern von Wortpaaren, was vorwiegend das deklarative Gedächtnis beanspruchen sollte, vom SWS-reichen Schlaf der ersten Hälfte der Schlafperiode stärker profitiert als das Nachzeichnen von indirekt über einen Spiegel sichtbaren Figuren, was vor allem das nondeklarative Gedächtnis beanspruchen sollte. Umgekehrt profitierte die Leistung in nondeklarativen Aufgaben stärker als die Leistung in deklarativen Aufgaben vom REM-reichen Schlaf während der zweiten Hälfte der Schlafperiode. Solch ein Befundmuster legt die Vermutung nahe, dass SWS-Schlafphasen für Konsolidierungsprozesse des deklarativen Gedächtnisses wichtiger sind, REM-Phasen dagegen für die Konsolidierung nondeklarativer Gedächtnisinhalte. Konsistent damit ist, dass von einem kurzen mittäglichen Nickerchen das Behalten deklarativer, aber nicht prozeduraler Gedächtnisinhalte zu profitieren scheint (Schichl et al. 2011).

Deklaratives Gedächtnis

Von Tulving (1972, 1999) stammt die Dichotomie zwischen **episodischem und semantischem Langzeitgedächtnis**, die neben der Unterscheidung zwischen deklarativem und nondeklarativem Gedächtnis eine wichtige Rolle in der Gedächtnisforschung spielt. Dem episodischen Gedächtnis werden auf deskriptiver Ebene Erinnerungen an persönliche Ereignisse und deren räum-

liche und zeitliche Koordinaten zugeordnet. Die Erinnerung an den Urlaub in einem bestimmten Land ist ein Beispiel für einen Inhalt, den man dem episodischen Gedächtnis zuordnen würde. Das semantische Gedächtnis dagegen bezieht sich auf Sachwissen ohne zeitlich-räumliche Einbettung, z. B. unser allgemeines Wissen über das besagte Urlaubsland. Episodisches und semantisches Gedächtnis könnten demnach als Subsysteme des deklarativen Gedächtnisses betrachtet werden.

Welche empirischen Evidenzen sprechen dafür, semantisches und episodisches Gedächtnis als verschiedene Gedächtnissysteme zu betrachten? Tulving (1999) argumentiert, für die Trennung spräche der Befund, dass amnestische Patienten massive Probleme beim Erinnern autobiografischer Ereignisse hätten, aber ansonsten relativ unauffällig seien. Sie könnten z. B. lesen, schreiben oder Probleme lösen. Das dafür benötigte semantische Wissen scheint also nicht beeinträchtigt zu sein. Das könnte man im Sinne einer Dissoziation zwischen episodischem und semantischem Gedächtnis werten. Problematisch ist aber, dass große Teile der „semantischen" Wissensbestände – beispielsweise die Kenntnis von Objektnamen – oft weit vor der amnestischen Erkrankung erworben werden. Solche „älteren" Gedächtnisinhalte gehen bei einer amnestischen Erkrankung allgemein mit einer besonders geringen Wahrscheinlichkeit verloren. Tatsächlich kann man zeigen, dass nach einer Hirnschädigung, aber auch mit zunehmendem Alter diejenigen Begriffe mit größerer Wahrscheinlichkeit noch verfügbar sind, die man früher im Leben erworben hat (Hirsh und Ellis 1994; Hodgson und Ellis 1998). Hinzu kommt, dass man sich semantisches Wissen als redundanter repräsentiert vorstellen kann, da Fakten als Komponenten vieler verschiedener, für sich jeweils singulärer Episoden vorkommen können (Urlaubserinnerungen, Fernsehsendungen, Zeitungslektüren, Erzählungen etc.). Redundantere Repräsentationen von Fakten sollten natürlich in geringerem Umfang von Hirnschädigungen betroffen sein als singulär repräsentierte Episoden.

Die Liste der Probleme für die Trennung von episodischem und semantischem Gedächtnis ist damit noch lange nicht erschöpft. Wir wollen es aber dabei belassen und festhalten, dass beim derzeitigen Stand der Forschung diese Trennung zwar auf deskriptiver Ebene plausibel erscheint. Es bestehen aber erhebliche Zweifel daran, ob diese Unterscheidung auch auf anderen Analyseebenen sinnvoll ist.

▪ Nondeklaratives Gedächtnis

In die Kategorie des nondeklarativen Gedächtnisses wird eine Vielzahl von heterogen anmutenden Phänomenen eingeordnet. Manche beziehen sich auf Nachwirkungen der Verarbeitung einzelner Objekte oder Ereignisse und werden oft unter dem Begriff „Bahnung" (*priming*) behandelt. Gemeint ist damit die schnellere und/oder genauere Verarbeitung als Konsequenz einer vorangegangenen Verarbeitung der Objekte oder Ereignisse. Ein einfaches Beispiel wäre die *Identitätsbahnung* in einer Wortidentifikationsaufgabe: Zuvor gelesene Wörter werden später unter schwierigen Wahrnehmungsbedingungen – etwa einer nur wenige Millisekunden dauernden visuellen Präsentation – besser identifiziert als neue Wörter (Jacoby und Witherspoon 1982), und zwar auch dann, wenn unbemerkt bleibt, dass die Wörter in der vorangegangenen Phase des Experiments vorgekommen waren. Ein solches Befundmuster ergibt sich auch für amnestische Patienten (Cermak et al. 1985).

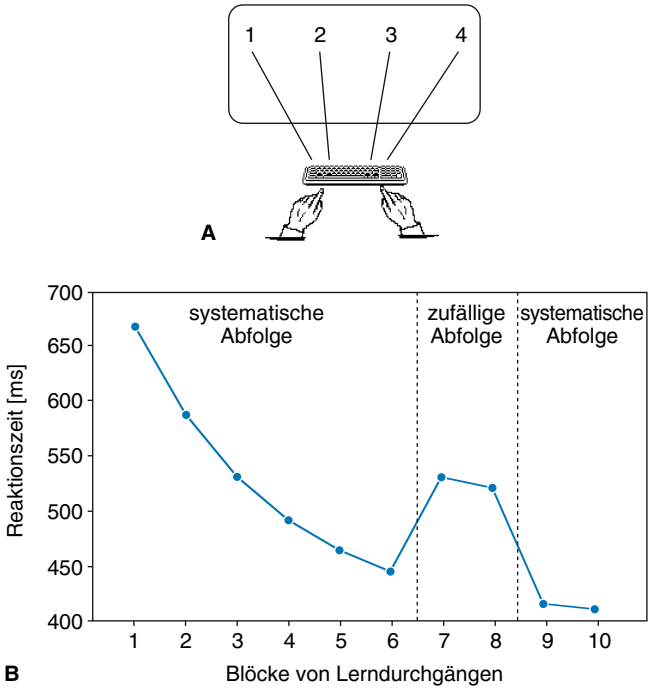


Abb. 12.3 Schematische Darstellung der Sequenzlernaufgabe (**A**) und des idealisierten Ergebnisses, wenn die Systematik gelernt wurde (**B**). Die Systematik in der Ereignisabfolge wird meist dadurch realisiert, dass eine kurze Sequenz von Positionen kontinuierlich wiederholt wird. Wenn die Zahlen 1 bis 4 die vier möglichen Bildschirmpositionen aus (**A**) beschreiben (die Zahlen sind hier nur zu Illustrationszwecken eingezeichnet), dann kann eine Sequenzabfolge, die aus sechs Ereignissen zusammengesetzt ist, beispielsweise als 1-4-2-3-2-4-1-4-2-3-2-4… dargestellt werden

Auch einfaches assoziatives Wissen wird dem nondeklarativen Gedächtnis zugeordnet. Der Erwerb solchen Wissens wird traditionell in Sequenzlernaufgaben untersucht. Bei einer typischen Variante dieser Aufgabe (Abb. 12.3) erscheinen Punkte in systematischer Abfolge an bestimmten Positionen auf einem Bildschirm. Die Systematik wird der Person, die die Aufgabe bearbeitet, nicht bekannt gemacht. Sie soll lediglich auf jeden Punkt möglichst schnell durch Drücken derjenigen Taste reagieren, die der entsprechenden Position zugeordnet ist (es gibt also so viele Tasten, wie es Positionen gibt, an denen Punkte erscheinen können). Sequenzlernen gilt als demonstriert, wenn die Antwortzeiten bei systematischer Ereignisabfolge kürzer sind als bei einer anschließenden zufälligen Ereignisabfolge (ein prototypisches Ergebnismuster ist in Abb. 12.3 eingetragen; Sequenzlernmechanismen werden auch in ▶ Kap. 10 vor dem Hintergrund des Erwerbs impliziten Wissen diskutiert). Auch für Sequenzlernaufgaben ist gezeigt worden, dass amnestische Patienten das notwendige assoziative Wissen genauso gut erwerben können wie gesunde Personen (Nissen und Bullemer 1987).

Andere Phänomene, die dem nondeklarativen Gedächtnis zugeordnet werden, sind noch komplexer und beziehen sich auf kognitive und motorische Fertigkeiten. So werden etwa Passagen mit spiegelverkehrtem Text noch mehr als ein Jahr nach dem erstmaligen Lesen schneller gelesen als neue Textpassagen (Kolers 1976).

Explizite und implizite Messung von Gedächtnisleistungen

Gemeinsam ist allen Phänomenen, die dem nondeklarativen Gedächtnis zugeordnet werden, dass die Messung der Gedächtnisleistungen normalerweise implizit erfolgt. Was das bedeutet, kann man sich am besten am Kontrast zu den expliziten Gedächtnistests wie dem Wiedererkennen oder dem freien Reproduzieren klarmachen. Beim Wiedererkennen sollen aus einer vorliegenden Liste von alten und neuen Objekten diejenigen ausgewählt werden, die man aus einer bestimmten Lernepisode kennt. Beim freien Reproduzieren sollen ohne weitere Hilfen diejenigen Objekte genannt werden, mit denen man in einer bestimmten Lernepisode konfrontiert war.

Bei impliziten Gedächtnisprüfungen entfällt dieser Bezug zur Lernphase. Stattdessen drückt sich die Nachwirkung einer bestimmten Lernerfahrung in einer fehlerfreieren oder schnelleren Verarbeitung aus. Bei der oben erwähnten Wortidentifikationsaufgabe beispielsweise werden beim Identifizieren bekannter Wörter weniger Fehler gemacht als bei unbekannten Wörtern. Bei der Sequenzlernaufgabe sind die Reaktionen schneller, wenn die Punkte in der gelernten systematischen Abfolge erscheinen, als wenn sie an zufällig gewählten Positionen auftauchen. Eine Erinnerung an die Lernphase ist bei beiden Aufgaben offenkundig nicht notwendig.

Die Unterscheidung zwischen **expliziter und impliziter Messung von Gedächtnisleistungen** ist seit der Einführung dieser zunächst rein deskriptiven Unterscheidung durch Graf und Schacter (1985) populär geworden. Um diese Entwicklung ebenso wie die daraus resultierenden Probleme besser zu verstehen, ist es sinnvoll, wenn wir einen konkreten impliziten Gedächtnistest etwas genauer betrachten.

Ein gutes Beispiel hierfür stellt die Wortstammergänzungsaufgabe dar. In einer ersten Phase sind normalerweise unter einem Vorwand lange Listen von Wörtern zu lesen. Beispielsweise sollen Wörter danach beurteilt werden, ob sie in der Sprache eher häufig oder eher selten vorkommen. Das Wort „Arbeit" etwa werden die meisten Menschen für häufig vorkommend halten, „Tiegel" dagegen wird als eher selten gelten. Die Lernsituation dieser ersten Phase nennt man *inzidentell*, weil die Personen die Wörter allenfalls beiläufig und als Nebenprodukt der eigentlichen Primäraufgabe lernen; sie wissen nicht, dass sich ein späterer Gedächtnistest auf die Lernphase beziehen wird. Die anschließende zweite Phase wird oft als separate Untersuchung getarnt. Präsentiert werden Wortstämme (z. B. „Tie…"), die sich zu verschiedenen Wörtern ergänzen lassen (z. B. „Tiefe", „Tiegel", „Tier"). Zu den Wortstämmen sollen die teilnehmenden Personen die ersten kompletten Wörter finden, die ihnen einfallen. Die typischen Nachwirkungen der vorangegangenen Lernerfahrung zeigen sich darin, dass Wortstämme häufiger zu vorher gelesenen Wörtern ergänzt werden als ohne die Vorerfahrung. Diese Erfahrungsnachwirkung zeigt sich, obwohl ein explizites Erinnern an die vorangegangene Lernphase nicht nötig ist. Es wird durch das experimentelle Vorgehen sogar einiges dafür getan, Erinnerungsversuche der beteiligten Personen von vornherein unwahrscheinlich zu machen. Daher sprechen manche bei impliziten Gedächtnistests auch von *unbewussten* Erinnerungen im Gegensatz zu *bewussten* Erinnerungen, die bei expliziten Gedächtnistests wie dem Wiedererkennen (Stammt das Wort „Tiegel" aus der Normierungsstudie?) gefordert seien.

Interessant sind nun Vergleiche zwischen impliziten Prüfverfahren wie der Wortstammergänzungsaufgabe und expliziten Prüfverfahren wie dem Wiedererkennen. Beispielsweise sind amnestische Patienten beim Wiedererkennen sehr viel schlechter als gesunde Personen, aber bei der Wortstammergänzungsaufgabe unterscheiden sich die beiden Gruppen kaum oder gar nicht (Hamann und Squire 1996; Warrington und Weiskrantz 1970). Solche Dissoziationen sind, wie wir bereits in ► Abschn. 12.1 gesehen haben, für Gedächtnistheorien interessant, wenn man sie im Sinne funktional verschiedener Gedächtnissysteme interpretiert. Man muss dazu annehmen, dass mit den beiden verschiedenen Gedächtnisaufgaben Prozesse in verschiedenen Gedächtnissystemen gemessen werden. Während demnach ein explizites Gedächtnissystem, das für (bewusstes) Wiedererkennen verantwortlich sein soll, bei amnestischen Patienten stark beeinträchtigt wäre, würde ein implizites Gedächtnissystem, das für (unbewusste) Erfahrungsnachwirkungen in der Wortstammergänzungsaufgabe verantwortlich sein soll, als nicht oder jedenfalls weniger stark beeinträchtigt gelten.

Diesem offenkundigen theoretischen Interesse an funktionalen Dissoziationen und sicherlich auch der Faszination, die phänomenal unbewusste mentale Vorgänge auf viele Personen ausüben, ist es zu verdanken, dass die einschlägige Forschungsliteratur zum impliziten Gedächtnis eine inzwischen unüberschaubare Fülle an entsprechenden Befunden in sehr verschiedenen Bereichen aufzuweisen hat. Im Hinblick auf das obige Beispiel zeigen sich keine Gruppenunterschiede in der impliziten Wortstammergänzungsaufgabe, wohl aber beim expliziten Wiedererkennen, etwa zwischen jüngeren und älteren Personen (Light und Singh 1987), zwischen Alzheimerpatienten und gesunden älteren Personen (Grosse et al. 1990), zwischen bestimmten schizophrenen Patienten und Kontrollpersonen (Clare et al. 1993) oder – um ein etwas ausgefalleneres Beispiel zu nennen – zwischen älteren Personen, die auf nüchternen Magen eine Glucoselösung zu sich nahmen, und älteren Personen, denen man eine Saccharinlösung gab (Manning et al. 1997). Die Liste ließe sich noch lange fortsetzen.

Das Reliabilitätsproblem Leider kann man nun nicht ohne Weiteres annehmen, dass experimentelle Dissoziationen im Sinne von funktionalen Unterschieden zwischen expliziten und impliziten Gedächtnisleistungen zu interpretieren sind. Ein einfacher methodischer Grund ist, dass implizite Prüfverfahren wie die Wortstammergänzungsaufgabe Gedächtnisleistungen oft weniger reliabel messen als explizite Prüfverfahren wie das Wiedererkennen (Buchner und Brandt 2003; Buchner und Wippich 2000; Meier und Perrig 2000). Die geringere Reliabilität impliziter Prüfverfahren führt dazu, dass Gruppenunterschiede (z. B. zwischen Jüngeren und Älteren, zwischen amnestischen Patienten und Gesunden) mit diesen Verfahren seltener entdeckt werden als mit den oft reliableren expliziten Verfahren. Dissoziationen wie die im vorangegangenen Abschnitt geschilderten – keine Gruppenunterschiede bei impliziten, aber Gruppenunterschiede bei expliziten Prüfverfahren – würden also auch dann beobachtbar sein, wenn implizite und explizite Prüfverfahren

nicht verschiedene Gedächtnissysteme, sondern ein homogenes Gedächtnis erfassen würden, aber eben unterschiedlich reliabel. Inzwischen spricht einiges dafür, dass dem tatsächlich so ist (Ward et al. 2013b).

Das Kontaminationsproblem Ein weiteres Problem bei diesem Ansatz ist, dass man annehmen muss, ein bestimmtes Prüfverfahren erfasse mehr oder weniger „rein" ein bestimmtes Gedächtnissystem. Das aber muss nicht so sein. Beispielsweise kann es Personen bei einer Wortstammergänzungsaufgabe trotz der weiter oben beschriebenen Vorsichtsmaßnahmen auffallen, dass sich viele der Wortstämme zu Wörtern ergänzen lassen, die zuvor in einer scheinbar anderen Untersuchung vorgekommen waren. Ab diesem Moment könnten die Personen versuchen, sich an möglichst viele der zuvor gelesenen Wörter zu erinnern. Die Wortstammergänzungsleistung wäre dann durch explizite Gedächtnisleistungen kontaminiert. Andererseits kann implizites Gedächtnis die Leistung beim Wiedererkennen kontaminieren, etwa dann, wenn ein zuvor gelesenes Wort zwar nicht bewusst aus dem Gedächtnis abgerufen, aber auf der Basis eines unspezifischen, nicht notwendigerweise bewussten Vertrautheitseindrucks als „alt" bezeichnet wird. Mandler (1980) beispielsweise hat ein Modell vorgelegt, in dem ausdrücklich angenommen wird, dass die beiden Komponenten bewusster Abruf und Vertrautheitseindruck am Wiedererkennen beteiligt sind.

Das Kontaminationsproblem hat Jacoby (1991) dazu veranlasst, auf der Basis der Idee von Mandler (1980) eine Prozedur zur Dissoziation expliziter, kontrollierter Abrufprozesse und automatischer vertrautheitsbasierter Prozesse innerhalb einer einzigen Aufgabe zu entwickeln. Diese *Prozessdissoziationsprozedur* soll nun näher betrachtet werden.

Die einfachste Variante der Prozessdissoziationsprozedur sieht eine Lernphase vor, in der Information in zwei unterscheidbaren Kontexten vorgelegt wird. Beispielsweise könnten Wörter in einer Phase 1 zu lesen und in einer Phase 2 zu hören sein. Die anschließende Testphase besteht aus zwei Bedingungen, in denen Wörter aus dem ersten Teil der Untersuchung wiedererkannt werden sollen. In der *Inklusionsbedingung* ist auf alle gelesenen und gehörten Wörter mit Ja zu antworten, Distraktoren (neue Wörter, die nicht in der Lernphase vorgekommen waren) sollen dagegen zurückgewiesen werden. In der *Exklusionsbedingung* ist nur auf die zuvor gehörten Wörter mit Ja zu antworten. Distraktoren, aber auch die in Phase 1 gelesenen Wörter, verlangen die Antwort Nein. Die gelesenen Wörter aus Phase 1 sollen also – das ist der entscheidende Punkt – ausgeschlossen werden; daher der Name dieser Bedingung.

Jacoby (1991) erläutert seine Modellannahmen wie folgt: In der Inklusionsbedingung soll ein Phase-1-Wort einmal auf der Basis eines kontrollierten Abrufs dieses Wortes (mit Wahrscheinlichkeit r) als alt akzeptiert werden. Wenn das Wort (mit Wahrscheinlichkeit $1-r$) nicht abgerufen werden kann, dann kann es immer noch auf der Basis eines automatischen Vertrautheitseindrucks (mit Wahrscheinlichkeit a) als alt akzeptiert werden. Entsprechend ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit p_i einer Ja-Antwort auf ein Phase-1-Wort in der Inklusionsbedingung

$$p_i = r + (1-r) \cdot a. \tag{12.1}$$

In der Exklusionsbedingung dagegen führt der kontrollierte Abruf eines Wortes (mit Wahrscheinlichkeit r) zur Antwort Nein, denn Phase-1-Wörter sollen in dieser Bedingung zurückgewiesen werden. Die uns interessierende Ja-Antwort auf ein Phase-1-Wort sollte nach Jacoby nur dann erfolgen, wenn das Wort nicht als Resultat eines kontrollierten Abrufprozesses identifiziert werden kann (mit Wahrscheinlichkeit $1-r$), aber dennoch vertraut erscheint (mit Wahrscheinlichkeit a). Folglich ergibt sich die Wahrscheinlichkeit p_e einer Ja-Antwort auf ein Phase-1-Wort in der Exklusionsbedingung nach

$$p_e = (1-r) \cdot a. \tag{12.2}$$

Aus diesen beiden Modellgleichungen kann man die Parameter ableiten, welche die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse repräsentieren sollen. Durch Einsetzen der Gl. 12.2 in Gl. 12.1 erhält man

$$r = p_i - p_e. \tag{12.3}$$

Aus Gl. 12.3 und Gl. 12.2 ergibt sich

$$a = p_e/(1-(p_i - p_e)). \tag{12.4}$$

Somit kann man die Parameter für die Wahrscheinlichkeit von Abruf- und Vertrautheitsprozessen r und a direkt aus den Wahrscheinlichkeiten für Ja-Antworten in der Inklusions- und der Exklusionsbedingung (p_i bzw. p_e) bestimmen.

Dieses einfache Messmodell ist rasch auf eine Vielzahl von experimentellen Aufgaben angewandt worden. Ein gutes Beispiel ist die Untersuchung von Hertel und Milan (1994). Ihr lag die Annahme zugrunde, mentale Prozesse bei depressiv verstimmten Personen seien durch ein geringeres Maß an „kognitiver Kontrolle" gekennzeichnet. Zu dieser Konzeption passt, dass bei depressiv verstimmten Personen der Parameter r, der kontrollierte Erinnerungsprozesse repräsentieren soll, geringere Werte annahm als bei nicht depressiv verstimmten Personen. Bei Parameter a, der vertrautheitsbasierte Erinnerungsprozesse repräsentieren soll, unterschieden sich die Personengruppen hingegen nicht.

In diesem Datenmuster zeigt sich also eine funktionale Dissoziation, aber eben nicht mehr auf der Ebene beobachtbaren Verhaltens, wie das bei der weiter oben beschriebenen Kontrastierung des Antwortverhaltens bei impliziten und expliziten Gedächtnistests der Fall war, sondern auf der Ebene von Prozesskomponenten, die beobachtbarem Verhalten zugrunde liegen sollen. Dies ist ein wichtiger Fortschritt hinsichtlich des Kontaminationsproblems.

An dieser Stelle sind zwei wichtige Anmerkungen zu machen:

1. Die Idee, beobachtbares Verhalten in zugrunde liegende Prozesse zu dekomponieren, ist nicht neu. Schon die Modelle, die im Kontext der Signalentdeckungstheorie entstanden sind und seit vielen Jahrzehnten eingesetzt werden, sollen genau dieses leisten (Macmillan und Creelman 1991; McNicol 1972; Wixted 2007; ▶ Kap. 2). Dort wird beobachtbares Verhalten zerlegt in eine Komponente, die die Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen zwei oder mehr

Zur Vertiefung 12.2

Das Zwei-Hochschwellen-Modell

Nehmen wir an, in einer Menge von Fotografien sollen diejenigen Gesichter identifiziert werden, die man zuvor in einem Raum gesehen hat. Wir haben also zwei Klassen von Stimuli, nämlich bekannte und unbekannte Gesichter. Als Antworten stehen uns zwei Möglichkeiten zur Verfügung, nämlich Ja (das ist ein aus dem Raum bekanntes Gesicht) und Nein (das ist kein bekanntes Gesicht).

Korrekt wiedererkannte Gesichter – also bekannte Gesichter, auf die mit Ja geantwortet wurde – gelten als Treffer. Hat nun diejenige Person die beste Gedächtnisleistung gezeigt, die am meisten Treffer erzielte? Offensichtlich ist das nicht so, denn die maximale Anzahl an Treffern erzielt man auch, indem man wahllos auf jedes Gesicht mit Ja antwortet. Dafür ist keinerlei Sensitivität für die Unterschiede zwischen bekannten und unbekannten Gesichtern notwendig. Eine solche Person zeigt nur eine massive Tendenz, mit der Antwort Ja einfach zu raten.

Nützlich wäre daher ein Verfahren zur Trennung zwischen der Sensitivität für Bekannt-Unbekannt-Unterschiede einerseits und der Tendenz, mit der Antwort Ja bloß zu raten, andererseits. Das Zwei-Hochschwellen-Modell stellt den formalen Rahmen für ein solches Verfahren dar. Es spezifiziert, welche latenten Zustände zwischen den Stimuli einerseits und den Antworten andererseits vermitteln sollen. Am Beispiel des Wiedererkennens von Gesichtern lässt sich gut erklären, was damit gemeint ist.

Abb. 12.4 illustriert die Annahmen des Zwei-Hochschwellen-Modells in einem Prozessbaum. Bei Präsentation eines bekannten Gesichts wird mit Wahrscheinlichkeit r ein interner Zustand erreicht, in dem das Gesicht aus dem Gedächtnis abgerufen wird (symbolisiert durch den kleinen Kreis oben in der Mitte). Aus diesem Zustand heraus ist die Antwort immer Ja – man erzielt einen Treffer. Mit Wahrscheinlichkeit $1 - r$ jedoch gelingt kein korrekter Abruf, und man befindet sich im Zustand der Unsicherheit darüber, ob man das Gesicht zuvor gesehen hat (symbolisiert durch den Kreis mit dem Fragezeichen in der Mitte). Aus diesem Unsicherheitszustand heraus wird mit Wahrscheinlichkeit g geraten, dass das Gesicht bekannt sei. Man erzielt wieder einen Treffer, aber dieses Mal, weil man zufällig richtig mit Ja geraten hat.

Nun interessieren uns noch die Antworten auf unbekannte Gesichter. Mit Wahrscheinlichkeit r können unbekannte Gesichter sicher als unbekannt zurückweisen: Man würde sich an dieses Gesicht erinnern, wenn es in der Lernphase gezeigt worden wäre. Mit Wahrscheinlichkeit $1 - r$ gelingt es nicht, ein Gesicht als unbekannt zurückzuweisen, und man befindet sich im Zustand der Unsicherheit darüber, ob man das Gesicht schon gesehen hat. Aus dem Unsicherheitszustand heraus wird wieder mit Wahrscheinlichkeit g geraten, dass das Gesicht bekannt sei, was zu einem falschen Alarm führt.

Nun lassen sich die Modellgleichungen des Zwei-Hochschwellen-Modells ableiten. Die Wahrscheinlichkeit einer Ja-Antwort auf ein bekanntes Gesicht, p_b (also die Trefferrate), ergibt sich aus

$$p_b = r + (1 - r) \cdot g. \tag{12.5}$$

Die Wahrscheinlichkeit einer Ja-Antwort auf ein unbekanntes Gesicht, p_u (also die Rate falscher Alarme), ist definiert als

$$p_u = (1 - r) \cdot g. \tag{12.6}$$

Aus diesen beiden Modellgleichungen lassen sich die Parameter bestimmen, welche die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse repräsentieren sollen. Durch Einsetzen von Gl. 12.6 in Gl. 12.5 erhält man

$$r = p_b - p_u. \tag{12.7}$$

Aus Gl. 12.7 und Gl. 12.6 folgt

$$g = p_u / (1 - (p_b - p_u)). \tag{12.8}$$

Snodgrass und Corwin (1988) haben gezeigt, dass die Parameter für Sensitivität (hier r, dort P_r genannt) und die Ratetendenz (hier g, dort B_r genannt) des Zwei-Hochschwellen-Modells mindestens so günstig zu bewerten sind wie die entsprechenden Parameter (d' und c) der klassischen Signalentdeckungstheorie.

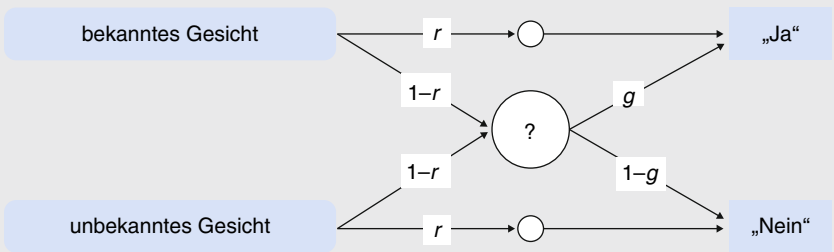


Abb. 12.4 Prozessbaum des Zwei-Hochschwellen-Modells. *Links* sind die Situationen, *rechts* die beobachtbaren Antworten eingetragen. Die Parameter entlang der Äste repräsentieren die Wahrscheinlichkeiten, mit denen bestimmte kognitive Prozesse laut Modell zu bestimmten internen Zuständen (symbolisiert durch Kreise) führen

Stimulusklassen repräsentiert, und in eine andere Komponente, die die Antwortneigung beim Raten erfasst (► Zur Vertiefung 12.2).

2. Jacobys (1991) Vorschlag löst nicht nur Probleme, er schafft auch neue. Hier ist nicht der Raum, um auf alle bisher vorgebrachten Kritikpunkte einzugehen. Ein wesentliches Problem jedoch springt ins Auge. In Jacobys Messmodell basieren Antworten ausschließlich auf (kontrollierten und automatischen) *Gedächtnis*prozessen. Es ist nicht vorgesehen, dass Personen auch raten können, was sie selbstverständlich tun. Das ist ein erheblicher Mangel, denn das bedeutet, dass neben Gedächtnisprozessen auch Raten in die Parameter r und a eingeht, sodass diese Parameter nicht eindeutig interpretiert werden können.

Multinomiale Modellierung kognitiver Prozesse Wie wir gesehen haben, sind Verhaltensdaten aus Gedächtnisexperimenten oft keine geeigneten Indikatoren für postulierte Prozesse oder Strukturen, da sie in aller Regel von mehreren theoretischen Prozessen beeinflusst werden. Die folgenden Abschnitte verfolgen zwei Ziele: Erstens soll gezeigt werden, wie eine Alternative zu Jacobys (1991) Messmodell aussehen kann, wenn Rateverhalten berücksichtigt wird. Zweitens wollen wir diese Demonstration nutzen, um einen für die Gedächtnispsychologie wichtigen methodischen Ansatz einzuführen. Es handelt sich dabei um die Methode der multinomialen Modellierung kognitiver Prozesse.

Multinomiale Modelle sind stochastische Modelle, mit denen auf der Basis beobachteter Häufigkeiten von Ereignissen die

Wahrscheinlichkeiten bestimmter latenter Zustände geschätzt werden können. Um latente Zustände im Sinne von (kontrolliertem) Abruf bzw. (automatischer) Vertrautheit geht es ja auch bei der Prozessdissoziationsprozedur. Eine Darstellung der formalen Grundlagen multinomialer Modelle geben Riefer und Batchelder (1988). Bei Erdfelder (2000) und Erdfelder et al. (2009) finden sich wichtige methodische Weiterentwicklungen sowie viele konkrete Anwendungsbeispiele solcher Modelle in der Psychologie.

In der Herleitung der Modellgleichungen für das Prozessdissoziationsmodell von Jacoby (1991) und in ▶ Zur Vertiefung 12.2 haben wir bereits zwei einfache multinomiale Modelle kennengelernt. Wie löst man nun das Problem, dass in dem Prozessdissoziationsmodell von Jacoby keine Rateprozesse berücksichtigt werden? Geht man davon aus, dass Rateprozesse nur dann (mit der Wahrscheinlichkeit g) wirken, wenn die Gedächtnisprozesse nicht erfolgreich waren (was mit der Wahrscheinlichkeit $(1-r)\cdot(1-a)$ der Fall ist), dann kommt man zu der folgenden neuen Modellgleichung für eine Ja-Antwort für ein Phase-1-Wort in der Inklusionsbedingung:

$$P_{1i} = r + (1-r)\cdot a + (1-r)\cdot(1-a)\cdot g. \tag{12.9}$$

Analog gilt für die Wahrscheinlichkeit einer Ja-Antwort für ein Phase-1-Wort in der Exklusionsbedingung:

$$P_{1e} = (1-r)\cdot a + (1-r)\cdot(1-a)\cdot g. \tag{12.10}$$

Die Modellgleichungen Gl. 12.9 und Gl. 12.10 zeigen, wie einfach es ist, das Prozessdissoziationsmodell um Rateprozesse zu erweitern. Tatsächlich zeigt sich empirisch, dass ein so erweitertes Modell besser auf Daten aus der Prozessdissoziationsprozedur passt als Jacobys (1991) ursprüngliches Messmodell (Buchner et al. 1995; Erdfelder und Buchner 1998a).

Dieses Beispiel veranschaulicht eine der Stärken multinomialer Modelle, nämlich die Einfachheit, mit der sich Hypothesen über das Zusammenspiel verschiedener kognitiver Prozesse beim Zustandekommen beobachtbaren Antwortverhaltens formal präzise formulieren lassen. Ein Zuwachs an theoretischer Präzision ist in jedem Fall ein Gewinn. Eine weitere wichtige Eigenschaft multinomialer Modelle besteht darin, dass die statistische Prüfung inhaltlicher Hypothesen direkt auf der Ebene der Parameter durchgeführt werden kann, die unmittelbar die interessierenden hypothetischen Prozesse repräsentieren. Wenn wir beispielsweise die Hypothese überprüfen möchten, dass kontrollierte Abrufprozesse im höheren Alter beeinträchtigt sind, dann kann man direkt statistisch testen, ob der Parameter r für eine Gruppe von älteren Personen sich von dem Parameter r für eine Gruppe von jüngeren Personen unterscheidet. Man ist also nicht mehr – wie etwa bei der weiter oben besprochenen Kontrastierung von Leistungen in impliziten und expliziten Prüfverfahren – darauf angewiesen, statistische Tests auf der Ebene globaler Verhaltensdaten durchführen zu müssen.

Wegen solcher Eigenschaften hat die Verwendung multinomialer Modelle in der Gedächtnispsychologie stetig zugenommen, seit Riefer und Batchelder (1988) sowie Hu und Batchelder (1994) die Nützlichkeit und Flexibilität dieser Modellklasse hervorgehoben und allgemeine Methoden für ihre statistische Analyse präsentiert haben. Eine Übersicht von Batchelder und Riefer (1999) verdeutlicht die große Spannbreite der Anwendung solcher Modelle. Innerhalb der Gedächtnispsychologie reicht diese von Modellen zu Prozessen des Arbeitsgedächtnisses (z. B. Schweickert 1993) über Modelle zum Quellengedächtnis (z. B. Bayen et al. 1996) bis hin zu Modellen zu **Gedächtnistäuschungen** (Erdfelder und Buchner 1998b). Aber auch die schon angesprochenen signalentdeckungstheoretischen Modelle fallen formal unter diese Modellklasse. Allen diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie versuchen, kognitive Prozesse unbeeinflusst von anderen Prozessen zu messen. Im Modell zu Gedächtnistäuschungen von Erdfelder und Buchner beispielsweise werden erinnerungsbasierte Täuschungen von urteilsbedingten Prozessen separat erfasst.

■ Wiedererkennen: Diskreter oder kontinuierlicher Prozess?

Es gibt seit jeher lebhafte Debatten darüber, welches Messmodell im Bereich des Wiedererkennens von Informationen am angemessensten ist. Die von uns bereits angesprochenen Modelle unterscheiden sich nämlich in einem theoretisch wichtigen Detail: In dem Zwei-Hochschwellen-Modell wird das Wiedererkennen von Informationen als diskreter Prozess verstanden. Entweder überschreitet ein zuvor gelerntes Item in der Testsituation die Schwelle des Wiedererkennens oder nicht; dann gelangt man in den Unsicherheitszustand. Die Schwelle definiert also zwei diskrete Zustände innerhalb derer es keine weitere Differenzierung mehr gibt. In signalentdeckungstheoretischen Modellen hingegen löst ein Item beim Test ein kontinuierliches Gedächtnissignal (im Kontext von Gedächtnistest oft als Gefühl von Vertrautheit bezeichnet) aus, das erst durch die Platzierung eines Antwortkriteriums in zwei diskrete Antwortkategorien („alt“ oder „neu“) abgebildet wird. Im Gegensatz zum Zwei-Hochschwellen-Modell, in dem man nur erinnern oder nicht erinnern kann, kann man sich in diesem theoretischen Rahmen durchaus sehr gut oder sehr schwach an etwas erinnern. Wie lässt sich empirisch zwischen diesen beiden theoretischen Vorstellungen unterscheiden? Die bevorzugte Methode dazu ist die Analyse von ROC-Kurven (ROC = *receiver operating characteristic*; ▶ Kap. 2). Bei dieser Methode versucht man, das Rateverhalten der teilnehmenden Personen zu manipulieren, ohne dass dabei die Gedächtnisleistung beeinflusst wird. So kann man beispielsweise den Prozentsatz gelernter Items in einem Alt-neu-Wiedererkennenstest zwischen 90 % und 10 % in fünf Abstufungen variieren. Ist dieser Prozentsatz sehr hoch, so geht man davon aus, dass Personen im Zustand der Unsicherheit eher eine „alt“-Antwort geben (Zwei-Hochschwellen-Modell) bzw. ihr Antwortkriterium liberaler platzieren (Signalentdeckungstheorie). Im nächsten Schritt werden nun die Trefferraten für jede Stufe der Manipulation als Funktion der Rate der falschen Alarme abgetragen. Die so entstandene Kurve ist die ROC-Kurve: Sie spiegelt die konstante Gedächtnisleistung mit variierenden Antwortverhalten der Person wider.

Der in diesem Kontext entscheidende Punkt ist, dass unsere beiden Modelle unterschiedlich geformte ROC-Kurven vorhersagen. Gilt das Zwei-Hochschwellen-Modell, so entsteht eine lineare ROC-Kurve; gilt die Signalentdeckungstheorie, so resultiert eine kurvilineare ROC-Kurve. Auf den ersten Blick scheint die Datenlage recht eindeutig zu sein: Sowohl Wixted (2007) als auch Yonelinas und Parks (2007) kommen in Über-

sichtsartikeln zu dem Schluss, dass ROC-Kurven beim Wiedererkennen vornehmlich kurvilinear sind und somit für das signalentdeckungstheoretische Modell sprechen. Im Gegensatz dazu finden Bröder und Schütz (2009) keinen Vorteil signalentdeckungstheoretischer Modelle gegenüber Schwellenmodellen. Obwohl es offenbar eine einfache Unterscheidungsmethode gibt, sind die empirischen Ergebnisse nicht eindeutig. Das hat viele methodologische und statistische Gründe (z. B. Batchelder und Alexander 2013). Ein wesentlicher Aspekt ist, dass beide Modelle keine theoretisch fundierten Gedächtnismodelle sind. Als solche sollten sie z. B. theoretische Erklärungen für die in diesem Kapitel vorgestellten Gedächtnisphänomene (Kontexteffekte, Gedächtnistäuschungen, Interferenz) liefern. Beide Modelle tun dies offensichtlich nicht. Vielmehr sind sie sogenannte Messmodelle, die eine möglichst einfache Methode bereitstellen, theoretische Mechanismen quantitativ zu erfassen. Der Preis der Einfachheit ist dann manchmal, dass gewisse experimentelle Restriktionen zu beachten und Abstriche bezüglich der Präzision zu machen sind. Als Analogie mag ein Flüssigkeitsglasthermometer zur Messung der Außentemperatur dienen. Ein solches physikalisches Messgerät ist sicher nicht sehr präzise und funktioniert nur in einem eingeschränkten Temperaurbereich, ist aber von jedermann einfach abzulesen. Gleichzeitig würden wir uns schwer tun, nur mit einem solchen Thermometer ausgestattet die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik zu erforschen.

Ähnlich verhält es sich mit den „Messgeräten" Signalentdeckungstheorie und Zwei-Hochschwellen-Modell: Aus pragmatischen Gründen ist der Einsatz beider Modelle durchaus vertretbar, wenn es um die separate Messung von Gedächtnisleistungen und Antworttendenzen geht. Eine Alternative zu den genannten Ansätzen könnte die Anpassung eines formalen Prozessmodells (▶ Abschn. 12.2.3) sein. Dieser Ansatz verbindet ein theoretisch starkes Gedächtnismodell mit den Vorzügen der pragmatischen – aber theorieschwachen – Messmodelle. Allerdings ist dieser Ansatz mathematisch sehr viel anspruchsvoller und somit nicht von jedermann einfach einzusetzen.

12.2.2 Prozessorientierter Zugang zum Langzeitgedächtnis

Im vorangegangenen Abschnitt haben wir einige Beispiele für Dissoziationen zwischen explizit und implizit gemessenen Gedächtnisleistungen kennengelernt, die traditionell im Sinne einer Unterscheidung zwischen nondeklarativem und deklarativem Gedächtnissystem interpretiert worden sind. Diese systemorientierte Interpretation von Dissoziationsbefunden ist jedoch keineswegs zwingend. Analysiert man Gedächtnisleistungen auf der Basis der beteiligten Prozesse, dann kann sich ein gänzlich anderes Bild ergeben.

Verarbeitungstiefe und transferangemessenes Verarbeiten

In einer sehr einflussreichen Arbeit stellten Craik und Lockhart (1972) die damals provokante These auf, ein erfolgreicher Abruf von Information aus dem Gedächtnis hinge weniger davon ab, in welchem Gedächtnis*system* eine Information abgelegt sei. Vielmehr komme es darauf an, welche Gedächtnis*prozesse* bei der Encodierung von Informationen beteiligt seien. Eine Schlüsselrolle spielt das Konzept der *Verarbeitungstiefe*: Informationen, die in der Lernphase tief verarbeitet wurden, sollen später besser wieder abrufbar sein als nur oberflächlich verarbeitete Informationen.

Mit einer tiefen Verarbeitung sind dabei Prozesse gemeint, die sich auf die Bedeutung von Informationen beziehen, während sich eine oberflächliche Verarbeitung vor allem an perzeptuellen (bei Wörtern auch phonologischen) Aspekten eines Ereignisses orientiert. Eine klassische Studie zum *Verarbeitungstiefeansatz* stammt von Hyde und Jenkins (1973). Sie verwendeten in der Lernphase eines Gedächtnisexperiments unterschiedliche Orientierungsaufgaben:

- In einer *nichtsemantischen Orientierungsaufgabe* sollte z. B. überprüft werden, ob ein Wort einen bestimmten Buchstaben enthält. Die Aufgabe bezieht sich also nicht auf die Bedeutung des Wortes, sondern auf Aspekte seiner Form. Sie sollte demnach zu einer oberflächlichen Verarbeitung des Wortes führen.
- In *semantischen Orientierungsaufgaben* sollte beurteilt werden, ob ein dargebotenes Wort ein Substantiv oder ein Verb ist, wie häufig das Wort im Sprachgebrauch vorkommt oder als wie angenehm das Wort empfunden wird. Diese drei Aufgaben orientieren sich eher an der Bedeutung des Wortes. Sie sollten demnach zu einer tieferen Verarbeitung, mithin also zu einer besseren Gedächtnisrepräsentation führen.

Tatsächlich war die Gedächtnisleistung für Wörter, die unter einer semantischen Orientierungsaufgabe gelernt wurden, besser als für Wörter, die unter einer nichtsemantischen Orientierungsaufgabe gelernt wurden. Dieses Ergebnis ist vielfach repliziert worden und stützt die zentrale theoretische Annahme von Craik und Lockhart (1972), nach der ein erfolgreicher Abruf vor allem von der Tiefe der Verarbeitung einer Information abhängt.

Ein wesentlicher Kritikpunkt am **Verarbeitungstiefeansatz** ist, dass ausschließlich die Prozesse der Encodierung berücksichtigt werden. Dass aber auch Abrufprozesse beachtet werden müssen, wird bei Morris et al. (1977) sehr deutlich. In einer semantischen Orientierungsaufgabe wurde ein Satz mit einem fehlenden Wort vorgegeben. Es sollte beurteilt werden, ob ein bestimmtes Wort in diese Lücke passt oder nicht. In einer phonologischen Aufgabe musste dagegen angegeben werden, ob sich ein Wort mit einem anderen reimt. Anschließend wurden zwei Varianten eines Gedächtnistests eingesetzt. Die Standardvariante war ein einfacher Wiedererkennenstest, in dem angegeben werden sollte, ob ein Wort in der ersten Phase des Experiments vorgekommen war. Hier zeigte sich das typische Ergebnis mit einer besseren Gedächtnisleistung nach der semantischen Orientierungsaufgabe. Bei der zweiten Variante, dem Reimwiedererkennenstest, sollte beurteilt werden, ob sich ein Wort auf ein Wort aus der ersten Phase des Experiments reimt. Hier war die Gedächtnisleistung nach der phonologischen Orientierungsaufgabe besser als nach der semantischen. Dieses Ergebnis widerspricht den Annahmen des **Verarbeitungstiefeansatzes**, wonach ja eine semantische Verarbeitung immer zu

einer tieferen Verarbeitung und somit immer auch zu einer besseren Gedächtnisleistung führen sollte. Nach Morris et al. (1977) ist es jedoch nicht die Tiefe der Verarbeitung an sich, welche die spätere Gedächtnisleistung bestimmt, sondern vielmehr das Ausmaß der **Transferangemessenheit der Verarbeitung**, also der Grad der Überlappung von kognitiven Prozessen bei der Encodierung und dem Abruf von Information die entscheidende Variable: Je größer die Überlappung der Prozesse ist, desto besser ist die Erinnerungsleistung.

Später akzeptieren Lockhart und Craik (1990) weite Teile der Kritik von Morris et al. (1977). Allerdings weisen sie auch darauf hin, dass sich beim Vergleich der kongruenten Bedingungen von Morris et al. eine deutlich bessere Gedächtnisleistung bei der Kombination der semantischen Orientierungsaufgabe mit dem Standardgedächtnistest ergibt als bei der Kombination aus phonologischer Orientierungsaufgabe und Reimwiedererkennenstest (vgl. auch die in den beiden folgenden Absätzen dargestellten Befunde von Blaxton 1989). Diese Überlegenheit der semantischen Variante kann durch die Theorie transferangemessenen Verarbeitens nicht erklärt werden. Deshalb schlagen Lockhart und Craik (1990) eine Integration beider Ansätze vor, was durchaus sinnvoll erscheint.

Wichtig ist, dass auch eine so modifizierte Theorie der transferangemessenen Verarbeitung die Bedeutung von Gedächtnis*prozessen* betont. Der Unterschied zu einer systemorientierten Analyse wird besonders schön in einer Untersuchung von Blaxton (1989) deutlich. Hier sollten die Personen in der Lernphase u. a. Wörter ohne Kontext einfach lesen (xxx-Verrat) oder auf der Basis eines bedeutungsverwandten Wortes generieren (Spionage-V_____). Im ersten Fall liegt damit der Schwerpunkt der Verarbeitung auf *perzeptuellen* Prozessen des Lesens, im zweiten auf *konzeptuellen* Prozessen der Wissensgenerierung. Die Besonderheit der Untersuchung von Blaxton liegt nun darin, dass sie sowohl explizite als auch implizite Prüfverfahren einsetzte. Von zwei expliziten Tests betonte eine Variante eher perzeptuelle, die andere eher konzeptuelle Verarbeitungsprozesse. Bei den impliziten Tests war es genauso. Bei der perzeptuellen Variante des expliziten Gedächtnistests sollte ein Wort erinnert werden, das einem bestimmten Wort in seiner Wortform ähnelt („Erinnere das Wort aus der Lernphase, das so ähnlich aussieht wie ‚Vertrag'"), während sich bei der konzeptuellen Variante der Hinweis auf die Bedeutung des gesuchten Wortes bezog („Erinnere das Wort aus der Lernphase, das so etwas Ähnliches bedeutet wie ‚Untreue'"). Auch in den impliziten Gedächtnistests wurde entweder ein perzeptueller („Ergänze das Fragment _er__t zu einem korrekten deutschen Wort") oder ein konzeptueller Hinweis gegeben („Wofür wurde das Ehepaar Guillaume im Dezember 1975 zu langjährigen Haftstrafen verurteilt?").

Die beiden von Blaxton (1989) verwendeten expliziten Gedächtnistests sollten nach herkömmlicher systemorientierter Auffassung das deklarative Gedächtnissystem, die beiden impliziten Tests aber das nondeklarative Gedächtnis betreffen (▶ Abschn. 12.2.1). Unter dieser Annahme sollten sich parallele Effekte der Lernbedingung (Lesen vs. Generieren) jeweils für die beiden expliziten und für die beiden impliziten Prüfverfahren zeigen. Aus der prozessorientierten Perspektive des transferangemessenen Verarbeitens hingegen sollten sich auf der einen Seite die beiden Gedächtnistests mit perzeptuellen Hinweisen ähnlich verhalten, und zwar unabhängig davon, ob der Test implizit oder explizit ist. Auf der anderen Seite sollten die beiden konzeptuellen Tests parallele Effekte der Lernbedingungen zeigen, und zwar ebenfalls unabhängig davon, ob der Test implizit oder explizit war. Die Ergebnisse von Blaxton sind klar (◘ Abb. 12.5): Die Gedächtnisleistung war immer dann besser, wenn die Verarbeitungsprozesse aus der Lernphase mit denen aus der Abrufphase übereinstimmten, und zwar unabhängig davon, ob ein implizites oder ein explizites Prüfverfahren eingesetzt wurde. Damit wird die Kernaussage der Theorie des transferangemessenen Verarbeitens bestätigt und die systemorientierte Trennung von deklarativem und nondeklarativem Gedächtnis vor Probleme gestellt. Das bedeutet nicht, dass eine systemorientierte Perspektive nicht sinnvoll ist. Allerdings verhalten sich Gedächtnisprozesse offensichtlich anders, als das die einfache Dichotomie zwischen deklarativem und nondeklarativem Gedächtnis nahelegt.

Nachdem viele Jahre allgemein akzeptiert war, dass semantische Verarbeitung zu den besten Erinnerungsleistungen im Standardwiedererkennenstest führt, machte der Befund Furore, dass sich die Erinnerungsleistung in typischen Gedächtnistests weiter steigern lässt, wenn in einer inzidentellen Lernphase Wörter danach zu beurteilen sind, wie relevant die durch sie repräsentierten Dinge für das Überleben in der Steppe eines fremden Landes wären (Nairne et al. 2008; Nairne et al. 2007). Nairne und Kollegen schlugen eine evolutionspsychologisch inspirierte Erklärung für diesen Befund vor. Demnach geht der beobachtete Leistungsvorteil darauf zurück, dass der evolutionäre Selektionsdruck ein Gedächtnis begünstigt habe, in dem alles das besonders gut behalten wird, was im Hinblick auf das eigene Überleben verarbeitet wurde. Das ist aber nicht besonders befriedigend, denn letztlich interessiert man sich für die *Gedächtnisprozesse*, die das Phänomen hervorbringen. Eine Reihe von Prozessen sind vorgeschlagen und experimentell überprüft worden, und einiges kann inzwischen ausgeschlossen werden. Beispielsweise hat der beobachtete Leistungsvorteil wohl nichts mit der emotionalen Erregung oder dem Stress zu tun, die sich angesichts der Vorstellung vom möglichen eigenen Tod einstellen könnte (Bell et al. 2013; Smeets et al. 2012). Der bisher schlüssigste Vorschlag zur Erklärung des Leistungsvorteils nach Urteilen über die Überlebensrelevanz stammt von Kroneisen und Erdfelder (2011). Sie argumentieren, dass die Beurteilung der Überlebensrelevanz von Dingen zu einer besonders reichhaltigen und distinkten Repräsentation im Gedächtnis führt. Wird man beispielsweise gefragt, wie relevant ein Schraubenzieher für das Überleben in der Wildnis ist, so könnten einem so verschiedene Dinge wie der Einsatz als Waffe zur Verteidigung, als Werkzeug zum Öffnen von Nüssen oder zum Graben nach Wurzeln einfallen. Da Items mit einer solchen reichhaltigen Repräsentation später leichter abgerufen werden können als etwa Items, deren Angenehmheit man beurteilt hat (eine Aufgabe, von der wir weiter oben gesehen haben, dass sie traditionell zur Induktion einer semantische Verarbeitung verwendet wird), bietet die Orientierungsaufgabe der Überlebensrelevanz einen Erinnerungsvorteil. Vieles spricht für diese Erklärung (Kroneisen et al. 2013; Röer et al. 2013a).

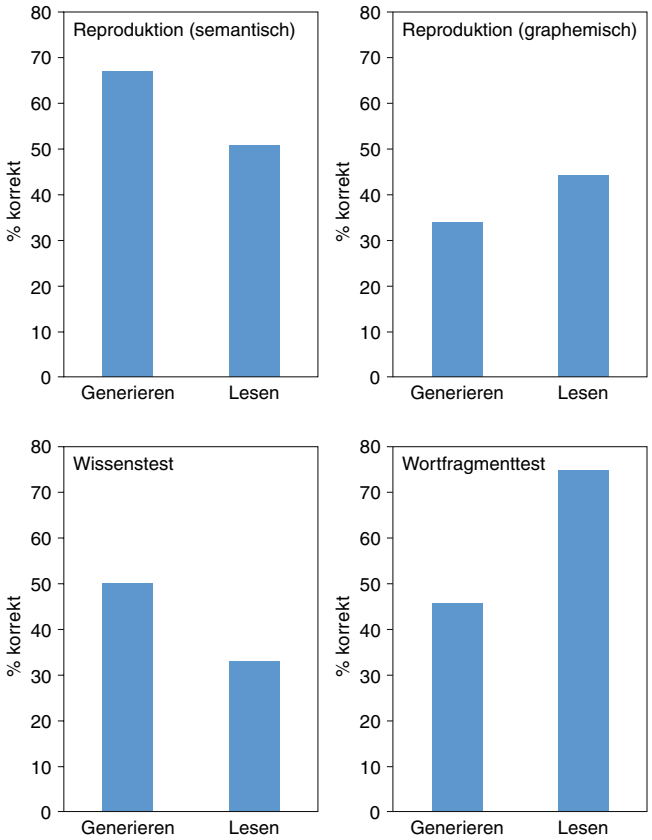


Abb. 12.5 Ergebnisse aus Experiment 1 von Blaxton (1989), in dem die Bedeutung transferangemessener Verarbeitung bei Gedächtnisleistungen demonstriert wurde

Kontexteffekte

Mit dem Lernen der „eigentlich interessierenden" Information werden immer auch bestimmte Aspekte des Lernkontexts gespeichert. Wenn diese Kontextinformationen auch beim Erinnern zur Verfügung stehen, können sie als Abrufhinweise dienen und zu besonders guten Erinnerungsleistungen führen. Dies verdeutlicht ein oft zitiertes Experiment von Godden und Baddeley (1975), in dem Mitglieder einer Tauchschule eine Liste von Wörtern an Land oder unter Wasser lernten. Der Gedächtnistest erfolgte wiederum an Land oder unter Wasser. Abb. 12.6 zeigt, dass die Anzahl der frei reproduzierten Wörter hoch war, wenn die Lern- und die Testphase in demselben Kontext stattfanden. Jeder Kontextwechsel zwischen Lern- und Testphase führte zu einer Verschlechterung der Gedächtnisleistung.

Um **Kontexteffekte** zu demonstrieren, realisierten Godden und Baddeley (1975) eine recht drastische Variation der Lernumgebung. Solche starken Manipulationen sind jedoch keineswegs notwendig. Murnane und Phelps (1993) präsentierten in der Lernphase Wörter auf einem Computerbildschirm und variierten die Hintergrundfarbe, die Schriftfarbe und die Bildschirmposition. In einem abschließenden Wiedererkennenstest wurden gelernte Wörter entweder mit denselben Farben und an derselben Positionen wie in der Lernphase oder in einer veränderten Farbpositionskombination dargeboten. Selbst unter dieser vergleichsweise schwachen Manipulation des Kontexts konnten Wörter, für die Lern- und Testkontexte identisch waren, besonders gut wiedererkannt werden.

Eine umfassende Auffassung des Kontexts schließt auch Merkmale wie Gerüche, den aktuellen emotionalen Zustand oder den Einfluss psychotroper Substanzen ein (Capaldi und Neath 1995). Ein typisches Beispiel für eine Untersuchung zum sogenannten *zustandsabhängigen Erinnern* stammt von Goodwin et al. (1969). Eine Wortliste sollte entweder alkoholisiert oder nüchtern gelernt werden. Die Gedächtnisleistung wurde entweder in alkoholisiertem oder in nüchternem Zustand erfasst. Erwartungsgemäß war das Erinnerungsvermögen der Personen am besten, die in der Lern- und in der Testphase nüchtern waren. Erstaunlich war jedoch, dass unter Alkoholeinfluss gelernte Informationen offensichtlich besser in alkoholisiertem als in nüchternem Zustand abgerufen werden konnten. Solche zustandsabhängigen Erinnerungseffekte sind auch für andere psychotrope Substanzen nachgewiesen (Eich et al. 1975).

Neben zustandsabhängigen Effekten ist besonders der Einfluss der emotionalen Verfassung auf die Gedächtnisleistung untersucht worden. Auch hier finden sich die üblichen Kontexteffekte: Informationen können dann besser abgerufen werden, wenn die Stimmung beim Abruf und beim Encodieren der Information ähnlich ist (Bower 1981).

Allerdings sind solche zustands- bzw. stimmungsspezifischen Effekte nicht immer leicht nachzuweisen. Am zuverlässigsten findet man stimmungsabhängige Effekte auf die Gedächtnisleistung bei freier Reproduktion. In diesen Aufgaben müssen Wörter aus einer Lernliste ohne zusätzliche Hinweisreize (daher „frei") produziert werden. Bei geförderter Reproduktion könnten beispielsweise die ersten drei Buchstaben eines gesuchten Wortes vorgegeben werden. Diese Anfangsbuchstaben stellen einen effizienten Hinweisreiz für den Abruf des gesuchten Wortes dar. Die Vorgabe solcher externer Hinweisreize verringert die Wahrscheinlichkeit von stimmungsabhängigen Gedächtnisleistungen erheblich. Noch deutlicher wird der Punkt, wenn wir die Situation bei Wiedererkennensaufgaben betrachten. Wird beim

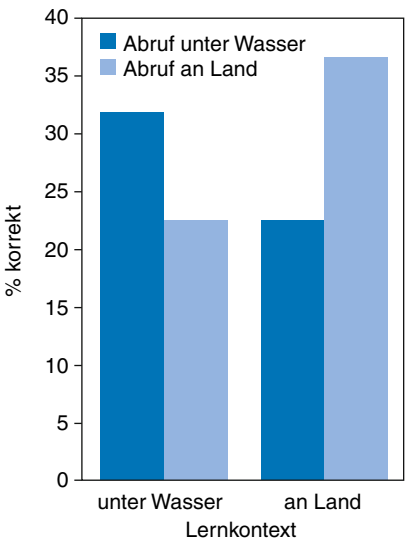


Abb. 12.6 Ergebnisse der Untersuchung von Godden und Baddeley (1975) zur Rolle der Übereinstimmung von Lern- und Abrufkontext

Wiedererkennen ein Element aus der Lernphase dargeboten, dann liegt damit der wichtigste Teil der Lernepisode bereits vor und muss nicht mehr generiert werden. Zusatzinformationen aus dem Lernkontext spielen daher nur noch eine sehr geringe Rolle. Entsprechend werden beim Wiedererkennen häufiger keine stimmungsabhängigen Effekte mehr beobachtet (Eich 1980). Ein weiterer Faktor, der die Effektivität von Kontextinformationen beeinflusst, ist die Eindeutigkeit, mit der bestimmte Kontextinformationen an zu erinnernde Informationen gekoppelt sind. So zeigten Poirier et al. (2012), dass der Abruf von Informationen mit mehreren Hinweisreizen aus der Lernphase sogar schlechter sein kann als mit wenigen, wenn die Hinweisreize aus der Lernphase mit vielen unterschiedlichen Informationen präsentiert wurden. In diesem Fall können aufgrund des Kontexthinweises viele früher gelernte Informationen abgerufen werden, zwischen denen dann Antwortwettbewerb auftreten kann.

Lern- und Abrufkontext sind also äußerst wichtige Faktoren für die Vorhersage eines erfolgreichen Abrufs aus dem Langzeitgedächtnis. Hierbei verstehen wir unter dem Begriff „Kontext" nicht nur die visuell-räumliche Umgebung, in der die Information gelernt bzw. abgerufen wird, sondern neben anderen materiellen Kontexten (Gerüchen, Geräuschen) auch innere Zustände und Stimmungslagen. Wir können aber noch einen Schritt weitergehen. Auch die spezifischen Aufgaben während der Lernphase und während der Testphase können als Kontext betrachtet werden. Müssen Personen z. B. während der Lernphase Reime bilden, dann ist, wie wir beim Ansatz der transferangemessenen Verarbeitung gesehen haben, die Erinnerungsleistung am besten, wenn ein Reimwiedererkennenstest und nicht ein normaler Wiedererkennenstest verwendet wird (Morris et al. 1977). Damit können wir auch den Ansatz der transferangemessenen Verarbeitung unter dem einheitlichen Konzept der Kontexteffekte fassen. Alle Aspekte der Lernphase – von der Instruktion und dem zu bearbeitenden Lernmaterial über den inneren Zustand einer Person bis zur materiellen Umgebung – können also prinzipiell determinieren, welche Dinge als Kontextattribute der Lernsituation gespeichert werden. Genauso verhält es sich mit den Attributen der Testsituation, die verwendet werden, um zuvor Gelerntes abzurufen. Je größer die Übereinstimmung beider Mengen von Attributen ist, desto besser ist die Erinnerungsleistung. Wir werden später sehen, dass dieses Grundprinzip für mathematische Modelle des Gedächtnisses sehr wichtig ist.

Faszinierend ist, dass es genügen kann, sich den Lernkontext gut vorzustellen, um die typischen Leistungseinbußen bei einem Kontextwechsel weitgehend zu vermeiden. Personen, die sich nach einem Kontextwechsel die Lernumgebung einfach vorstellen sollen, zeigen fast genauso gute Erinnerungsleistungen wie Personen, die in der ursprünglichen Lernumgebung reproduzieren, während sich bei den Personen mit Kontextwechsel, aber ohne Vorstellungsinstruktion der übliche Leistungsabfall einstellt (z. B. Smith 1979).

Das ist von großer praktischer Bedeutung. Zeugen können sich beispielsweise besser an einen Tathergang erinnern, wenn sie sich den externen Kontext (wo sie sich genau befanden, die damals herrschenden Beleuchtungsverhältnisse etc.) und ihren inneren Zustand (Irritation, Ängstlichkeit etc.) noch einmal vergegenwärtigen, bevor sie zum Tathergang befragt werden (Malpass und Devine 1981). Auf dieser empirischen Tatsache beruht eine der Grundtechniken des *kognitiven Interviews*, mit dessen Hilfe die Qualität von Zeugenaussagen gegenüber normalen Vernehmungen deutlich verbessert werden kann (Geiselman und Fisher 1989; Köhnken et al. 1991). Hierbei werden Personen dazu angeleitet, sich an möglichst viele Details des Tathergangs und der Umgebung sowie an die eigenen Gefühle, Gedanken und Reaktionen zu erinnern. Auch wenn diese Details vermeintlich irrelevant für die „eigentliche" Zeugenaussage sind, so können sie doch als Hinweisreize dienen und das Abrufen von wichtigen Informationen erheblich erleichtern. Ergänzt wird das Vorgehen durch einige übliche Gesprächstechniken. Tatsächlich zeigt sich bei empirischen Prüfungen sehr klar die Überlegenheit des kognitiven Interviews: Im Vergleich zu anderen Befragungsmethoden werden sehr viel mehr richtige, kaum mehr falsche und keine zusätzlichen konfabulierten Elemente erinnert (Memon et al. 2010).

Interferenz und Vergessen

Trotz der enormen Leistungen, die das menschliche Gedächtnis tagtäglich erbringt, sind uns häufig ausschließlich seine Schwächen und Fehler bewusst: Wir vergessen beim Wochenendeinkauf einen wichtigen Artikel, können uns an der Kasse nicht an die Geheimnummer der EC-Karte erinnern, und auf dem Nachhauseweg fällt uns der Name einer vertrauten Person nicht ein. Aber haben wir diese Informationen tatsächlich vergessen, oder konnten wir sie nur in einer spezifischen Situation nicht abrufen?

In der Gedächtnispsychologie wird diese Frage seit langer Zeit diskutiert. Eine theoretische Position geht dabei von einem permanenten Gedächtnis aus, d. h., alle gelernten Informationen sollen für alle Zeit im Gedächtnis gespeichert bleiben (z. B. Tulving 1974). Eine andere Position geht davon aus, dass unter bestimmten Umständen alte Gedächtnisinhalte durch neue dauerhaft verändert oder gar überschrieben und damit gelöscht werden können (z. B. Loftus und Loftus 1980). Wir wollen diese Diskussion nicht erneut aufrollen, da sie sich einer empirischen Klärung entzieht: Für jede Information, die nicht abgerufen werden kann, ist es theoretisch möglich, dass sie unter anderen Umständen doch noch abrufbar wäre. Aus der Amnesieforschung ist beispielsweise bekannt, dass bestimmte Ereignisse, die temporär nicht erinnert werden können, nach einer bestimmten Zeit der Erholung wieder zugänglich sind. Solche Befunde belegen jedoch keineswegs, dass tatsächlich *alle* jemals gespeicherten Informationen im Gedächtnis prinzipiell *immer* vorhanden sind. Dennoch gibt es unzählige Beispiele dafür, dass scheinbar vergessene Ereignisse unter bestimmten Umständen wieder erinnert werden können. Man sollte also aus der Tatsache, dass ein Ereignis nicht abgerufen werden kann, niemals schließen, dass die gesuchte Information für alle Zeiten verloren ist. Sie kann auch einfach nur im Moment nicht zugänglich sein.

Wir wollen im Folgenden zwei verschiedene Formen von **Vergessen** betrachten, die für viele Alltagssituationen typisch sind. Nehmen wir etwa die vierstelligen PINs, die man bei der Verwendung einer EC- oder Kreditkarte an Geldautomaten benötigt. Nach einer Weile sind die meisten Menschen in der Lage,

Tab. 12.1 Darstellung der Situationen, die zur Untersuchung proaktiver und retroaktiver Interferenz realisiert werden müssen. Bei der Paarassoziationsaufgabe wird am Ende der Untersuchungsphase geprüft, wie gut A-B-Assoziationen gelernt worden sind. Je ein Wort der Liste A muss dabei mit je einem Wort der Liste B verbunden werden. Diesem Test gehen unterschiedliche Lernerfahrungen voraus. Die beiden Versuchsanordnungen zeigen die Situation für proaktive und retroaktive Interferenz

	Früheres Lernen	Späteres Lernen	Test	Situation
Experimentalgruppe	A–D	A–B	A–B	Proaktive Interferenz
Kontrollgruppe	C–D	A–B	A–B	
Experimentalgruppe	A–B	A–D	A–B	Retroaktive Interferenz
Kontrollgruppe	A–B	C–D	A–B	

diese Nummern ziemlich zuverlässig zu reproduzieren. Probleme treten auf, wenn sich eine Nummer ändert, etwa weil man eine neue Karte bekommen hat. Zum einen kann es vorkommen, dass man die neue PIN zunächst nur sehr schlecht erinnert, wenn man sie braucht, weil einem immer die alte einfällt. Das nennt man **proaktive Interferenz**. **Retroaktive Interferenz** dagegen tritt auf, wenn einem bei dem Versuch, die alte PIN zu erinnern, die neue einfällt. Beide Formen von Interferenz werden im Labor mit der Paarassoziationsaufgabe untersucht. Das Prinzip der Aufgabe ist in Tab. 12.1 dargestellt.

Eine sehr einfache Untersuchung zum Vergessen durch retroaktive Interferenz macht vom A–B/A–D-Design Gebrauch, das man sich etwa folgendermaßen vorstellen kann: Zunächst werden Wörter einer Liste A präsentiert. Wie beim Vokabellernen soll nun gelernt werden, dass zu jedem Wort der Liste A ein bestimmtes Wort einer Liste B gehört (z. B. Apfel–Salz, Tisch–Ring). Gelernt werden also A–B-Assoziationen. Später werden in der Experimentalgruppe die Wörter der Liste A mit neuen Wörtern einer Liste D gepaart (z. B. Apfel–Igel, Tisch–Datum), und die A–D-Assoziationen sollen gelernt werden. In einer Kontrollgruppe sollen Assoziationen zwischen Wörtern von zwei neuen Listen, C und D, gelernt werden (z. B. Haus–Igel, Ball–Datum). Im anschließenden Test muss auf jedes Wort der Liste A das „ursprünglich" dazugehörende Wort der Liste B genannt werden. Der Experimentalgruppe fällt das wesentlich schwerer als der Kontrollgruppe (Martin 1965). Der Abfall in der Erinnerungsleistung in der Experimentalgruppe soll darauf zurückgehen, dass das Lernen der zweiten Lernliste (A–D) Interferenzprozesse auslöst, die das Abrufen der ersten Lernliste (A–B) erschweren. Da das Lernen der A–D-Liste nach dem Erlernen der A–B-Liste erfolgte und die A–D-Liste auf die A–B-Liste zurückwirkt, spricht man in diesem Fall von *retroaktiver Interferenz*.

Lange Zeit glaubte man, dass retroaktive Interferenzprozesse alleine dafür verantwortlich sind, dass einmal gelernte Informationen schlechter abgerufen werden können. Underwood (1957) konnte jedoch zeigen, dass noch weitere Interferenzprozesse wirken müssen. Solche zusätzlichen Interferenzprozesse lassen sich nachweisen, wenn in der Experimentalgruppe erst eine A–D-Liste und anschließend die A–B-Liste gelernt wird. Die Kontrollgruppe lernt analog zunächst eine C–D-Liste und anschließend ebenfalls die A–B-Liste. Vergleicht man nun die Gedächtnisleistung für die A–B-Liste, dann erhält man erneut eine schlechtere Leistung in der Experimentalgruppe. Das Lernen der A–D-Assoziationen wirkt sich demnach negativ auf die Gedächtnisleistung für die A–B-Paare aus. Da die A–D-Liste jedoch zeitlich vor der kritischen A–B-Liste gelernt wurde und gleichsam „nach vorn" wirkt, spricht man in diesem Fall von *proaktiver Interferenz*.

Ursachen für Interferenz Die Effekte pro- und retroaktiver Interferenz sind in zahlreichen Untersuchungen bestätigt worden. Dennoch herrscht keine Einigkeit darüber, aufgrund welcher Prozesse diese Effekte auftreten. Nach der klassischen Interferenztheorie werden die Leistungseinbußen beim Erinnern auf einen *Antwortwettbewerb* und auf das *Verlernen von Assoziationen* zurückgeführt.

Unter Antwortwettbewerb ist dabei etwas vereinfachend zu verstehen, dass der Hinweisreiz A in der Kontrollbedingung nur eine Antwort (nämlich B) nahelegt, während in der Experimentalgruppe die Antworten B *und* D infrage kommen. Die Wahrscheinlichkeit der richtigen Antwort B sinkt jedoch mit der Anzahl der potenziellen Antworten, die von einem Hinweisreiz A ausgelöst werden.

Der Prozess des Verlernens wird als Abschwächen der Assoziationsstärke etwa zwischen den Reizen A und B verstanden, wenn eine neue Assoziation A–D gelernt wird. Analog zu Vorgängen bei der Löschung (▶ Kap. 10), die Gegenstand der Lerntheorie sind, kann es aber auch zu einer spontanen Erholung der A–B-Assoziationsstärke kommen. Eine solche spontane Erholung könnte beispielsweise dafür verantwortlich sein, dass sich Interferenzeffekte erheblich abschwächen können, wenn das Behaltensintervall zwischen dem Lernen der zweiten Liste und dem Gedächtnistest verlängert wird. Erhebliche Zweifel am Konzept des Verlernens von Assoziationen kommen jedoch durch den Befund auf, dass Interferenzeffekte gar nicht oder nur sehr schwach auftreten, wenn nicht auf Vorgabe von Reiz A der assoziierte Reiz B reproduziert, sondern einfach ein vorgegebenes Reizpaar wiedererkannt (oder als Distraktor zurückgewiesen) werden soll (Postman und Stark 1969).

Eine kritische Variable beim Antwortwettbewerb ist, wie gut der Hinweisreiz A die Antwort B vorhersagt. Bower et al. (1994) verwendeten Stimuli aus verschiedenen Kategorien, z. B. zweistellige Ziffern, Buchstaben und Namen von Künstlern. In einer kongruenten Bedingung stammte jeder Reiz eines A–B-Paares aus derselben Kategorie, die unterschiedlichen Paare jedoch jeweils aus verschiedenen Kategorien (z. B. 12–32, M–V). In einer

nichtkongruenten Bedingung wurden dieselben Kategorien wie in der kongruenten Bedingung verwendet, wobei die Stimuli eines Wortpaares aber aus verschiedenen Kategorien stammten (z. B. 12–V, M–32). Betrachten wir nun die Vorhersagegüte von Hinweisreizen in diesem Experiment. In der kongruenten Bedingung sagt der Hinweisreiz die *Kategorie* der korrekten Antwort sicher voraus. In der nichtkongruenten Bedingung lässt sich die Kategorie der Antwort jedoch nicht vorhersagen. Folglich kommen alle gelernten Stimuli und nicht nur die aus einer bestimmten Kategorie als Antworten infrage. Hier sollte also ein deutlich stärkerer Antwortwettbewerb stattfinden, und dementsprechend sollten größere Interferenzeffekte auftreten. Tatsächlich fanden Bower et al. (1994) in der nichtkongruenten Bedingung sehr starke Interferenzeffekte, in der kongruenten Bedingung aber fast keine. Insgesamt lässt sich also festhalten, dass Interferenzeffekte vermutlich darauf zurückzuführen sind, dass eine Zielinformation wegen Antwortwettbewerbs schlecht abgerufen werden kann und nicht etwa wegen des Verlernens von Assoziationen für alle Zeit verloren ist.

Interferenz durch Nachinformation Loftus et al. (1978) untersuchten die Verzerrung von Erinnerungen an Ereignisse durch inkonsistente Nachinformation in einem Untersuchungsdesign, das auf abstrakter Ebene dem A–B/A–D-Design zur Untersuchung retroaktiver Interferenz sehr ähnlich ist. Zunächst zeigten sie Personen eine Serie von Dias über einen Verkehrsunfall. Auf einem der Dias kam ein kritisches Detail vor, nämlich ein Wagen (Reiz A), der an einer Kreuzung ein Stoppschild (Reiz B) passierte. Anschließend sollten Fragen zum Unfallhergang beantwortet werden. Eine der Fragen enthielt als Information den Wagen und das kritische Detail, das in der konsistenten Bedingung ein Stoppschild war (sodass erneut A–B vorgegeben wurde), in der inkonsistenten aber ein Vorfahrt-gewähren-Schild (sodass A–D vorgegeben wurde). Die Frage konnte sinngemäß etwa lauten: „Hat ein anderes Auto den roten Wagen passiert, als dieser an dem Vorfahrt-gewähren-Schild anhielt?“

In einem abschließenden Wiedererkennenstest sollte in einer Zufallsabfolge von Bildpaaren entschieden werden, welches der beiden Bilder gesehen wurde und welches nicht. Das interessierende Bildpaar enthielt zum einen das Original aus der Lernphase (A–B), zum anderen ein ansonsten identisches Bild, aber mit dem Schild aus der inkonsistenten Nachinformation (A–D). Die Erinnerungsleistungen waren dann am schlechtesten, wenn die Nachbefragung inkonsistente Detailinformationen enthielt. Man könnte nun annehmen, dass dieser Effekt der falschen Nachinformation nur dann auftritt, wenn das ursprüngliche Ereignis gar nicht encodiert wurde. In einer fMRI-Studie konnten Baym und Gonsalves (2010) zeigen, dass dies vermutlich nicht der Fall ist: Items, für die später ein Effekt der falschen Nachinformation gefunden wurde, zeigten eine stärkere Aktivität in den medialen Temporallappen in der Encodierungsphase als Items, die später gar nicht erinnert werden konnten. Allerdings immunisiert ein verstärktes Encodieren visueller Details gegen spätere Gedächtnisfehler: Je aktiver okzipitale und temporale visuelle Areale beim Encodieren der Originalinformation waren, desto geringer war die Wahrscheinlichkeit, dass im späteren Gedächtnistest die falsche Information gewählt wurde.

Abweichend von der klassischen Interferenztheorie nahmen Loftus et al. (1978) an, der Effekt der falschen Nachinformation ginge auf die Integration der Gedächtnisspur dieser Information mit der Gedächtnisrepräsentation des ursprünglichen Ereignisses zurück. Bekerian und Bowers (1983) argumentierten jedoch, dass die Originalinformation im Gedächtnis keineswegs „verändert“ oder „gelöscht“, sondern einfach nur momentan unzugänglich war. Ausgangspunkt ihrer Überlegungen waren die bereits besprochenen Kontexteffekte, deren Einfluss auf das Gedächtnis bekanntlich sehr stark sein kann. Kontext kann auch durch die zeitliche Abfolge von einzelnen Ereignissen entstehen. Viele kennen das Phänomen, dass man oft nicht sagen kann, an welcher Stelle eines Albums ein bestimmtes Musikstück gespielt wird, aber wenn die letzten Takte eines Stückes erreicht sind, dann weiß man plötzlich ganz genau, welches Stück als Nächstes kommt. Folgerichtig haben Bekerian und Bowers (1983) neben der Testbedingung von Loftus et al. (1978) eine weitere Bedingung gewählt, in der die Bildpaare nicht mehr in einer zufälligen Abfolge, sondern in genau der Reihenfolge präsentiert wurden, in der sie auch in dem ursprünglichen Ereignis vorgekommen waren. In dieser zweiten Bedingung zeigte sich erwartungsgemäß kein Unterschied mehr zwischen Bedingungen mit konsistenter und inkonsistenter Nachinformation.

Interferenz beim Wiedererkennen Mit Ausnahme der Untersuchungen zum Nachinformationseffekt werden in einem Großteil der Untersuchungen zu Interferenzeffekten geförderte oder freie Reproduktionstests eingesetzt. Mit dieser Art der Gedächtnisprüfung erweisen sich die Interferenzeffekte als stabil und gut replizierbar. In jüngerer Zeit untersuchte man Interferenzeffekte zunehmend auch mit Wiedererkennenstests. Ein Grund dafür ist, dass sich Interferenzeffekte beim Wiedererkennen besonders eignen, um zwischen verschiedenen Klassen von Interferenzmodellen zu differenzieren. So genannte *Item-Noise-Modelle* postulieren, dass die Anzahl und Repräsentationsstärke aller gelernten Items den Abruf eines einzelnen Zielitems mitbestimmt. Werden z. B. mehr Items in einer Lernliste präsentiert, dann kommt es zu stärkerer Interferenz als wenn wenige Items gelernt werden. *Context-Noise-Modelle* hingegen postulieren einen anderen Mechanismus. Wenn eine Information im Wiedererkennenstest abgerufen wird, dann versucht man, den Lernkontext zu rekonstruieren. Ist das Item früher bereits in anderen Kontexten präsentiert worden, dann interferieren hier die früheren Kontexte, in denen das Item schon gelernt wurde, mit dem spezifischen Lernkontext. Stärkere Interferenz ist hier also nicht an die Anzahl der gelernten Items gekoppelt, sondern an die Häufigkeit, mit der ein Item vor dem Experiment schon im Gedächtnis gespeichert wurde. Blickt man auf die empirischen Ergebnisse, so ist die Situation zunächst recht eindeutig: Der Listenlängeneffekt, d. h. der Befund, dass die Gedächtnisleistung für längere Listen von zu lernenden Items schlechter ist als für kürzere Lernlisten, ist im Bereich des Wiedererkennens oft empirisch bestätigt worden, was für die Item-Noise-Modelle und gegen die Context-Noise-Modelle spräche.

Kinnell und Dennis (2011) konnten jedoch zeigen, dass der Listenlängeneffekt nicht immer auf ein Interferenzphänomen zurückzuführen ist, sondern häufig durch konfundierende Störvariablen zu erklären ist. Zum Beispiel kann man annehmen, dass die Motivation und Anstrengung, sich eine Information einzuprägen, im Verlauf des Einprägens einer Liste von zu lernenden Items stetig abnehmen. Die spät gelernten Items in einer langen Liste sollten also insgesamt etwas schlechter gelernt werden als die Items in einer kurzen Liste. Vergleicht man nun die spät gelernten Items der langen Lernliste mit den relativ früh dargebotenen Items der kurzen Liste, so ist auch ohne einen Interferenzmechanismus ein Listenlängeneffekt zu erwarten: Die Informationen in der langen Liste werden durchschnittlich einfach schlechter gelernt und folglich auch schlechter wiedererkannt. Ein empirisch gefundener Listenlängeneffekt spricht also nicht unbedingt gegen die Context-Noise-Modelle. Kinnell und Dennis (2012) kontrollierten solche konfundierenden Variablen und kamen insgesamt zu dem überraschenden Ergebnis, dass der Listenlängeneffekt vom Lernmaterial abhängt. Die entscheidende Variable bei dem Lernmaterial scheint zu sein, wie homogen es ist. So fanden sie keinen Listenlängeneffekt für Wortpaare und Bilder von Szenen – allesamt Lernmaterialien, die relativ heterogen waren. Untersuchten sie jedoch Bilder von Gesichtern und Bilder von Fraktalen – jeweils relativ homogenes Material –, war der Listenlängeneffekt vorhanden.

Wie lassen sich diese Befunde erklären? Am wahrscheinlichsten ist es, dass tatsächlich eine Kombination aus Interferenz von verschiedenen Kontexten und Items aus der Lernphase vorliegt: Untersucht man heterogenes Material, das zudem schon häufig in der Lerngeschichte einer Testperson vorkam, dann aktiviert jedes Item in der Testsituation eine große Anzahl von Lernkontexten, und es entsteht eine große Interferenz durch die Kontextinformation. Diese Interferenz ist für kurze und lange Listen identisch und überlagert die relativ dazu recht schwache Interferenz durch die Informationen in den Lernlisten. Für Wortmaterial beispielsweise ist es schwer, die subtilen Interferenzeffekte, die von den Item-Noise-Modellen vorhergesagt werden, zu finden. Um diese Effekte zu finden, muss man versuchen, den Einfluss von Kontextinterferenz zu minimieren. Dies kann man durch die Verwendung von neuartigem Material tun, wie beispielsweise von Bildern von Fraktalen. Aber auch mit häufig gelerntem Material kann der Listenlängeneffekt gefunden werden, wenn das Material relativ homogen ist. Stammen z. B. alle Wörter in einem Experiment aus einer einzigen semantischen Kategorie, so kann dies helfen, den Lernkontext so spezifisch einzuschränken, dass der Einfluss anderer Lernkontexte minimiert wird.

Ein indirekter Beleg für diese Interpretation stammt aus einem Experiment von Dennis und Chapman (2010). Sie untersuchten den Listenlängeneffekt für Wortmaterial aus verschiedenen semantischen Kategorien. In einem Ja-Nein-Test des Wiedererkennens stellten sie den gelernten Zielitems aus den semantischen Kategorien Distraktoren (also Wörter, die nicht gelernt wurden) aus denselben Kategorien gegenüber. Unter dieser Bedingung fanden sie den Listenlängeneffekt. Verglichen sie aber die Zielwörter aus den semantischen Kategorien mit zufälligen Wörtern, die nicht aus den semantischen Kategorien stammten, dann verschwand der Listenlängeneffekt nicht nur, sondern er drehte sich sogar um. Dieser Befund ist weder mit einem Context-Noise-Modell noch mit einem Item-Noise-Modell einfach zu erklären, aber mit der oben diskutierten Kombination beider Modelle. Es bleibt abzuwarten, ob dieser Erklärungsansatz auch andere momentan diskutierten Probleme erklären kann Diese Beispiele aus der aktuellen Forschung zur Interferenz sollen zeigen, dass zur erfolgreichen Theoriebildung in der Gedächtnispsychologie nicht formale Modelle oder experimentelle Forschung allein weiterhelfen. Es ist die Kombination beider Ansätze, nämlich die sorgfältige Planung von Experimenten auf der Basis starker formaler Theorien, die zu dem größten Erkenntnisfortschritt führt.

Gedächtnistäuschungen

In Untersuchungen zu Interferenzeffekten stehen Situationen im Vordergrund, bei denen der Abruf einer gesuchten Information nicht gelingt. Wenn aber nun der Abruf einer Information erfolgt, können wir dann auch sicher sein, dass die erinnerte Information der ursprünglich gespeicherten entspricht? Diese Frage kann eindeutig verneint werden. In der Gedächtnispsychologie sind unzählige Befunde dokumentiert, die belegen, dass erinnerte Ereignisse sehr stark von den tatsächlich erlebten Ereignissen abweichen können. Aus den zahllosen Beispielen für fehlerhafte Erinnerungen werden hier nur wenige Beispiele aufgegriffen, um das Problem der Ungenauigkeit von Gedächtnisinhalten zu illustrieren.

Immer wenn ein erinnertes Ereignis nicht dem Originalereignis entspricht, kann man von Gedächtnistäuschungen sprechen. Ähnlich wie in der Wahrnehmungspsychologie versucht man in der Gedächtnispsychologie, über das Studium von systematischen Fehlern in Gedächtnisaufgaben die Funktionsweise des Gedächtnisses zu verstehen. Die Analyse von Gedächtnisfehlern ist aber auch von großer praktischer Relevanz. Inwieweit können wir uns beispielsweise auf Zeugenaussagen vor Gericht verlassen? Sind in einer Therapiesitzung erinnerte Kindheitserlebnisse tatsächlich geschehen? Kann uns die Gedächtnispsychologie Kriterien liefern, die uns unterscheiden helfen, ob ein erinnertes Ereignis tatsächlich stattgefunden hat? Um solche Fragen fundiert beantworten zu können, ist es wichtig, Situationen zu schaffen, in denen Gedächtnisfehler relativ häufig und systematisch auftreten.

Solcher experimenteller Situationen bedient sich z. B. die Schemaforschung. Ein Standardbefund aus der Schemaforschung besteht darin, dass Ereignisse, die mit dem Schema einer zu erinnernden Episode konsistent sind, häufig fälschlicherweise in Gedächtnistests berichtet werden, obwohl sie gar nicht erwähnt wurden. So wird beispielsweise bei Nacherzählungen der Schilderung eines Restaurantbesuchs das Zahlen der Rechnung häufig auch dann „erinnert“, wenn die Handlung in der ursprünglichen Geschichte nicht vorkam (Graesser et al. 1980). Loftus und Palmer (1974) berichten, dass die erinnerte Geschwindigkeit eines Unfallfahrzeugs höher war, wenn in der Frage nach der Geschwindigkeit erwähnt wurde, die Fahrzeuge seien ineinander „gekracht“, im Vergleich zu einer Formulie-

rung, in der die Fahrzeuge nur „zusammengestoßen“ waren. Auch gaben mehr Personen an, am Unfallort zerbrochenes Glas gesehen zu haben, wenn zwei Fahrzeuge angeblich „zusammengekracht“ statt bloß „zusammengestoßen“ waren. Dies ist deshalb besonders bemerkenswert, weil in der Szene, die die Personen gesehen hatten, gar kein zerbrochenes Glas zu sehen war, was noch einmal den stark rekonstruktiven Charakter von Erinnerungen unterstreicht.

Ein weiteres, sehr wichtiges Paradigma zur Untersuchung von Gedächtnisfehlern stammt von Deese (1959). Er stellte Lernlisten aus Wörtern zusammen, die alle in einer engen semantischen Beziehung zu einem kritischen Wort standen, das aber nicht präsentiert wurde. Eine solche Liste könnte beispielsweise aus den Wörtern „Faden“, „Reißzwecke“, „Öhr“, „nähen“, „scharf“, „Spitze“, „Stich“, „Fingerhut“, „Heuhaufen“, „Dorn“, „Schmerz“, „Injektion“ und „Spritze“ bestehen. Alle diese Wörter sind mit dem kritischen Wort „Nadel“ assoziiert, das aber selbst in der Lernliste nicht vorkommt. Beim Reproduzieren der Wörter zeigte sich dann, dass das kritische Wort sehr häufig genannt wurde, und zwar teilweise so häufig wie die tatsächlich gelernten Wörter.

Das von Deese (1959) eingesetzte Verfahren fand zunächst relativ wenig Beachtung und wurde von Roediger und McDermott (1995) gleichsam wiederentdeckt. Sie replizierten die Befunde von Deese und erweiterten sie um einige wichtige Aspekte. Zunächst zeigten sie, dass die fälschliche Erinnerung an ein kritisches Wort auch auftritt, wenn Wiedererkennenstests verwendet werden. Darüber hinaus versuchten sie herauszufinden, ob die falschen Antworten auf Gedächtnis- oder Rateprozesse zurückzuführen sind. Es zeigte sich, dass Personen die kritischen Wörter mit großer subjektiver Sicherheit „wiedererkannten“, was man beim Raten nicht erwarten würde. Weiterhin wandten die Autoren eine Prozedur an, bei der angegeben werden sollte, ob man sich außer an das zu erinnernde Wort an spezifische Details bei der Präsentation des Wortes (z. B. eine spontane Assoziation, ein Gefühl, worauf man geachtet hat) in der Liste erinnert (R-Antwort für *remember*). Alternativ konnte man angeben, dass man zwar weiß, dass das kritische Wort in der Lernliste vorhanden war, dass man sich an Details der Präsentation jedoch nicht erinnern kann (K-Antwort für *know*). Obwohl die kritischen Distraktoren nicht in der Lernphase dargeboten worden waren, wählten die Personen, die im Wiedererkennenstest diese Distraktoren als alt bezeichnet hatten, überwiegend die R-Kategorie. Auch dies würde man nicht erwarten, wenn die Gedächtnistäuschung hauptsächlich auf Raten zurückginge.

Ein ähnliches Vorgehen wählten Payne et al. (1996). Dort wurden die Wörter der Lernliste in einer weiblichen und einer männlichen Stimme dargeboten. Im Gedächtnistest sollte angegeben werden, ob die Wörter in der Lernphase vorhanden waren. Bei einer Ja-Antwort sollte zusätzlich bestimmt werden, in welcher Stimme das Wort gesprochen wurde. Obwohl ausdrücklich erlaubt war anzugeben, man könne sich an die Stimme nicht erinnern, ordneten 87 % der Personen den kritischen Distraktor einer Stimme zu.

Die im Deese-Paradigma induzierten Gedächtnisfehler weisen demnach alle Charakteristiken „echter“ Erinnerungen auf. Der Effekt erweist sich sogar als so robust, dass er selbst dann auftritt, wenn die Personen von vornherein über die Details der Untersuchungssituation informiert und aufgefordert werden, den Fehler zu vermeiden.

Betrachten wir nun eine typische Erklärung von Gedächtnisfehlern, bei der eine Wechselwirkung von episodischem Erinnern an die Lernsituation mit semantischen Wissensstrukturen eine zentrale Rolle spielt. In einer weit verbreiteten Vorstellung vom Aufbau des semantischen Gedächtnisses geht man von hierarchisch organisierten semantischen Netzwerken aus (z. B. Collins und Loftus 1975). Hierin sind Wissensinhalte als wechselseitig verknüpfte Knoten repräsentiert. So bestehen beispielsweise Verknüpfungen vom Knoten „Gelb“ zum Knoten „Postauto“ und „Banane“, aber keine direkte Beziehung zwischen den Knoten „Postauto“ und „Banane“. Ein Schlüsselkonzept dieses Modells besteht in der Annahme, die mentale Verarbeitung des mit einem Knoten verbundenen Konzepts erhöhe die Aktivierung dieses Knotens. Gleichzeitig wird angenommen, dass sich die Aktivierung entlang der Verknüpfungen eines Knotens ausbreitet, sodass auch „benachbarte“ Knoten eine Aktivierungserhöhung erfahren. In Phasen der Inaktivität sinkt die Aktivierung aller Knoten.

Über einen solchen Prozess der Aktivierungsausbreitung lassen sich Gedächtnisfehler innerhalb des Deese-Paradigmas leicht erklären. Da alle Elemente der Lernphase mit dem kritischen Distraktor semantisch verwandt sind, sollte dieser in der Lernphase eine erhebliche Aktivierung erfahren und folglich im Gedächtnistest leicht fälschlicherweise aus dem Gedächtnis abgerufen werden.

Zum Ende dieses Abschnitts wollen wir noch auf folgenden Punkt aufmerksam machen: Den erwähnten Prozeduren zur Induktion von Gedächtnisfehlern ist gemeinsam, dass sie auf Interaktionen von episodischen Gedächtnisaufgaben mit semantischem Wissen der Person beruhen. Diese Wechselwirkungen stellen erneut die bereits als problematisch herausgestellte systemorientierte Trennung zwischen einem episodischen und einem semantischen Gedächtnis infrage. Wenn im Gedächtnistest offensichtlich die Erinnerung an eine bestimmte Lernepisode gefordert wird, warum sollten sich dann so massiv Effekte des semantischen Gedächtnisses zeigen, das bei dieser Aufgabe eigentlich gar nicht angesprochen sein sollte?

12.2.3 Formale Gedächtnistheorien

Seit den 1980er Jahren sind verstärkt Versuche unternommen worden, das Langzeitgedächtnis durch mathematische Modelle zu beschreiben. Dafür ist es notwendig, dass alle an einer Gedächtnisaufgabe beteiligten Prozesse *und* Strukturen beschrieben werden. In der Regel wird versucht, ein Maximum an Befunden aus verschiedenen Bereichen der Gedächtnispsychologie mit einem Minimum an theoretischen Annahmen zu analysieren.

Innerhalb der Klasse der **formalen Gedächtnismodelle** nehmen insbesondere die **globalen Gedächtnismodelle** eine prominente Stelle ein. Nach der zentralen Annahme globaler Gedächtnismodelle ist die Erinnerung an ein Ereignis immer

durch alle im Gedächtnis repräsentierten Inhalte mitbestimmt. Diese Auffassung widerspricht der in der Gedächtnispsychologie immer noch dominierenden Sichtweise, dass die Erinnerungsleistung im Wesentlichen von den Charakteristika individueller Gedächtnisrepräsentationen abhängt. Hier sei an die implizite Annahme des Verarbeitungstiefeansatzes erinnert, wonach verschiedene Instruktionen während der Encodierungsphase zu tiefen bzw. oberflächlichen Gedächtnisrepräsentationen führen. Geht man von global operierenden Prozessen aus, dann verliert die Charakteristik individueller Gedächtnisrepräsentationen an Bedeutung, da die Erinnerung an ein Ereignis immer von *allen* Lernerfahrungen abhängt. Auch wenn diese zentrale Annahme globaler Gedächtnismodelle womöglich der ersten Intuition über die Funktionsweise eines Gedächtnissystems widerspricht, so ermöglicht sie es doch, zahlreiche Standardbefunde der Gedächtnispsychologie komfortabel zu erklären. Prominente globale Gedächtnismodelle sind die Modelle SAM (*search of associative memory*) (Gillund und Shiffrin 1984; Raaijmakers und Shiffrin 1981), TODAM 2 (*theory of distributed associative memory*) (Murdock 1982, 1997), CHARM (*composite holographic associative recall model*) (Metcalfe 1982), das Matrixmodell (Humphreys et al. 1989a; Pike 1984), REM (*retrieving effectively from memory*) (Shiffrin und Steyvers 1997) und MINERVA 2 (Hintzman 1986, 1988). Wie wir im vorhergehenden Abschnitt gesehen haben, sind formale Gedächtnismodelle nicht auf die Annahme eines global operierenden Abrufprozesses beschränkt. In dem Context-Noise-Modell von Dennis und Humphreys (2001) wird beispielsweise angenommen, dass Iteminformationen vollständig orthogonal repräsentiert sind und folglich keine Interferenz zwischen Items vorliegen kann. Die Speicherung von Kontextinformationen hingegen ist fehleranfällig, sodass es beim Abruf von Informationen zur Rekonstruktion falscher Kontextinformationen kommen kann. Hier ist es also nicht so wichtig, welche und wie viele andere Items in der Lernphase gelernt wurden, sondern wie häufig und in welchen Kontexten eine einzelne Information aus der Lernphase präsentiert wurde.

Grundannahmen von MINERVA 2

Im Folgenden stellen wir beispielhaft das Modell MINERVA 2 (Hintzman 1986, 1988) in seinen Grundzügen kurz vor. Dieses Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es sich auf sehr wenige theoretische Parameter beschränkt und dennoch mit einer Vielzahl von empirischen Befunden verträglich ist. Anschließend diskutieren wir, wie sich durch ein solches Modell einige der in diesem Kapitel angesprochenen Befunde erklären lassen. Eine ausführliche Darstellung globaler Gedächtnismodelle findet sich in den oben angeführten Originalarbeiten sowie in den Übersichten von Clark und Gronlund (1996), Humphreys et al. (1989b) sowie Neath und Surprenant (2002).

Beginnen wir mit der Beschreibung des Modells MINERVA 2 bei der formalen Darstellung von Gedächtniselementen. In dem Modell werden Gedächtniselemente als Vektoren $\mathbf{T}$ mit K unterschiedlichen Attributen dargestellt, wobei jedes Attribut $\mathbf{T}_j$ ($j = 1 \ldots K$) mit den Werten 1, 0 oder −1 codiert wird. Man kann sich vorstellen, dass ein Attribut mit 1 codiert wird, wenn es vorhanden ist, während es mit −1 codiert wird, wenn es nicht vorhanden ist. Mit 0 hingegen würde codiert, dass das Attribut nicht sinnvoll definiert ist. Diese Attribute des Vektors repräsentieren die unterschiedlichsten Aspekte eines Stimulus. Dies können z. B. semantische, phonologische oder andere perzeptuelle Attribute des Reizes sein. Weiterhin ist es wichtig, die Attribute, welche die eigentliche Zielinformation codieren, von solchen zu unterscheiden, die den episodischen Kontext repräsentieren. Der episodische Kontext eines Elements umfasst dabei alle Attribute, die zeitlich gemeinsam mit der Zielinformation vorhanden sind. Dies können bestimmte perzeptuelle Attribute der Zielinformation (grün), aber auch von der Person assoziierte semantische Inhalte (Frosch), emotionale Zustände (Freude) etc. sein. Die Gesamtheit aller Attribute bildet den *funktionalen Stimulus*, der sich mitunter stark von dem nominalen Stimulus, also der Information, die vom Experimentator vorgegeben wird, unterscheidet. Der Elementvektor $\mathbf{T}$ wird in MINERVA 2 in einem Kurzzeitspeicher gehalten, der die Funktion hat, die Information für die Übertragung in das Langzeitgedächtnis aufrechtzuerhalten.

Im Langzeitgedächtnis werden alle Elemente in MINERVA 2 in separaten Gedächtnisrepräsentationen abgelegt. Da ein Element als Vektor $\mathbf{T}$ dargestellt wird, kann das Langzeitgedächtnis $\mathbf{M}$ als Matrix aufgefasst werden, wobei N die Anzahl der im Gedächtnis repräsentierten Elemente und K die Anzahl der Attribute jedes Element bezeichnet. Wiederholte Darbietungen von Elementen führen in MINERVA 2 zu multiplen Repräsentationen des Elements, d. h., jede Präsentation eines Elements führt automatisch zu einer neuen Gedächtnisrepräsentation, und zwar unabhängig davon, ob dieses Element schon einmal gespeichert wurde.

Neben diesen strukturellen Aspekten des Gedächtnisses sind in MINERVA 2 Lern-, Vergessens- und Abrufprozesse definiert. Der Lernprozess wird als probabilistisches Kopieren eines Elementvektors in die Gedächtnismatrix verstanden. Sei $\mathbf{M}_i$ die Gedächtnispräsentation des Elements $\mathbf{T}$, dann gelten bezüglich des Lernprozesses folgende bedingte Wahrscheinlichkeiten: $P(\mathbf{M}_{i,j} = \mathbf{T}_j \mid \mathbf{T}_j \neq 0) = L$, $P(\mathbf{M}_{i,j} = 0 \mid \mathbf{T}_j \neq 0) = 1 - L$ und $P(\mathbf{M}_{i,j} = 0 \mid \mathbf{T}_j = 0) = 1$. Der Lernparameter L bestimmt demnach, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Attribut gelernt wird. Wird mit der Wahrscheinlichkeit $1 - L$ ein Attribut nicht gelernt, wird in der Gedächtnismatrix eine 0 eingetragen. Der Vergessensprozess wird in MINERVA 2 so konzipiert, dass gelernte Attribute von im Gedächtnis repräsentierten Elementen mit der Wahrscheinlichkeit F wieder vergessen werden, d. h., die Attribute werden in der Gedächtnisrepräsentation mit 0 codiert. Sei M^t die Gedächtnismatrix zum Zeitpunkt t, dann gilt also

$$P\left(\mathbf{M}_{i,j}^{t+1} = 0 | \mathbf{M}_{i,j}^{t} \neq 0\right) = F$$

Neben diesen Lern- und Vergessensprozessen sind in MINERVA 2 zwei unterschiedliche Abrufprozesse definiert. Hintzman benutzt die Metapher des Echos, um die Funktionsweise dieser Prozesse zu beschreiben. Zunächst wird ein ursprüngliches Schallsignal benötigt, um ein Echo auszulösen. Das resultierende Echo kann nun bezüglich der Lautstärke

und des Inhalts beschrieben werden. Innerhalb des Gedächtnissystems übernimmt ein Hinweisreiz die Funktion des auslösenden Schallsignals, und die Prozesse der *Echointensität* und des *Echoinhalts* bestimmen die Intensität bzw. den Inhalt des reflektierten Schalls. Zur Berechnung des *Echointensitätsprozesses* in MINERVA 2 wird zunächst die Aktivierung $A_i(\mathbf{C})$ jeder separaten Gedächtnisrepräsentation durch einen Hinweisreiz $\mathbf{C}$ berechnet:

$$A_i\,(\mathbf{C}) = \left(\frac{1}{N_K}\sum_{j=1}^{K}\mathbf{C}_j\,\mathbf{M}_{i,j}\right)^3 . \tag{12.11}$$

Das Ausmaß der Aktivierung $A_i(\mathbf{C})$ einer Gedächtnisrepräsentation durch einen Hinweisreiz $\mathbf{C}$ hängt wesentlich von der Ähnlichkeit des Hinweisreizes mit einer Gedächtnisrepräsentation ab. Die Normierungsvariable N_K bezeichnet die Anzahl der relevanten Attribute, d. h., die Anzahl der Attribute, die entweder beim Hinweisreiz oder in der Gedächtnisrepräsentation als vorhanden oder als nicht vorhanden codiert sind, für die also $\mathbf{C}_j$ und $\mathbf{M}_{i,j}$ nicht beide null sind. Diese separaten Aktivierungen von Gedächtnisrepräsentationen spielen jedoch in Gedächtnisaufgaben keine direkte Rolle. Stattdessen wird für einen Hinweisreiz eine globale Aktivierung $A(\mathbf{C})$ aller Gedächtnisrepräsentationen berechnet, die Hintzman als *Echointensität* bezeichnet:

$$A\,(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^{N} A_i\,(\mathbf{C})\,. \tag{12.12}$$

Bei Wiedererkennensaufgaben ist es üblich, $A(\mathbf{C})$ als Gefühl der Vertrautheit zu interpretieren und anzunehmen, dass Personen eine „Alt"-Antwort genau dann geben, wenn $A(\mathbf{C})$ größer als ein Antwortkriterium c ist. In dieser Hinsicht ähnelt MINERVA 2 der Signalentdeckungstheorie. Es erweitert diesen Ansatz jedoch insofern, als die Prozesse, die zu einem Vertrautheitsgefühl führen, spezifiert werden.

Im Gegensatz zum Echointensitätsprozess ist das Ergebnis des Echoinhaltsprozesses wiederum ein Vektor, dessen Attribute inhaltlich genauso interpretiert werden wie die Attribute des ursprünglichen Elements. Die Attribute $\mathbf{R}_j$ eines erinnerten Elements werden dabei als mit der Aktivierung der separaten Gedächtnisrepräsentationen gewichtete Summe über alle Attribute der Gedächtnismatrix berechnet:

$$\mathbf{R}_j\,(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^{N} A_i\,(\mathbf{C})\cdot\mathbf{M}_{i,j}\,. \tag{12.13}$$

Die beiden in MINERVA 2 definierten Abrufprozesse unterscheiden sich also vornehmlich hinsichtlich ihres Rückgabewertes: Der **Echointensitätsprozess** liefert eine kontinuierliche Zufallsvariable zurück, die unabhängig von der Bedeutung einzelner Attribute der Elemente ist, während der **Echoinhaltsprozess** einen vollständigen Elementvektor zurückliefert.

Bezüglich der in MINERVA 2 definierten Abrufprozesse sind folgende Punkte bemerkenswert:

- Die durch einen Hinweisreiz ausgelöste Aktivierung bzw. Reproduktion eines Elements ist nicht Teil der Gedächtnisrepräsentation des Hinweisreizes. Erinnerte Merkmale bzw. die Vertrautheit eines Testelements werden folglich nicht passiv aus einer Gedächtnisrepräsentation ausgelesen, sondern sind das Resultat eines komplexen Prozesses. Der Echoinhaltsprozess ähnelt dabei mehr einer Rekonstruktion als einer Reproduktion von Informationen.
- Für beide Abrufprozesse ist der Hinweisreiz $\mathbf{C}$, mit dem das Gedächtnissystem konfrontiert wird, von enormer Bedeutung. Analog zu der Encodierung von Elementen muss auch hier zwischen nominalem und funktionalem Hinweisreiz unterschieden werden.
- Rufen wir uns in Erinnerung, dass der Hinweisreiz $\mathbf{C}$ nicht nur Attribute der Zielinformation umfasst, sondern auch Kontextmerkmale, dann ist offensichtlich, dass die durch den Hinweisreiz $\mathbf{C}$ ausgelöste Vertrautheit und die reproduzierten Elementvektoren mit dem Lernkontext variieren können. Auf diese Weise ist es möglich, eine Vielzahl von Kontexteffekten aus der Gedächtnisforschung zu modellieren.
- Das Resultat beider Abrufprozesse in MINERVA 2 wird von allen im Gedächtnis repräsentierten Elementen bestimmt, da über alle separaten Aktivierungen bzw. Elementattribute separater Gedächtnisrepräsentationen summiert wird. Es ist diese Eigenschaft, die MINERVA 2 als globales Gedächtnismodell definiert. Der individuelle Beitrag separater Gedächtnisrepräsentationen zur Aktivierung bzw. Rekonstruktion eines Elements hängt dabei wesentlich von der Ähnlichkeit der Gedächtnisrepräsentation zum Hinweisreiz ab.

Anwendungen von MINERVA 2

Im Rahmen des Ansatzes des transferangemessenen Verarbeitens wurde gezeigt, dass die Gedächtnisleistung am besten ist, wenn die kognitiven Prozesse bei der Encodierung und beim Abruf der Information übereinstimmen. In MINERVA 2 lässt sich dieser Befund relativ einfach erklären. Dazu muss man annehmen, dass die verschiedenen Instruktionen in der Lernphase, die ja z. B. auf eine perzeptuelle oder eine konzeptuelle Verarbeitung abzielen, sich auf die Wahrscheinlichkeit auswirken, mit der bestimmte Gruppen von Attributen gelernt werden. Unter einer *konzeptuellen Instruktion* werden beispielsweise semantische Attribute mit größerer Wahrscheinlichkeit gelernt als unter einer *perzeptuellen Instruktion*. Dieser Gedanke lässt sich leicht auf die Abrufphase übertragen. Bedenkt man, dass bezüglich des Hinweisreizes ebenfalls ein nominaler und ein funktionaler Hinweisreiz unterschieden werden muss, dann liegt es auf der Hand, dass verschiedene Arten von Gedächtnistests ebenfalls zu unterschiedlichen funktionalen Hinweisreizen führen. Je mehr Attribute zwischen Hinweisreiz und den Gedächtnisrepräsentationen jedoch übereinstimmen, desto höher ist die Vertrautheit $A(\mathbf{C})$ eines Testelements. Die verbesserte Gedächtnisleistung im Ansatz des transferangemessenen Verarbeitens kann demnach auf eine höhere Überlappung gelern-

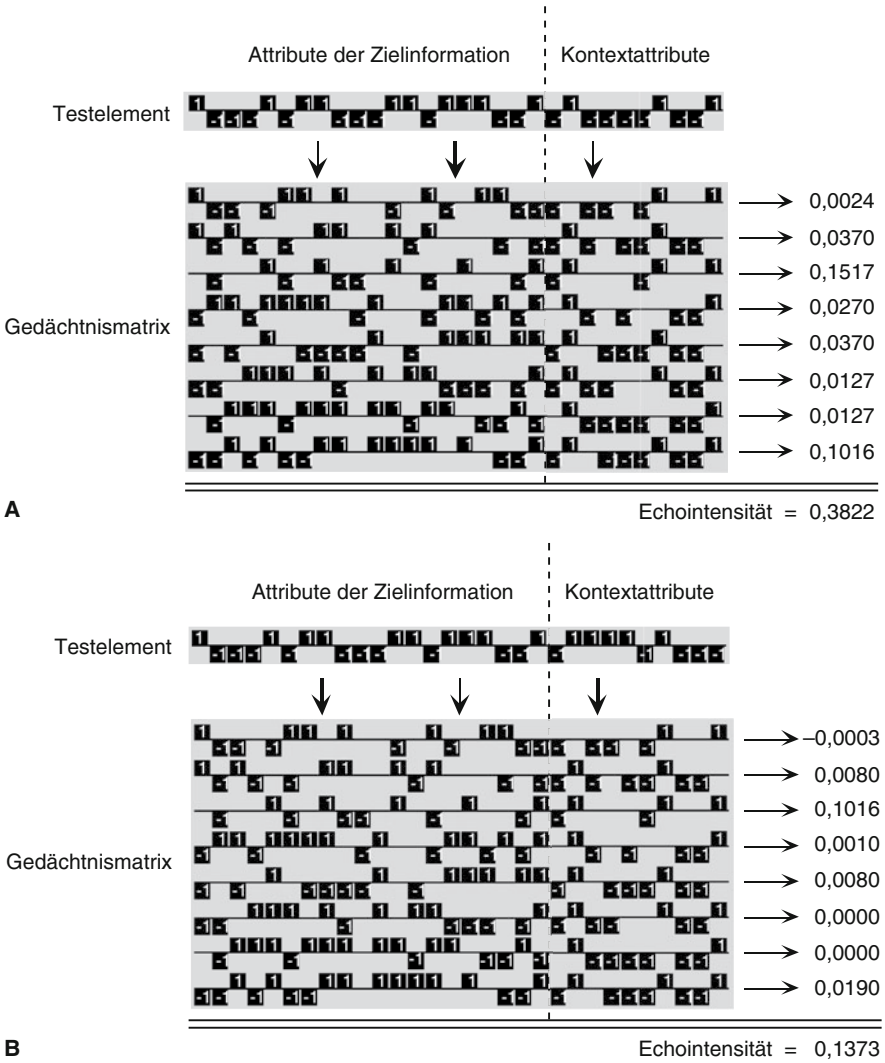


Abb. 12.7 Grafische Illustration von Kontexteffekten in Wiedererkennensaufgaben in dem Modell MINERVA 2. In dem Beispiel codieren die ersten 20 Attribute eines Elements die Zielinformation und die letzten zehn Attribute den episodischen Kontext. Die Codierung von Elementattributen wird durch nach oben bzw. nach unten ausgerichtete Rechtecke symbolisiert. In der Lernphase wurden acht Elemente in einem konstanten Kontext gelernt. Entsprechend sind diese acht Elemente in der Gedächtnismatrix repräsentiert. Die Attribute eines Elements aus der Lernphase sind mit der Wahrscheinlichkeit von .7 gelernt worden. In **A** wird ein gelerntes Element (Element 3 aus der Lernphase) in dem Lernkontext getestet. In **B** wird dasselbe Element in einem unterschiedlichen Kontext getestet. Entsprechend den Modellannahmen wird zunächst die lokale Aktivierung separater Gedächtnisrepräsentationen berechnet (s. Gl. 12.11), welche dann zur globalen Aktivierung (Echointensität; s. Gl. 12.12) aufsummiert werden. Das Beispiel zeigt, dass die globale Aktivierung des Testelements deutlich höher ist, wenn es im Lernkontext dargeboten wird. Demnach sollte die Gedächtnisleistung höher sein, wenn Lern- und Abrufkontext identisch sind

ter Elementattribute mit dem funktionalen Hinweisreiz erklärt werden.

Auch Kontexteffekte können im Rahmen von MINERVA 2 problemlos erklärt werden. Jeder Abruf von Informationen aus dem Gedächtnis hängt wesentlich von dem Hinweisreiz ab, mit dem das Gedächtnis „stimuliert" wird. Ist der Abrufkontext dem Lernkontext sehr ähnlich, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass auch die Anzahl identischer Attribute des gelernten Elements und des Hinweisreizes übereinstimmen. In Abb. 12.7 ist beispielhaft dargestellt, wie Kontexteffekte innerhalb des Modells MINERVA 2 modelliert werden können.

Die im Paradigma des Paarassoziationslernens gefundenen proaktiven und retroaktiven Interferenzeffekte gelten als Standardbefunde der Gedächtnispsychologie, die von jeder Gedächtnistheorie erklärt werden sollten. In MINERVA 2 können diese Effekte auf Interferenzen während der Abrufphase zurückgeführt werden: In Untersuchungen zu Interferenzeffekten wird im geförderten Reproduktionstest ein Teil des Stimulus als Hinweisreiz vorgegeben. Der andere Teil des Stimulus soll reproduziert werden. In der Kontrollbedingung (A–B, C–D; Tab. 12.1) werden in der Testsituation die durch den Hinweisreiz A reproduzierten Attribute im Wesentlichen mit der gesuchten Information B übereinstimmen, da die Gedächtnisrepräsentation A–B durch den Hinweisreiz A am stärksten aktiviert wird, die Repräsentation von C–D jedoch wesentlich weniger. Der korrekte Abruf von B sollte somit weniger problematisch sein. In der Experimentalbedingung (A–B, A–D) hingegen werden die Gedächtnisrepräsentationen von A–B und A–D bei der Präsentation von A gleichermaßen aktiviert. Der korrekte Abruf von B wird hier also durch den starken „Wettbewerber" D weniger wahrscheinlich.

Auch Gedächtnistäuschungen im Rahmen des Deese-Paradigmas lassen sich in globalen Gedächtnismodellen auf einfache Weise erklären. Erinnern wir uns, dass im Deese-Paradigma eine Reihe Wörter dargeboten werden, die alle in einer engen semantischen Relation zu einem kritischen Distraktor stehen. Dieser Distraktor wird sowohl in Reproduktions- als auch in Wiedererkennensaufgaben häufig fälschlich erinnert. In MINERVA 2 wird in beiden Abrufprozessen über alle Elemente der Gedächtnismatrix summiert. Haben die Elemente eine hinreichende Ähnlichkeit zu einem zuvor nicht präsentierten Testwort, dann kann dieses Wort eine sehr hohe Vertrautheit über den Echointensitätsprozess erfahren, ohne dass für das Wort

überhaupt eine Gedächtnisrepräsentation vorliegt. Unter der Annahme einer vertrautheitsbasierten Entscheidungsstrategie sind demnach hohe falsche Alarmraten für kritische Distraktoren in globalen Gedächtnismodellen nicht nur zu erwarten, sondern sie stellen eine fundamentale Modellvorhersage dar. Die formale Modellierung von Wiedererkennensaufgaben innerhalb des Deese-Paradigmas mit MINERVA 2 ermöglicht es zudem, spezifische Vorhersagen abzuleiten, die ohne den formalen Rahmen nicht unbedingt auf der Hand liegen. So sollte beispielsweise die falsche Alarmrate der kritischen Distraktoren im Vergleich zur Trefferrate von gelernten Elementen unter erschwerten Lernbedingungen (z. B. kurze Darbietungsdauer) höher ausfallen als unter einfacheren Lernbedingungen (z. B. lange Darbietungsdauer). Arndt und Hirshman (1998) konnten diese spezifischen Vorhersagen des Modells experimentell bestätigen. MINERVA 2 sagt zudem vorher, dass die Wahrscheinlichkeit, den kritischen Distraktor fälschlicherweise als zuvor gelernt zu akzeptieren, weiter gesteigert werden kann, wenn zusätzlich zur semantischen Ähnlichkeit weitere Kontextattribute des kritischen Distraktors mit den gelernten Wörtern innerhalb des Deese-Paradigmas übereinstimmen. Der Effekt diese Kontextattribute sollte zudem mit der Anzahl der gelernten Wörter mit identischen Attributen steigen. Diese Vorhersage konnte Arndt (2010) belegen. Er präsentierte semantisch kategorisierbare Wortlisten in außergewöhnlichen Schriftarten. Wurde nun der kritische Distraktor in derselben Schriftart wie die zuvor gelernten, semantisch verwandten Wörter abgefragt, stieg die Anzahl falscher Alarme noch einmal deutlich an. Dieser Anstieg war wie vorhergesagt umso stärker, je mehr gelernte, semantisch verwandte Wörter mit der Schriftart des kritischen Distraktors im Test übereinstimmten.

Aber auch in anderen Gebieten der Kognitiven Psychologie ist MINERVA 2 erfolgreich angewandt worden. Dougherty et al. (1999) beispielsweise modellierten mit einer Variante von MINERVA 2 zahlreiche Phänomen aus der Entscheidungsforschung (▶ Kap. 17). Jamieson und Mewhort (2009a, b, 2010) zeigten, dass sich viele Standardphänomene aus dem Bereich des Lernens artifizieller Grammatiken (▶ Kap. 10) oder aus dem Bereich der Sequenzlernaufgaben (▶ Abschn. 12.2.1) mit den Grundannahmen von MINERVA 2 erklären lassen. Diese Anwendungen verdeutlichen einen ganz entscheidenden Vorteil formaler Modellbildung: Vermeintlich vollkommen unterschiedliche Phänomene, die typischerweise nicht gemeinsam betrachtet werden, können auf der Basis eines formalen Modells auf ein gemeinsames theoretisches Fundament gesetzt werden. Somit tragen formale Gedächtnismodelle wesentlich zur integrativen Theoriebildung in der Psychologie bei.

Diese kurz skizzierten Anwendungsbeispiele sollen genügen, um einen Eindruck von der Modellierung von Gedächtnisprozessen mit einem formalen Prozessmodell zu erhalten. Wie wir gesehen haben, lassen sich sehr unterschiedliche Befunde aus der Gedächtnisforschung ohne aufgabenspezifische Zusatzannahmen innerhalb eines Modells erklären. Dennoch sind formale Modelle häufig kritisiert worden. Ein Kritikpunkt betrifft beispielsweise die unklare Beziehung von Modellparametern und empirischen Daten. Da formale Modelle in der Regel als Computersimulationen implementiert werden, gab es bisher keine befriedigenden statistischen Verfahren zur Beurteilung der Frage, wie gut ein Modell auf die relevanten empirischen Daten passt. Eine ausführliche Diskussion der methodischen Probleme der Anwendung globaler Gedächtnismodelle findet sich bei Brandt (2001). Brandt (2007) zeigt zudem, dass unter bestimmten Rahmenbedingungen Computersimulationen verzichtbar und formale Gedächtnismodelle statistisch streng testbar sind.

Zusammenfassend können wir festhalten, dass die formale Modellierung von Gedächtnisprozessen und -strukturen eine vielversprechende Alternative zu verbal formulierten Theorien darstellt. Die Hauptvorteile der formalen Modellierung bestehen in der Transparenz und der Präzision, mit der die theoretischen Annahmen formuliert sind. Darüber hinaus haben formale Modelle eine bemerkenswerte integrative Kraft, da viele zum Teil höchst unterschiedliche Gedächtnisphänomene sich innerhalb eines theoretischen Rahmens betrachten lassen. So wurde MINERVA 2 von Hintzman (1986) ursprünglich formuliert, um Experimente aus der Konzept- und Prototypforschung zu modellieren. Diese Phänomene werden gemeinhin dem semantischen Gedächtnis zugeordnet. Ohne Modifikation lässt sich das Modell jedoch auch auf episodische Gedächtnistäuschungen im Deese-Paradigma anwenden. Aus der Perspektive des Modells erweisen sich demnach Konzeptbildung und Gedächtnistäuschungen als zwei Seiten einer Medaille: Die Vorteile, welche die Generierung abstrakter Konzepte mit sich bringen, werden durch die Anfälligkeit des Gedächtnisses für Gedächtnistäuschungen erkauft.

12.3 Arbeitsgedächtnis

Das vermutlich immer noch populärste Modell des menschlichen Arbeitsgedächtnisses ist modular angelegt, wurde ursprünglich von Baddeley und Hitch (1974) vorgeschlagen und liegt seither in nur wenig modifizierter Form (Baddeley 1986) zahllosen Untersuchungen zugrunde. Dieses Modell werden wir zuerst besprechen. Anschließend widmen wir uns mit dem Embedded-Processes-Modell einer vielversprechenden alternativen Konzeption des Arbeitsgedächtnisses.

12.3.1 Das modulare Arbeitsgedächtnismodell

Ursprünglich wurden im modularen Modell drei Komponenten unterschieden: eine zentrale Kontrolleinheit, die zentrale Exekutive genannt wird, und zwei Subsysteme, nämlich ein visuell-räumliches und ein phonologisches. Zuletzt ist das Modell um einen episodischen Puffer erweitert worden (Baddeley 2000). Evidenzen zugunsten einer Trennung von visuell-räumlichem und phonologischem Modul stammen u. a. aus Untersuchungen, in denen verbale Arbeitsgedächtnisleistungen (z. B. eine bestimmte Abfolge von Konsonanten behalten) stärker durch verbale Zusatzaufgaben (z. B. von 1 bis 9 zählen) als durch visuelle Zusatzaufgaben (z. B. eine einfache Abfolge von neun Tasten drücken) gestört werden. Bei visuell-räumlichen Arbeitsgedächt-

nisleistungen ist es umgekehrt (z. B. Meiser und Klauer 1999; Quinn und McConnel 1996).

Den angenommenen Subsystemen scheinen verschiedene neuronale Strukturen zugrunde zu liegen. Smith und Jonides (1997) berichten beispielsweise erhöhte linkshemisphärische Aktivität im Broca-Areal, im präfrontalen Cortex und im posterioren Parietalcortex für eine phonologische Aufgabe, bei der für jeden Buchstaben innerhalb einer Buchstabensequenz geprüft werden musste, ob dieser mit dem drei Positionen zuvor präsentierten Buchstaben trotz Variation der Groß- und Kleinschreibung übereinstimmte. Die Bearbeitung einer vergleichbar angelegten visuell-räumlichen Aufgabe, bei der beurteilt werden musste, ob zwei nacheinander erscheinende Objekte an derselben Stelle lokalisiert waren, ging dagegen mit erhöhter rechtshemisphärischer Aktivität im präfrontalen und prämotorischen Cortex und im posterioren Parietalcortex einher.

Das visuell-räumliche Subsystem des modularen Arbeitsgedächtnismodells firmiert auch als visuell-räumlicher Notizblock. In diesem Subsystem sollen visuelle Wahrnehmungen und Vorstellungen verarbeitet werden (Logie 1995). Für dieses System wird angenommen, dass es aus mehreren Komponenten besteht, namentlich einer Komponente für Objektmerkmale wie Farbe und Form sowie einer weiteren Komponente für räumliche Information. Dazu passt, dass sich in der eben beschriebenen Untersuchung von Smith und Jonides (1997) auch gezeigt hatte, dass zwei parallel konstruierte visuelle Aufgaben zu verschiedenen corticalen Aktivitätsmustern führten, je nachdem, ob die Form oder die räumliche Position von Stimuli kurzfristig memoriert werden musste.

Im phonologischen Modul sollen akustische und artikulatorische Informationen verarbeitet werden. Visuell präsentierte sprachliche Information wird beim Lesen in einen sprachbasierten, artikulatorischen Code übersetzt und dann ebenfalls im phonologischen Modul gespeichert. Durch *subvokales Wiederholen* (eine Art inneres Sprechen) kann artikulatorische Information im phonologischen Modul bereitgehalten werden. Wird dieser Prozess unterdrückt – etwa indem man in rascher Folge Wörter laut aussprechen muss –,zerfallen die Gedächtnisspuren im phonologischen Modul innerhalb von 1–2 s. Diese Zeitspanne bestimmt auch die Kapazitätsgrenze des phonologischen Subsystems: Alles, was nicht in 2 s ausgesprochen werden kann, übersteigt seine Kapazität und muss aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen werden – oder es ist verloren.

Eine Reihe von Phänomenen können mit der Annahme eines phonologischen Moduls erklärt werden. Der *Wortlängeneffekt* beispielsweise bezeichnet den Befund, dass die Anzahl der Wörter, die im Arbeitsgedächtnis bereitgehalten werden können, von der Länge der Wörter abhängt. Entscheidend ist dabei aber weniger die Silbenzahl als vielmehr die Aussprechdauer, die natürlich mit jeder Silbe steigt. Aber auch auf der Ebene einzelner Silben kann man die Rolle der Aussprechdauer nachweisen. Im Durchschnitt hat z. B. eine walisische Silbe eine höhere Aussprechdauer als eine englische. Entsprechend sollten weniger walisische als englische Wörter gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten werden können, und das ist auch so (N. C. Ellis und Hennelly 1980). Auch der *Effekt phonologischer Ähnlichkeit* kann mit einem phonologischen Verarbeitungsmodul erklärt werden: Ähnlich klingende Elemente (etwa die Buchstaben C, B, D, W, T) können, weil sie in einem phonologischen Repräsentationsmedium untereinander interferieren, schlechter kurzfristig in einer bestimmten Reihenfolge behalten werden als verschieden klingende (z. B. L, K, S, Q, X) (Logie et al. 1996).

Das phonologische Modul selbst kann weiter unterteilt werden in einen *passiven phonologischen Speicher* und einen *artikulatorischen Kontrollprozess*. Der passive phonologische Speicher soll sozusagen ein „Zwischenlager" für phonologisch codierte Information und eng mit Prozessen der Sprachwahrnehmung verbunden sein. Der artikulatorische Kontrollprozess hingegen soll eine enge Beziehung zu Prozessen der Sprachproduktion haben und primär dazu dienen, phonologische Information „aufzufrischen".

Das Aussprechen von Zahlen oder Wörtern soll selektiv den artikulatorischen Kontrollprozess beanspruchen, der auch dem Wortlängeneffekt zugrunde liegen soll: Längeres Artikulieren benötigt mehr Zeit, sodass weniger Information wieder aufgefrischt werden kann. Nicht davon beeinflusst werden sollte dagegen das Geschehen beim zeitlich begrenzten Behalten im passiven phonologischen Speicher, in dem Informationen nur abgelegt werden. Konsistent mit diesen Annahmen zeigt sich, dass offenes Aussprechen parallel zu einer Behaltensaufgabe den Wortlängeneffekt eliminiert, aber nicht den Effekt phonologischer Ähnlichkeit, der auf Interferenz im passiven phonologischen Speicher zurückgeführt wird (Baddeley et al. 1975; Longoni et al. 1993).

Ein weiterer Effekt, der oft als Evidenz für einen separaten phonologischen Speicher betrachtet wird, ist der *Effekt unbeachteter Sprache*: Aufgabenirrelevante Hintergrundgeräusche vermindern die Behaltensleistung für gelesene Wörter. Es wird angenommen, dass gelesene Wörter über den artikulatorischen Kontrollprozess phonologisch recodiert werden und dann in den phonologischen Speicher gelangen. Dorthin gelangen akustische Informationen von außen ebenfalls, und zwar umso eher, je sprachähnlicher diese Informationen sind (Baddeley 1986). Allerdings muss akustische Information nicht unbedingt Sprachcharakter besitzen, um zu stören. Stark rhythmische und melodisch abwechslungsreiche Instrumentalmusik – also Musik mit einer raschen Abfolge von abrupten Lautstärke- und Frequenzveränderungen – kann genauso stark stören wie unbeachtete Sprache (Klatte und Hellbrück 1993). Ein ununterbrochener Ton, der kontinuierlich in seiner Frequenz verändert wird, stört kurzfristiges Behalten nicht, aber wenn derselbe kontinuierliche Klangverlauf durch Pausen unterbrochen ist, wird die Störung deutlich (Jones et al. 1993).

Diese Befunde stehen nicht im Einklang mit dem modularen Arbeitsgedächtnismodell. Sie weisen darauf hin, dass der störende Einfluss unbeachteter akustischer Information nicht auf deren Sprachähnlichkeit, sondern auf die Menge der „Zustandsveränderungen" im unbeachteten Kanal zurückzuführen ist (Jones 1993). Bei Sprachinformation sind diese Zustandsveränderungen durch die Segmentierung des Sprachsignals im Zuge der Sprachwahrnehmung natürlicherweise zahlreich. Bei anderen akustischen Signalen kommt es in erster Linie auf die Menge und Abruptheit der Veränderungen in Frequenz und Ton-

höhe an. Eine Reihe weiterer Befunde sind ebenfalls nicht mit dem modularen Modell vereinbar. So stören Distraktorwörter stärker, wenn sie eine starke semantische Assoziation zu den zu erinnernden Wörtern aufweisen (Neely und LeCompte 1999), Distraktorwörter mit negativer Valenz stören das kurzfristige Behalten stärker als neutrale Distraktorwörter (Buchner et al. 2004), in der Sprache seltene Distraktorwörter stören stärker als häufige Wörter (Buchner und Erdfelder 2005), der eigene Name ist ein potenterer Distraktor als ein phonologisch vergleichbarer anderer Name (Röer et al. 2013b), und der Effekt irrelevanter Sprache habituiert, d. h., er wird mit zunehmender Vertrautheit mit den Distraktoren geringer (Banbury und Berry 1997; Bell et al. 2012; Röer et al. 2014). Das modulare Modell kann alle diese Phänomene nicht erklären, weil im phonologischen Modul nichtakustische Distraktormerkmale wie die Wortbedeutung oder Aufmerksamkeitsprozesse, die habituieren könnten, nicht vorkommen und daher keine Rolle für Leistungen innerhalb dieses Moduls spielen dürfen.

Es drängt sich auch die Frage auf, warum das modulare Modell auf ein akustisch-phonologisches und ein visuell-räumliches Subsystem beschränkt ist. Müsste man nicht für andere Kategorien von Informationen ebenfalls eigene Arbeitsgedächtnismodule postulieren? Beispielsweise lassen sich temporäre Repräsentationen räumlicher und kinästhetischer Informationen experimentell voneinander trennen. Die Aufgabe, eigene Körperteile zu berühren, interferiert mit dem Gedächtnis für Ruderhaltungen, nicht jedoch mit rein visuell-räumlichen Erinnerungen (Woodin und Heil 1996). Entsprechend müsste man nun ein weiteres kinästhetisches Modul annehmen. Ob zusätzliche Module etwa für Geruchs- oder Geschmacksinformationen angenommen werden müssen, ist unklar.

Baddeley (2000) hat das modulare Modell um eine andere Komponente erweitert, nämlich um einen sogenannten *episodischen Puffer*, in dem Information in einem multimodalen Code repräsentiert sein soll. Kontrolliert wird der episodische Puffer von der zentralen Exekutive, auf die wir im nächsten Abschnitt kurz eingehen werden. Die zentrale Exekutive soll Informationen aus einer Vielzahl von Quellen zu einer einheitlichen episodischen Repräsentation zusammenfügen. Solche kohärenten Episoden sollen den Gegenstand des Bewusstseins bilden. Der episodische Puffer dient darüber hinaus der Manipulation und Verknüpfung von Information.

Notwendig wurde die Annahme eines episodischen Puffers wegen Phänomenen wie dem *Satzüberlegenheitseffekt* (Baddeley 2000): Normalerweise können wir nicht mehr als fünf oder sechs zufällig ausgewählte Wörter kurzzeitig behalten; formen diese Wörter aber ganze Sätze, dann können sehr viel mehr Wörter behalten werden. Es müssen also auch syntaktische und semantische Information in Leistungen des Arbeitsgedächtnisses einfließen, was eine der Funktionen des episodischen Puffers sein soll. Diese Verknüpfungen von Informationen zu größeren Einheiten – teilweise unter Beteiligung des Langzeitgedächtnisses – sollen wiederum Ressourcen der zentralen Exekutive benötigen. In einer Reihe von Experimenten untersuchten Baddeley et al. (2009) den gerade erwähnten Satzüberlegenheitseffekt. Zweitaufgaben, die eine starke Belastung der zentralen Exekutive darstellen, sollten das Verknüpfen von Wörtern zu größeren sinnvolleren Einheiten im episodischen Puffer behindern. Unter starker Belastung sollte demnach die Leistung für Sätze stärker abfallen als für ungeordnete Listen einzelner Wörter. Die Ergebnisse waren eindeutig. Unter allen getesteten Zweitaufgaben wurde die Leistung schlechter, aber in gleichem Ausmaß für Sätze und ungeordnete Listen. Die Verknüpfung von Wörtern zu sinnvolleren Einheiten scheint demnach – entgegen der ursprünglichen Idee – keine nennenswerten Ressourcen zu benötigen und weitgehend automatisch zu erfolgen.

Im modularen Arbeitsgedächtnismodell sollen die Subsysteme von einer *zentralen Exekutive* „kontrolliert" werden. Hier werden Verarbeitungsprioritäten vergeben, Routineprozesse bei Bedarf unterbrochen, nichtroutinisierte Prozesse überwacht, Handlungsergebnisse mit Handlungszielen verglichen und vieles mehr. Die zentrale Exekutive ist also eine Art Aufmerksamkeitssystem und zugleich eine Art Restkategorie für alle möglichen Prozesse, die man dem Arbeitsgedächtnis zurechnen kann, die aber weder dem phonologischen noch dem visuell-räumlichen oder dem inzwischen eingeführten episodischen Subsystem zugeordnet werden können.

Auf funktionaler Ebene kann die zentrale Exekutive von den bisher besprochenen Subsystemen dennoch gut abgegrenzt werden. Betrachten wir als Beispiel das Addieren von Zahlen – eine Aufgabe, bei der die zentrale Exekutive gefordert ist. Verbale und visuell-räumliche Zusatzaufgaben, für die bekannt ist, dass sie deutlich mit Leistungen des phonologischen bzw. des visuell-räumlichen Subsystems interferieren, stören bei Additionsaufgaben weniger als das Generieren von Zufallszahlen (Logie et al. 1994). Letzteres ist eine beanspruchende Nichtroutineaufgabe, die vorwiegend die zentrale Exekutive betreffen sollte. Die neuronale Repräsentation der exekutiven Kontrolle wird häufig mit dem präfrontalen Cortex in Verbindung gebracht (Shimamura 2000).

Damit wollen wir die Diskussion von Prozessen, die der zentralen Exekutive zugeordnet werden, abschließen. Eine ausführliche Darstellung exekutiver Funktionen erfolgt in ► Kap. 18.

12.3.2 Das Embedded-Processes-Modell

Die modulare Arbeitsgedächtniskonzeption orientiert sich an der *Struktur* des Arbeitsgedächtnisses. Zentral für das Embedded-Processes-Modell (Cowan 1995, 1999) ist dagegen die *Funktion* des Arbeitsgedächtnisses. Der Aspekt der Modularität rückt in den Hintergrund. Der Begriff des Arbeitsgedächtnisses bezieht sich hier auf die Prozesse, die dazu beitragen, dass Information in einem außerordentlich gut zugänglichen Zustand im Gedächtnis gehalten wird. In diesem Zustand kann die Information in kognitive Leistungen wie Problemlösen, Entscheidungsfindung und Sprachproduktion einfließen.

Ausgangspunkt des Embedded-Processes-Modells ist das Langzeitgedächtnis. Innerhalb des Langzeitgedächtnisses existieren Elemente, die sich in einem aktivierten Zustand befinden und daher besonders gut „verfügbar" sind. Elemente des Gedächtnisses werden aktiviert, wenn sie in einer kognitiven Operation ver-

wendet werden – beispielsweise die mentalen Repräsentationen von Gegenständen, die man gerade aufmerksam betrachtet, oder von Wörtern, die man gerade verwendet hat. Eine Untermenge der aktivierten Elemente befindet sich zu einem gegebenen Zeitpunkt im Fokus der Aufmerksamkeit. Das Arbeitsgedächtnis umfasst im Embedded-Processes-Modell alle aktivierten Gedächtniselemente innerhalb und außerhalb des Fokus der Aufmerksamkeit. Hier können Verknüpfungen zwischen diesen Elementen hergestellt werden, die später im Langzeitgedächtnis gespeichert werden können. Damit schließt das Modell explizit die Möglichkeit eines Lernens ohne Aufmerksamkeit ein, wie wir das bei der Diskussion des nondeklarativen Gedächtnisses (▶ Abschn. 12.2.1) im Zusammenhang mit Sequenzlernaufgaben kennengelernt haben.

Strukturelle Aspekte, die die Konzeption des modularen Modells dominieren, werden nicht diskutiert, aber auch nicht infrage gestellt. Es wird als gegeben vorausgesetzt, dass verschiedenartige Informationen – etwa verbale und bildhafte – in verschiedenen Teilen des Gedächtnisses und verschiedenen neuronalen Strukturen repräsentiert sind, sodass sie weniger miteinander interferieren als gleichartige Informationen, die sich Verarbeitungs- und Repräsentationsstrukturen teilen. Die phonologische Schleife und der visuell-räumliche Speicher des modularen Modells werden hier also lediglich als verschiedene Formate innerhalb des aktivierten Langzeitgedächtnisses betrachtet. Durch diese Annahmen wird das Embedded-Processes-Modell vereinbar mit den Befunden, die weiter oben im Zusammenhang mit dem modularen Modell angeführt wurden (vgl. z. B. die dort diskutierten Befunde von Smith und Jonides 1997).

Zwei generelle Funktionscharakteristika werden für alle Informationen angenommen:

1. Der Fokus der Aufmerksamkeit ist mehr durch die Kapazität als durch Zeit begrenzt. Die Grenze scheint unabhängig von der betrachteten Modalität bei ungefähr vier Elementen zu liegen; mehr Elemente können nicht gleichzeitig im Fokus der Aufmerksamkeit sein (Cowan 2001).
2. Das „aktivierte" Gedächtnis ist eher zeitlich als kapazitätsbegrenzt. Ohne erneute Reaktivierung verliert sich eine einmal aufgebaute Aktivierung innerhalb von 10–20 s.

Wenden wir uns zunächst der Grenze von höchstens vier Elementen im Fokus der Aufmerksamkeit zu. Was genau sind diese vier Elemente – sind es vier Merkmale eines Objekts, oder sind es vier Objekte? Luck und Vogel (1997) untersuchten diese Frage in einer Reihe von Experimenten. Dabei setzten sie das *Change-Detection-Paradigma* ein. Innerhalb dieses Paradigmas wird eine unterschiedliche Anzahl von Objekten kurz (wenige Hundert Millisekunden) dargeboten. Im einfachsten Fall unterscheiden sich alle Objekte nur in einem Merkmal. Es werden z. B. verschieden farbige Quadrate präsentiert. Nach einer Pause von etwa 1 s werden Testobjekte präsentiert, die in 50 % der Fälle identisch mit den zuerst präsentierten Objekten sind. In den anderen 50 % der Fälle wird aber nun ein Merkmal eines Objekts geändert (z. B. die Farbe eines Quadrats). Die Aufgabe besteht darin anzugeben, ob eine Veränderung zwischen den ursprünglichen Objekten und den Testobjekten bemerkt wurde. Betrachtet man die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Antwort als Funktion der Anzahl der präsentierten Objekte, dann zeigte sich folgendes Muster: Bis zu einer Anzahl von vier Objekten sind die Antworten nahezu fehlerfrei. Bei einer größeren Anzahl von Objekten gibt es einen relativ deutlichen Einbruch in der Leistung. Wichtig ist die Tatsache, dass die Kapazitätsschätzung konstant bleibt, wenn die Objekte sich in mehreren Merkmalen unterscheiden (z. B. Farbe, Größe und Orientierung). Dies deutet darauf hin, dass die Einheit für die Kapazität des Aufmerksamkeitsfokus tatsächlich Objekte und nicht etwa Objektmerkmale sind. Diese Kapazität ist in vielen Studien auf etwa vier geschätzt worden, aber es gibt auch Ausnahmen. Alvarez und Cavanagh (2004) beispielsweise führten ähnliche Experimente wie Luck und Vogel (1997) durch, variierten aber zusätzlich die Komplexität der Objekte. Für Objekte geringer Komplexität (farbige Quadrate oder Buchstaben) replizieren sie die von Luck und Vogel berichteten Kapazitätsschätzungen. Wählten sie jedoch komplexere Objekte wie chinesische Schriftzeichen oder dreidimensionale Würfel unterschiedlicher Schattierung, dann sank die Kapazitätsschätzung deutlich unter die magische Zahl vier. Eng et al. (2005) vermuteten jedoch, dass die Kapazitätsreduktion für komplexe Objekte bei Alvarez und Cavanagh (2004) kein Problem der Speicherkapazität, sondern ein Problem der Encodierung des Materials war. Mit anderen Worten: Sehr komplexe Objekte können in extrem kurzen Darbietungen eventuell gar nicht hinreichend encodiert werden. Um diese Hypothese zu testen, erlaubten sie in einem ihrer Experimente, die erste Konfiguration beliebig lange zu betrachten. In der Tat stiegen die Kapazitätsschätzungen bei längerer Darbietung deutlich an, wenngleich sie für die komplexen Objekte immer noch unter der magischen Zahl 4 blieben.

Wenden wir uns nun der Aktivierung von Information zu. Wie im modularen Modell wird auch im Embedded-Processes-Modell angenommen, dass die Aktivierung von Information über eine hypothetische zentrale Exekutive gesteuert wird. Zusätzlich ist vorgesehen, dass auch über den Mechanismus der Orientierungsreaktion Aufmerksamkeit exogen gesteuert wird und damit Repräsentationen von Elementen im Langzeitgedächtnis aktiviert werden können. Solange Information aber nur aktiviert wird und nicht in den Fokus der Aufmerksamkeit gerät, bleibt die Verarbeitung fragmentarisch. Orientierungsreaktionen habituieren bei wiederholter Präsentation desselben Stimulus. Tritt der Stimulus länger nicht auf, wird eine Dishabituation wahrscheinlicher, sodass erneute Orientierungsreaktionen zu erwarten sind. Zu dieser Konzeption passen Befunde von Banbury und Berry (1997), die zeigen konnten, dass der oben im Kontext des modularen Modells beschriebene Effekt irrelevanter Sprache auf Arbeitsgedächtnisleistungen die erwarteten Muster von Habituation und Dishabituation zeigt: Der störende Effekt von Bürolärm reduziert sich nach einer gewissen Zeit und tritt wieder auf, wenn eine Weile Stille herrschte. Parallele Befunde findet man auch mit anderen Formen von Distraktoren (Bell et al. 2012; Röer et al. 2014).

Insgesamt scheint das Embedded-Processes-Modell mit einer großen Zahl von empirischen Befunden kompatibel. Beispielsweise ist es vereinbar mit den in ▶ Abschn. 12.3.1 erwähnten Befunden zum Effekt irrelevanter Sprache, mit denen das modulare Arbeitsgedächtnismodell nicht vereinbar ist. Es handelt sich um

einen vielversprechenden Ansatz, dem künftig mehr Aufmerksamkeit zuteil werden wird.

12.4 Sensorisches Gedächtnis

Der letzte Abschnitt dieses Kapitels widmet sich den sensorischen Registern, einer Repräsentationsform, an die man beim Stichwort „Gedächtnis" kaum zuerst denkt. Es ist wahrscheinlich sinnvoller, sensorische Register als Schnittstelle zwischen Wahrnehmung und Gedächtnis zu betrachten.

Der Begriff „sensorische Register" hat sich eingebürgert, weil in diesen Strukturen Information in einem sehr „reizspezifischen" Format vorliegen soll. Dieser Idee folgend hat Neisser (1967) für die visuelle Modalität den Begriff des *ikonischen Gedächtnisses*, für die akustische den des *Echogedächtnisses* geprägt. Sensorische Register werden für alle Sinnesmodalitäten angenommen. Unsere Darstellung beschränkt sich auf die visuelle und die akustische Modalität.

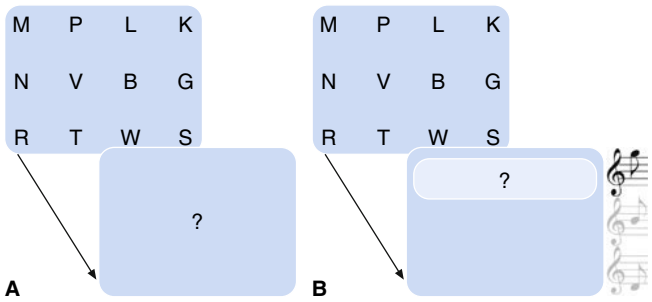
Man kann durchaus behaupten, die Forschung zum visuellen sensorischen Gedächtnis habe mit der Dissertation von Sperling (1960) begonnen (vgl. auch Averbach und Coriell 1961). Er hat in einer Serie von Experimenten untersucht, wie viele Elemente aus einer kurz präsentierten visuellen Vorlage anschließend berichtet werden können. ◘ Abb. 12.8A illustriert diese Situation.

Bei einer Präsentationszeit von 50 ms konnten aus der dargebotenen 3×4-Matrix durchschnittlich 4,32 Elemente korrekt berichtet werden (an der Stelle sei an die magische Zahl 4 erinnert, ▶ Abschn. 12.3.2). Der subjektive Eindruck bei solch einer Aufgabe ist aber, dass man mehr sieht, als man dann berichten kann. Entsprechend hat Sperling (1960) eine Variante der Aufgabe entwickelt, bei der unmittelbar nach der 3×4-Matrix ein Ton dargeboten wurde. Die Höhe des Tones zeigte an, welche Reihe aus der Matrix zu berichten war (bei einem hohen Ton die obere, bei einem mittelhohen die mittlere etc.). Es war für die teilnehmenden Personen nicht vorhersehbar, auf welche Reihe sich der Ton beziehen würde. Die Aufgabe ist in Abb. ◘ Abb. 12.8B illustriert.

Wenn der akustische Hinweis in dem Moment präsentiert wurde, in dem die 3×4-Matrix verschwand, wurden in dieser Teilberichtsbedingung im Durchschnitt 3,04 Elemente berichtet. Daher müssen zum Zeitpunkt des Hinweises pro Reihe etwa drei Elemente, bei drei Reihen also ungefähr neun Elemente im ikonischen Gedächtnis verfügbar gewesen sein, also viel mehr, als normalerweise berichtet werden können. Dies bezeichnet man auch als den Teilberichtsvorteil.

Je später der Hinweis auf die zu berichtende Reihe erklang, desto weniger Zeichen der Matrix konnten berichtet werden. Zwischen 250 und 500 ms näherte sich die Leistung in der Teilberichtsbedingung derjenigen in der Kontrollbedingung an, in der kein Hinweis auf eine bestimmte Reihe gegeben wurde. Damit läge die Zeitspanne, innerhalb derer Information im ikonischen Gedächtnis repräsentiert bleibt, bei höchstens 500 ms.

Spätere Befunde haben unser Verständnis des ikonischen Gedächtnisses weiter verfeinert. Wahrscheinlich müssen zwei Phasen unterschieden werden, nämlich erstens eine kurze, 150–250 ms dauernde „echt" sensorische Phase und eine zweite Phase,



◘ **Abb. 12.8** Schematische Darstellung des Versuchsablaufs bei Sperling (1960). **A** Standardbedingung, in der alle Zeichen der 3×4-Matrix berichtet werden sollten. **B** Experimentalbedingung, in der nur die Zeichen einer Reihe berichtet werden sollten. Die Reihe wurde zufällig gewählt und durch die Höhe eines Tones angezeigt, der kurz nach dem Verschwinden der 3×4-Matrix präsentiert wurde (im Beispiel der hohe Ton für die *obere* Reihe)

in der bereits weitere (zum Teil abstrakte) Merkmale der visuellen Objekte repräsentiert sind. Letzteres erklärt, warum sich der Teilberichtsvorteil auch dann einstellt, wenn die zu berichtenden Zeichen nicht nach dem Ort (die Reihe in der Matrix) auszuwählen sind, sondern danach, ob sie zur Kategorie der Buchstaben oder der Zahlen gehören (Merikle 1980). Zudem hängt die über den Teilberichtsvorteil geschätzte Dauer der Informationsspeicherung im ikonischen Gedächtnis von der Dunkeladaptation der Augen ab, was darauf hindeutet, dass zumindest ein Teil des „Gedächtnisses" auf der Retina zu lokalisieren sein dürfte (Sperling 1960).

Beim Echogedächtnis, das viele als das akustische Pendant zum ikonischen Gedächtnis betrachten, ist die Bewertung der funktionalen Bedeutung weniger strittig. Das liegt wohl auch daran, dass wir über Alltagserfahrungen verfügen, die sich auf eine solche Gedächtnisform zurückführen lassen. So kann es vorkommen, dass man während einer angestrengten Tätigkeit angesprochen wird und sogleich zurückfragt, weil man glaubt, die Äußerung nicht verstanden zu haben. Doch dann bemerkt man, dass man das Gesagte doch noch erinnern kann. Das entsprechende Gedächtnis scheint Information für mindestens 2 s bereitzuhalten. Dies legen Untersuchungen wie etwa die von Treisman (1964) nahe. Dort musste die auf einem Ohr präsentierte Nachricht laut nachgesprochen werden, während auf dem anderen Ohr ebenfalls Wörter zu hören waren. Die Personen bemerkten nur dann, dass die beiden Nachrichten identisch waren, wenn die nicht beachtete Nachricht der nachzusprechenden um 1,5 s oder weniger voraus war.

Cowan (1984) kommt nach einer Analyse der Befunde aus verschiedenen experimentellen Paradigmen zu der Schlussfolgerung, dass zwei Komponenten eines auditiven sensorischen Speichers unterschieden werden sollten. Ein kurzer auditiver Speicher hält relativ wenig analysierte spektrale Information für 150–350 ms bereit. Nachfolgende Stimuli „überschreiben" die spektrale Information vorangegangener Stimuli. Davon zu unterscheiden ist ein langer auditiver Speicher, in dem Information mindestens 2 s – in bestimmten Fällen bis zu 20 s – bereitgehalten wird. Hier werden Sequenzen etwa von aufeinanderfolgenden Sprachsignalen gespeichert, die nur teilweise miteinander interferieren, und zwar in dem Ausmaß, in dem sich die Stimuli ähnlich sind (▶ Kap. 3).

12.5 Anwendungsbeispiele

Für Studierende besteht eine zentrale Frage, wie der umfangreiche Stoff für Prüfungen effizient gelernt werden soll. Dunlosky et al. (2013) präsentieren einen Überblick über effektive Studientechniken aus der Perspektive der wissenschaftlichen Psychologie. Dabei wird deutlich, dass es *die eine* effiziente Methode der Prüfungsvorbereitung nicht gibt. Vielmehr hängt die Wahl der konkreten Vorbereitung immer von dem Material (z. B. mathematische Konzepte oder Inhalt einer Vorlesung), der Form der zu erwartenden Prüfung (z. B. Multiple-Choice-Test oder freie Reproduktion) und Eigenschaften des Lernenden (Motivation und Vorwissen) ab. Erstaunlicherweise erweisen sich jedoch beliebte Studiertechniken wie das Schreiben von Zusammenfassungen, das Hervorheben wichtiger Textpassagen oder einfaches wiederholtes Lernen als wenig wirksam. Wie können nun aber auf der Basis der Gedächtnispsychologie effiziente Methoden aussehen? Wir wollen diese Frage in drei Schritten beantworten.

Lernstrategien

Zunächst muss die Information gelernt werden. Um eine effiziente Lernstrategie zu illustrieren, möchten wir das Gedächtnis metaphorisch als Spinnennetz betrachten. Neue Informationen sollten wenn möglich in diesem Netz hängen bleiben, um für einen späteren Abruf bereitzustehen. Jede geplagte Studentin und jeder geplagte Student kennt aber vermutlich die Situation, dass nach der Lektüre eines Textes das Gefühl entsteht, dass nichts im Gedächtnis „hängengeblieben" ist. Um dieses Gefühl zu verhindern, müssen wir Texte nicht nur passiv aufnehmen, sondern den Lernprozess aktiv gestalten. Dazu können wir zunächst die Informationseinheiten vergrößern, in dem wir aktiv die Information anreichern. Dazu gehört eine tiefe semantische Verarbeitung (▶ Abschn. 12.2.2), eine Hinterfragung des Verständnisses der Information oder – wenn möglich – eine bildhafte Vorstellung. Noch wichtiger scheint aber zu sein, dass wir neue Informationseinheiten mit bereits bestehendem Wissen verknüpfen (also bildlich gesprochen unser Spinnennetz immer enger weben). Dieses Verknüpfen mit bestehenden Wissensstrukturen ist auch die Grundlage einer Mnemotechniken, bei der Informationen mental an Orten einer gut bekannten Route abgelegt werden. Das Einbinden neuer Information in bestehende Wissensstrukturen sorgt nicht nur dafür, dass Informationen überhaupt gespeichert werden, sondern auch dafür, dass die Information später wieder abgerufen werden kann. Die bereits existierende Information dient dann als Abrufhinweis für die neu gelernte Information. Auch hier sagt uns die Gedächtnispsychologie, wie ein solches System effektiv genutzt werden kann. Zum einen sollten wir, wenn möglich, mehrere Verbindungen zu unserer neuen Information knüpfen. Ist die Information dann über einen „Pfad" nicht erreichbar, können wir auf alternative Abrufhinweise zurückgreifen. Zum anderen sollten einzelne Abrufhinweise nicht mit zu vielen neuen Informationen verknüpft werden. Eine solche „Überladung" von Abrufhinweisen mindert die Effizienz des Abrufs erheblich (▶ Abschn. 12.2.2). Der altbewährte Befund der Gedächtnispsychologie, dass über längere Zeiträume verteiltes Lernen effektiver ist als zeitlich massives Lernen, ist zum großen Teil darauf zurückzuführen, dass in verteilten Lernepisoden neue Verknüpfungen erstellt werden und somit ein ganzes System effizienterer Abrufhinweise gebildet wird. Lernen Sie also aktiv und über die Zeit verteilt.

Selbsttests

Nachdem der Lernstoff erarbeitet wurde, stellt sich die Frage, ob der Stoff erneut gelernt oder ob ein Test über den bisherigen Lernerfolg durchgeführt werden sollte. Erstaunlicherweise zeigt sich, dass ein Testen des Lernstoffes oftmals die besseren Ergebnisse erbringt (Roediger und Karpicke 2006). Dies gilt insbesondere dann, wenn der finale Test nicht unmittelbar bevorsteht und das gelernte Material frei reproduziert werden soll. Allerdings sollte man nicht vergessen, dass das Testen durchaus auch negative Konsequenzen haben kann. So können Informationen, die in einem Test reproduziert werden, den späterem Abruf von Informationen, die aktuell nicht abgerufen werden konnten, weiter verschlechtern. Einen Überblick über positive und negative Effekte des Testens geben Malmberg et al. (2014). Dieses Phänomen erinnert an das Paradigma des abrufinduzierten Vergessens (M. C. Anderson et al. 1994). Bei diesem Paradigma werden in einer Lernphase semantisch kategorisierbare Items gelernt. In der anschließenden Abrufübungsphase werden Teile der Items mit einem spezifischen Abrufhinweis (z. B. der semantischen Kategorie plus Anfangsbuchstabe des Items) abgefragt. Während die so getesteten Items in einem späteren geförderten Reproduktionstest profitieren, ist die Erinnerung an nicht getestete Items schlechter. Es scheint so zu sein, dass der Hinweisreiz der Kategorie für die nicht geübten Items an Effektivität verliert. Auf der Basis dieser Befunde scheint es umso wichtiger, beim Lernen möglichst individuelle Abrufhinweise zu generieren.

Abruf

In der abschließenden Prüfungsphase gilt es nun, die gelernte Information möglichst effektiv abzurufen. Wir wissen bereits, dass eine möglichst gute Übereinstimmung von Encodierungs- und Abrufkontext die besten Bedingungen für einen erfolgreichen Abruf darstellen (▶ Abschn. 12.2.2). Zumindest bezüglich des räumlichen Kontexts ist es aber in der Regel nicht möglich, in dem späteren Prüfungsraum auch zu lernen. Das Wiederherstellen des Kontexts (Smith 1979) kann hier aber eine einfache hilfreiche Prozedur sein. Natürlich sollte sich das Wiederherstellen nicht nur auf den räumlichen Kontext beziehen: Alle in der Lernphase gebildeten Assoziationen können helfen, die gesuchte Information im Gedächtnis zu finden. Ist die Information zunächst nicht abrufbar, kann es helfen, aktiv zu versuchen, den Abrufhinweis zu wechseln. Erneut gilt: Je variabler die Information in der Lernphase encodiert wurde, desto mehr Pfade zum Abruf stehen in der Testphase zur Verfügung.

12.6 Ausblick

Die Geschichte der Gedächtnispsychologie zeigt, dass sich aktuelle Forschung häufig in gewissen Zeiträumen auf populäre

empirische Paradigmen konzentriert (z. B. das erwähnte Deese-Paradigma, das Paarassoziationslernen). Eine seriöse Prognose dazu, welche Paradigmen in Zukunft die empirische Forschung und damit auch die Theoriebildung bestimmen, wollen und können wir nicht abgeben. Wir sind aber der Überzeugung, dass sich im Laufe der Evolution nur eine relativ begrenzte Anzahl an Gedächtnisprozessen und Strukturen ausgebildet haben, sodass in ganz unterschiedlichen Paradigmen vermutlich identische Mechanismen beteiligt sind. Zukünftige Forschung sollte dies berücksichtigen und dadurch integrativ sein: Theoretische postulierte Mechanismen müssen sich dann in ganz unterschiedlichen experimentellen Situationen bewähren und konkurrierende Theorien auch danach beurteilt werden, wie gut sie sich in einem möglichst weiten empirischen Feld bewähren.

12.7 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Menschliches Gedächtnis wird innerhalb des weit verbreiteten modalen Modells unterteilt in Langzeitgedächtnis, Arbeitsgedächtnis und sensorisches Gedächtnis.
- Dominierende theoretische Ausgangspunkte bei Theorien zum Langzeitgedächtnis sind der Systemansatz und der Prozessansatz. Aus Sicht eines Systemansatzes werden innerhalb des Langzeitgedächtnisses das deklarative und das nondeklarative Gedächtnis unterschieden. Diese beiden Systeme werden in weitere spezifischere Komponenten von Gedächtnis differenziert. Wichtig für die Trennung funktional verschiedener Gedächtnissysteme ist das Dissoziationsparadigma, bei dem aber Probleme wie das Reliabilitätsproblem und das Kontaminationsproblem beachtet werden müssen.
- Unter einer Prozessperspektive spielen vor allem die Informationsverarbeitungsprozesse während der Encodierung und des Abrufs von Information sowie der Grad der Überlappung dieser beiden Prozesse eine wesentliche Rolle.
- Mithilfe multinomialer Modelle können auf einfache Weise Hypothesen über das Zusammenspiel verschiedener kognitiver Prozesse beim Zustandekommen beobachtbaren Antwortverhaltens formal präzise formuliert und statistisch geprüft werden.
- Mathematische Modelle des menschlichen Gedächtnisses spezifizieren die informationsspeichernden Strukturen und die darauf operierenden Prozesse mit einem Minimum an präzise und transparent formulierten Annahmen. Auf dieser Basis sollen möglichst viele Gedächtnisphänomene erklärt werden. Sehr leistungsfähige mathematische Modelle des Gedächtnisses sind die globalen Gedächtnismodelle.
- Das gegenwärtig populärste Modell des menschlichen Arbeitsgedächtnisses ist modular angelegt. Ursprünglich wurden darin drei Komponenten unterschieden: eine zentrale Kontrolleinheit, die zentrale Exekutive genannt wird, sowie ein phonologisches und ein visuell-räumliches Subsystem. Zuletzt ist das Modell um einen episodischen Puffer erweitert worden.
- Im sensorischen Gedächtnis (auch als sensorische Register bezeichnet) liegen Informationen in einem sehr „reizspezifischen" Format vor. Es bildet die Schnittstelle zwischen Wahrnehmung und Gedächtnis.

Schlüsselbegriffe

Arbeitsgedächtnis (*working memory*) Struktur zur kurzfristigen Speicherung und Manipulation von Information. Am besten untersucht sind Arbeitsgedächtnisstrukturen für phonologische und visuelle Reizformate. Einer zentralen Exekutive werden Kontrollprozesse im Sinne eines Aufmerksamkeitssystems zugeordnet.

Deklaratives versus nondeklaratives Gedächtnis (*declarative versus nondeclarative memory*) Populäre Dichotomie zur Unterscheidung von Gedächtnis für verbal berichtbare Episoden und Wissensbestände (deklarativ) im Gegensatz zu einer Vielzahl von Situationen, in denen sich Erfahrungsnachwirkungen zeigen, auch wenn diese nicht berichtet werden können (nondeklarativ).

Dissoziationsparadigma (*dissociation paradigm*) Gegeben seien zwei Gedächtnisaufgaben G_X und G_Y sowie zwei experimentelle Manipulationen M_A und M_B. Wenn sich die Manipulation M_A auf die Leistung bei Aufgabe G_X, aber nicht bei Aufgabe G_Y auswirkt, spricht man von einer *einfachen Dissoziation*. Eine *doppelte Dissoziation* liegt vor, wenn sich zusätzlich M_B auf die Leistung bei Aufgabe G_Y, aber nicht bei Aufgabe G_x auswirkt.

Episodisches versus semantisches Gedächtnis (*episodic versus semantic memory*) Deskriptive Unterscheidung innerhalb des deklarativen Gedächtnisses zwischen Erinnerungen an persönlich erfahrene, räumlich und zeitlich festgelegte Ereignisse einerseits und Sachwissen ohne zeitlich-räumliche Einbettung andererseits.

Explizite versus implizite Messung von Gedächtnisleistungen (*explicit versus implicit tests of memory*) Bei einer expliziten Prüfung ist die Erinnerung an eine bestimmte Lernsituation gefordert (Beispiel: Wiedererkennen). Bei impliziten Prüfungen drückt sich die Nachwirkung einer bestimmten Lernerfahrung in einer mit weniger Fehlern behafteten oder schnelleren Verarbeitung aus (Beispiel: Sequenzlernaufgabe).

Formale Gedächtnismodelle (*formal memory theories*) Mathematische Modelle des menschlichen Gedächtnisses, die versuchen, mit einem Minimum an präzise und transparent formulierten Annahmen möglichst viele Gedächtnisphänomene zu erklären.

Gedächtnistäuschungen (*memory illusions*) Wenn ein erinnertes Ereignis nicht mit dem Originalereignis übereinstimmt, kann man von einer Gedächtnistäuschung sprechen. Die Untersuchung von Gedächtnistäuschungen erlaubt Rückschlüsse auf die Funktionsweise des Gedächtnisses.

Globale Gedächtnismodelle (*global memory models*) Sehr leistungsfähige mathematisch formulierte Gedächtnismodelle mit der zentralen Annahme, dass die Erinnerung an ein Ereignis

immer durch alle im Gedächtnis repräsentierten Inhalte mitbestimmt ist.

Kontexteffekte (*context effects*) Unter Kontext verstehen wir Aspekte der physikalischen (visuellen, akustischen, olfaktorischen etc.) Umgebung, in der die Information gelernt bzw. abgerufen wird, ebenso wie innere Zustände und Stimmungslagen sowie bloß vorgestellte Kontexte und Assoziationen. Auch die spezifischen Aufgaben während der Lernphase und während der Testphase können als Kontext betrachtet werden.

Langzeitgedächtnis (*long-term memory*) Struktur zur dauerhaften Speicherung von Information. Umstritten, aber letztlich nicht entscheidbar ist die Frage, ob Informationen im Langzeitgedächtnis vergessen werden, weil sie nicht mehr zugänglich sind oder weil neue Information alte verändert oder gar überschreibt.

Modales Gedächtnismodell (*modal model*) Mehrspeicherkonzeption des menschlichen Gedächtnisses mit drei Hauptkomponenten: dem sensorischen Gedächtnis, dem Arbeitsgedächtnis und dem Langzeitgedächtnis.

Multinomiale Modelle (*multinomial models*) Stochastische Modelle, mit denen auf der Basis beobachteter Häufigkeiten von Ereignissen die Wahrscheinlichkeit bestimmter latenter Zustände geschätzt werden können. Multinomiale Modelle ermöglichen die Überprüfung psychologischer Hypothesen auf der Ebene theoretischer Konstrukte.

Proaktive Interferenz (*proactive interference*) Mit proaktiver Interferenz wird der Befund beschrieben, dass eine Zielinformation aufgrund zeitlich vorangegangener Lernerfahrungen (proaktive Interferenz) später schlechter abrufbar ist (s. auch retroaktive Interferenz).

Prozessansatz (*processing approach*) Analyse des Gedächtnisses als eine Menge von verschiedenen Typen von Informationsverarbeitungsprozessen. Das neuronale Korrelat dieser Prozesse spielt bei diesem Ansatz eine untergeordnete Rolle. Innerhalb dieses Ansatzes sind Konzepte wie die Transferangemessenheit der Informationsverarbeitung, die Verarbeitungstiefe sowie Interferenz- und Kontexteffekte von besonderer Bedeutung.

Retroaktive Interferenz (*retroactive interference*) Mit retroaktiver Interferenz wird der Befund beschrieben, dass eine Zielinformation aufgrund zeitlich nachfolgender Lernerfahrungen später schlechter abrufbar ist (s. auch proaktive Interferenz).

Sensorisches Gedächtnis (*sensory memory*) Schnittstelle zwischen Wahrnehmung und Gedächtnis, an der Information für sehr kurze Zeit in einem „reizspezifischen" Format vorliegen soll.

Systemansatz (*systems approach*) Analyse des Gedächtnisses als eine Menge von funktional und/oder neuronal verschiedenen Systemen.

Transferangemessenheit der Verarbeitung (*transfer-appropriate processing*) Annahme, dass der Grad der Überlappung von kognitiven Prozessen bei der Encodierung und dem Abruf von Information die entscheidende Variable für die Güte der Gedächtnisleistung ist.

Verarbeitungstiefe (*depth of processing*) Annahme, dass diejenigen Informationen, die in der Lernphase tief (semantisch) verarbeitet wurden, später besser wieder abrufbar sein sollten als nur oberflächlich (nicht semantisch) verarbeitete Informationen.

Vergessen (*forgetting*) Vergessen im Langzeitgedächtnis geht vor allem auf Interferenzprozesse zurück. Wir unterscheiden *proaktive* und *retroaktive Interferenz*.

Weiterführende Literatur

Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press. (Eine umfassende Darstellung des modularen Modells des Arbeitsgedächtnisses.)

Baddeley, A. D. , Eysenck, M. W. & Anderson, M. C. (2009). *Memory*. New York: Psychology Press. (Eine allgemeine Einführung in die Gedächtnispsychologie.)

Cowan, N. (1995). *Attention and memory. An integrated framework*. New York: Oxford University Press. (Eine umfassende Darstellung des Embedded-Processes-Modells des Arbeitsgedächtnisses.)

Haberlandt, K. (1999). *Human memory: Exploration and application*. Boston, MA, USA: Allyn and Bacon. (Eine allgemeine Einführung in die Gedächtnispsychologie.)

Miyake, A. & Shah, P. (Eds.). (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. New York, NY: Cambridge University Press. (Empfehlenswerter Sammelband, in dem verschiedene Ansätze zur Modellierung des menschlichen Arbeitsgedächtnisses vorgestellt werden.)

Schwartz, B. L. (2011). *Memory: Foundations and applications*. Thousand Oaks, CA: Sage. (Ein empfehlenswertes Buch zur Gedächtnispsychologie.)

Surprenant, A. M. & Neath, I. (2009). *Principles of memory*. New York: Psychology Press. (Ein sehr empfehlenswertes Buch zur Gedächtnispsychologie mit einer recht umfassenden Zusammenstellung der Befundlage.)

Literatur

Aggleton, J. P., & Brown, M. W. (1999). Episodic memory, amnesia, and the hippocampal-anterior thalamic axis. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 425–489.

Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The capacity of visual short term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychological Science*, *15*, 106–111.

Anderson, J. R. (1976). *Language, memory, and thought*. Potomac, MD: Lawrence Erlbaum Associates.

Anderson, M. C., Bjork, R. A., & Bjork, E. L. (1994). Remembering can cause forgetting: Retrieval dynamics in long-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 1063–1087.

Arndt, J. (2010). The role of memory activation in creating false memories of encoding context. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 66–79.

Arndt, J., & Hirshman, E. (1998). True and false recognition in MINERVA2: Explanations from a global matching perspective. *Journal of Memory and Language*, *39*, 371–391.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control mechanisms. In K. W. Spence (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 2, S. 89–195). New York: Academic Press.

Averbach, E., & Coriell, A. S. (1961). Short-term memory in vision. *Bell System Technical Journal*, *40*, 309–328.

Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford, UK: Clarendon Press.

Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 417–423.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 8, S. 47–90). New York: Academic Press.

Baddeley, A. D., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*, 575–589.

Baddeley, A. D., Hitch, G. J., & Allen, R. J. (2009). Working memory and binding in sentence recall. *Journal of Memory and Language*, *61*, 438–456.

Banbury, S., & Berry, D. C. (1997). Habituation and dishabituation to speech and office noise. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *3*, 181–195.

Batchelder, W. H., & Alexander, G. E. (2013). Discrete-state models: Comment on Pazzaglia, Dube, and Rotello (2013). *Psychological Bulletin*, *139*, 1204–1212.

Batchelder, W. H., & Riefer, D. M. (1999). Theoretical and empirical review of multinomial process tree modeling. *Psychonomic Bulletin & Review*, *6*, 57–86.

Bayen, U. J., Murnane, K., & Erdfelder, E. (1996). Source discrimination, item detection, and multinomial models of source monitoring. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 197–215.

Baym, C. L., & Gonsalves, B. D. (2010). Comparison of neural activity that leads to true memories, false memories, and forgetting: An fMRI study of the misinformation effect. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *10*, 339–348.

Bekerian, D. A., & Bowers, J. M. (1983). Eyewitness testimony: Were we misled? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *9*, 139–145.

Bell, R., & Buchner, A. (2012). How adaptive is memory for cheaters? *Current Directions in Psychological Science*, *21*, 403–408.

Bell, R., & Buchner, A. (2014). Remembering cheaters. In B. L. Schwartz, M. L. Howe, M. P. Toglia, & H. Otgaar (Hrsg.), *What is adaptive about adaptive memory?* (S. 35–52). Oxford: Oxford University Press.

Bell, R., Röer, J. P., Dentale, S., & Buchner, A. (2012). Habituation of the irrelevant sound effect: Evidence for an attentional theory of short-term memory disruption. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 1542–1557.

Bell, R., Röer, J. P., & Buchner, A. (2013). Adaptive memory: The survival-processing memory advantage is not due to negativity or mortality salience. *Memory & Cognition*, *41*, 490–502.

Blaxton, T. A. (1989). Investigating dissociations among memory measures: Support for a transfer appropriate processing framework. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 657–668.

Bower, G. H. (1981). Mood and memory. *American Psychologist*, *36*, 129–148.

Bower, G. H., Thompson Schill, S., & Tulving, E. (1994). Reducing retroactive interference: An interference analysis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 51–66.

Brandt, M. (2001). *Modellbasierte Analyse globaler Gedächtnismodelle*. Lengerich: Pabst Sciences Publishers.

Brandt, M. (2007). Bridging the gap between measurement models and theories of human memory. *Zeitschrift für Psychologie/Journal of Psychology*, *215*, 72–85.

Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. London: Pergamon Press.

Bröder, A., & Schütz, J. (2009). Recognition ROCs are curvilinear-or are they? On premature arguments against the two-high-threshold model of recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*, 587–606.

Buchner, A., & Brandt, M. (2003). Further evidence for systematic reliability differences between explicit and implicit memory tests. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, *56A*, 193–209.

Buchner, A., & Erdfelder, E. (2005). Word frequency of irrelevant speech distractors affects serial recall. *Memory & Cognition*, *33*, 86–97.

Buchner, A., & Wippich, W. (2000). On the reliability of implicit and explicit memory measures. *Cognitive Psychology*, *40*, 227–259.

Buchner, A., Erdfelder, E., & Vaterrodt-Plünnecke, B. (1995). Toward unbiased measurement of conscious and unconscious memory processes within the process dissociation framework. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*, 137–160.

Buchner, A., Rothermund, K., Wentura, D., & Mehl, B. (2004). Valence of distractor words increases the effects of irrelevant speech on serial recall. *Memory & Cognition*, *32*, 722–731.

Capaldi, E. J., & Neath, I. (1995). Remembering and forgetting as context discrimination. *Learning and Memory*, *2*, 107–132.

Cermak, L. S., Talbot, N., Chandler, K., & Wolbarst, L. R. (1985). The perceptual priming phenomenon in amnesia. *Neuropsychologia*, *23*, 615–622.

Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, *4*, 55–81.

Clare, L., McKenna, P. J., Mortimer, A. M., & Baddeley, A. D. (1993). Memory in schizophrenia: What is impaired and what is preserved? *Neuropsychologia*, *31*, 1225–1241.

Clark, S. E., & Gronlund, S. D. (1996). Global matching models of recognition memory: How the models match the data. *Psychonomic Bulletin & Review*, *3*, 37–60.

Cohen, N. J., & Eichenbaum, H. (1993). *Memory, amnesia, and the hippocampal system*. Cambridge, MA: MIT Press.

Cohen, N. J., & Squire, L. R. (1980). Preserved learning and retention of pattern-analyzing skill in amnesia: Dissociation of knowing how and knowing that. *Science*, *210*, 207–210.

Collins, A. M., & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, *82*, 407–428.

Cowan, N. (1984). On short and long auditory stores. *Psychological Bulletin*, *96*, 341–370.

Cowan, N. (1995). *Attention and memory. An integrated framework*. New York: Oxford University Press.

Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. In A. Miyake, & P. Shah (Hrsg.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (S. 62–101). New York, NY: Cambridge University Press.

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 87–185.

Craik, F. I. M., & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*, 671–684.

Deese, J. (1959). On the prediction of occurrence of particular verbal intrusions in immediate recall. *Journal of Experimental Psychology*, *58*, 17–22.

Deffenbacher, K. A., Bornstein, B. H., & Penrod, S. D. (2006). Mugshot exposure effects: Retroactive interference, mugshot commitment, source confusion, and unconscious transference. *Law and Human Behavior*, *30*, 287.

Dennis, S., & Chapman, A. (2010). The inverse list length effect: A challenge for pure exemplar models of recognition memory. *Journal of Memory and Language*, *63*, 416–424.

Dennis, S., & Humphreys, M. S. (2001). A context noise model of episodic word recognition. *Psychological Review*, *108*, 452–478.

Dougherty, M. R. P., Gettys, C. F., & Ogden, E. E. (1999). MINERVA-DM: A memory processes model for judgments of likelihood. *Psychological Review*, *106*, 180–209.

Downes, J. J., & Mayes, A. R. (1997). Concluding comments: Common themes, disagreements, and future directions. *Memory*, *5*, 301–311.

Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from Cognitive and Educational Psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, *14*, 4–58.

Eich, J. E. (1980). The cue-dependent nature of state-dependent retrieval. *Memory & Cognition*, *8*, 157–173.

Eich, J. E., Weingartner, H., Stillman, R. C., & Gillin, J. C. (1975). State-dependent accessibility of retrieval cues in the retention of a categorized list. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *14*, 408–417.

Ellis, H. D., & Young, A. W. (1989). Are faces special? In A. W. Young, & H. D. Ellis (Hrsg.), *Handbook of research on face processing* (S. 1–26). Amsterdam: North-Holland.

Ellis, N. C., & Hennelly, R. A. (1980). A bilingual word-length effect: Implications for intelligence testing and the relative ease of mental calculation in Welsh and English. *British Journal of Psychology*, *71*, 43–51.

Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*, 1127–1133.

Erdfelder, E. (2000). *Multinomiale Modelle in der Kognitiven Psychologie*. Unveröffentlichte Habilitationsschrift, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

Erdfelder, E., & Buchner, A. (1998a). Process dissociation measurement models: Threshold theory or signal-detection theory? *Journal of Experimental Psychology: General*, *127*, 83–96.

Erdfelder, E., & Buchner, A. (1998b). Decomposing the hindsight bias: An integrative multinomial processing tree model. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *24*, 387–414.

Erdfelder, E., Auer, T.-S., Hilbig, B. E., Assfalg, A., Moshagen, M., & Nadarevic, L. (2009). Multinomial processing tree models: A review of the literature. *Zeitschrift für Psychologie/Journal of Psychology*, *217*, 108–124.

Eslinger, P. J., Easton, A., Grattan, L. M., & Van Hoesen, G. W. (1996). Distinctive forms of partial retrograde amnesia after asymmetric temporal lobe lesions: Possible role of the occipitotemporal gyri in memory. *Cerebral Cortex*, *6*, 530–539.

Geiselman, R. E., & Fisher, R. P. (1989). The cognitive interview technique for victims and witnesses of crime. In D. C. Raskin (Hrsg.), *Psychological methods in criminal investigation and evidence* (S. 191–215). New York, NY: Springer Publishing Co Inc..

Gigerenzer, G. (1991). From tools to theories: A heuristic of discovery in cognitive psychology. *Psychological Review*, *98*, 254–267.

Gillund, G., & Shiffrin, R. M. (1984). A retrieval model for both recognition and recall. *Psychological Review*, *91*, 1–67.

Godden, D. R., & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater. *British Journal of Psychology*, *66*, 325–331.

Goodwin, D. W., Powell, B., Bremer, D., Hoine, H., & Stern, J. (1969). Alcohol and recall: State-dependent effects in man. *Science*, *163*, 1358–1360.

Graesser, A. C., Woll, S. B., Kowalski, D. J., & Smith, D. A. (1980). Memory for typical and atypical actions in scripted activities. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *6*, 503–515.

Graf, P., & Schacter, D. L. (1985). Implicit and explicit memory for new associations in normal and amnesic subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *11*, 501–518.

Grosse, D. A., Wilson, R. S., & Fox, J. H. (1990). Preserved word-stem-completion priming of semantically encoded information in Alzheimer's disease. *Psychology and Aging*, *5*, 304–306.

Hamann, S. B., & Squire, L. R. (1996). Level-of-processing effects in word-completion priming: A neuropsychological study. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*, 933–947.

Hertel, P. T., & Milan, S. (1994). Depressive deficits in recognition: Dissociation of recollection and familiarity. *Journal of Abnormal Psychology*, *103*, 736–742.

Hintzman, D. L. (1986). „Schema abstraction" in a multiple trace memory model. *Psychological Review*, *93*, 411–428.

Hintzman, D. L. (1988). Judgments of frequency and recognition memory in a multiple trace model. *Psychological Review*, *95*, 528–551.

Hintzman, D. L. (1990). Human learning and memory: Connections and dissociations. *Annual Review of Psychology*, *41*, 109–139.

Hirsh, K. W., & Ellis, A. W. (1994). Age of acquisition and lexical processing in aphasia: A case study. *Cognitive Neuropsychology*, *11*, 435–458.

Hodgson, C., & Ellis, A. W. (1998). Last in, first to go: Age of acquisition and naming in the elderly. *Brain and Language*, *64*, 146–163.

Hu, X., & Batchelder, W. H. (1994). The statistical analysis of general processing tree models with the EM algorithm. *Psychometrika*, *59*, 21–47.

Humphreys, M. S., Bain, J. D., & Pike, R. (1989a). Different ways to cue a coherent system: A theory for episodic, semantic, and procedural tasks. *Psychological Review*, *96*, 208–233.

Humphreys, M. S., Pike, R., Bain, J. D., & Tehan, G. (1989b). Global matching: A comparison of the SAM, Minerva II, Matrix, and TODAM models. *Journal of Mathematical Psychology*, *33*, 36–67.

Hyde, T. S., & Jenkins, J. J. (1973). Recall for words as a function of semantic, graphic, and syntactic orienting tasks. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *12*, 471–480.

Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework: Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of Memory and Language*, *30*, 513–541.

Jacoby, L. L., & Witherspoon, D. (1982). Remembering without awareness. *Canadian Journal of Psychology*, *36*, 300–324.

Jamieson, R. K., & Mewhort, D. J. K. (2009a). Applying an exemplar model to the artificial-grammar task: Inferring grammaticality from similarity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*, 550–575.

Jamieson, R. K., & Mewhort, D. J. K. (2009b). Applying an exemplar model to the serial reaction-time task: Anticipating from experience. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*, 1757–1783.

Jamieson, R. K., & Mewhort, D. J. K. (2010). Applying an exemplar model to the artificial-grammar task: String completion and performance on individual items. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*, 1014–1039.

Jones, D. M. (1993). Objects, streams, and threads of auditory attention. In A. D. Baddeley, & L. Weiskrantz (Hrsg.), *Attention, selection, awareness, and control. A tribute to Donald Broadbent* (S. 87–104). Oxford, UK: Oxford University Press.

Jones, D. M., Macken, W. J., & Murray, A. C. (1993). Disruption of visual short-term memory by changing-state auditory stimuli: The role of segmentation. *Memory & Cognition*, *21*, 318–328.

Kapur, N. (1999). Syndromes of retrograde amnesia: A conceptual and empirical synthesis. *Psychological Bulletin*, *125*, 800–825.

Kendrick, K. M., & Baldwin, B. A. (1987). Cells in temporal cortex of conscious sheep can respond preferentially to the sight of faces. *Science*, *236*, 448–450.

Kinnell, A., & Dennis, S. (2011). The list length effect in recognition memory: An analysis of potential confounds. *Memory & Cognition*, *39*, 348–363.

Kinnell, A., & Dennis, S. (2012). The role of stimulus type in list length effects in recognition memory. *Memory & Cognition*, *40*, 311–325.

Klatte, M., & Hellbrück, J. (1993). Der „Irrelevant Speech Effect": Wirkungen von Hintergrundschall auf das Arbeitsgedächtnis. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, *40*, 91–98.

Köhnken, G., Mantwill, M., & Aschermann, E. (1991). Das Kognitive Interview – experimentelle Evaluation einer neuen Interviewmethode. In R. Egg (Hrsg.), *Brennpunkte der Rechtspsychologie* (S. 247–258). Bonn-Bad Godesberg: Forum Verlag.

Kolers, P. A. (1976). Reading a year later. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *3*, 554–565.

Kroneisen, M., & Erdfelder, E. (2011). On the plasticity of the survival processing effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*, 1553–1562.

Kroneisen, M., Rummel, J., & Erdfelder, E. (2013). Working memory load eliminates the survival processing effect. *Memory*, *22*, 92–102.

Lahl, O., Wispel, C., Willigens, B., & Pietrowsky, R. (2008). An ultra short episode of sleep is sufficient to promote declarative memory performance. *Journal of Sleep Research*, *17*, 3–10.

Light, L. L., & Singh, A. (1987). Implicit and explicit memory in young and older adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*, 531–541.

Lockhart, R. S., & Craik, F. I. (1990). Levels of processing: A retrospective commentary on a framework for memory research. *Canadian Journal of Psychology*, *44*, 87–112.

Loftus, E. F., & Loftus, G. R. (1980). On the permanence of stored information in the human brain. *American Psychologist*, *35*, 409–420.

Loftus, E. F., & Palmer, J. C. (1974). Reconstruction of automobile destruction: An example of the interaction between language and memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*, 585–589.

Loftus, E. F., Miller, D. G., & Burns, H. J. (1978). Semantic integration of verbal information into a visual memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *4*, 19–31.

Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates.
Logie, R. H., Gilhooly, K. J., & Wynn, V. (1994). Counting on working memory in arithmetic problem solving. *Memory & Cognition*, *22*, 395–410.
Logie, R. H., Della Sala, S., Laiacona, M., Chalmers, P., & Wynn, V. (1996). Group aggregates and individual reliability: The case of verbal short-term memory. *Memory & Cognition*, *24*, 305–321.
Longoni, A. M., Richardson, J. T., & Aiello, A. (1993). Articulatory rehearsal and phonological storage in working memory. *Memory & Cognition*, *21*, 11–22.
Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, *390*, 279–281.
Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (1991). *Detection theory: A user's guide*. Cambridge: Cambridge University Press.
Malmberg, K. J., Lehman, M., Annis, J., Criss, A. H., & Shiffrin, R. M. (2014). Consequences of testing memory. *Psychology of Learning and Motivation*, *61*, 285–313.
Malpass, R. S., & Devine, P. G. (1981). Guided memory in eyewitness identification. *Journal of Applied Psychology*, *66*, 343–350.
Mandler, G. (1980). Recognizing: The judgment of previous occurrence. *Psychological Review*, *87*, 252–271.
Manning, C. A., Parsons, M. W., Cotter, E. M., & Gold, P. E. (1997). Glucose effects on declarative and nondeclarative memory in healthy elderly and young adults. *Psychobiology*, *25*, 103–108.
Martin, E. (1965). Transfer of verbal paired associates. *Psychological Review*, *72*, 327–343.
McNicol, D. (1972). *A primer of signal detection theory*. London: George Allen & Unwin.
Meier, B., & Perrig, W. J. (2000). Low reliability of perceptual priming: Consequences for the interpretation of functional dissociations between explicit and implicit memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, *53A*, 211–233.
Meiser, T., & Klauer, K. C. (1999). Working memory and changing-state hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *25*, 1272–1299.
Meissner, C. A., & Brigham, J. C. (2001). Thirty years of investigating the own-race bias in memory for faces: A meta-analytic review. *Psychology, Public Policy, and Law*, *7*, 3–35.
Memon, A., Meissner, C. A., & Fraser, J. (2010). The Cognitive Interview: A meta-analytic review and study space analysis of the past 25 years. *Psychology, Public Policy, and Law*, *16*, 340–372.
Merikle, P. M. (1980). Selection from visual persistence by perceptual groups and category membership. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 279–295.
Metcalfe, J. A. (1982). A composite holographic associative recall model. *Dissertation Abstracts International*, *43*, 901.
Morris, C. D., Bransford, J. D., & Franks, J. J. (1977). Levels of processing versus transfer appropriate processing. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *16*, 519–533.
Murdock, B. B. (1974). *Human memory: Theory and data*. Potomac, MD: Lawrence Erlbaum Associates.
Murdock, B. B. (1982). A theory for the storage and retrieval of item and associative information. *Psychological Review*, *89*, 609–626.
Murdock, B. B. (1997). Context and mediators in a theory of distributed associative memory (TODAM2). *Psychological Review*, *104*, 839–862.
Murnane, K., & Phelps, M. P. (1993). A global activation approach to the effect of changes in environmental context on recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 882–894.
Nairne, J. S., Thompson, S. R., & Pandeirada, J. N. S. (2007). Adaptive memory: Survival processing enhances retention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *33*, 263–273.
Nairne, J. S., Pandeirada, J. N. S., & Thompson, S. R. (2008). Adaptive memory: The comparative value of survival processing. *Psychological Science*, *19*, 176–180.
Neath, I., & Surprenant, A. M. (2002). *Human memory: An introduction to research, data, and theory*. Belmont, CA: Wadsworth.
Neely, C. B., & LeCompte, D. C. (1999). The importance of semantic similarity to the irrelevant speech effect. *Memory & Cognition*, *27*, 37–44.
Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Apple-Century-Crofts.
Nissen, M. J., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*, 1–32.
Payne, D. G., Elie, C. J., Blackwell, J. M., & Neuschatz, J. S. (1996). Memory illusions: Recalling, recognizing, and recollecting events that never occurred. *Journal of Memory and Language*, *35*, 261–285.
Pike, R. (1984). Comparison of convolution and matrix distributed memory systems for associative recall and recognition. *Psychological Review*, *91*, 281–294.
Plihal, W., & Born, J. (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*, 534–547.
Poirier, M., Nairne, J. S., Morin, C., Zimmermann, F. G. S., Koutmeridou, K., & Fowler, J. (2012). Memory as discrimination: A challenge to the encoding-retrieval match principle. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 16–29.
Postman, L., & Stark, K. (1969). Role of response availability in transfer and interference. *Journal of Experimental Psychology*, *79*, 168–177.
Quinn, J. G., & McConnel, J. (1996). Irrelevant pictures in visual working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A. Human Experimental Psychology*, *49A*, 200–215.
Raaijmakers, J. G., & Shiffrin, R. M. (1981). Search of associative memory. *Psychological Review*, *88*, 93–134.
Riefer, D. M., & Batchelder, W. H. (1988). Multinomial modeling and the measurement of cognitive processes. *Psychological Review*, *95*, 318–339.
Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). The power of testing memory: Basic research and implications for educational practice. *Perspectives on Psychological Science*, *1*, 181–210.
Roediger, H. L., & McDermott, K. B. (1995). Creating false memories: Remembering words not presented in lists. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 803–814.
Röer, J. P., Bell, R., & Buchner, A. (2013a). Is the survival processing memory advantage due to richness of encoding? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*, 1294–1302.
Röer, J. P., Bell, R., & Buchner, A. (2013b). Self-relevance increases the irrelevant sound effect: Attentional disruption by one's own name. *Journal of Cognitive Psychology*, *25*, 925–931.
Röer, J. P., Bell, R., & Buchner, A. (2014). Evidence for habituation of the irrelevant-sound effect on serial recall. *Memory & Cognition*, *42*, 609–621.
Schichl, M., Ziberi, M., Lahl, O., & Pietrowsky, R. (2011). The influence of midday naps and relaxation-hypnosis on declarative and procedural memory performance. *Sleep and Hypnosis*, *13*, 8–14.
Schweickert, R. (1993). A multinomial processing tree model for degradation and redintegration in immediate recall. *Memory & Cognition*, *21*, 168–175.
Shiffrin, R. M., & Steyvers, M. (1997). A model for recognition memory: REM-retrieving effectively from memory. *Psychonomic Bulletin and Review*, *4*, 145–166.
Shimamura, A. P. (2000). The role of the prefrontal cortex in dynamic filtering. *Psychobiology*, *28*, 207–218.
Smeets, T., Otgaar, H., Raymaekers, L., Peters, M. J. V., & Merckelbach, H. (2012). Survival processing in times of stress. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*, 113–118.
Smith, E. E., & Jonides, J. (1997). Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, *33*, 5–42.
Smith, S. M. (1979). Remembering in and out of context. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *5*, 460–471.
Snodgrass, J. G., & Corwin, J. (1988). Pragmatics of measuring recognition memory: Applications to dementia and amnesia. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*, 34–50.
Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs*, *74*(11), Whole No. 498.
Treisman, A. M. (1964). Monitoring and storage of irrelevant messages in selective attention. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *3*, 449–459.
Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving, & W. Donaldson (Hrsg.), *Organization of memory* (S. 382–403). New York: Academic Press.
Tulving, E. (1974). Cue-dependent forgetting. *American Scientist*, *62*, 74–82.
Tulving, E. (1999). Study of memory: Processes and systems. In J. K. Foster, & M. Jelicic (Hrsg.), *Memory: Systems, process, or function?* (S. 11–30). Oxford, UK: Oxford University Press.

Underwood, B. J. (1957). Interference and forgetting. *Psychological Review*, *64*, 49–60.

Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annual Review of Psychology*, *57*, 139–166.

Ward, E. V., Berry, C. J., & Shanks, D. R. (2013a). An effect of age on implicit memory that is not due to explicit contamination: Implications for single and multiple-systems theories. *Psychology and Aging*, *28*, 429–442.

Ward, E. V., Berry, C. J., & Shanks, D. R. (2013b). Age effects on explicit and implicit memory. *Frontiers in Psychology*, *4*, 639.

Warrington, E. K., & Weiskrantz, L. (1970). Amnesic syndrome: Consolidation or retrieval? *Nature*, *228*, 628–630.

Wells, G. L., Memon, A., & Penrod, S. D. (2006). Eyewitness evidence: Improving its probative value. *Psychological Science in the Public Interest*, *7*, 45–75.

Wixted, J. T. (2007). Dual-process theory and signal-detection theory of recognition memory. *Psychological Review*, *114*, 152–176.

Woodin, M. E., & Heil, J. (1996). Skilled motor performance and working memory in rowers: Body patterns and spatial positions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, *49A*, 357–378.

Yonelinas, A. P., & Parks, C. M. (2007). Receiver operating characteristics (ROCs) in recognition memory: A review. *Psychological Bulletin*, *133*, 800–832.

Zola-Morgan, S. M., & Squire, L. R. (1993). Neuroanatomy of memory. *Annual Review of Neuroscience*, *16*, 547–563.

Sprachproduktion und -verstehen

Kapitel 13 **Worterkennung und -produktion – 437**
Pienie Zwitserlood und Jens Bölte

Kapitel 14 **Sätze und Texte verstehen und produzieren – 467**
Barbara Kaup und Carolin Dudschig

Die Sprache unterscheidet den Menschen vom Tier. Bei keinem anderen Lebewesen hat sich diese Fähigkeit im Laufe der Evolution derart verfeinert und perfektioniert. Bisweilen bezeichnet man die Sprache als das, was das Menschsein ausmacht, auch wenn nach den meisten gängigen Definitionen auch tierische Kommunikation als Sprache kategorisiert wird. Eine rudimentäre Kommunikation und ein auf das Nötigste beschränkter Informationsaustausch sind zwar auch mit nichtsprachlichen Mitteln möglich, aber erst mithilfe der hoch entwickelten Komplexität der menschlichen Sprache konnten sich derartig komplexe Informationssysteme und gesellschaftliche Strukturen herausbilden, wie wir sie heute in unserer Gesellschaft vorfinden.

Meistens empfinden wir bei der Produktion wie bei der Rezeption von Sprache keinerlei mentale Anstrengung – wir produzieren oder rezipieren sie einfach. Nur in manchen Situationen wird uns dabei die ganze Leistungsfähigkeit des informationsverarbeitenden Apparats klar: etwa, wenn wir Kindern das Sprechen beibringen; wenn wir eine Fremdsprache erlernen, die so viel schwieriger ist als unsere Muttersprache; wenn wir mit einer Person interagieren, die an Sprachstörungen leidet; wenn wir die richtigen Worte nicht finden; oder wenn wir die Worte einer anderen Person nicht eindeutig zu interpretieren wissen.

Im vorliegenden Teil werden grundlegende Probleme der Sprachproduktion und des Sprachverstehens, der Sprachstörungen und der Neurowissenschaft der Sprache erörtert. In ► Kap. 13 stehen zunächst die Prozesse der auditiven und visuellen Worterkennung und -produktion im Vordergrund. In ► Kap. 14 werden dann die Prozesse beim Verstehen und Produzieren von Sätzen und Texten erläutert.

Worterkennung und -produktion

Pienie Zwitserlood und Jens Bölte

13.1 Einleitung: Wörter als Kernelemente der Sprache – 438
13.1.1 Wie hängen sprachliche und nichtsprachliche Einheiten zusammen? – 438
13.1.2 Was sind Wörter? – 439
13.1.3 Sprechen und Verstehen: Von den Konzepten zu den Sprachlauten – von den Sprachlauten zu den Konzepten – 439

13.2 Wie wir Sprachlaute produzieren – 440

13.3 Wortgedächtnis: Was ist im Wortgedächtnis gespeichert und wie? – 442
13.3.1 Die Form der Wörter: Lautliche und orthografische Beschreibung – 442
13.3.2 Die interne Struktur der Wörter: Morphologie – 443
13.3.3 Die strukturellen Merkmale der Wörter – 443
13.3.4 Die Bedeutung der Wörter und das Problem der Mehrdeutigkeit – 444

13.4 Worterkennung – 445
13.4.1 Das kontinuierliche und variable Sprachsignal – 445
13.4.2 Was passiert bei der Worterkennung? – 449
13.4.3 Vom Buchstaben zur Bedeutung – 451

13.5 Was passiert im Gehirn bei der Worterkennung? – 452

13.6 Wortproduktion – 452
13.6.1 Umsetzung von lexikalen Konzepten in Wörter – 454
13.6.2 Umsetzung von Lemmata in Wortformen – 455

13.7 Was passiert im Gehirn beim Sprechen von Wörtern? – 456
13.7.1 Neuronale Korrelate der Sprachproduktion – 457
13.7.2 Wenn es nicht einwandfrei funktioniert: Aphasien – 457

13.8 Anwendungsbeispiele – 458

13.9 Ausblick – 458

13.10 Weiterführende Informationen – 459

Literatur – 462

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_13

Im Blickfang

Sprechen ohne Wörter? Ein Fallbeispiel aus der Aphasieforschung

ja … ich … äh … immer … äh … äh … denken … äh ... ihr? … ihr Buch … aha! … richtig! … dann immer denken! … und … äh … sprechen … und … äh … und … jemand … äh … zuhause … mein Mann und ich … Einladung … äh … eingeladen … und ich … äh … scht … äh … immer … ähäh … stumm! … äh … Hemmungen! … und …. äh … Bekannten … nicht mehr nicht mehr … Hemmung … aber … äh … im … im Betrieb … äh … Hemmungen … und … äh … (seufzt). (Aus Peuser 1978)

Was ein Mensch mit einer Sprachstörung nicht mehr kann, schnell und flüssig sprechen, problemlos Worte finden für die Dinge, die man sagen möchte, Sprache verstehen ohne Mühe und Anstrengung – davon handelt dieses Kapitel.

13.1 Einleitung: Wörter als Kernelemente der Sprache

Sprache ist eine der komplexesten Errungenschaften der Menschheit. Sprache ist unser wichtigstes Kommunikationsmittel. Täglich verbringen wir viele Stunden mit Sprechen, Zuhören, Lesen und Schreiben. Sprache ist meist Mittel zum Zweck, aber Psycholinguisten interessieren sich gerade für dieses Mittel. Wie sprechen wir, wie wird Sprache verstanden? Welche Vorgänge finden wann und wo im Gehirn statt, welches gespeicherte Wissen (auch Repräsentationen genannt) ist für das Sprechen und Sprachverstehen unentbehrlich?

In diesem Kapitel befassen wir uns mit Wörtern, die wir beim Reden mühelos zu Sätzen aneinanderreihen und die uns in gesprochener oder geschriebener Form tagtäglich begegnen. Zuerst beschreiben wir, was Wörter eigentlich sind. In weiteren Abschnitten werden wir uns mit den Lauten der Sprache und dem Wissen, das wir über die Wörter unserer Sprache (und anderer Sprachen) haben, befassen. Danach wenden wir uns dem Erkennen von Wörtern beim Hören und Lesen zu und beschreiben, was beim Sprechen von Wörtern abläuft. Jeder nicht sprachgestörte Mensch kann sowohl verstehen (Sprachwahrnehmung) als auch sprechen (Sprachproduktion), dennoch werden wir Sprechen und Verstehen häufig getrennt behandeln.

Was sind eigentlich Wörter? Die Antwort scheint einfach: Wörter sind im Text durch Leerzeichen getrennt. Nun hat sich die Schriftsprache viel später entwickelt als unsere Fähigkeit zu sprechen, und erst die Römer verwendeten Leerzeichen, um Wörter zu trennen (Chrystal 2010). In gesprochener Sprache gibt es keine Entsprechung für die Leerzeichen, mit denen wir beim Schreiben Wörter trennen. Wie wir im Folgenden erfahren werden, ist es schwer zu entscheiden, wo ein Wort aufhört und das nächste anfängt. Wir werden uns mit der Frage auseinandersetzen, was es bedeutet, ein Wort zu *kennen*. Heißt es, dass wir es beim Sprechen oder Schreiben verwenden? Allerdings benutzen wir aktiv viel weniger Wörter, als wir passiv kennen, d. h., von vielen Wörtern wissen wir, was sie bedeuten, auch wenn wir sie selbst nie verwenden. Was bedeutet es, ein Wort zu *erkennen*? Von vielen Wörtern, vor allem von denen, die häufig vorkommen, ist die Bedeutung sofort präsent. Manchmal aber wissen wir nur, dass ein Wort tatsächlich ein Wort unserer Sprache ist, ohne genau zu wissen, was es bedeutet (z. B. *Angiom*, *Schwirrholz*). Auch ist es leicht zu entscheiden, ob eine Buchstaben- oder Lautabfolge ein mögliches, aber nicht existierendes Wort ist (*Hanker*) oder nicht (*Bgrute*). Es mag deutlich sein, dass das Wissen über Wörter sehr vielfältig ist.

13.1.1 Wie hängen sprachliche und nichtsprachliche Einheiten zusammen?

Wenn wir ein Buch lesen oder jemandem zuhören, wollen wir erfahren, was der Verfasser oder Sprecher uns mitteilen will. Es fällt uns nicht auf, dass es Buchstaben sind, die wir lesen, bzw. Sprachlaute, die wir hören. Wir meinen, dass wir direkt zur Bedeutung gelangen, und merken nicht, dass es Zeichen sind, die diese Bedeutung vermitteln. Die Verarbeitung von Sprachlauten und Buchstaben geschieht schnell und erfordert selten unsere Aufmerksamkeit. So wie Buchstaben Zeichen für Sprachlaute sind, sind Wörter Zeichen für Bedeutungen, für Begriffe oder **Konzepte**. Konzepte sind Bausteine des deklarativen Langzeitgedächtnisses. Sie codieren, etwas vereinfacht ausgedrückt, unser Wissen über Objekte, Menschen, Geschehnisse, Zustände und Handlungen (▶ Kap. 11). Konzepte sind nichtsprachlich. Wir können mithilfe von Konzepten denken und Probleme lösen, ohne zu sprechen oder gar die dazugehörigen Wörter zu aktivieren. Beim Sprechen aber werden Konzepte durch einzelne Wörter oder Kombinationen von Wörtern versprachlicht.

Vergleichen wir das deutsche Wort für den Vierbeiner, der mit dem Schwanz wedelt und bellt (*Hund*), mit dem französischen (*chien*) oder dem spanischen (*perro*), dann fällt gleich auf, dass sehr unterschiedliche Lautkombinationen mit derselben Bedeutung belegt sein können. Die Wörter einer Sprache sind also beliebige Lautkombinationen, die mit bestimmten Bedeutungen gepaart sind (Pinker 1994). Wörter sind somit, wie schon der Schweizer Ferdinand de Saussure, Urvater der modernen Sprachwissenschaft, vor fast 100 Jahren behauptete, lautliche Symbole für Konzepte (de Saussure 1916/1960). Wörter wie *Kuckuck*, die in vielen Sprachen ähnlich klingen, weil sie etwas klanglich nachahmen – in diesem Beispiel die vom Tier produzierten Geräusche –, bilden eine Ausnahme von der ansonsten eher willkürlichen Zuordnung von Lauten zu Begriffen. Solche Wörter sind in der Kindersprache häufig: *wau-wau* für Hund, *aua* für Schmerz. Jede Sprache hat Lautkombinationen (oder **Wortformen**; ▶ Kap. 1) für die Begriffe, die die Benutzer der Sprache ausdrücken wollen. Sprachen können sich unterscheiden in der Anzahl der Wörter für bestimmte Konzepte, je nachdem wie wichtig diese Konzepte in der Kultur und Umgebung sind. So stimmt es, dass Eskimosprachen mehr Wörter für Schnee haben als polynesische Sprachen, aber nicht mehr als Isländisch (Miller 1993). Kinder lernen, die Wortformen ihrer Sprache mit der richtigen Bedeutung zu verbinden. Kommen neue Konzepte dazu, werden neue Wörter gebildet oder aus einer anderen Sprache übernommen (*Fressnarkose*, *Fremdschämen*, *skypen*).

13.1.2 Was sind Wörter?

Ist jedes Wort das direkte symbolische Äquivalent eines Konzepts? Die Antwort ist Nein. In vielen Fällen werden Konzepte durch ein Wort versprachlicht: Tisch ist ein Konzept, ebenso wie Garten oder Liebe Konzepte sind. In vielen Fällen ist aber eine 1:1-Korrespondenz zwischen Konzept und Wort nicht gewährleistet. Manche Konzepte werden mit mehreren Wörtern versprachlicht: *sich verlieben* ist ein Beispiel oder auch Idiome, d. h. Ausdrücke, in denen Wörter zu einer nichtwörtlichen Bedeutung kombiniert sind (*an die Decke gehen* oder *im Eimer sein*). Andererseits kann das gleiche Wort mehrere Bedeutungen haben, also mit mehreren Konzepten verbunden sein: *Abkratzen* kann sich sowohl auf das Entfernen von Schmutz oder Flecken beziehen als auch auf das Sterben. Wir werden in ▶ Abschn. 13.3.4 sehen, dass Mehrdeutigkeit von Wörtern sehr häufig vorkommt.

Wenn wir nun ein Wort wie *abkratzen* unter die Lupe nehmen, fällt auf, dass dieses Wort eigentlich zwei Wörter enthält: *ab* und *kratzen*, die beide selbstständig vorkommen können. Dies gilt im Deutschen für sehr viele Wörter: *Nervenbündel*, *herunterkommen* oder gar *Rindfleischetikettierungsüberwachung*. Wir sollten uns nochmals die Frage stellen: Was ist ein Wort? Wenn wir all das, was zusammengeschrieben wird, als Wort kennzeichnen und von einer Zuordnung eines jeden Wortes zu einem Konzept ausgehen, müsste die Bedeutung dieses Konzepts „die Überwachung der Etikettierung von Fleisch vom Rind" sein. Wäre es nicht einfacher, wenn wir während des Verstehens dieses „Wortes" die Bedeutung mehrerer Konzepte kombinieren würden? Außerdem enthält auch diese Umschreibung komplexe Wörter wie *Überwachung*. Wie erfolgt hier die Zuordnung von Wort zu Konzept? Das Beispiel soll verdeutlichen, wie schwierig eine Definition von Wort ist, und führt uns zu anderen Einheiten in der Sprache: den **Morphemen**. Morpheme sind die kleinsten *bedeutungstragenden* Einheiten der Sprache. So unterscheiden sich *antrinken* und *austrinken* deutlich in der Bedeutung, bedingt durch die Bedeutung von *an* oder *aus*. Das nächste Beispiel, *betrinken*, hat, wie *an-* oder *austrinken*, drei Morpheme: *be*, *trink* und *en*. Es zeigt, dass es auch Morpheme gibt, die nur an andere Wörter gebunden und nicht freistehend vorkommen können (*be* und *en*); nur *trink* kann alleine im Satz stehen (*trink deine Milch!*). Man unterscheidet daher zwischen freien (*trink*) und gebundenen (*be*, *en*) Morphemen. Auf Morpheme werden wir in ▶ Abschn. 13.3.2 und ▶ Zur Vertiefung 13.2 ausführlicher eingehen.

Festzuhalten ist, dass eine Definition von „Wort" durchaus nicht einfach ist. Wörter sind nicht mit Konzepten gleichzusetzen, da eine einfache Korrespondenz nicht gegeben ist. Manchmal ist dieselbe Wortform das Zeichen für unterschiedliche Konzepte, manchmal wird ein Konzept mit mehreren Wörtern oder Morphemen versprachlicht.

13.1.3 Sprechen und Verstehen: Von den Konzepten zu den Sprachlauten – von den Sprachlauten zu den Konzepten

Wir sprechen viel und gerne. Viele Stunden am Tag verbringen wir damit zu erzählen, was uns widerfahren ist, was wir gerade machen oder vorhaben, sei es von Angesicht zu Angesicht, über

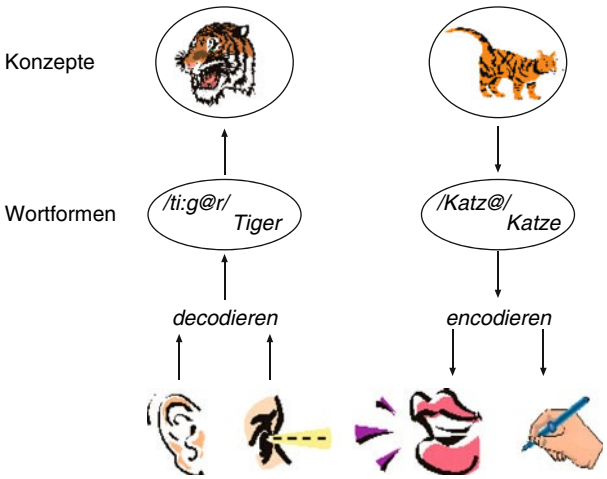


Abb. 13.1 Sprachmodi (Wahrnehmung und Produktion) und Modalitäten (Sprechen, Hören, Reden und Schreiben)

Telefon oder in sozialen Netzwerken. Wir plappern, erzählen, streiten uns, schimpfen oder sagen uns, dass wir uns mögen. Wenn wir sprechen, versprachlichen wir Konzepte und den Zusammenhang zwischen Konzepten. Wir fangen mit der Bedeutung an und überlegen, was wir sagen wollen, bevor eine geeignete sprachliche Form ausgewählt wird. Wie in ▶ Abschn. 13.6 ausführlich dargestellt, gibt es vieles zu tun, bevor unser Sprechapparat (die **Artikulatoren** oder Sprechwerkzeuge: Lippen, Zunge, Gaumen usw.) anfangen kann, tatsächlich sprachliche Geräusche zu produzieren. Sprechen, wie auch Schreiben, verläuft also von den Konzepten zu den Lauten.

Wenn wir gesprochene Sprache verstehen, ist es genau umgekehrt. Was auf unsere Ohren trifft, sind eben diese sprachlichen Klänge. Bei gesprochener Sprache muss unser mentales Sprachverstehenssystem erst die Geräusche als Sprache identifizieren und diese mit Sprachlauten, mit Wortformen, aber vor allem mit Bedeutung verbinden. Das Verstehen von Sprache geht also den Weg vom Klang zu den Konzepten. Ähnlich ist es beim Lesen. Die kleinen Zeichen, die wir Buchstaben nennen, werden vom visuellen System analysiert und wiederum mit Wortformen – diesmal keinen lautlichen, sondern orthografischen – in Verbindung gebracht. Von da geht es wieder zu den Konzepten und zu der Bedeutung des Gesagten oder Geschriebenen. Letztlich ist Sprache das Mittel par excellence, um Informationen von A nach B zu transportieren. Mit der Erforschung unserer sprachlichen Kommunikationsfähigkeit ist die Sprachpsychologie oder Psycholinguistik wesentlicher Bestandteil der Psychologie. ▶ Zur Vertiefung 13.1 erklärt den Werdegang der Psycholinguistik.

Wie Abb. 13.1 deutlich macht, gehen Sprechen und Sprachverstehen zwar unterschiedliche Wege, die sprachlichen und konzeptuellen Informationen, die benötigt werden, sind aber zum größten Teil dieselben. Sprachliches Wissen, das beim Verstehen und Produzieren vollständiger Sätze wichtig ist, hat eher Regelcharakter (▶ Kap. 14). Das Wissen über Wörter ist davon verschieden und für jedes Wort einzigartig. Bevor wir uns diesem Wissen (▶ Kap. 1) im Detail zuwenden, werden wir zunächst kleinere Einheiten unter die Lupe nehmen, und zwar die Sprachlaute oder **Phoneme**. Schließlich ist jedes Wort eine – meist einzigartige – Kombination von Sprachlauten.

Zur Vertiefung 13.1

Kurzer Abriss über die Geschichte psycholinguistischer Forschung

Die Psycholinguistik als Teilgebiet der Psychologie etablierte sich im Wesentlichen in den 1950er Jahren. Über die Zeit davor kann man sich hervorragend in Levelt (2013) informieren. Die Kritik des Linguisten Chomsky an den Vorstellungen der Behavioristen über Sprache gab den Anstoß zu zahlreichen psycholinguistischen Untersuchungen (Chomsky 1959; Skinner 1957). In der behavioristischen Forschung stand der assoziative Aspekt der Sprache im Mittelpunkt. Sprachliches Verhalten sollte genauso wie anderes Verhalten durch die auftretenden Konsequenzen verbalen Verhaltens kontrolliert werden. Sprecher lernen zu diskriminieren, welche sprachlichen Äußerungen in einer Situation eine Verstärkung nach sich ziehen und welche dies nicht tun. So erhöhen z. B. Äußerungen wie „mmh" oder „gut" die Häufigkeit eigener Meinungsäußerungen (Verplank 1955). Die Anzahl von Assoziationen zu einem Wort (oder vielmehr zu dem vom Wort bezeichneten Konzept), die eine Person in einem bestimmten Zeitraum generieren konnte, war ein Maß für seine Bedeutungshaltigkeit (Noble und McNeely 1957). Ein anderes Maß zur Erfassung der assoziativen Bedeutungen eines Wortes, das in dieser Zeit entwickelt wurde, ist das semantische Differenzial (Osgood et al. 1958). Hierbei wird ein durch ein Wort vermitteltes Konzept hinsichtlich einer Vielzahl von Dimensionen (z. B. männlich – weiblich, groß – klein) beurteilt.

Psycholinguistische Forschung gab es natürlich schon vor den Behavioristen und Chomsky. Cattell (1886) maß die Zeit zum Lesen und Benennen von Buchstaben, Wörtern, Sätzen und Bildern. Er zeigte, dass Buchstabenkombinationen, die ein Wort ergaben, schneller gelesen werden konnten als solche, die kein Wort ergaben, und fand, dass Wörter schneller gelesen werden in Sätzen, die Sinn ergaben, im Vergleich zu Sätzen, die keinen Sinn ergaben. Mayer und Orth (1901) untersuchten (durch Introspektion) die Dauer und Anzahl der „Bewusstseinsschritte" in Assoziationsaufgaben. Huey (1900) untersuchte Leseprozesse mit dem Ziel, die Lesegeschwindigkeit zu erhöhen. Er maß die Anzahl von Augenfixationen (und Sakkaden) pro Zeile in Abhängigkeit von Schriftgröße und Zeilenlänge. Die Versuchspersonen lasen den Text entweder laut oder still. So fand er heraus, dass man beim Lesen nicht die Wörter fixiert, die man gerade laut liest. Vielmehr hinkt das laute Lesen dem Fixieren um sechs bis sieben Wörter hinterher. Die frühen Untersuchungen zum Einfluss kontextueller Information auf die Worterkennung von Bagley (1900) und von der Gruppe um George Miller (Miller et al. 1951) werden in ▶ Abschn. 13.4.2 erwähnt.

Nach Chomskys Kritik an Skinner wandte sich die psycholinguistische Forschung den strukturellen Aspekten der Sprache zu. Man überprüfte die psychologische Realität linguistischer Theorien, insbesondere der Transformationsgrammatik von Chomsky (1965). In Langzeitstudien wurde die Sprachentwicklung von Kindern untersucht (Brown 1973). Heutzutage ist das Themenspektrum der Psycholinguistik viel breiter. Neben der Struktur von Äußerungen fragt man sich vor allem, welche Prozesse und Repräsentationen beteiligt sind. Dabei spielen der zeitliche Ablauf und das Zusammenspiel der beteiligten Prozesse eine wichtige Rolle. Ereigniskorrelierte Potenziale (EKPs; ▶ Kap. 2) oder auch die Magnetencephalografie (MEG; ▶ Kap. 2) sind neben Reaktionszeiten ein wichtiges abhängiges Maß für Untersuchungen des zeitlichen Zusammenspiels (Überblick zu EKPs und Sprache in Kutas und DeLong 2008). An Sprachverarbeitung beteiligte Hirnstrukturen werden mithilfe bildgebender Verfahren, der Positronenemissionstomografie (PET) und funktionellen Kernspintomografie (fMRI) bzw. funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) (Friederici 2011; ▶ Kap. 2), untersucht.

13

13.2 Wie wir Sprachlaute produzieren

Sprechen geht uns nach einigen Jahren des Spracherwerbs mühelos von den Lippen. Der vorliegende Abschnitt beschreibt die an der Artikulation beteiligten Organe und Strukturen. Wir erläutern, wie und wo Konsonanten und Vokale artikuliert und wie bestimmte Konsonanten zusammengruppiert werden können. Auf dieses Wissen wird im weiteren Verlauf des Kapitels immer wieder zurückgegriffen.

Zwerchfell, Brustkorb, Zwischenrippenmuskulatur, Atmungsmuskulatur, Lungen, Bronchien und Luftröhre erzeugen gemeinsam den für die menschliche Sprachproduktion nötigen Luftstrom. Die wesentlichen Lautartikulationen erfolgen im Mundraum, in geringerem Ausmaß in der Nasenhöhle bzw. im Rachen. Der Luftstrom, der bei der Produktion von Vokalen entsteht, wird außerhalb des Kehlkopfs nicht behindert. Unterschiedliche Vokale entstehen durch verschiedene Formungen von Rachen, Nasen- und Mundraum. Dagegen wird bei Konsonanten der Luftstrom im Mundraum, teilweise auch im Nasen- oder Rachenraum, mehr oder weniger stark behindert (◘ Abb. 13.2).

Alle Sprachlaute werden durch die Bewegung von Luftströmen erzeugt. Die meisten Sprachlaute entstehen durch den *Ausstoß* (exhalatorisch) von Luft aus der Lunge. Lautproduktion beim *Einatmen* wird nur sporadisch in Sprachen eingesetzt. Das deutsche *ja* wird zeitweise inhalatorisch gebildet. Ein weiterer Luftstrom entsteht innerhalb des Mundes und wird daher oral genannt. Der Verschluss zur Lunge wird durch die hintere Zunge und den weichen Gaumen gebildet. Der Luftstrom entsteht durch Vor- bzw. Zurückgleiten der Zunge. So entstehen Schnalzlaute, die im Deutschen nur als Ausdruck von Missbilligung oder als Appell an z. B. Pferde verwendet werden.

Der exhalatorische Luftstrom kann zuerst an den Stimmbändern modifiziert werden. Durch bloße Öffnung, ohne weitere Beteiligung der Stimmbänder, entstehen stimmlose Laute. Bei stimmhaften Lauten schwingen die Stimmbänder regelmäßig und versetzen den Luftstrom somit in Schwingung. Beim Flüstern werden die Stimmbänder verschlossen, die Knorpel, an denen die Stimmbänder befestigt sind (Stellknorpel), stehen jedoch offen. Die nächste Veränderung des Luftstroms kann durch den weichen Gaumen (Velum) erfolgen. Senkt sich der weiche Gaumen, strömt Luft in den Nasenraum, und es entstehen nasale Laute ([m], [n], [ŋ]). Ist der Nasenraum verschlossen, werden orale Laute produziert (z. B. [p], [s], [a]). Sowohl [m] als [n] sind demnach stimmhafte nasale Laute. Was aber unterscheidet [m] und [n]? Es ist der Ort der Artikulation. Für ein [m] wird der Luftstrom durch den Verschluss der Lippen behindert (labialer Laut). Bei einem [n] entsteht der Verschluss dagegen durch die Zunge, die am Zahnwulst anliegt (aveolarer Laut). Zwischen Lippen und Zäpfchen liegen die verschiedenen **Artikulationsorte** (◘ Abb. 13.3).

Mit Ober- und Unterlippe werden labiale Laute gebildet, [b], [p], und [m]. Die übrigen Orte werden durch die Zungenspitze oder den Zungenrücken angesteuert. Von vorn nach hinten gehend, heißen die Orte der Artikulation labiodental (Unterlippe

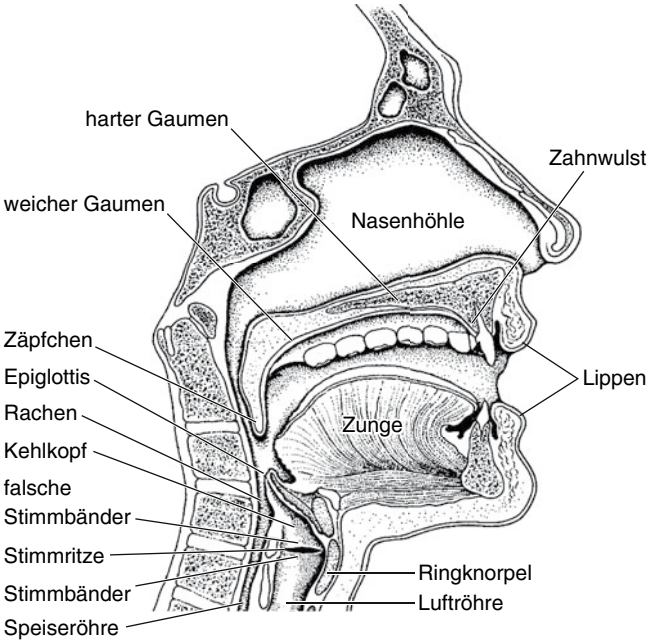


Abb. 13.2 Schnitt durch den Sprechapparat. Benannt sind die an der Spracherzeugung beteiligten Systeme (Artikulatoren)

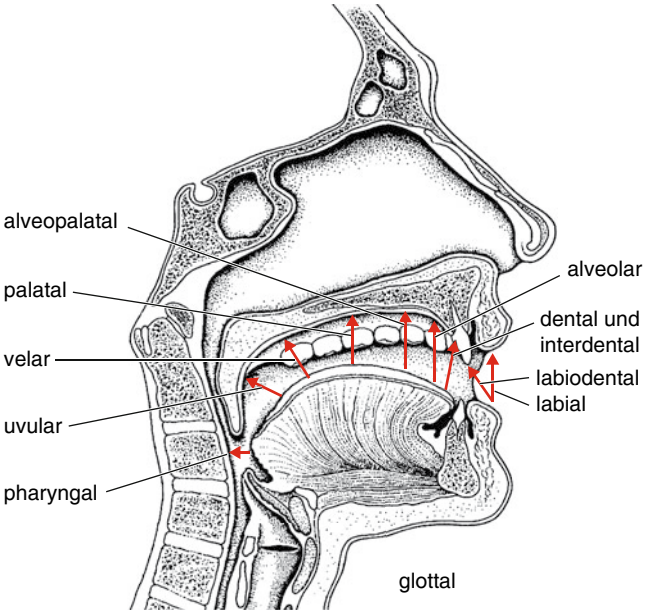


Abb. 13.3 Ausgewählte Artikulationsstellen. Die Pfeile geben die Richtung an, in die der Artikulator sich bewegt. Bei einem labialen Laut beispielsweise schließen sich die Lippen bis zum Verschluss, der dann explosionsartig geöffnet wird

und Zähne), interdental (Zunge zwischen den Zähnen), alveolar (Zunge am knöchernen Wulst hinter den Schneidezähnen), palatal (Zunge am harten Gaumen hinter dem Zahnwulst) und velar (Zunge am weichen Gaumen). Bilabiale und labiodentale Laute bilden zusammen die Gruppe der labialen Laute. Da bei alveolaren und palatalen Lauten die Zunge gegen den harten Gaumen angehoben wird, bezeichnet man sie auch als koronale Laute. Stimmlose palatale Laute nennt man auch alveopalatale Laute, z. B. [š], der erste Laut in *schicken*. Es gibt in der deutschen Sprache keine Laute, die mit dem Zäpfchen (Uvula) oder mit dem Rachen (Pharynx) gebildet werden.

Mit dieser Einteilung nach dem Ort der Artikulation kann man [m] und [n] unterscheiden. Jedoch kann man noch immer nicht [t] und [s] unterscheiden: [t] und [s] sind beide stimmlose, alveolare Laute. Was diese beiden Laute unterscheidet, ist die Art der Blockade des Luftstroms, anders gesagt die Art der Artikulation. Bei einem [t], wie bei [p] und [k], wird der Luftstrom kurzfristig vollständig blockiert. Da der Luftstrom „explodiert", wenn die Blockade sich öffnet, nennt man diese Laute Plosive. Auch bei einem [s] kommt es zu einer teilweisen Blockade des Luftstroms, die zu Turbulenzen des Luftstroms führt. Diese Lautklasse wird als Frikativ bezeichnet. Gibt es lediglich eine Verengung des Luftstroms ohne richtige Turbulenzen, entstehen sogenannte Liquide, z. B. [l] und [r]. Noch weniger oder keine Behinderung des Luftstroms findet bei Halbvokalen (Gleitlaut) statt, z. B. [j], [w] und [h].

Eine Sonderstellung nehmen Affrikate ein, die entstehen, wenn die Blockade des Luftstroms langsam geöffnet wird. Sie entsprechen einer Kombination eines Plosivs mit einem Frikativ, z. B. [pf] in *Pfote*, [ts] in *Mieze* und [tš] am Ende von *Tratsch*. Bei allen bis jetzt beschriebenen Lauten wird der Luftstrom mehr oder minder stark moduliert. Diese Laute werden in der Klasse der Konsonanten zusammengefasst. Laute, bei denen der Luftstrom ungehindert fließt, nennt man Vokale. Vokale unterscheiden sich voneinander durch eine jeweils typische Konfiguration des Sprechapparats. Vokale können lang sein wie in *Mahl* oder kurz wie in *Ball*. Vokale werden durch die Lippenstellung (gerundet, ungerundet), die Höhe der Zunge (hoch, mittel, tief) und den artikulierenden Zungenteil (vorn, Mitte, hinten) beschrieben. Anders als die meisten Konsonanten können Vokale ohne folgenden oder vorangehenden Laut produziert werden. Man kann das [a] aus *Ball* ohne das [b] oder das [l] aussprechen. Zum Schluss gibt es noch die Diphthonge. Ein Diphthong liegt vor, wenn innerhalb einer Silbe die Zunge von einer Vokalstellung zu einer anderen gleitet. Im Deutschen treten hauptsächlich drei Diphthonge auf: [ai], [au] und [ɔʏ], z. B. in *heiß*, *Haus* und *Freude*. Vereinzelt tritt auch [ʊɪ] auf, z. B. in *Pfui*.

Diese Beschreibung, wie Sprachlaute produziert werden, welche Artikulatoren beteiligt sind und wie Laute in Gruppen eingeteilt werden können, orientiert sich stark an der Phonetik, die sich vor allem mit der Art und Erzeugung der Laute befasst. Aber die eingeführten Begriffe wie Ort oder Art der Artikulation usw. werden auch in der Phonologie benutzt, die sich auf die Kombinierbarkeit von Lauten und ihre Bedeutung für die Wörter konzentriert. Die Phonologie beschreibt Sprachlaute, hier Phoneme genannt, als Bündel distinktiver Merkmale. Distinktive Merkmale wie [nasal], [plosiv] oder [stimmhaft] sind Teilkomponenten eines Phonems. So unterscheiden sich [b] und [p] nur in der Stimmhaftigkeit (Tab. 13.1). Diese Merkmale sind wichtige Bestandteile von vielen Modellen für das Erkennen und Produzieren von Wörtern. Die oben dargestellte Einteilung der Laute orientiert sich an der Sprachproduktion, aber die Laute oder Phoneme sind beim Verstehen gesproche-

Tab. 13.1 Einteilung der bekanntesten Konsonanten nach Art der Artikulation, Ort der Artikulation und Stimmhaftigkeit. Die Konsonanten sind mittels Symbolen des International Phonetic Alphabet (IPA) gekennzeichnet

			Ort der Artikulation			
	Labial		Alveolar		Velar	
Art der Artikulation	Stimmlos	Stimmhaft	Stimmlos	Stimmhaft	Stimmlos	Stimmhaft
Plosiv	p	b	t	d	k	g
Frikativ	f	v	s	z	χ	
			ʃ	ʒ		
Nasal		m		n		ŋ
Liquide				l		r

ner Sprache natürlich genauso wichtig. Sprachlaute sind die Bausteine von Wörtern, denen wir uns im folgenden Abschnitt zuwenden.

13.3 Wortgedächtnis: Was ist im Wortgedächtnis gespeichert und wie?

Unser gesamtes Wissen über die Wörter unserer Sprache, d. h. unser Wortschatz, ist im Langzeitgedächtnis gespeichert. Psycholinguisten sprechen vom **mentalen Lexikon**, das anders strukturiert ist als ein normales Wörterbuch. Erwachsene haben, je nach Bildungsgrad, zwischen 30.000 und 50.000 Einträge in ihrem mentalen Wörterbuch, die sie tatsächlich aktiv benutzen (Levelt 1989). Das passive Wissen über Wörter ist viel ausgedehnter. Für Studenten ergeben sich Schätzungen von 100.000 bis 200.000 Einträgen, wenn Wörter wie *gemein* und *Gemeinheit* als unterschiedliche Einträge gezählt werden (▶ Abschn. 13.3.2; Aitchison 1994). Die schiere Menge lässt vermuten, dass unser **mentales Lexikon** gut organisiert ist, sonst könnten wir Wörter nicht so schnell und mühelos erkennen, d. h. ihre Bedeutung erfassen. Empirische Schätzungen zufolge erkennen wir alle 200–250 ms ein Wort, also vier bis fünf Wörter pro Sekunde (Marslen-Wilson 1987). Bevor wir uns der faszinierenden Frage widmen, wie Wörter im kontinuierlichen Sprachfluss mit solcher Geschwindigkeit erkannt werden, wenden wir uns den Inhalten des mentalen Lexikons zu.

13.3.1 Die Form der Wörter: Lautliche und orthografische Beschreibung

Wie schon erwähnt, sind Wörter eigentlich beliebige Lautkombinationen für bestimmte Konzepte. Beim Verstehen gesprochener Sprache müssen wir über diese Sprachlaute einen Zugang zu den Informationen im mentalen Lexikon finden, so wie man mit einer Buchstabenreihenfolge im Wörterbuch nachschaut, ob es einen Eintrag gibt, und wenn ja, welche Bedeutung mit den Buchstaben verbunden ist. So wie Handschriften sich sehr unterscheiden, unterscheidet sich auch die Aussprache. Sprache ist variabel, wir reden laut oder leise, schnell oder langsam, sorgfältig oder schludrig, wir können Geflüstertes oder mit Akzent Gesprochenes verstehen.

Psycholinguisten nehmen an, dass für jedes Wort eine Beschreibung der lautlichen Zusammenstellung im mentalen Lexikon existiert. Diese Beschreibung nennen wir Wortform. Wortformen spezifizieren, wie Wörter sich anhören. Anders gesagt, sie legen die lautlichen Einheiten (z. B. Phoneme oder phonetische Eigenschaften) fest, aus denen ein Wort aufgebaut ist (▶ Abschn. 13.4.1). Je nach theoretischer Sichtweise können diese Beschreibungen wahrnehmungsnah (Klatt 1986), produktionsnah (Liberman und Mattingly 1986) oder relativ abstrakt (Gaskell 2003; Lahiri und Marslen-Wilson 1991; Lahiri und Reetz 2002; McClelland und Elman 1986) sein. Wortformen müssen jedenfalls genügend abstrakt und robust sein, um der Variabilität gesprochener Sprache gerecht zu werden. Möglicherweise ist bei jeder Wortform codiert, aus welchen **Silben** sie aufgebaut ist (z. B. drei Silben für *ka-pi-tän*). Wortformen sind beim Sprechen wie beim Verstehen gleichermaßen wichtig. Bevor der Sprechapparat aktiv werden kann, muss klar sein, welche Kombination von Sprachlauten produziert werden soll.

Welche Wortformen werden beim Lesen benutzt? Eine Möglichkeit wäre, dass die Buchstaben eines Wortes in lautliche Einheiten umgewandelt werden und anschließend auf die gleichen Wortformen, die beim Hören verwendet werden, zugegriffen wird. Unsere Fähigkeit, Buchstabenfolgen, die keine existierenden Wörter ergeben, auszusprechen (*Gemops*, *Anthaliber*), belegt, dass es direkte Verbindungen zwischen Buchstaben und Lauten gibt. Viele Forscher meinen, dass es zusätzlich separate orthografische Wortformen gibt, die sich beim Lesenlernen bilden (Daneman und Reingold 1995). Solche orthografische Wortformen ermöglichen schnelles Lesen. Beim Schreiben braucht man ebenfalls orthografische Wortformen, denn sonst wüsste man nicht, dass man *drive* und *live* ähnlich schreibt, obwohl sie sich lautlich sehr unterscheiden. Zudem können Wörter, die sich gleich anhören, in der Schrift unterschieden werden, wie in *leere Flaschen sind uns eine Lehre*. Auch Befunde von sprachgestörten Patienten mit einer Hirnläsion weisen auf getrennte Wortformen für Lesen/Schreiben und Hören/Sprechen hin (Caramazza 1997).

Tab. 13.2 Morphologische Klassen und Beispiele

Morphologische Klasse	Morphologische Einheit	Beispiel
Flexion	Wortstamm + Suffix, (Deklination, Konjugation)	merk-t, merk-en, ge-merk-t, neu-e, neu-em, Tisch-es, schlimm-er, dünn-sten
Derivation	Wortstamm + Suffix(e)	merk-bar, lieb-lich, Heiz-ung, Klar-heit, triumph-ieren, Sorg-sam-keit
Komposition	Wort(stamm) + Wortstamm	Merk+zettel, Gelb+körper, Tisch+tennis, Heiz-ung-s+wart-ung-s+ver-trag

13.3.2 Die interne Struktur der Wörter: Morphologie

Wir haben Beispiele wie *Nervenbündel* und *abkratzen* herangezogen, um zu zeigen, dass viele Wörter aus mehreren Teilen – den Morphemen – aufgebaut sind. Eine viel diskutierte und intensiv erforschte Frage ist, ob und wie sich diese morphologische Zusammenstellung im mentalen Lexikon widerspiegelt. Bevor wir uns dieser Debatte vor allem in ▶ Zur Vertiefung 13.2 zuwenden, sind einige Informationen über morphologische Komplexität wichtig.

Morphologisch komplexe Wörter sind aus mehreren Teilen aufgebaut, die entweder selbstständig vorkommen können (*Glück*) oder nicht (*-lich*). Selbstständig vorkommende Teile nennt man freie Morpheme, die anderen gebundene Morpheme. Gebundene Morpheme (**Affixe**) heißen Präfixe, wenn sie vorn stehen (*Unglück*), und Suffixe, wenn sie hinten stehen (*glücklich*). Die einfachste Form der morphologischen Komplexität heißt **Flexion**, wozu die Deklination von Substantiven und Adjektiven (*klein-er Hund, klein-e Hund-e*), die Konjugationen von Verben (*mach-te*, *ge-mach-t*), Diminutive (*Kind-chen*) sowie Komparativ und Superlativ (*schön-er*, *schön-st*) gezählt werden. Bei der Flexion werden an den **Wortstamm**, d. h. den Teil des Wortes, der übrig bleibt, wenn die Endungen entfernt sind (*hund, mach, schön*), gebundene Morpheme angehängt. Bei Flexion eines Wortes bleibt die **Wortklasse**, d. h. ob ein Wort ein Substantiv, Verb oder Adjektiv ist, gleich.

Eine zweite Form der morphologischen Komplexität ist die **Derivation**, mit der, im Unterschied zur Flexion, die Wortklasse eines Wortes oft verändert wird. Wenn aus *Fisch fischig* gebildet wird, ändert sich die Wortklasse von Substantiv zu Adjektiv/Adverb. Adjektive und Adverbien werden mit Suffixen wie *-ig*, *-bar*, *-sam*, *-lich* usw. gebildet; Substantive entstehen, wenn Morpheme wie *-heit* oder *-ung* einem Stamm hinzugefügt werden. Neue Verben bildet man mit *-en* oder, vor allem wenn das Ursprungswort aus dem romanischen Sprachraum stammt, mit *-ieren* (*gratulieren*, aber auch *verdünnisieren*). Manchmal wird dabei ein Präfix (*ver-* oder *be-)* vorangestellt. Wie zuvor bei der Flexion werden bei der Derivation freie und gebundene Morpheme kombiniert: *-heit* oder *-sam* können nicht alleine im Satz vorkommen. Derivation ist ein kreativer Prozess: Wird ein neues Wort benötigt, wird es gebildet, wie bei *skypen* (Tab. 13.2).

Ein weiterer morphologischer Prozess heißt Zusammenstellung oder Komposition, mit dem die im Deutschen sehr beliebten und häufig vorkommenden Komposita gebildet werden. Substantive werden mit Substantiven und Adjektive mit Adjektiven kombiniert (*Bücherwurm*, *Fußballfanatismus*, *goldgelb*), aber auch Kombinationen unterschiedlicher Wortklassen werden gebildet (*Backpulver*, *grasgrün*). Auch Verben können zusammengestellt sein: *weiterbringen*, *staubsaugen*. Anders als bei der Derivation können die Teile eines **Kompositums** selbstständig vorkommen. Da in Zusammenstellungen auch derivierte Wörter kombiniert werden können (*Ab-fall+be-rein-ig-ung*), sprechen Linguisten von einem späten Prozess der Wortbildung (Fleischer 1982). Um die Aussprache zu erleichtern, enthalten Komposita manchmal Fugenmorpheme wie -s oder -e (*Engel-s-geduld*). Auch Zusammenstellung ist ein sehr kreativer Prozess. Fast täglich kann man in der Zeitung neue Komposita lesen oder in Gesprächen auf Wörter wie *Wutbürger* oder *Parkschwein* stoßen.

Während die Bedeutungsänderung bei der Flexion minimal ist (*Hund* im Singular oder Plural ändert nichts an dem Konzept HUND), ist dies bei Derivation und Komposition anders. Das derivierte Wort *göttlich* bedeutet noch immer „zu Gott gehörend", wird aber meistens in der Bedeutung von „wunderbar" verwendet. Im Laufe der Zeit kann ein Bedeutungswandel eintreten, manchmal ändert sich die Bedeutung vollständig. Dies trifft in hohem Maße auf Komposita zu*: Himmelsschlüssel*, die Blume, ist wohl nicht der Schlüssel zum Himmel, ein *Frauenzimmer* ist kein Zimmer, und *umbringen* hat wenig mit der Bedeutung von „bringen" zu tun. Aber Experimente haben gezeigt, dass Komposita wie *Frauenzimmer* die Bedeutung der enthaltenen Wörter wie *Zimmer* aktivieren, trotz der Abwesenheit eines bedeutungsmäßigen Zusammenhangs zwischen den Wörtern (Zwitserlood 1994a).

13.3.3 Die strukturellen Merkmale der Wörter

In unserem mentalen Lexikon ist auch gespeichert, welche Funktion Wörter in der Struktur des Satzes einnehmen können. Die Wortklassenzugehörigkeit ist ein erstes strukturelles Merkmal, das für die Syntax des Satzes wichtig ist (▶ Kap. 14). Für jedes Wort ist codiert, ob es sich z. B. um ein Verb, ein Substantiv, ein Adjektiv/Adverb oder eine Präposition handelt. Auf dieser Ebene sind nicht einzelne Morpheme, sondern vollständige, komplexe Wörter wichtig. Wie oben erwähnt, ändert sich die Wortklasse bei der Derivation. Komplexe Wörter wie *fischig* oder *unglücklich* sind Adjektive, die darin enthaltenen Stammwörter *Fisch* und *Glück* aber Substantive. Außerdem sind das Genus (maskulin, feminin, neutrum) eines jeden Wortes sowie die sogenannte **Subkategorisierungsinformation** gespeichert. Letztere bestimmt den syntaktischen Rahmen, in dem Wörter eine bestimmte Rolle spielen. Verben wie *schlafen* und *schenken* unterscheiden sich

Zur Vertiefung 13.2

Aktuelle Fragen zur Morphologie

Flexion ist in vielen Sprachen meist regelmäßig. Kennt man den Stamm, können andere Formen gebildet werden, indem man Suffixe hinzufügt. Experimente mit Kindern und Erwachsenen haben gezeigt, dass dies sogar bei nicht existierenden Wörtern funktioniert. Wenn man sie auffordert, Sätze wie *Anne wumpt sehr gerne. Gestern hat sie 5 Stunden …* zu ergänzen, antworten sie fast immer mit *gewumpt* (Clahsen 1999). Natürlich gibt es in jeder Sprache Ausnahmen: unregelmäßige Plurale (*Kraut – Kräuter*) und starke Verben (*singen – sang – gesungen*). Kinder machen in solchen Fällen anfänglich Fehler, sie überregularisieren: *viel Kraute* oder *Mama hat das Lied gesingt*. Verbesserungen führen keineswegs dazu, dass die Kinder im Folgenden die richtige Form produzieren. Solche Ausnahmen müssen wohl mühsam gelernt und einzeln im mentalen Lexikon abgespeichert werden.

Wäre es aber für die regelmäßigen Fälle nicht viel günstiger, Suffixe während des Sprechens zum Stamm hinzuzufügen und während des Verstehens abzutrennen? Viele Forscher meinen, dass genau das zutrifft. Sie nehmen an, wir haben nur den Stamm als Wortform im mentalen Lexikon gespeichert und fügen nach Regeln die Suffixe hinzu oder trennen sie ab (Clahsen 1999; Levelt et al. 1999; Pinker 1999). Dies scheint wohl für den Plural im Englischen zuzutreffen, ist aber für deutsche Plurale umstritten. Was z. B. ist der regelmäßige (im Englischen oft *default* genannt) Plural des Deutschen? Einige Forscher meinen: die s-Form (*Radios*, *Mangos*), auch wenn sie sehr selten vorkommt (Clahsen 1999). Als Argumente führen sie u. a. an, dass der s-Plural immer dann benutzt wird, wenn Wörter neu dazukommen (*E-Mails*, *Pastas*), und dass alle Namen im Plural ein „s" bekommen (*die Böltes*, *zwei Pienies* – nicht: *Pienien*). Ähnlich verhält es sich bei den deutschen Verben: Ist *gewumpt* regelmäßig gebildet, aber *gewumpen* nicht? In der Forschung sind die deutschen Plurale und Verbformen weiterhin ein kontrovers debattiertes Thema (Krott und Lebib 2013; Smolka et al. 2007).

Generell unterscheiden sich Modelle des mentalen Lexikons in ihren Annahmen, wie morphologisch komplexe Wörter – ob flektiert, deriviert oder zusammengestellt – abgespeichert sind. In einigen Modellen sind komplexe und einfache Wörter im mentalen Lexikon gleich repräsentiert: *Stuhl* hat eine eigene Wortform, genauso wie *Rosenzüchterverein* (Butterworth 1983). Andere gehen jedoch davon aus, dass nur einzelne Morpheme gespeichert sind, die beim Sprechen zusammengefügt bzw. beim Hören oder Lesen zergliedert werden (Levelt et al. 1999; Taft 1985). Zwischenpositionen gibt es natürlich auch, z. B. komplexe Wörter mit eigenen Wortformen, die die interne morphologische Struktur codieren, wie in [Ab-fall] + [be-rein-ig-ung] (Feldman und Fowler 1987; Marslen-Wilson et al. 1994). Eine zweite Variante sind die Dual-Coding-Modelle, die eine Speicherung von kompletten Wortformen und von einzelnen Morphemen vorsehen (Schreuder und Baayen 1995).

Zusammenfassend wollen wir festhalten, dass viele Wörter aus mehreren Morphemen zusammengestellt sind. Freie Morpheme können auch selbstständig vorkommen, gebundene nicht. Wir unterscheiden drei Typen der morphologischen Komplexität: Flexion, Derivation und Komposition. Das Bilden von neuen Wörtern aus Morphemen ist ein häufiger und kreativer Prozess. Eine gegenwärtig erforschte Frage ist, ob komplexe Wörter als Ganzes im mentalen Lexikon vorliegen oder beim Sprechen zusammengesetzt und beim Sprachverstehen in Teile zerlegt werden.

hinsichtlich ihres Subkategorisierungsrahmens: *Schlafen* kann nur mit einem Substantiv, das die Rolle des Subjekts einnimmt, gepaart werden (*Hans schläft*), *schenken* hingegen kann mit einem Subjekt, einem direkten und indirekten Objekt kombiniert werden (*Hans schenkt seiner Frau einen Blumenstrauß*).

Wenn wir uns demnächst der Sprachproduktion zuwenden, wird uns ein Begriff begegnen, der bislang noch nicht besprochen wurde: das **Lemma**. Sprachproduktionsmodelle bezeichnen mit Lemma die strukturell-syntaktischen Merkmale eines Wortes. Jedes Wort, ob morphologisch komplex oder einfach, entspricht einem Lemma, in dem also die Wortklasse, das Genus, der Subkategorisierungsrahmen usw. enthalten sind. Für Informationen zur syntaktischen Verarbeitung wird auf ▶ Kap. 14 verwiesen.

13.3.4 Die Bedeutung der Wörter und das Problem der Mehrdeutigkeit

Wie bereits erwähnt, wird unser Wissen über die Bedeutung von Wörtern nicht als Teil des sprachlichen mentalen Lexikons angesehen. Das Wissen über Wortbedeutungen ist in Form von Konzepten und Beziehungen zwischen Konzepten im Langzeitgedächtnis gespeichert. Im Prinzip sind Konzepte unabhängig von der Sprache, wobei aber wichtig ist, dass die meisten Konzepte versprachlicht werden können. Gegenwärtig wird angenommen, dass konzeptuelles Wissen nicht nur in abstrakter Form vorliegt, sondern auch in Wahrnehmung und Handlung verortet ist. Diese Sicht wird *embodiment* oder *grounded cognition* genannt (Barsalou 2008). Dass zur Bedeutung von Wörtern auch sensomotorische Informationen gehören, wird durch die Aktivierung von Hirnarealen, die Handlungs- und Wahrnehmungsaspekte codieren, belegt (Amsel et al. 2014, Pulvermüller und Fadiga 2010).

Hinsichtlich der Bedeutung von Wörtern hat sich die psycholinguistische Forschung zudem ausführlich mit dem Problem der Mehrdeutigkeit befasst. Wörter wie *Bank* oder *Schloss* sind mehrdeutig: Die gleiche Wortform ist mit zwei völlig unterschiedlichen Konzepten verbunden. Experimente haben gezeigt, dass beim Hören solcher Wörter kurzfristig beide Bedeutungen zur Verfügung stehen, sogar dann, wenn der Satz, in dem das Wort gehört wird, eindeutig auf eine der beiden Bedeutungen hinweist, wie in *Franz saß auf der Bank* (Überblick in Swinney 1979; Tabossi 1988; Eddington und Tokowicz 2014). Bedeutungsunsicherheit ist aber nicht auf solche Fälle beschränkt. Auch Wörter wie *Kapitän* (der Fußballmannschaft?, eines Schiffes?), aber vor allem Verben sind sehr heterogen in ihrer Bedeutung. Was bedeutet z. B. *halten*? Wir haben Schwierigkeiten, die Bedeutung zu definieren, und ein Blick ins Wörterbuch genügt, um zu zeigen, warum. So werden in Wahrig (2012) 14 Bedeutungen von *halten* aufgeführt, u. a. *stützen*, *ergreifen*, *pflegen*, *besitzen*, *erfüllen*. In solchen Fällen kann nur über die Bedeutung der anderen Wörter im Satz auf die spezifische Bedeutung des Verbs geschlossen werden: *Er hält Kaninchen* (Drews et al. 1994; ◘ Tab. 13.3).

Zusammenfassend geht die Psycholinguistik davon aus, dass im mentalen Lexikon eine Fülle von Informationen über uns bekannte Wörter gespeichert ist. Wie hört sich ein Wort an, wie wird es geschrieben, aus welchen Teilen ist es zusammengesetzt, zu welcher Wortklasse gehört es? Wenn wir Wörter hören oder lesen, wenn wir sprechen oder schreiben, werden diese Informationen aktiviert. Beim Sprachverstehen werden zuerst Wortformen angesprochen, die, je nach theoretischer Position, aus einzelnen Morphemen oder aus morphologisch komplexen Wörtern beste-

Tab. 13.3 Konzeptuelle und sprachliche Informationen im Überblick: HEFTCHEN

Informationsart	Beispiel
Konzeptuell	Kleines Heft; siehe Heft; verwandt mit Buch, Lesen, Zeitschrift, Papier
Strukturell	Substantiv; Neutrum
Morphologisch	[heft] + [chen]
Phonologisch	/hɛftçən/
Orthografisch	Heftchen

hen. Als Nächstes kommen strukturelle Eigenschaften der Wörter wie Wortklasse und Genus zur Anwendung. Diese sind für die syntaktische Bearbeitung des Satzes wichtig, in dem das Wort vorkommt. Im letzten, aber natürlich wichtigsten Schritt, wird die mit den Wörtern verbundene Bedeutung aktiviert, damit wir in der Lage sind zu verstehen, was der Sprecher sagen möchte. Diese konzeptuelle Information liegt nicht (nur) in abstrakter Form vor, sondern enthält wahrnehmungs- und handlungsnahe Aspekte, die im Gehirn verteilt repräsentiert sind. Ein Sprecher geht in entgegengesetzter Reihenfolge vor: Konzepte werden aktiviert, syntaktische Eigenschaften von Wörtern werden ausgewählt, diese werden mit lautlicher Information gefüllt (Wortformen) und zum Schluss artikuliert. Ob diese Schritte nacheinander oder teilweise parallel ablaufen, wird in ▶ Abschn. 13.4.2 diskutiert. Das mentale Lexikon von Bilingualen wird in ▶ Zur Vertiefung 13.3 vorgestellt.

13.4 Worterkennung

Nun wenden wir uns der Frage zu, wie wir im kontinuierlichen Fluss von Sprachklängen Wörter entdecken und erkennen. Dabei ergeben sich zwei grundsätzliche Probleme: das Segmentierungsproblem und das Variabilitätsproblem. Da das Sprachsignal kontinuierlich ist und es keine Grenzen zwischen Wörtern, Lauten oder anderen relevanten Einheiten gibt, gilt die erste Frage der **Segmentierung** des Inputs: Wo hört ein Wort auf und fängt das nächste an? Das zweite Problem ist die Variabilität. Wie variabel Sprache sein kann, wird uns klar, wenn wir einer erkälteten, einer betrunkenen oder einer wütend schreienden Person zuhören. Nach diesen Fragen wenden wir uns dem Prozess der Worterkennung und den Modellen, die Worterkennung zu erklären versuchen, zu.

13.4.1 Das kontinuierliche und variable Sprachsignal

Scheinbar hören wir Wörter, wenn wir gesprochene Sprache hören. Ähnlich wie Leerzeichen geschriebene Wörter trennen, scheinen gesprochene Wörter durch Pausen voneinander getrennt zu sein. Dies ist jedoch ein Trugschluss. Es gibt keine systematischen Pausen, die anzeigen, wann ein Wort (oder Phonem) beginnt bzw. endet. Die Segmentierung gesprochener Sprache in einzelne Wörter ist ein automatischer, unbewusster Prozess. Als Hörer mögen auch Sie Schwierigkeiten haben den Satz *Mähenäbteheu?* zu verstehen. Nur wenige Hörer erkennen die richtigen Wörter beim ersten Hören und können die Antwort *Äbte mähen kein Heu, sondern Gras* geben. Dass Wortgrenzen nicht einfach im Sprachsignal zu erkennen sind, wird deutlich, wenn man eine unbekannte Sprache hört. Sie können erkennen, dass es sich um eine Sprache handelt – es sind keine Geräusche –, aber Wortgrenzen können Sie nicht entdecken (Abb. 13.4).

Die Segmentierung des kontinuierlichen Sprachsignals

Gesprochene Sprache ist akustisch gesehen nahezu kontinuierlich. Sie ist nicht in deutlich abgegrenzte Einheiten (Phoneme, Silben oder Wörter) unterteilt. Bisher ist es noch nicht gelungen, konstante (invariante) akustische Merkmale zu entdecken, die Anfänge oder Enden individueller Wörter markieren. Der Segmentierungsprozess, d. h. die Unterteilung des kontinuierlichen Sprachstroms in einzelne Wörter, wird außerdem dadurch erschwert, dass Wörter aus einer begrenzten Anzahl von Sprachlauten bzw. Silben produziert werden. Dadurch enthalten Wörter andere Wörter (*Du* in *Duden* oder *Raben* in *Graben*), oder es entstehen Wörter über Wortgrenzen (*Schund* in *Busch und …*). Eine bestimmte Segmentierung in Wörter garantiert daher nicht immer, dass diese auch tatsächlich produziert wurden. Dennoch „verstehen" wir Wörter und nicht einen kontinuierlichen Fluss von Sprache. Äußerst selten unterliegen wir Segmentierungsfehlern. Wie unterteilen wir also den Sprachfluss in einzelne Wörter?

Das Segmentierungsproblem kennt zwei Seiten. Zum einen muss der Hörer Einheiten im Sprachsignal entdecken, die den Zugriff auf das mentale Lexikon erlauben. Man nennt diese *prälexikale Zugriffseinheiten*. Zum anderen müssen diese Zugriffseinheiten auch so kategorisiert werden, dass sie den Zugriff auf das Lexikon ermöglichen. Aktuelle Modelle nehmen an, dass der Zugriff auf das mentale Lexikon über linguistisch definierte Einheiten erfolgt. Eine ganze Fülle von möglichen Einheiten wurde vorgeschlagen: phonetische Eigenschaften (Marslen-Wilson 1987), phonologische Eigenschaften (Lahiri und Marslen-Wilson 1991), Phoneme (Foss und Gernsbacher 1983; Pisoni und Luce 1987) oder Silben (Cutler et al. 1986; Zwitserlood 2004).

Im Folgenden werden im Wesentlichen Modelle, die das Segmentierungsproblem lösen können, beschrieben, die in der auditiven Worterkennungsforschung von Bedeutung sind. Modelle, die anhand akustischer Merkmale Wortgrenzen erkennen, wie das LAFS-Modell (LAFS = *lexical access from spectra*) von Klatt (1979, 1986), werden hier nicht aufgeführt.

In einigen Modellen löst sich das Segmentierungsproblem wie von selbst. Es handelt sich um Modelle, die beschreiben, wie wir gesprochene Wörter erkennen: das TRACE-Modell (McClelland und Elman 1986) und das Kohortenmodell (Marslen-Wilson 1993); beide werden weiter unten ausführlicher dargestellt. In diesen Modellen ergibt sich die Segmentierung kontinuierlicher Sprache als Konsequenz der Worterkennung. Der Beginn einer Äußerung bildet dabei immer den Anfang des ersten Wortes. Dieser Wortanfang, im Kohortenmodell die ersten 150–250 ms einer Äußerung, wird für den ersten lexikalen Zugriff verwendet. Sobald ein Wort erkannt wurde, kann dessen Ende „vorhergesagt" werden. Die auf das Ende folgende Sprachinformation muss einen neuen Wortanfang darstellen, mit der ein erneuter lexikaler Zugriff initiiert wird.

Es gibt jedoch auch Ansätze, in denen die Segmentierung unabhängig von der Worterkennung aufgrund von Informationen im Sprachsignal stattfindet. So schlagen Cutler und Norris (1988) mit ihrer metrischen Segmentierungsstrategie (MSS) für

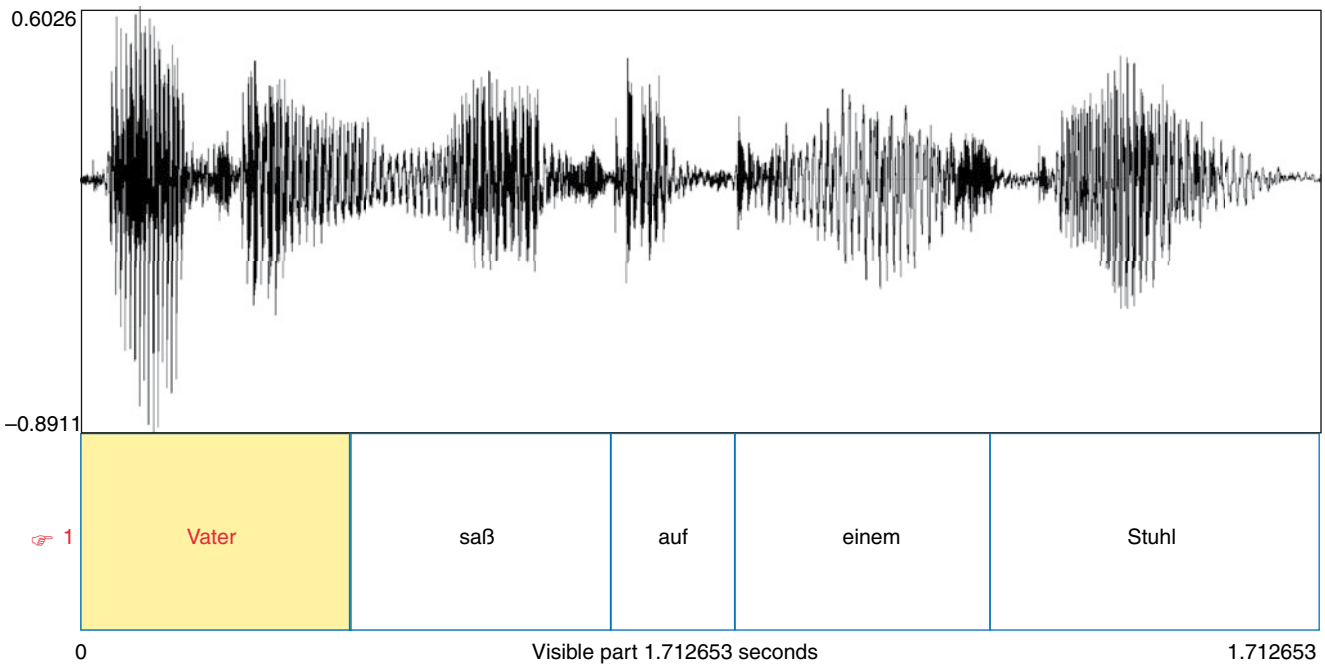


Abb. 13.4 Sprache ohne Pausen, Wörter ohne Grenzen. Weder Wörter noch Phoneme sind im Sprachsignal (Amplitude × Zeit) eindeutig zu erkennen. Auch in anderen Visualisierungen, z. B. Frequenz × Zeit, sind Wort- und Phonemgrenzen nur sehr schwer zu erkennen

das Englische vor, dass der Segmentierungsprozess durch Silben mit vollem Vokal initiiert wird (die erste Silbe von *woman* hat einen vollen Vokal, die zweite nicht). Eine Silbe mit einem vollen Vokal löst den lexikalen Zugriff aus; alle darauffolgenden Silben mit reduziertem Vokal werden als dazugehörig angesehen. Mittlerweile ist die MSS im Computermodell Shortlist implementiert worden (Norris 1994). Shortlist ist in der Lage, Wörter zu erkennen, die in anderen Wörtern enthalten sind. Außerdem erkennt es Wörter, die über Wortgrenzen hinausgehen. Das Modell zeigt die möglichen Alternativen auf, beendet den Segmentierungsprozess aber erst, wenn der gesamte Sprachfluss in Wörter aufgeteilt werden konnte und kein Rest übrig bleibt. Im Gegensatz zum Englischen wird der Segmentierungsprozess im Französischen wahrscheinlich mit jeder Silbe (also mit oder ohne vollem Vokal) eingeleitet (Dumay et al. 2002; ähnliche Befunde im Niederländischen in Zwitserlood et al. 1993). Französische Hörer, die englisch sprechen, segmentieren auch englische Sprache vor jeder Silbe und nicht nur bei vollen Vokalen (Cutler et al. 1986). Englischsprachige Hörer dagegen segmentieren, trotz exzellenter Französischkenntnisse, Französisch ebenso wie Englisch.

Die Segmentierung gesprochener Sprache scheint durch die Muttersprache bestimmt zu sein: Silben im Französischen, Katalanischen und Niederländischen, volle Vokale im Englischen, subsilbische Einheiten im Japanischen. Welche spezifischen Faktoren in der Phonologie einer Sprache die unterschiedlichen Segmentierungsstrategien hervorbringen, ist noch unklar (Sebastian-Gallés et al. 1992). Es ist bisher auch nicht entschieden, ob die Zugriffseinheiten gespeichert sind oder erst während der Verarbeitung Segmentierungsgrenzen berechnet werden (Zwitserlood 2004).

Das variable Sprachsignal

Die zweite Schwierigkeit bei der Sprachsegmentierung betrifft die Kategorisierung relevanter Einheiten – z. B. Phoneme. Auch dieses Problem ist keineswegs trivial. Menschen erkennen Wörter unabhängig von Geschlecht und Alter des Sprechenden. Ob ein Wort als Frage (*Du?*) oder Aussage (*Du!*) formuliert, geschrien, geflüstert oder mit vollem Mund gesprochen wurde, scheint die Worterkennung nicht wesentlich zu beeinflussen. Wir erkennen diese Variationen und berücksichtigen sie entsprechend (Repp und Liberman 1987).

Wenn wir längere Zeit reden, werden wir bestimmte Wörter wiederholt benutzen. Obwohl die physikalischen Eigenschaften dieser Realisierungen sehr verschieden sein können, verstehen Zuhörer alle Realisierungen (**Token**) dieser Wörter (**Typen**) gleich. Das Kategorisierungsproblem wird zusätzlich dadurch erschwert, dass Sprecher in Abhängigkeit vom Kontext Wortteile, meist Phoneme, weglassen (Elision: *gehen* [ge:ən] → [ge:n]), hinzufügen (Epenthese: *kommt, kommst* [kɔmt], [kɔmst] → [kɔmpt], [kɔmpst]) oder einander anpassen (Assimilation: *leben* [le:bən] → [le:bm]). Letztendlich sind diese Prozesse Ausdruck der Tatsache, dass Sprecher nicht ein Phonem nach dem anderen, sondern Phoneme vielmehr überlappend produzieren, also **koartikulieren**. Die Bewegungen der Artikulatoren (▶ Abschn. 13.2) spiegeln nicht nur das aktuell produzierte Phonem wider, sondern auch das vorherige und das folgende Phonem. Koartikulation führt dazu, dass akustische Eigenschaften und phonetische Kategorien einander nicht eindeutig zugeordnet werden können. Außerdem verhindert sie die Unterteilung des Sprachsignals in Einheiten, die eindeutig auf diskrete phonetische (oder phonologische) Segmente abgebildet werden können.

Wie kommt es dann, dass wir dennoch mit hoher Genauigkeit das beabsichtigte Wort erkennen? Zwar ist nicht alle Sprachinformation veränderlich – Vokale sind relativ invariant, Konsonanten verändern sich wesentlich stärker in Abhängigkeit vom Kontext; es gibt jedoch bis heute noch keine Antwort darauf, wie kontextabhängige veränderliche Sprachinformation auf konstante (invariante) gespeicherte Einheiten abgebildet wird.

Zur Vertiefung 13.3

Wie viele Lexika haben Bilinguale im Kopf?

Im mentalen Lexikon sind sprachspezifische Informationen enthalten: Wortformen, Lemmas, Morpheme. Wie sieht es denn im mentalen Lexikon eines Bilingualen aus? Forscher sind sich einig, dass jeder Sprecher nur ein einziges konzeptuelles Gedächtnis besitzt, in dem sein Wissen, das versprachlicht werden kann, gespeichert ist. Jedoch haben Sprachen ganz unterschiedliche Wortformen für diese Konzepte: *Hund*, *chien*, *dog*, *perro*. Jemand, der mehrsprachig ist, hat also mehrere Wortformen für ein Konzept. Diese Wortformen scheinen in separaten Wortformspeichern abgelegt zu sein (Gollan und Kroll 2001). Wenn sich die syntaktischen Eigenschaften der Wörter unterscheiden, z. B. wenn das Wort für *Tisch* (im Deutschen ein Maskulinum) im Französischen das feminine Geschlecht hat (*la table*), sollten sich die Lemmas auch unterscheiden.

Zurzeit wird eine Reihe von wichtigen Fragen zum Lexikon von Bilingualen bearbeitet (Grosjean und Li 2012). Wie ist der Kontakt zwischen den Wortformen? Ergeben sich Unterschiede, je nachdem in welchem Alter man eine zweite Sprache gelernt hat oder wie gut man die zweite Sprache beherrscht? Die Antwort lautet Ja. Wer seine zweite Sprache spät lernt und nicht sehr gut beherrscht, hat natürlich einen kleinen Wortschatz und direkte Verbindungen zwischen den Wortformen in der Muttersprache (diese wird immer L1, für *first language*, genannt) und den Wortformen der Zweitsprache (L2; ◘ Abb. 13.5).

Die Wortformen von L2 können anfänglich nur über die Verbindung zu den Wortformen in L1 mit dem konzeptuellen Wissen in Kontakt treten. Neuere Ergebnisse zeigen, dass Wortformen in der einen Sprache mit denen der anderen konkurrieren. Wenn ein deutsch-niederländischer Zweisprachiger das niederländische Wort *tand* (*Zahn*) liest, aktivieren die Buchstaben dieses Wortes ähnliche niederländische (*hand*, *wand*, *pand*) und deutsche Wörter (*Wand*, *Land*, *Rand*), die sich gegenseitig beeinflussen (van Heuven et al. 1998).

Mit zunehmender Beherrschung der Zweitsprache bilden sich direkte Verbindungen zwischen den Wortformen in L2 und den Konzepten. Bei Menschen, die fast perfekt zweisprachig sind, werden die Querverbindungen zwischen den Wortformen der beiden Sprachen schwächer. Übersetzen von der einen in die andere Sprache verläuft nicht mehr über Wortformen, sondern über Konzepte (Kroll und Stewart 1994; Potter et al. 1984).

◘ **Abb. 13.5** Entwicklung des bilingualen mentalen Lexikons. Mit zunehmender Beherrschung einer Fremdsprache erfolgt der Zugriff auf die Konzepte direkt und wird nicht durch die Übersetzung der Fremdsprache in die Muttersprache erreicht. *L1* = Muttersprache, *L2* = Zweitsprache

Zum einen wird vorgeschlagen, dass Hörer größere Einheiten anstelle von Phonemen (z. B. Silben) verwenden, wodurch sich die Varianz reduziert. Andere Vorschläge gehen davon aus, dass die veränderlichen Anteile ignoriert werden und nur die phonetisch wesentlichen Anteile aus dem Sprachsignal wiedergewonnen werden.

Die Variationen, die innerhalb einer Phonemkategorie auftreten, würden dann ignoriert (Repp 1984) oder in Richtung des Kategoriemittelpunktes angepasst (Kuhl 1991). Andererseits sind wir ebenfalls in der Lage, die feinen Unterschiede innerhalb einer Phonemkategorie wahrzunehmen (McMurray et al.2002). Insgesamt haben diese Befunde dazu geführt, diese Art der Variation nicht mehr als „Rauschen" im Sprachsignal zu verstehen, das ignoriert werden muss, sondern als Informationsquelle zu betrachten, die zur Sprachverarbeitung herangezogen werden kann.

▪ Der Umgang mit Abweichungen

Auch wenn man die Variation im Sprachsignal als Informationsquelle betrachtet, bleibt die Frage bestehen, wie stark Sprachsignal und lexikale Repräsentation voneinander abweichen dürfen. Einerseits zieht die Sprache relativ enge Grenzen hinsichtlich des Ausmaßes der Variation, da jede Sprache sogenannte minimale Paare besitzt. Ein minimales Paar ist aus Wörtern zusammengesetzt, die bis auf ein Phonem identisch sind (*mies* – *fies*), sich teilweise sogar nur in einer phonologischen Eigenschaft unterscheiden (*backen* – *packen*). Das Sprachverarbeitungssystem muss also solch feine Unterschiede auflösen können. Andererseits tritt die oben beschriebene Koartikulation auf, oder Sprachteile werden durch Umweltgeräusche verändert und überlagert. Die Frage, inwieweit Sprachsignal und lexikale Repräsentation voneinander abweichen dürfen, ist für den Abbildungsprozess vom Sprachsignal auf die lexikale Repräsentation sowie für die Art dieser Repräsentationen wichtig. Je nach Art und Aufbau der lexikalen Repräsentation kann eine bestimmte Variation im Sprachsignal eine Abweichung darstellen oder problemlos verarbeitet werden. Im Folgenden werden zwei Modelle beschrieben, die zur Beantwortung dieser Frage entwickelt wurden.

TRACE-Modell TRACE, ein interaktives Aktivierungsmodell zur Worterkennung, unterscheidet drei Ebenen: die phonologische Merkmalsebene, die Phonemebene und die Wortformebene (McClelland und Elman 1986). Auf jeder Ebene existieren *lokale Repräsentationen* (für *verteilte Repräsentationen*; s. unten), d. h., die **Aktivierung** einer Repräsentation bewirkt das Vorhanden-

sein dieser Einheit (phonologische Eigenschaft, Phonem, Wort). Bidirektionale, aktivierende Verbindungen leiten die Aktivierung zwischen den Ebenen weiter. Innerhalb einer Ebene existieren zwischen den Repräsentationen hemmende Verbindungen (laterale **Hemmung**). Ein Sprachsignal wird auf die erste Ebene abgebildet, die phonologische Eigenschaften (Merkmale wie nasal oder plosiv) enthält. Je besser ein bestimmtes Merkmal zum Sprachsignal passt, desto stärker wird es aktiviert. Die Aktivierung der Merkmale wird an die Phonemebene weitergeleitet. Je mehr Merkmale eine Phonemrepräsentation aktivieren, desto größer ist deren Aktivierung. Die Phonemeinheiten ihrerseits aktivieren alle Wortformeinheiten, in denen sie enthalten sind. Aktivierte Phonemeinheiten können auch die Verbindungen von der Merkmals- zur Phonemebene so verändern, dass Koartikulationseffekte kompensiert werden (Elman und McClelland 1986). Sobald eine Wortrepräsentation aktiviert wird, aktiviert sie rückwirkend (Top-down-Aktivierung) die in ihr enthaltenen Phoneme.

Im TRACE-Modell ist es möglich, dass Phoneme oder auch Wörter aktiviert werden, die nur teilweise zur Eingabe passen. So wird *backen* mitaktiviert, wenn die Eingabe *packen* ist. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Aktivierung der nur partiell passenden Einträge relativ gering ist (Frauenfelder und Peeters 1998). Dies kann man darauf zurückführen, dass der am besten passende Eintrag, *backen*, alle weniger gut passenden Einträge (*packen*, *lacken*, *hacken*) stärker hemmt, als er durch sie gehemmt wird. Der Aktivierungsvorteil, der durch die bessere Übereinstimmung mit der Eingabe (Bottom-up-Aktivierung) entsteht, wird durch die laterale Hemmung innerhalb der Ebenen weiter verstärkt. Dieses Zusammenspiel von Bottom-up-Aktivierung und lateraler Hemmung ermöglicht TRACE, minimale Paare zu unterscheiden.

Ist die Eingabe ein Pseudowort, z. B. *dacken (* markiert ein Pseudowort), werden in TRACE lexikale Repräsentationen, *backen*, *packen*, *Nacken* usw., im Ausmaß ihrer Übereinstimmung mit der Eingabe aktiviert. Es wird diejenige Repräsentation am stärksten aktiviert, die phonologisch am besten zur Eingabe passt. Jedoch reicht in TRACE die lexikale Aktivierung nicht in allen Fällen aus, um ein Wort zu erkennen (Goldman et al. 1998, zit. nach Frauenfelder und Peeters 1998).

Kohortenmodell Im Gegensatz zu TRACE erfordert das Kohortenmodell eine genaue Passung von Sprachsignal und lexikaler Repräsentation (Marslen-Wilson 1993). Im Kohortenmodell sind Wortformen als Bündel distinktiver, nichtredundanter und markierter phonologischer Merkmale gespeichert. Nichtredundant bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nur relevante Information gespeichert wird. So sind z. B. im Deutschen alle Nasale ([m], [n], [ŋ]) stimmhaft (▶ Abschn. 13.2, ◘ Abb. 13.2). Das Merkmal [stimmhaft] wird bei nasalen Phonemen nicht gespeichert, es ist vorhersagbar. Markierte, also nicht erschließbare, Information wird dagegen gespeichert. Im Fall der eben aufgeführten Nasale ist der Ort der Artikulation für [m], labial, und [ŋ], velar, spezifiziert. Der Artikulationsort für [n], alveolar, ist vorhersagbar und deswegen nicht spezifiziert. Der Vorteil dieser Repräsentationsform liegt darin, dass sie elegant mit phonologisch regelhaft veränderten Spracheingaben umgehen kann. Das Musterbeispiel für eine regelhafte Veränderung im Deutschen ist die Auslautverhärtung. Auslautverhärtung bezeichnet den Vorgang, bei dem stimmhafte Plosive (z. B. [b], [v], [d], [g]) im Auslaut oder vor stimmlosen Obstruenten stimmlos (z. B. [p], [f], [t], [k]) werden. *Rind* wird nicht etwa als /rind/ ausgesprochen, sondern als /rint/. In anderen Fällen wird der Laut stimmhaft, z. B. *Rinder* /rindər/.

Im Kohortenmodell werden phonetische Eigenschaften aus dem Sprachsignal extrahiert und auf unterspezifizierte lexikale Repräsentationen abgebildet. Im Modell stellt /rint/ keine Abweichung zur lexikalen Repräsentation *Rind* dar, da das regelhaft veränderte Merkmal nicht lexikal spezifiziert ist (Lahiri und Marslen-Wilson 1991; Gaskell und Marslen-Wilson 1996; widersprechende Befunde in Coenen et al. 2001; Gumnior et al. 2005). Weichen Sprachsignal und lexikale Repräsentation dagegen in markierten phonologischen Eigenschaften voneinander ab, führt dies zu einer Deaktivierung der nicht passenden lexikalen Repräsentationen (Marslen-Wilson und Zwitserlood 1989; Marslen-Wilson 1993). Das intendierte Wort soll jedoch über einen weiteren, zeitaufwendigen Reparaturprozess erkannt werden (Marslen-Wilson et al. 1996).

Ob es solch einen Reparaturprozess gibt, ist aber umstritten. Untersuchungen zeigten, dass markierte phonologische Abweichungen schnell kompensiert werden können (Bölte 1997, 2001; Bölte und Coenen 2002; Connine et al. 1993). Was letztendlich die unterschiedliche Befundlage verursacht, ist unklar.

Mittlerweile gibt es eine Weiterentwicklung des Kohortenmodells, eine implementierte Variante, die jedoch keine unterspezifizierten lexikalen Repräsentationen verwendet (Gaskell et al. 1995). Die Spracheingabe in Form phonetischer Eigenschaften wird auf eine semantische Ausgabeschicht und eine davon getrennte phonologische Ausgabeschicht abgebildet. Jede dieser semantischen und phonologischen Repräsentationen ist nicht, wie in TRACE, als einzelner Knoten in einem Netzwerk implementiert, sondern als das Muster der Aktivierung über viele Knoten (**verteilte Repräsentation**).

Obwohl die phonologischen Repräsentationen vollständig spezifiziert sind, kann diese Version des Kohortenmodells assimilierte Wörter erkennen. Wird ein assimiliertes Wort (z. B. [le:bm]) eingegeben, wird das Muster für die zugrunde liegende, nichtassimilierte phonologische Repräsentation aktiviert und nicht das Muster einer assimilierten Repräsentation. Man könnte vermuten, dass dies nur ein einfaches Assoziationsproblem ist. Dies ist jedoch nicht der Fall. Das Modell muss erkennen, dass bestimmte Phoneme in einem Wort assimiliert sein können, andere dagegen nicht. Folgendes Beispiel verdeutlicht das Problem. Das Wort *lebensmüde* wird oft mit einem assimilierten [m] ausgesprochen, /le:bmsmy:də/ statt /lebnsmy:də/. Während das erste [m] ein assimiliertes [n] ist, ist das zweite [m] nicht assimiliert. Ein einfacher Assoziationsmechanismus würde in beiden Fällen [m] zu [n] verändern. Die Fähigkeit dieser Version des Kohortenmodells, assimilierte und nichtassimilierte Phoneme zu unterscheiden, ist eine Folge seiner Lernfähigkeit. Das Modell hat gelernt, dass es Assimilationen nur dann kompensieren darf, wenn der lautliche Kontext eine Assimilation verursacht haben könnte.

Zusammenfassung Es ist deutlich geworden, dass unsere Fähigkeit, aus variablem und verrauschtem Input Wörter zu verstehen, immer noch nicht vollständig verstanden ist. Es gibt unter Forschern keinen Konsens darüber, wie Sprachsignale segmentiert, kategorisiert und mit den Inhalten in unserem mentalen Lexikon

in Verbindung gebracht werden. Genauso wenig ist man sich einig, wie die Repräsentationen, auf die das Signal abgebildet wird, strukturiert sind. Die vorgestellten Modelle befassen sich mit Worterkennung, mit der Abbildung eines schon kategorisierten Signals auf lexikale Repräsentationen und mit dem Wettbewerb zwischen lexikalen Kandidaten. Wie man zu diesem kategorisierten Signal kommt, bleibt allerdings unbeantwortet. So ist bei Modellen, die auf Computern implementiert sind, die Spracheingabe keine natürliche, sondern vorkategorisierte Sprache. Der Einfluss phonologisch begründeter Repräsentationen, z. B. im Kohortenmodell, ist zwar größer geworden, jedoch blieben auch diese Ansätze nicht unwidersprochen (Coenen et al. 2001). Mittlerweile werden Modelle des Sprachverstehens vermehrt aufgrund neurokognitiver Daten (EEG, MEG, fMRI; ▶ Abschn. 13.5) verfeinert und spezifiziert (Hickok und Poeppel 2007). Außerdem unterliegen natürlich auch phonologische Theorien dem wissenschaftlichen Fortschritt, und infolgedessen verändern sich die angenommenen Repräsentationsformen ebenfalls (Byrd 1992; Browman und Goldstein 1992).

13.4.2 Was passiert bei der Worterkennung?

Stellen wir die Frage, wie das kontinuierliche und variable Sprachsignal kategorisiert wird, für einen Moment in den Hintergrund. Wie schaffen Menschen es, aus ihrem Gedächtnis, in dem ca. 30.000 bis 50.000 aktiv benutzte Einträge gespeichert sind, die richtigen drei bis vier Wörter pro Sekunde zu finden? Der zugrunde liegende Mechanismus ist so effektiv, dass die Sprechgeschwindigkeit ohne Weiteres auf sieben Wörter pro Sekunde gesteigert werden kann. In normaler Konversation hat man also 250–300 ms Zeit für die Worterkennung, wenn man die Zeit zur Integration der Wortbedeutung in den Kontext (Satz, Geschichte) ignoriert. Im Folgenden werden wir erläutern, was die Worterkennung leistet, was ihre allgemeinen Funktionen sind, wie man sich die Struktur und die Zusammenarbeit der Teilprozesse vorstellt, in Modellen, die spezifisch für Worterkennung entwickelt wurden.

Modular oder interaktiv?

Der Worterkennungsprozess wird häufig in drei Teilprozesse unterteilt:

- Beim *lexikalen Zugriff* werden lexikale Zugriffseinheiten (die Wortformen aus ▶ Abschn. 13.3.1) aufgrund der Informationen im Sprachsignal aktiviert.
- Wenn mehrere Wortformen aktiviert werden, ist *lexikale Auswahl* notwendig: Es soll das eine Wort ausgewählt werden, das am besten zu der Eingabe passt.
- Die *Integration der Wortbedeutung* stellt eine Verbindung zwischen der Bedeutung von einzelnen Wörtern und der Bedeutung der gesamten Äußerung her.

Ein wichtiger Aspekt ist der Grad der Modularität dieser beteiligten Teilprozesse. Ein strikt modularer Teilprozess ist spezifisch für einen Teilbereich zuständig und arbeitet unabhängig von anderen Subsystemen. Modulare Subsysteme sind schnell, arbeiten automatisch und sind obligatorisch an der Verarbeitung beteiligt (Fodor 1983). Eine definierende Eigenschaft modularer Systeme ist, dass höhere Prozesse (weiter entfernt von der Eingabe) nicht die Verarbeitung niedriger Prozesse (nah am Input) beeinflussen können. In einem vollständig modularen System würde ein Prozess die akustisch-phonetische Analyse erledigen und ein weiterer die lexikale Auswahl. Das Ergebnis der lexikalen Auswahl würde an den syntaktischen Verarbeitungsprozess weitergereicht werden. Letztendlich würde dessen Ergebnis im Subsystem zur Generierung des Diskursmodells weiterverarbeitet.

Eine andere Struktur haben interaktive Modelle. Worterkennung ist hier das Ergebnis verschiedener Verarbeitungsprozesse, die gemeinsam eine plausible Interpretation der Eingabe erstellen. Syntaktische und semantische Informationen werden dabei eingesetzt, um lexikale Verarbeitung zu steuern.

Modelle der Worterkennung unterscheiden sich im Ausmaß der Modularität. Das Kohortenmodell und Shortlist sind (teilweise) modulare Modelle, da sie annehmen, dass weder die Analyse des sprachlichen Inputs noch der lexikale Zugriff von Informationen außerhalb der tatsächlichen Eingabe beeinflusst wird. Dieser Annahme widersprechen jedoch Befunde von Ganong (1980). Stellen Sie sich vor, Sie hören Sprachinformation, die einen mehrdeutigen Laut enthält, der zwischen /g/ und /k/ liegt (g/k-las). Wird die mehrdeutige Sprachinformation als /g/ interpretiert, formt sich das Wort *Glas*, interpretiert man es dagegen als /k/, „hört" man das Pseudowort *Klas*. In den Experimenten von Ganong tendierten die Versuchspersonen dazu, Wörter und nicht Pseudowörter zu „hören". Das Lexikon beeinflusst also die Interpretation der akustisch-phonetischen Analyse (ähnliche Ergebnisse in Samuel 1996).

Für das interaktive TRACE-Modell stellen solche Befunde kein Problem dar. Aufgrund der Top-down-Aktivierung von der Wort- auf die Phonemebene kann der Eintrag *Glas* die Aktivierung des Phonems /g/ erhöhen. Dies wiederum erhöht die Aktivierung von *Glas*, und letztendlich gewinnt *Glas* den Worterkennungsprozess. Mittlerweile existiert jedoch mit dem Worterkennungsmodell MERGE eine modulare Modellvorstellung, die diese Befunde ohne Top-down-Aktivierung erklären kann (Norris et al. 2000).

Seriell oder parallel?

Eine weitere relevante Frage bei der Worterkennung betrifft den Vergleich von Spracheingabe mit Wortformen. In älteren, hier nicht besprochenen Modellen wird angenommen, dass dieser Vergleichsprozess seriell verläuft (Forster 1979; Paap et al. 1982). Es wird jeweils immer nur eine lexikale Einheit mit dem Sprachsignal verglichen. Die Annahme eines streng seriellen Vergleichsprozesses ist letztendlich kaum haltbar. Wenn man den Umfang des mentalen Lexikons und die Geschwindigkeit der Worterkennung betrachtet, könnte jeder Vergleich vielleicht gerade mal 1 ms dauern (▶ Zur Vertiefung 13.5).

Das Feld der auditiven Worterkennung dominieren parallele Modelle wie das Kohortenmodell, Shortlist und TRACE, in denen zahlreiche gleichzeitig aktive Zugriffseinheiten mit dem Sprachsignal verglichen werden. Die Anzahl gleichzeitig aktivierter Einträge wird in allen drei Modellen letztendlich vom Grad der Übereinstimmung mit dem Sprachsignal bestimmt. Ein Faktor, der zumindest in TRACE und Shortlist die Anzahl

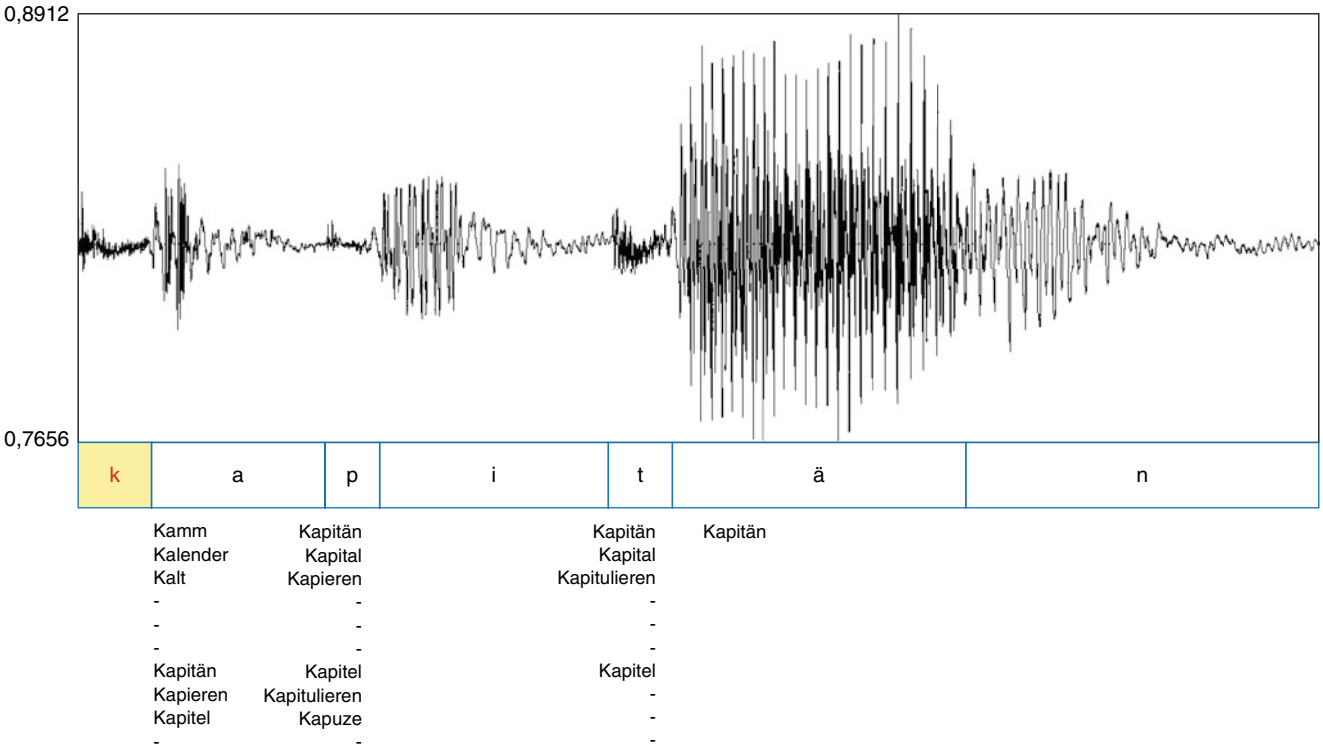


Abb. 13.6 Veränderung der Aktivierung in Abhängigkeit vom Sprachsignal. Die Beispiele stellen nur eine Auswahl der aktivierten Einträge dar. Je mehr vom Sprachsignal dargeboten wird, desto höher ist die Aktivierung einzelner lexikaler Repräsentationen. Auch hier sind Phonemgrenzen nicht eindeutig zu erkennen. Am besten entdeckt man noch Plosive wie /p/ und /t/. Plosiven geht eine Stille voran, der dann eine Explosion folgt. Der Übergang zum folgenden Vokal ist aber fließend

13

der gleichzeitig aktivierten Wortformen beeinflusst, ist die laterale Hemmung zwischen diesen Einheiten. Stärker aktivierte Wortformen hemmen schwächer aktivierte und reduzieren so die Anzahl aktivierter Einträge (Abb. 13.6).

Die überzeugendsten experimentellen Belege für parallele Aktivierung mehrerer lexikaler Einträge kommen aus der Ambiguitätsforschung (Swinney 1979) und aus Untersuchungen mit Wortfragmenten (Moss et al. 1997; Zwitserlood 1989). Swinney konnte zeigen, dass bei mehrdeutigen Wörtern zuerst alle Bedeutungen zur Verfügung stehen. So werden bei *Bank* die Bedeutungen „Geldinstitut" und „Sitzgelegenheit" aktiviert. Der Kontext, d. h. der semantische Inhalt des Satzes, in dem das mehrdeutige Wort gehört wird, hilft erst im Nachhinein bei der Auswahl der passenden Bedeutung. Ähnliches ergibt sich bei Mehrdeutigkeit des sprachlichen Inputs. Es hat sich gezeigt, dass ein Wortfragment wie /kapit/ gleichzeitig mehrere lexikale Zugriffseinheiten (*Kapitän*, *Kapital*, *Kapitol*, *Kapitel*) und die damit verbundenen Bedeutungen aktiviert (Zwitserlood 1989), auch wenn diese nicht zum Satzkontext passen. Anders als zuvor bei den Daten von Ganong (1980) hilft Information einer höheren Ebene (semantische Passung mit dem Kontext) nicht bei der Verarbeitung auf einer tieferen Ebene (lexikaler Zugriff). Diese Ergebnisse stützen das Kohortenmodell und Shortlist, die den Prozess des lexikalen Zugriffs als autonom ansehen. Die anschließenden Worterkennungsprozesse – Auswahl und Integration – können aber von Informationen aus dem Kontext mitbestimmt werden. Die Auswahl einer Wortform geschieht aufgrund des Aktivierungsgrades, der Passung zum Sprachsignal sowie zum Kontext, in dem ein Wort gehört wird.

Modelle, die eine parallele Aktivierung mehrerer Worteinträge zulassen, brauchen einen Selektionsmechanismus, damit nur ein Wort erkannt wird. Die Mechanismen für die **Selektion** einer lexikalen Repräsentation sind ebenso vielfältig wie die Modelle. Im Kohortenmodell muss eine kritische Differenz zwischen den zwei am höchsten aktivierten Wortformen erreicht werden. Wird diese Differenz überschritten, wird das Wort mit der höchsten Aktivierung erkannt (Marslen-Wilson 1987). In TRACE kann entweder der Eintrag mit dem absolut gesehen höchsten Aktivierungsgrad eine Schwelle überschreiten, oder die relative Aktivierung wird nach einer Regel berechnet, bei der auch die Aktivierung anderer Wortformen berücksichtigt wird (Luce's-Choice-Regel; Frauenfelder und Peeters 1998). Shortlist hat bislang kein explizites Kriterium, das den Moment der Selektion festlegt. Shortlist ist eher ein Modell zur Segmentierung gesprochener Sprache und weniger ein Modell der Worterkennung; bei TRACE und Kohort ist dies umgekehrt. Zumindest verhindert Shortlist, dass eine lexikale Repräsentation ausgewählt wird, solange ein Rest des Inputs nicht auf ein Wort abgebildet werden kann. Die gesamte Eingabe muss eindeutig interpretierbar sein (Norris et al. 1997). So würde *Busch und* nicht in *Bu* und *Schund* segmentiert, weil erkannt wird, dass *Bu* keine lexikale Repräsentation hat.

Bleibt nur die Frage, ob die Selektion eines Eintrags nur von der Passung mit dem Sprachsignal abhängt oder ob auch andere

Informationen, vor allem die Bedeutung des Satzes, in dem ein Wort steht, zur Worterkennung beitragen. Diese Frage hat eine lange Tradition (Bagley 1900; Miller et al. 1951). In zahllosen Experimenten wurde gezeigt, dass Wörter schneller erkannt werden, wenn sie in einem passenden Satzkontext vorkommen (Überblick in Zwitserlood 1999). Auch wenn in manchen Experimenten kontextuelle Information keinen Einfluss auf die anfängliche Aktivierung lexikaler Einträge hat, so scheint doch die Selektion eines Wortes aus der aktivierten Menge von der Passung mit dem Satzinhalt abzuhängen (Zwitserlood 1989, 1999). Selektion und Integration (die Abstimmung semantischer Merkmale des Wortes mit der Bedeutung des Satzes) wirken eng zusammen. Mittlerweile hat sich herausgestellt, dass auch die Aktivierung lexikaler Einträge nicht autonom abläuft. Wichtig ist, wie vorhersagbar ein Wort aufgrund der Kontextinformation ist. Wenn Wörter sehr vorhersagbar sind, wird ein früher Einfluss der kontextuellen Passung festgestellt (van Berkum et al. 2005). Diese frühen Interaktionen zwischen Worterkennung und kontextueller Passung, für die es vermehrt Evidenz aus Experimenten mit evozierten Potenzialen (EEG, MEG; ▶ Abschn. 13.5) gibt, werden mit den Begriffen *prediction* (Vorhersage), *expectancy* (Erwartung) und *anticipation* (Vorwegnahme) gekennzeichnet (Überblick in Kutas et al. 2014).

Festzuhalten ist, dass beim Zugriff auf das mentale Lexikon mehrere Wortformen gleichzeitig aktiviert werden. Lexikaler Zugriff ist ein schneller Prozess, der schon aufgrund von Teilinformation aus dem Input gestartet wird und der, je nach Vorhersagewert des Kontexts, in dem Wörter gehört werden, sich nur auf erwartete Wortformen beschränken könnte.

13.4.3 Vom Buchstaben zur Bedeutung

Die Unterteilung in lexikalen Zugriff, Selektion und Integration in den Kontext findet sich auch in Modellen der visuellen Worterkennung. Ebenso finden sich Fragen, ob höhere Verarbeitungsebenen tiefere beeinflussen. Die offensichtlichsten Unterschiede zur auditiven Worterkennung liegen aber in der Art und Weise der Eingabe:

- Man sieht deutlich Wort- und auch Buchstabengrenzen, zumindest in Druckschrift.
- Die Information wird quasi gleichzeitig zur Verfügung gestellt und nicht Teil für Teil verteilt über einen Zeitraum wie bei gesprochener Sprache – es sei denn, es handelt sich um sehr lange Wörter, die mit mehreren Fixationen gelesen werden.

Dennoch gibt es Berührungspunkte zwischen auditiver und visueller Worterkennung. Leser sind zuallererst Sprecher und Hörer ihrer Sprache. Beim Lesenlernen knüpft man Verbindungen zwischen geschriebenen Symbolen und phonologischen Äquivalenten, um so Zugriff auf die Bedeutung zu erhalten. Eine wichtige Frage der visuellen Worterkennung, die im Folgenden besprochen wird, ist daher, inwieweit phonologische Repräsentationen auch beim geübten Lesen beteiligt sind.

Die Übersetzung orthografischer in phonologische Repräsentationen erfordert Regeln, sogenannte Graphem-zu-Phonem-Regeln. **Grapheme** sind die distinktiven Einheiten eines Schriftsystems. Im Idealfall symbolisieren sie Phoneme. Komplexität und Anzahl der Graphem-zu-Phonem-Regeln variieren von Sprache zu Sprache. Serbokroatisch und Finnisch haben eine eindeutige Zuordnung von Graphemen zu Phonemen. Im Vergleich dazu ist die Zuordnung im Englischen schwieriger und wird im Hebräischen noch uneindeutiger (Frost et al. 1987).

Da, zumindest im Englischen, nicht alle Wörter durch Graphem-zu-Phonem Regeln übersetzt werden können, muss es einen weiteren (orthografischen) Weg zum mentalen Lexikon geben. Coltheart (1978) schlägt in seinem Zwei-Wege-Modell (*dual route model*) der Worterkennung zwei Pfade zum Erkennen geschriebener Wörter vor. Ein Weg führt über orthografische Repräsentationen des Gesamtwortes zu lexikalen Informationen. Auf dem anderen Weg werden Grapheme in Phoneme übersetzt, und erst danach erfolgt der Zugriff auf das mentale Lexikon. Je schlechter die Graphem-zu-Phonem-Korrespondenz ist, desto mehr verstärkt sich der Einfluss des orthografischen (direkten) Weges zum Lexikon.

Wenn es einen direkten Weg gibt, kann man sich fragen, warum man überhaupt einen indirekten Weg mit Graphem-zu-Phonem-Übersetzung braucht. Sprechen Sie doch einmal das Pseudowort *Tühmerdein* aus. Sie können das ohne Probleme. Die indirekte Route „übersetzt" die Grapheme in die entsprechenden Phoneme und versetzt Sie so in die Lage, das Pseudowort auszusprechen. Die indirekte Route dient hauptsächlich zur Aussprache neuer, unbekannter, aber regelhafter Wörter.

Starke Belege für die Existenz einer indirekten Route finden sich bei dyslektischen Patienten, bei denen eine doppelte Dissoziation zwischen den beiden Wegen vorliegt. Patienten mit sogenannter Oberflächendyslexie sprechen Wörter mit irregulärer Graphem-zu-Phonem-Korrespondenz regulär aus (Shallice et al. 1983). Deutsche Oberflächendyslektiker würden *Jeep* als /je:p/ aussprechen. Patienten mit phonologischer **Dyslexie** sind dagegen in der Lage, irreguläre Wörter und häufig vorkommende Wörter auszusprechen. Jedoch scheitern sie darin, Pseudowörter auszusprechen. Sie können also nicht *Dasse* laut vorlesen: Ihre Graphem-zu-Phonem-Route scheint teilweise unterbrochen zu sein (Beschreibung von Sprachstörungen in ▶ Abschn. 13.7.1). Trotz dieser Belege werden die Notwendigkeit und die genaue Rolle der indirekten Route noch immer kontrovers diskutiert (Leinenger 2014). Zudem gibt es implementierte konnektionistische Modelle, die ohne explizite Graphem-zu-Phonem-Regeln zahlreiche Befunde, die als Beleg für Zwei-Wege-Modelle gelten, simulieren können (Seidenberg und McClelland 1989; Plaut 1999).

Zusammenfassend scheint die eigentliche Worterkennung beim Lesen und Hören, trotz Unterschiede im Input, ähnlich zu verlaufen. In welchem Umfang und unter welchen Umständen der graphemische Input in eine phonologische Repräsentation überführt wird, oder orthografische und phonologische Wortformen aktiviert werden, ist noch nicht entschieden (Carreiras et al. 2009; Newman et al. 2012).

13.5 Was passiert im Gehirn bei der Worterkennung?

Kognitive Funktionen wie Worterkennung und mentale Repräsentationen sind natürlich alle im Gehirn verankert. Es fällt schwer, kognitive Vorgänge zu verstehen, ohne die Funktion des Gehirns zu verstehen. Wie schon aufgezeigt, gibt es zahlreiche Modellvorstellungen dazu, wie ein und dieselbe kognitive Funktion ausgeführt werden kann. In ▶ Abschn. 13.4.3 wurde gezeigt, wie Daten von hirngeschädigten Patienten wichtige Hinweise für Modelle und Theorien liefern. Auch neurobiologische Daten können helfen, kognitive Theorien weiterzuentwickeln. Andererseits sollte man nicht glauben, dass wir automatisch kognitive Prozesse verstehen würden, wenn wir in der Lage wären, das Gehirn neurobiologisch zu beschreiben (Sejnowski und Churchland 1989).

In den letzten Jahrzehnten ermöglichten es bildgebende Verfahren wie PET oder fMRI, kognitive Prozesse mit den zugrunde liegenden neuronalen Strukturen zu verbinden (▶ Kap. 2). Diesen Forschungsansatz fasst man unter dem Begriff *Kognitive Neurowissenschaften* zusammen (Kosslyn 1994). Sowohl PET als auch fMRI mangelt es jedoch an der zeitlichen Auflösung, an der psycholinguistische Forschung interessiert ist. Hier spielen evozierte Potenziale (ereigniskorrelierte Potenziale [EKPs]; *event related potentials* [ERPs]), gewonnen aus dem Elektroencephalogramm (EEG), ihre Stärken aus, da diese Methoden eine zeitliche Auflösung gewähren, die es erlaubt, kognitive Prozesse zu untersuchen.

Alle Aktivität von Neuronen beruht auf elektrochemischen Prozessen. Die dabei entstehenden Ströme werden bei EKPs gemessen (Berger 1929). EKPs sind alle elektrocorticalen Potenziale, die vor, während und nach einem sensorischen, motorischen oder psychischen Ereignis im EEG messbar sind. Relevant für die kognitiven Prozesse der Sprachverarbeitung sind die N400, die LAN und die P600. Die N400 ist eine Negativierung des EEG-Potenzials, die 400 ms nach Anfang des Stimuluswortes am ausgeprägtesten ist und semantische Integrationsprozesse widerspiegelt. Die LAN ist eine frühe links-anteriore Komponente, die auf Wortklasseninformation reagiert. Die P600 (oder SPS, *syntactic positive shift*) beobachtet man ca. 600 ms nach Anfang des Wortes und korreliert mit syntaktischer Verarbeitung (Friederici 1999; Kutas und DeLong 2008).

Ähnliche Komponenten findet man bei der Magnetencephalografie (MEG), einer Methode mit der nicht hirnelektrische, sondern hirnmagnetische Aktivität gemessen wird. Die durch die neuronale Aktivität hervorgerufenen elektrischen Ströme erzeugen winzige magnetische Felder (<1 Femtotesla), die ein Vielfaches kleiner als das Erdmagnetfeld sind. Das Problem der geringen Stärke wird, wie bei EKP-Messungen, durch Mittelung zahlreicher Messungen überwunden. Die MEG ist besonders gut geeignet, Quellen elektrischer Aktivität aufzuspüren.

Wie können EKP-Experimente Informationen liefern, die den Daten aus Reaktionszeitstudien etwas Wesentliches hinzufügen? In ▶ Zur Vertiefung 13.4 findet sich ein Beispiel aus dem Bereich des semantischen Priming. Kurz gefasst: Wenn ein Prime-Wort (*Hund*) mit dem Zielwort (*Katze*) verwandt ist, sind die Reaktionen auf das Zielwort immer schneller als bei einem semantisch nicht verwandten Prime-Wort. Verschiedene Mechanismen wie automatische Ausbreitung von Aktivierung, semantischer Abgleich oder Integration oder erwartungsbasierte Vorhersage werden für das Zustandekommen von Priming-Effekten vorgeschlagen (Neely 1991). Meistens wird angenommen, dass die automatische Aktivierungsausbreitung schnell verläuft, semantischer Abgleich und Integration aber relativ viel Zeit brauchen. Es müssen semantische Repräsentationen aufgebaut werden, die dann auch noch miteinander verglichen werden müssen. Chwilla et al. (1998) konnten jedoch zeigen, dass semantische Integrationsprozesse unmittelbar mit der Darbietung des Zielwortes einsetzen. Unabhängig von der zeitlichen Trennung von Prime und Target fanden sie N400-Effekte. Da N400-Effekte hauptsächlich die Aktivität semantischer Integrationsprozesse widerspiegeln, konnte gefolgert werden, dass semantische Abgleichprozesse genauso früh einsetzen wie die automatische Ausbreitung von Aktivierung. Sie treten anscheinend ebenso obligatorisch und automatisch auf. Ähnlich konnte Hagoort (2003) zeigen, dass semantische und syntaktische Kontextinformationen bei der Integration gleichzeitig zur Verfügung stehen. Der Grund für solch schnell operierende Integrationsprozesse könnte darin liegen, dass das Worterkennungssystem immer versucht, Bedeutungen zu erkennen und diese so schnell wie möglich in eine sinnvolle Beziehung zueinander zu setzen.

13.6 Wortproduktion

Nachdem wir uns mit den Inhalten des mentalen Lexikons, mit den Tücken des gesprochenen Sprachsignals und mit der schnellen und effizienten Worterkennung beschäftigt haben, wenden wir uns wiederum dem Sprechen zu. Diesmal geht es nicht um die Artikulatoren, sondern um den Weg vom Konzept zur Wortform. Im Folgenden wird beschrieben, wie ein Gedanke in Sprache umgesetzt wird, welche Prozesse dabei ablaufen und wie diese untereinander zeitlich verschaltet sind. Die Serialität oder Parallelität der Prozesse wird wieder eine Rolle spielen.

Wie schon angedeutet, fließen die Informationen beim Sprechen entgegengesetzt der Richtung beim Sprachverstehen. Bevor wir sprechen, muss klar sein, *was* wir sagen wollen. In den Modellen der Sprachproduktion, an die wir uns bei der Beschreibung der Prozesse der Wortproduktion anlehnen, werden drei globale Funktionen unterschieden: **Konzeptualisieren**, Formulieren (syntaktisches und phonologisches Codieren) und Artikulieren (Garrett 1988; Levelt 1989; Levelt et al. 1999; alternative Modelle in ▶ Zur Vertiefung 13.5). Die Grundlage für die Einteilung in funktionale Stufen bildeten jahrzehntelang Versprecher. Sprachproduktion verläuft nicht immer reibungslos: Sprecher machen manchmal Fehler. Diese Versprecher wurden gesammelt und ausführlich analysiert (Fromkin 1971; Leuninger 1993). Es zeigte sich, dass Versprecher auf unterschiedlichen Verarbeitungsstufen entstehen: Manche sind eher konzeptuell (*Das ist das Gelbe in Grün; Die Sonne schneit*), manche weisen auf Vertauschungen von Positionen in der syntaktischen Satzstruktur hin (*In der Fische stank es nach Küche*). Andere Versprecher zeigen einen Austausch von Morphemen (*Langarbeitszeitlose*), und ein weiterer Fehlertyp stammt wohl von einer Ebene, auf der Laute vertauscht werden können (*geschnügelt und gebiegelt*;

Zur Vertiefung 13.4

Aktuelle Forschungsparadigmen

Die psycholinguistische Forschung zur Worterkennung und -produktion lebt von der Entwicklung von Paradigmen und Aufgaben. Bei den meisten sollen die Versuchsteilnehmer eine einfache Aufgabe ausführen, z. B. ein Bild benennen, ein Wort aussprechen (**Benennungsaufgabe**) oder entscheiden, ob eine Buchstabenreihenfolge ein Wort ihrer Sprache ist oder nicht (*Buch*: ja, *Bich*: nein). Letztere Aufgabe heißt **lexikale Entscheidung**. Es wird die Zeit gemessen, die Versuchspersonen für die Aufgabe brauchen (Reaktionszeit), und die Anzahl der fehlerhaften Antworten gezählt; zusätzlich können evozierte Hirnpotenziale abgeleitet werden.

Priming-Paradigma

Eine oft angewandte Methode, die mit unterschiedlichsten Aufgaben verbunden wird, ist das **Priming-Paradigma**. Unter Priming (*to prime* = jemanden vorher informieren) versteht man in der Psychologie, dass die Reaktionszeit (Fehler, Identifikationsrate) auf einen Stimulus (Zielreiz, *target*), auf den die Versuchsperson reagieren soll, durch einen vorangegangenen Stimulus (Vor- bzw. Bahnungsreiz, *prime*) beeinflusst wird (Abb. 13.7).

Ein Durchgang in einem Priming-Experiment besteht aus mindestens zwei Ereignissen: Zuerst wird ein Prime kurz dargeboten, auf den die Teilnehmer nicht reagieren müssen. Dann erscheint der Target, auf den eine Reaktion erfolgen soll. Es gibt jedoch auch Situationen, in denen Prime und Target zeitgleich, zeitlich überlappend oder durch mehrere Durchgänge voneinander getrennt dargeboten werden. Prime und Target können in derselben Modalität (unimodal) oder in unterschiedlichen Modalitäten (crossmodal) präsentiert werden. Prime und Target stehen entweder in einer relevanten Beziehung zueinander (verwandte Bedingung), oder sie sind nicht verwandt (Kontrollbedingung). Es gibt orthografische, phonetische, phonologische, semantische, morphologische und syntaktische Priming-Experimente (Tab. 13.4). Der Priming-Effekt wird typischerweise bestimmt, indem man die Reaktionszeit der verwandten Bedingung von der Reaktionszeit der unverwandten Bedingung abzieht. Die Differenz ist der Priming-Effekt. Ist die Differenz positiv, spricht man von Erleichterung (*facilitation*), ist sie negativ, von Hemmung (*inhibition*). Die Mechanismen, die Priming-Effekten zugrunde liegen, sind noch unklar. Für semantisches Priming werden häufig drei verschiedene Mechanismen herangezogen: automatische Ausbreitung von Aktivierung von verwandten Konzepten, Erwartungen, die Versuchsteilnehmer generieren und zu Vorhersagen führen, und semantischer Abgleich von Vor- und Zielreiz. Die unterschiedlichen Erklärungsansätze für semantisches Priming finden sich in Chwilla et al. (1998) sowie Neely (1991). Wie semantisches Priming durch ein konnektionistisches Modell simuliert werden kann, zeigen Cree et al. (1999). Ein Vergleich von semantischem und phonologischem Priming findet sich bei Bölte und Coenen (2002). Grosjean und Frauenfelder (1997) bieten eine Übersicht über viele Paradigmen, die zur Untersuchung der auditiven Worterkennung eingesetzt werden.

Bild-Wort-Interferenzparadigma

Zahlreiche Befunde der Sprachproduktionsforschung sind mithilfe des **Bild-Wort-Interferenzparadigmas**, einer Variante des Priming-Paradigmas, gewonnen worden. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es dabei, einzelne Bilder zu benennen, die als Zielreize dienen. Der Vorreiz, hier fast immer Ablenker (*distractor*) genannt, ist ein gesprochenes oder gedrucktes Wort. Häufig wird der zeitliche Abstand, die Asynchronie, zwischen der Darbietung des Ablenkwortes und des Bildes variiert (SOA, *stimulus onset asynchrony*). Es hat sich gezeigt, dass phonologische und morphologische Verwandtschaft zwischen Wort und Bild die Bildbenennung erleichtert (Lüttman et al. 2011; Zwitserlood et al. 2000, 2002). Bestimmte semantische Beziehungen hingegen verlangsamen die Bildbenennung (Piai et al. 2011; Schriefers et al. 1990; Abb. 13.8).

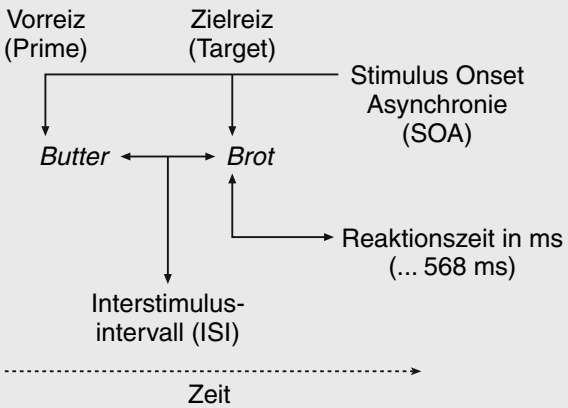


Abb. 13.7 Visuelles Priming. Interstimulusintervall bezeichnet das Zeitintervall zwischen Prime und Target; SOA bezeichnet das Zeitintervall zwischen Prime- und Target-Beginn. Üblicherweise misst man die Reaktionszeit von Beginn der Target-Präsentation an

Tab. 13.4 Beispiele verschieden verwandter Prime-Target-Paare

Art der Beziehung	Vorreiz	Zielreiz
Semantisch	Butter	Brot
Syntaktisch	Auf dem	Schiff
Morphologisch	Himmelsschlüssel	Schlüssel
Orthografisch	Keller	Kelle
Phonologisch	Leere	Lehre

Zur Vertiefung 13.4 (*Fortsetzung*)

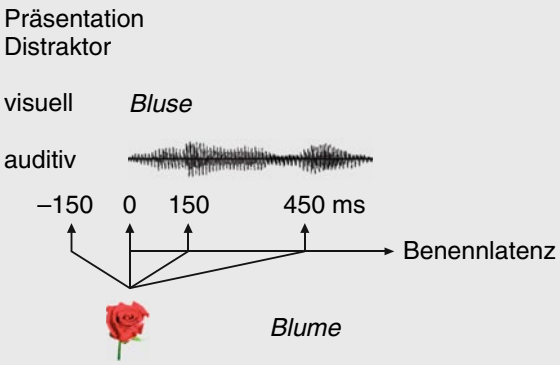


Abb. 13.8 Bild-Wort-Interferenzparadigma

alle Beispiele aus Leuninger 1993). Nachdem über mehrere Jahrzehnte Versprecher als empirische Evidenz für Sprachproduktionsmodelle gedient haben, werden heute überwiegend Daten aus Experimenten verwendet (▶ Zur Vertiefung 13.4).

Das Konzeptualisieren ist ein nichtsprachlicher Prozess, in dem Konzepte vom Langzeitgedächtnis in das Kurzzeitgedächtnis überführt und bearbeitet werden. Formulieren und Artikulieren hingegen sind sprachliche Prozesse. Konzeptualisieren bezeichnet die Erstellung einer vorsprachlichen Botschaft. Die Einheiten der vorsprachlichen Botschaft sind sogenannte **lexikale Konzepte**, für die es – auf der sprachlichen Ebene – Wörter gibt. Beim Konzeptualisieren werden diese lexikalen Konzepte in eine Reihenfolge gebracht, die die Abfolge der Wörter in der syntaktischen Struktur der Äußerung mitbestimmt (Linearisierung). Die Funktion des **Formulators** ist es, diese syntaktische Struktur zu erstellen (▶ Kap. 14) und die Einheiten dieser Struktur in eine lautliche Form zu bringen (phonologische Codierung). Der Artikulator ist für die Umsetzung der phonologischen Form der Wörter in einen artikulatorischen Plan zuständig. Dieser wird vom Sprechapparat (▶ Abschn. 13.2) ausgeführt. Da wir uns hier mit der Produktion einzelner Wörter beschäftigen, beschränken wir uns auf die Umsetzung der lexikalen Konzepte in sprachliche Einheiten. Für eine ausführliche Darstellung der Konzeptualisierungsprozesse wird auf Levelt (1989), für die Erstellung der syntaktischen Struktur auf ▶ Kap. 14 verwiesen.

13.6.1 Umsetzung von lexikalen Konzepten in Wörter

Das Sprechen der Wörter, aus denen eine Äußerung besteht, erfolgt normalerweise schnell und mühelos. Trotzdem erbringt unser Sprachproduktionssystem auch bei einer ganz einfachen Äußerung wie „Kaffee" als Antwort auf die Frage, was man trinken möchte, eine beachtliche Leistung. Zuerst muss auf der konzeptuellen Ebene entschieden werden, was wir nun tatsächlich trinken möchten: Tee, Wein, Saft oder doch lieber Kaffee? Wenn wir uns für Kaffee entschieden haben, wird das lexikale Konzept KAFFEE bereitgestellt. Dieses lexikale Konzept ist mit mehreren verwandten lexikalen Konzepten verbunden, u. a. mit BOHNE, TEE, SAFT, MILCH, ZUCKER und SCHWARZ. Wichtig ist, dass verwandte Konzepte sich gegenseitig aktivieren.

Das lexikale Konzept KAFFEE aktiviert auf der sprachlichen Ebene seine syntaktischen Merkmale, d. h. sein Lemma. Lemmas codieren strukturelle, syntaktische Informationen, die für die Position und Funktion der Wörter im Satz notwendig sind (▶ Kap. 14). Sie enthalten keine semantischen Informationen – diese sind im konzeptuellen Gedächtnis gespeichert –, haben aber eine direkte Verbindung zu den lexikalen Konzepten (Levelt 1989; Levelt et al. 1999). Lemmas haben außerdem sogenannte diakritische Parameter, die, wie wir unten sehen werden, für die morphologische Struktur eines Wortes wichtig sind.

Wenn nun das lexikale Konzept KAFFEE bereitgestellt ist und gleichzeitig auch verwandte lexikale Konzepte aktiv sind (BOHNE, ZUCKER usw.), führt dies aber automatisch zu einer teilweisen Aktivierung der Lemmas dieser Konzepte, obwohl die Konzepte nicht versprachlicht werden sollen! Das Ergebnis ist eine Konkurrenz zwischen aktivierten Lemmas, die entschieden werden muss, da ja nur ein Wort gesprochen werden soll. Für diese Konkurrenz gibt es mittlerweile eine Fülle von Belegen, die mit dem Bild-Wort-Interferenzparadigma (▶ Zur Vertiefung 13.4) erzielt wurden. Dabei benennen Versuchspersonen Bilder einfacher Objekte (z. B. eines Tisches) und hören oder lesen kurz vor der Bildbenennung Ablenkwörter (z. B. *Stuhl*). Wenn, wie in dem Beispiel, die Konzepte von Bild und Wort aus derselben semantischen Kategorie stammen, dauert die Bildbenennung länger, als wenn ein nichtverwandtes Wort (*Milch*) dargeboten wird. Gehörte oder gelesene Wörter aktivieren immer ihre Lemmas (und Konzepte). Wenn das Ablenkwort mit dem Bild kategoriell verwandt ist, erschwert dessen Aktivierung die Auswahl des für die Bildbenennung notwendigen TISCH-Lemmas (La Heij 1988; Schriefers et al. 1990; Roelofs 1992).

Die Konkurrenz zwischen Lemmas führt manchmal dazu, dass ein Lemma ausgewählt wird, das nicht dem intendierten lexikalen Konzept entspricht. Das ergibt einen Versprecher: Der Sprecher sagt z. B. *Saft* statt *Kaffee*. Oft merkt es der Sprecher und korrigiert sich: *Saft, eh ... nee ... Kaffee.* Manchmal korrigieren Sprecher sich sogar mitten im Wort: *Sa ... eh ... Kaffee.* Versprecher können manchmal abgefangen werden; der Sprecher merkt rechtzeitig, dass er dabei ist, etwas Falsches zu sagen, und verbessert sich, bevor der Fehler gesprochen wird. In diesen Fällen gibt es häufig eine Pause im Redefluss. Dieses interne Korrigieren belegt, dass wir während der Vorbereitung einer Äußerung mithören können. Levelt (1989) nennt diese Rolle des Sprachver-

Zur Vertiefung 13.5

Sprachproduktion – seriell oder parallel?

Sprechen ist ein zeitlich geordnet ablaufender Prozess. Sätze, Satzteile und Wörter werden Stück für Stück konstruiert. Konzepte, die uns zuerst in den Sinn kommen, erscheinen in aller Regel zuerst im Satz. Die linguistische Struktur eines Satzes muss also auch der konzeptuell intendierten Abfolge entsprechen. Diese Inkrementalität der Sprachproduktion verlangt nach einem Modell, das eine sequenzielle Ausgabe erzeugen kann.

Diese Ziele kann man mit diskret-seriellen, mit vorwärts kaskadierenden oder mit interaktiven Modellen erreichen. In diskret-seriellen Modellen laufen Prozesse nacheinander ab. Das Endergebnis eines Prozesses wird an die jeweils anschließende Verarbeitungsstufe weitergereicht. Die Verarbeitungsstufen sind voneinander abgekapselt und beeinflussen sich nicht (Levelt 1989). In vorwärts kaskadierenden Modellen können auch unvollständige Ergebnisse an die folgende Verarbeitungsstufe weitergeleitet werden (Cutting und Ferreira 1999). Interaktive Modelle nehmen zusätzlich eine Rückkopplung späterer Verarbeitungsprozesse auf frühere Verarbeitungsstufen an (Dell et al. 1999).

Die Diskussion um diese Modelle entzündete sich an Ergebnissen zur zeitlichen Trennung von Lemmaselektion und Wortformaktivierung (Levelt et al. 1991). Alle genannten Modelle gehen von einer parallelen Aktivierung von Lemmata aus. In diskret-seriellen Modellen wird zuerst ein Lemma aus einer Vielzahl aktivierter Lemmata ausgewählt, das dann seine Wortform – und nur diese Wortform – aktiviert. In vorwärts kaskadierenden Modellen können Wortformen aktiviert werden, bevor die Selektion eines Lemmas erfolgt. Da mehrere Lemmata um die Selektion konkurrieren, hat das zur Konsequenz, dass auch mehrere Wortformen aktiviert sind (phonologische Koaktivierung). Interaktive Modelle wurden entwickelt, um Fehlermuster aphasischer und normaler Sprecher zu erklären. Bei Rückkopplung zwischen Wortform und Lemma werden solche Lemmata ausgewählt, deren Wortform einfacher zu aktivieren ist. Die Selektion könnte also schneller vonstattengehen. Im Modell von Levelt et al. (1999) wird noch an der seriellen Abfolge festgehalten, aber das Prinzip der Selektion eines einzigen Lemmas wurde aufgegeben. Wenn verschiedene Lemmata zum Kontext passen, können auch verschiedene Lemmata ausgewählt werden.

stehenssystems den „Monitor“ (Hartsuiker et al. 2005; Acheson und Hagoort 2014).

Alle Modelle gehen von einer Aktivierung mehrerer Lemmata aus. Sie unterscheiden sich darin, ob der Wettkampf aktivierter Lemmata abgeschlossen sein muss, bevor die lautlichen Informationen – die Wortformen – zur Verfügung stehen. Das Modell von Levelt et al. (1999) geht davon aus, dass in der Regel nur ein Lemma ausgewählt und danach auch nur eine Wortform aktiviert wird. Im Modell von Dell und Kollegen (Dell und O'Sheaghdha 1992; Dell et al. 2014) werden zusammen mit verschiedenen Lemmata auch verschiedene Wortformen aktiviert. Tatsächlich gibt es genügend Belege dafür, dass vor allem bei konzeptuell sehr ähnlichen Lemmata (*Sofa* und *Couch*) auch die dazugehörigen Wortformen aktiv sind (Jescheniak und Schriefers 1997; Starreveld und La Heij 1995; ▶ Zur Vertiefung 13.5).

13.6.2 Umsetzung von Lemmata in Wortformen

Spätestens wenn die Konkurrenz zwischen aktivierten Lemmata abgeschlossen und das richtige Lemma ausgewählt ist, kann die lautliche Form erstellt werden. Dazu aktiviert ein Lemma Einträge auf der Wortformebene. Die vom Lemma angesprochene Wortform (oder Wortformen) entsprechen den Morphemen, aus denen das zum Lemma gehörige Wort aufgebaut ist. Für die korrekte Codierung der Deklinations- und Konjugationssuffixe werden von der konzeptuellen Ebene diakritische Parameter der Lemmas aktiviert. Die vorsprachliche Botschaft diktiert, ob die Äußerung sich auf Vergangenes oder Gegenwärtiges, auf eine oder auf mehrere Instanzen eines lexikalen Konzepts bezieht. Diakritische Parameter sind z. B. [Plural] oder [Gegenwart]; sie verweisen auf die benötigten Suffixe, die als Wortform gespeichert sind und mit denen Wortstämme regelhaft kombiniert werden können (▶ Zur Vertiefung 13.2).

Einige Beispiele sollen weitere Beziehungen zwischen einem Lemma und Wortform(en) erläutern. Das Lemma für REIS aktiviert die Wortform *reis* (/rais/), das Lemma für TISCHDECKE aktiviert zwei Wortformen: *tisch* (/tiʃ/) und *decke* (/dɛkə/), genauso wie das Lemma für SAFTIG die Wortformen *saft* /saft/ und *ig* /ig/ bereitstellt. Morphologisch komplexe Wörter haben zwar nur ein Lemma – weil die strukturellen Eigenschaften des gesamten komplexen Wortes auf der Lemmaebene wichtig sind –, korrespondieren aber mit mehreren Wortformen. Die Wortformeinheiten entsprechen also den Morphemen. Wortformen enthalten eine Spezifikation der enthaltenen Phoneme: Die Wortform für *Decke* stellt die Phoneme /d/, /ɛ/, /k/ und /ə/ bereit. Genauso gibt es für das Schreiben orthografische Wortformen, die die Buchstaben D, E, C, K und E spezifizieren. Ob beim Sprachverstehen und Sprechen die gleichen lexikalen Repräsentationen verwendet werden, wird in ▶ Zur Vertiefung 13.6 erklärt.

Was laut diesen Modellen nicht passiert, ist, dass eine Wortform als ganzes Paket von Phonemen an die Artikulatoren geschickt wird. Obwohl es sich paradox anhört, sollen die Phoneme, die in der Wortform schon in der richtigen Reihenfolge enthalten sind, nochmals in einem separaten Prozess der phonologischen Encodierung in die richtige Reihenfolge gebracht werden. Die Begründung für diese Annahme der phonologischen Codierung liegt wiederum in charakteristischen Versprechern. Silben (*H-Mess-Molle – H-Moll-Messe*) und einzelne Laute (*Filzpanne*, *spektukalär*; alle Beispiele aus Leuninger 1993) werden vertauscht. Wie könnte das passieren, wenn die ganze Wortform an die Artikulatoren weitergereicht wird? Ein weiterer wichtiger Grund für einen phonologischen Codierungsprozess liegt in der Tatsache, dass bei der phonologischen Encodierung nicht Wörter, sondern größere Einheiten gebildet werden. Wenn wir *da war er erstaunt* sagen, dann werden *war* und *er* zu einem sogenannten phonologischen Wort zusammengefügt: *warer* (/wa:rər/). Dieses phonologische Wort besteht aus zwei Silben: /wa:/ und /rər/. Das Beispiel zeigt, dass in der Silbenstruktur des phonologischen Wortes sogar die Wortgrenze untergeht. Während des phonologischen Encodierens werden also die Phoneme der Wortformen, die kurz nacheinander aktiviert werden, in einen metrischen Rahmen (der die Silbenstruktur und die Betonung spezifiziert)

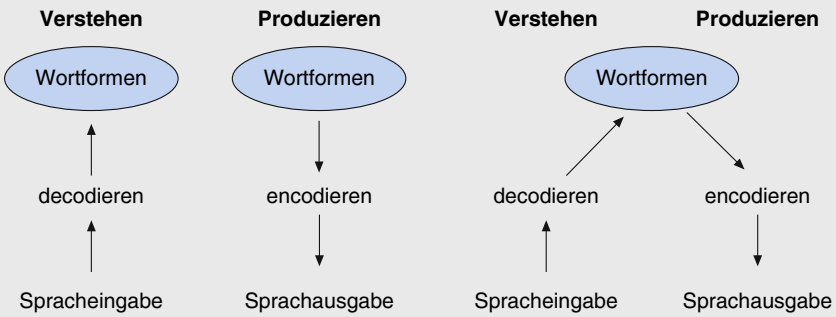
Zur Vertiefung 13.6

Wird beim Verstehen und Sprechen auf die gleichen Informationen im Wortgedächtnis zugegriffen?

Unser gesamtes Wissen über die Welt, das in konzeptuellen Netzwerken im Langzeitgedächtnis gespeichert ist, ist dasselbe, egal ob wir sprechen oder Sprache verstehen. Ist es auch dasselbe sprachliche Wissen im mentalen Lexikon? Man ist sich einig, dass die Lemmas, die Einheiten der strukturell-syntaktischen Informationen, für Sprechen und Verstehen identisch sind. Die Frage ist nur, ob sich die Wortformen für die Sprachproduktion und die Sprachwahrnehmung unterscheiden.

Die Wortformen codieren die lautliche, phonologische Struktur der Wörter. Diese Information wird beim Sprechen und beim Sprachverstehen benutzt. Die Effekte, die man in Priming-Experimenten (▶ Zur Vertiefung 13.4) findet, haben aber ein umgekehrtes Vorzeichen. Man benennt ein Bild einer *Suppenkelle* schneller, wenn es mit dem Ablenker *Keller* gepaart wird, als wenn es mit einem Ablenker gepaart wird, der keine lautliche Verwandtschaft mit dem Bildnamen hat (Meyer und Schriefers 1991). Wenn man aber statt des Bildes das Wort *Kelle* darbietet und die Versuchspersonen entscheiden sollen, ob es ein Wort des Deutschen ist, verzögert das verwandte Prime-Wort Keller die Reaktionszeiten erheblich (Drews und Zwitserlood 1995). Solche Ergebnisse lassen mindestens zwei Interpretationen zu: Entweder sind die Wortformen der Wahrnehmung und der Produktion grundsätzlich andere, oder sie sind die gleichen, werden aber bei der Wahrnehmung und dem Sprechen anders beansprucht und verarbeitet.

Wenn es getrennte Wortformspeicher für Sprechen und Verstehen gibt, ist erklärungsbedürftig, wie geschriebene oder gelesene, also über die Wahrnehmung verarbeitete Wortformen die Wortformen des Sprechens überhaupt beeinflussen können, z. B. im Bild-Wort-Interferenzparadigma. In dem anderen Fall der gemeinsamen Wortformen könnte die Erklärung der divergenten Effekte auf grundsätzlich unterschiedliche Funktionen der Wortformverarbeitung zurückgehen. Bei der Sprachwahrnehmung muss auf der Ebene der Wortformen entschieden werden, welches Wort gehört oder gelesen wird. Das Worterkennungssystem muss sich zwischen *Keller* und *Kelle* entscheiden, und dies ist umso schwieriger, je ähnlicher sich die Wörter sind. In vielen Modellen wird für diese Entscheidung eine Konkurrenz zwischen Wortformen angenommen (Zwitserlood 1994b). Diese Konkurrenz besteht beim Sprechen nicht: Die Entscheidung, welches Wort gesprochen werden soll, wird nicht auf der Ebene der Wortformen, sondern auf der konzeptuellen sowie der Lemmaebene gefällt (Levelt et al. 1999; ◘ Abb. 13.9).



◘ **Abb. 13.9** Geteilte oder getrennte Wortformen für Wahrnehmung und Produktion

eingefügt. So wird für das morphologisch komplexe Wort *staubsaugen*, das aus zwei Morphemen und dementsprechend aus zwei Wortformen besteht, ein phonologisches Wort mit drei Silben gebildet: *staub*, *sau* und *gen*.

Nachdem die Phoneme eines phonologischen Wortes in der richtigen Reihenfolge in den metrischen Rahmen eingefügt wurden, muss ein phonetischer Plan für die Artikulation erstellt werden. Die Phoneme im phonologischen Wort sind abstrakte Lautrepräsentationen. Artikulierte Laute gestalten sich aber als in der Zeit überlappende Sprachgesten (▶ Abschn. 13.2). Im Modell von Levelt et al. (1999) aktivieren die abstrakten, phonologischen Silben aus der phonologischen Enkodierung gespeicherte, artikulatorische Silbenpakete, und diese bilden dann die Eingabe für die Artikulatoren.

Nach all diesen Verarbeitungsschritten und der mannigfaltigen Aktivierung von Informationen im mentalen Lexikon, ist nun endlich ein Konzept versprachlicht. Es ist verblüffend, dass trotz der Komplexität der Sprachproduktion unser Sprechen so schnell und mühelos erfolgt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass beim Sprechen der Informationsfluss vom Konzept zu den Lauten verläuft. Nachdem konzeptuelle Informationen des Langzeitgedächtnisses zu einer Aktivierung lexikaler Konzepte und Lemmas geführt haben, wird ein Lemma ausgewählt, und die Wortformen der dazugehörigen Morpheme werden aktiviert. Die Phoneme, die diese Morpheme enthalten, werden in einem Prozess der phonologischen Encodierung in Silbenrahmen gepackt. Diese wiederum aktivieren gespeicherte Silbenpakete, die in Befehle für die Artikulatoren umgesetzt werden.

13.7 Was passiert im Gehirn beim Sprechen von Wörtern?

Wie für die Worterkennung in ▶ Abschn. 13.5 beschrieben, wendet die Sprachproduktionsforschung sich ebenfalls der Frage zu, was genau im Gehirn abläuft zwischen dem Gedanken und der Artikulation. Die Anwendung neurowissenschaftlicher Methoden, die Einsicht über die funktionale Lokalisierung, die neuronalen Korrelate und den zeitlichen Verlauf von Sprachproduktionsprozessen geben kann, steckt jedoch noch in den Kinderschuhen. Ein Grund dafür ist methodisch: Das Sprechen erzeugt Artefakte in den bildgebenden Maßen, vor allem im EEG und MEG. Mittlerweile können diese aber mit ausgeklügelten Verfahren identifi-

ziert und eliminiert werden. Patienten mit erworbenen Sprachstörungen (Aphasie), die eine gestörte Sprachproduktion aufweisen, liefern seit Langem wichtige Informationen über die Prozesse und Einheiten der Sprachproduktion. Von vielen dieser Patienten stehen mittlerweile Bildgebungsdaten zur Verfügung, was die Zuordnung der spezifischen Störung zu bestimmten Hirnarealen (z. B. zum Broca-Areal; ◘ Abb. 13.10) erleichtert.

13.7.1 Neuronale Korrelate der Sprachproduktion

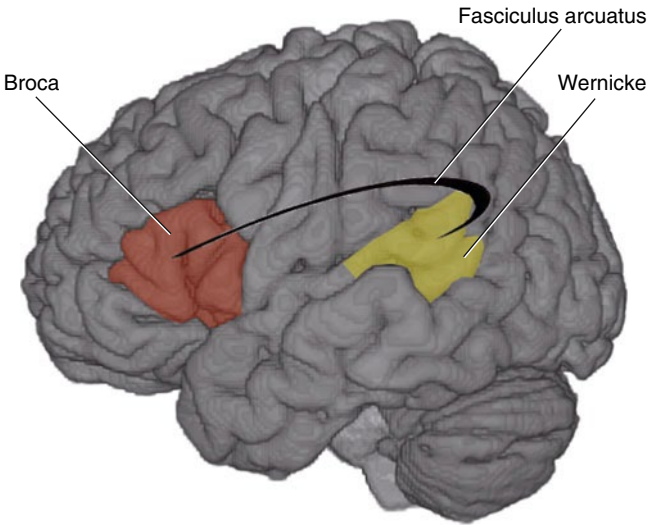
Mit evozierten Hirnpotenzialen wurde die zeitliche Abfolge der Zugriffsprozesse auf Lemmas und Wortformen untersucht. Die genaue zeitliche Abfolge ist in Reaktionszeitexperimenten schwer zu erfassen; hier können Messungen von Hirnaktivität einen interessanten Beitrag liefern, da Veränderungen über die Zeit verfolgt werden können.

Dabei wird auch die Methode des lateralisierten Bereitschaftspotenzials (LRP, *lateralised readiness potential*; vgl. das *ereigniskorrelierte Potenzial* in ▶ Kap. 2) eingesetzt, mit der man die Vorbereitung einer motorischen Antwort (Knopfdruck) an den elektrischen Signalen des Gehirns „ablesen" kann, auch wenn diese Antwort gar nicht ausgeführt wird. Es zeigte sich, dass man eine Antwort aufgrund von Lemmainformationen vorbereiten kann, um dann mit der Antwort zu warten, bis sie aufgrund von Informationen aus der Wortform tatsächlich abgegeben werden darf – oder eben nicht. Dies trifft aber nicht für eine Antwort zu, die aufgrund von Wortforminformationen vorbereitet werden kann, aber nur bei bestimmter Lemmainformation abgegeben werden darf. Anscheinend stehen die Informationen des Lemmas tatsächlich früher zur Verfügung als die der Wortform (van Turennout et al. 1998).

Mit der Methode der MEG zeigten Levelt et al. (1998), dass die Ereignisse während der Bildbenennung, die man mit dieser Methode im Gehirn lokalisieren kann, tatsächlich zeitlich wie örtlich für Lemma- und für Wortformverarbeitung unterschiedlich sind. Prozesse des Lemmazugriffs zeigten sich im okzipital-parietalen Bereich. Während der phonologischen Encodierung zeigte sich Aktivität vor allem aber im Broca-Areal (◘ Abb. 13.10). Einen Überblick über Befunde aus bildgebenden Verfahren zur Sprachproduktion geben Indefrey und Levelt (2004) bzw. Indefrey (2011).

13.7.2 Wenn es nicht einwandfrei funktioniert: Aphasien

Bisher haben wir fast ausschließlich über normale, ungestörte Sprachverarbeitung gesprochen. Fehler in der Sprachproduktion wurden zwar herangezogen, um unterschiedliche Verarbeitungsstufen innerhalb der Modelle zu postulieren, aber inwieweit die Modelle auch Störungen erklären können, wurde nicht erörtert (z. B. Dell et al. 1997). Immer mehr erkennt man auch den Wert psycholinguistischer Modelle für die Therapie von Sprachstörungen (Berndt und Mitchum 1995; Nickels 1997). Was aber versteht man unter Sprachstörungen, wie wirken sie sich aus?



◘ **Abb. 13.10** Läsionsorte und dazugehörige Aphasien. Verletzungen in den umrandeten Gebieten führen zu bestimmten Arten von Sprachstörungen

Der Begriff Sprachstörung (**Aphasie**) bezieht sich auf Störungen beim Schreiben (Agrafie), beim Lesen (Alexie), beim Verstehen oder der Produktion von Sprache. Störungen, die auf intellektuelle oder sensorische Beeinträchtigungen, Lähmungen oder Fehlkoordinationen, z. B. des Mundes (Anarthie), zurückzuführen sind, gehören nicht zu den Aphasien. Aphasien entstehen durch Schädigungen der an Sprachproduktion und Sprachverständnis beteiligten Gehirnareale. Bei Störungen des Sprachverständnisses kann man schlechtes auditives und schlechtes visuelles Verständnis unterscheiden. Störungen der Sprachproduktion können sich auf schlechte Artikulation, Wortfindungsdefizite (Anomie), die Produktion nicht intendierter Wörter (Paraphasie), Probleme mit der Grammatik (Agrammatismus), die Unfähigkeit, auditiv präsentierte Wörter zu wiederholen, geringe Sprachflüssigkeit, die Unfähigkeit zu schreiben oder den Verlust der Intonation (Aprosodie) beziehen. Störungen beim Lesen oder Buchstabieren bezeichnet man als Dyslexien. All diese Störungen können allein auftreten, aber auch gemeinsam vorkommen.

Aphasien werden in zwei Hauptklassen aufgeteilt: nichtflüssige und flüssige Aphasie (◘ Tab. 13.5). Bei der nichtflüssigen Aphasie liegen Produktionsschwierigkeiten vor, während das Hörverständnis einigermaßen gut erhalten ist. Die flüssige Aphasie zeichnet sich durch einen normalen Sprachfluss aus, es kommt jedoch zu Störungen beim Verstehen gesprochener Sprache.

Die klassische Arbeit von Penfield und Roberts (1959), die durch Stimulation von Gehirnarealen Sprachareale bestimmte, wurde im Wesentlichen mit bildgebenden Verfahren bestätigt (◘ Abb. 13.10). Schädigungen im Broca-Areal (Brodmann-Areale 44 und 45) führen hauptsächlich zu einer nichtflüssigen Sprachproduktion, während Verletzungen des Wernicke-Areals (Brodmann-Areale 42, 22 und 40) Sprachverstehensprozesse beeinträchtigen. Bei Broca-Patienten scheint das Ausmaß der Störung stärker als bei Wernicke-Patienten zu variieren. Möglicherweise hängt die Variation vom Ausmaß der subcorticalen Schädigung ab (Kolb und Whishaw 1996). Es hat sich außerdem gezeigt, dass auch Läsionen jenseits der klassischen Sprachareale (Broca und

Tab. 13.5 Flüssige und nichtflüssige Sprachstörungen. (In Anlehnung an Dijkstra und Kempen 1993; Kolb und Whishaw 1996)

Flüssige Sprachstörung	Wernicke (sensorisch)	Flüssige Sprache, kaum Artikulationsstörungen, Prosodie gut erhalten, Paragrammatismus, semantische Paraphasie und Neologismen, gestörtes Sprachverständnis
	Leitungsaphasie	Flüssige, zeitweise stockende Sprache, keine Artikulationsprobleme, Prosodie gut erhalten, Sprachverständnis meist erhalten, leichter Paragrammatismus, Wortfindungsprobleme beim Nachsprechen, phonematische Paraphasien
	Amnestische Aphasie	Gute Sprachproduktion, Artikulation und Prosodie gut erhalten, Ausweichstrategien bei Wortfindungsproblemen, leicht gestörtes Sprachverständnis
Nichtflüssige Sprachstörung	Broca	Mühsame Sprachproduktion, Dysarthrie, abgeflachte Prosodie, Agrammatismus, eingeschränkter Wortschatz, phonematische Paraphasien, leicht gestörtes Sprachverständnis
	Globale Aphasie	Mühsame Sprachproduktion, Dysarthrie, abgeflachte Prosodie, begrenzter Wortschatz, stark abweichende semantische Paraphasien, sehr viele phonematische Paraphasien, Neologismen, sehr gestörtes Sprachverständnis

Wernicke) zu Sprachfunktionsstörungen führen können. Mittlerweile steht fest, dass die Ausdehnung der corticalen Sprachareale zwischen verschiedenen Menschen erheblich variiert. Die Trennung in Sprachverstehen (Wernicke) und Sprachproduktion (Broca) ist nicht so eindeutig, wie man bisher gedacht hat. So konnte in PET-Studien gezeigt werden, dass Sprachwahrnehmung nicht nur mit Aktivität im klassischen Wernicke-Areal korreliert ist, sondern auch mit Aktivität in Prämotorcortex und Motorcortex (Zatorre et al. 1996). Interessanterweise entspricht dieser Befund teilweise den Vorstellungen, wie sie die Motortheorie der Sprachwahrnehmung formulierte (Liberman und Mattingly 1986). In diesem Ansatz entschlüsselt der Hörer das Sprachsignal aufgrund artikulatorischer Muster, die der Sprecher ausgeführt hat. Diese Muster dienen als prälexikale Zugriffseinheiten.

Die Erforschung von Dyslexien hat sich zu einem Spezialzweig von Sprachuntersuchungen entwickelt. Man unterscheidet erworbene Dyslexien (durch Gehirnverletzungen) und entwicklungsbedingte Dyslexien (Unfähigkeit, schreiben und lesen zu lernen; Coltheart 2013).

13.8 Anwendungsbeispiele

Die Erforschung von Sprachproduktions- und -verstehensprozessen ist Teilgebiet der Grundlagenforschung, die ohne den Hintergedanken praktischer Verwertung durchgeführt wird (Bush 1960). Der Grundlagenforschung liegt die Annahme zugrunde, dass sie zu einem besseren Verständnis der Natur und ihrer Gesetzmäßigkeiten führt. Dieses verbesserte Verständnis kann zur Folge haben, dass praktische Probleme gelöst werden können.

Diagnostische Verfahren

Eine direkte Anwendung der Forschung zur Sprachverarbeitung findet sich bei der Entwicklung diagnostischer Testverfahren (z. B. Schaefer et al. 2009). Auch gibt es zahlreiche Einzelfallstudien zu Sprachstörungen, in denen unterschiedlichste Verfahren und Methoden angewandt werden. Ob deren Vorgehen in der Praxis erfolgreich sein wird, ist noch fraglich. So zeigen de Aguiar et al. (2015), dass vor der klinischen Anwendung von transkanieller Gleichstromstimulation (tCDS; *transcranial direct current stimulation*) in der Behandlung von Aphasikern noch praktische (Höhe der Spannung, Dauer und Häufigkeit der Sitzung) und theoretische Fragen (Bei welchen kognitiven Defiziten hilft tCDS? Welche Regionen müssen erhalten sein? Welche Regionen sollten stimuliert werden?) geklärt werden müssen. Bildgebende Verfahren zeigen erhebliche neuronale Umstrukturierungen, die auf einen Schlaganfall folgen und von Läsionsgröße, Läsionsort, Trainingsmethode und Sprachaufgaben abhängen (Cappa 2011). Solche Daten sind Voraussetzung für die Anwendung von Stimulationstechniken wie tCDS oder transkranieller Magnetstimulation (TMS). Salmelin (2007) argumentiert bei Sprachstörungen für die Verwendung neurophysiologischer Maße zusätzlich zu hämodynamischen Maßen. Zeitlich-räumliche Information ist ihr zufolge unabdingbar, um die Funktionalität einer Region zu bestimmen. Ein komplettes Bild erhält man nur, wenn hämodynamische und neurophysiologische Maße miteinander kombiniert werden (für eine Anwendung neurophysiologischer Maße in einer Einzelfallstudie zur Anomie vgl. Cornelissen et al. 2003).

Therapie bei Sprachverlust

Breitenstein und Knecht (2002; Breitenstein et al. 2004) ließen unbeeinträchtigte Probanden sowie Aphasiker durch überzufällige Häufigkeit bestimmter Bild-Wort Kombinationen „neue" Wörter für Objekte lernen. Sie überprüften, ob Probanden auch ohne Feedback die korrekten Bild-Wort-Paarungen lernen können. Nach dem Training zeigten Gruppen mit und ohne Feedback keine Lernunterschiede. Da das Standardvorgehen in der Sprachtherapie von Aphasikern Feedback enthält, kann dieses Ergebnis direkte Konsequenzen für die Therapie haben, da ohne Feedback (1) die Patienten weniger mit ihren Defiziten konfrontiert werden und (2) massives Üben am Computer, ohne Therapeut, wie es auch bei körperlicher Rehabilitation, realisiert werden könnte.

13.9 Ausblick

Etwa 60 Jahre nach dem Entstehen der Psycholinguistik als eigenständige Forschungsrichtung hat sich unser Wissen über das

Verstehen und Produzieren von Wörtern entscheidend erweitert. Einerseits gibt es eine Fülle an Daten, die zeigen, welche Informationen im mentalen Lexikon spezifiziert sein müssen, damit wir Wörter richtig erkennen oder sprechen. Auch zu den Verarbeitungsprozessen, die auf diese Informationen zugreifen und zu deren zeitlichen Verlauf gibt es zahlreiche Befunde, sowohl aus Verhaltensstudien als mit EEG, MEG oder funktioneller Bildgebung, die zur Bildung und Verfeinerung der Modelle und Theorien lexikaler Verarbeitung beim Sprechen und Verstehen beigetragen haben. Vieles bleibt aber noch ungewiss. Wie wir welche Informationen aus dem kontinuierlichen Sprachfluss aufnehmen, um auf gespeicherte Repräsentationen zugreifen und gesprochene Wörter voneinander trennen und erkennen zu können, bleibt rätselhaft. Teilweise mag es damit zusammenhängen, dass die Psycholinguistik sich schwer von den Kategorien aus der Linguistik und von der klassischen Informationsverarbeitungsmetapher der Psychologie lösen kann. Innovative Denkansätze und Theorien sind nötig, der Forschung neuen Rückenwind zu geben.

Für die Erkennung gesprochener Wörter fehlt ein vollständiges, implementiertes Modell, das alle Teilprozesse und Schritte modelliert. Immer noch problematisch ist die Modellierung, wie Worterkennungsprozesse und Satzverarbeitungsprozesse zusammenwirken, da die Modelle im Prinzip mit dem gesamten konzeptuellen Wissen und den Prozessen, die darauf zugreifen, ausgestattet sein müssten. Schon für die Worterkennung alleine ist es schwierig, ein implementiertes Modell mit einem realistischen Lexikon zu versehen. Vergessen wir nicht, dass wir über 30.000 Worteinträge, mit allem dazugehörigen Wissen, zur Verfügung haben – in einem Gehirn, dessen Leistungen noch von keinem Computer adäquat simuliert werden kann.

Was der Psycholinguistik immer noch fehlt, ist eine verbindende Klammer zwischen ihren Teilgebieten. Insbesondere an den Schnittstellen der Module innerhalb von Sprachverständnis oder Sprachproduktion, z. B. von Worterkennung zu Satzverarbeitung und Textverständnis, fehlen die Modellvorstellungen. Auch mangelt es an Ideen, wie sich die Interaktionen zwischen Sprechen und Sprachverstehen – Funktionen, die in jedem Menschen problemlos zusammenarbeiten – gestalten. Zum Schluss: Ungeklärt ist immer noch die Frage, ob unsere Fähigkeit, Sprache zu produzieren und zu verstehen, eine besondere kognitive Fähigkeit ist, die sich von anderen nichtsprachlichen kognitiven Fähigkeiten unterscheidet, oder ob Sprache nur eine, wenn auch komplexe Fertigkeit ist, die sich aus einer Vielzahl kognitiver Fähigkeiten zusammensetzt.

13.10 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Wörter sind beliebige Lautkombinationen, die mit bestimmten Bedeutungen gepaart sind. Wörter sind Symbole für Konzepte und nicht mit Konzepten gleichzusetzen.
- Sprachlaute können durch die Art der Artikulation, den Ort der Artikulation und die Stimmhaftigkeit beschrieben werden. Zur Lauterzeugung wird der Luftstrom bei Vokalen nicht, bei Konsonanten mehr oder minder stark behindert.
- Im mentalen Lexikon sind die lautliche und orthografische Beschreibung, die morphologische Zusammenstellung sowie die syntaktischen Merkmale von Wörtern enthalten.
- Anders als in geschriebener Sprache gibt es in gesprochener Sprache keine Grenzen zwischen Wörtern oder Lauten. Sprache ist ein kontinuierlicher Strom von Information, der durch aktive Prozesse segmentiert und kategorisiert wird.
- Worterkennung wird in drei Teilprozesse unterteilt: lexikaler Zugriff, lexikale Auswahl und Integration der Wortbedeutung mit der Bedeutung der gesamten Äußerung. Mittlerweile gibt es mehr Evidenz für die Interaktion dieser Prozesse als für ihre Modularität.
- Bei der Worterkennung wird im mentalen Lexikon parallel eine Vielzahl von Wortformen aktiviert. Die Bedeutung von Wörtern wird schon aufgrund gehörter Wortteile aktiviert.
- Bei visueller Worterkennung werden graphemische und phonologische Repräsentationen aktiviert. Unter welchen Umständen graphemische in phonologische Information übersetzt wird, ist Gegenstand wissenschaftlicher Forschung.
- Durch Konzeptualisieren wird eine vorsprachliche Botschaft erstellt, die durch den Formulator und den Artikulator in eine sprachliche Form überführt wird.
- Sprachstörungen (Aphasien) entstehen durch Schädigung von an Sprachproduktion und an Sprachverständnis beteiligten Gehirnarealen. Aphasien werden in nichtflüssige und flüssige Aphasien unterteilt.
- Dyslexien, Störungen beim Schreiben und Lesen, können durch Gehirnverletzungen entstehen, oder es sind entwicklungsbedingte Lernstörungen (Lese-Rechtschreib-Schwierigkeiten).
- Der Psycholinguistik fehlt bisher eine verbindende Klammer ihrer unterschiedlichen Teildisziplinen. Die Frage, ob Sprache eine besondere kognitive Fähigkeit ist oder eine komplexe Fertigkeit, die sich aus einer Vielzahl kognitiver Fähigkeiten zusammensetzt, ist ungeklärt.

Schlüsselbegriffe

Affix (*affix*) Nicht selbstständig vorkommendes, gebundenes Morphem. Gebundene Morpheme, die dem Wort vorangestellt werden, nennt man Präfixe (ent-, be- ver- usw.), solche, die dem Wort folgen, nennt man Suffixe (-ung, -lich, -keit usw.).

Aktivierung (*activation*) Zustand von Repräsentationen zu einem bestimmten Zeitpunkt, der nicht dem Ruhezustand entspricht. Aktivierung kann kontinuierlich oder diskret und begrenzt oder unbegrenzt schwanken.

Artikulatoren (*articulators*) Sprechwerkzeuge (Artikulationsorgane) bestehend aus Atemapparat, Kehlkopf, Nasenhöhle, Mundhöhle, Zunge, Lippen.

Artikulationsort (*place of articulation*) Hindernisbildende Passage bei der Artikulation; Zusammenspiel eines (relativ beweglichen)

Artikulationsorgans und einer (relativ unbeweglichen) Artikulationsstelle.

Aphasie (*aphasia*) Bezeichnung der Unfähigkeit, Gedanken mittels Sprache auszudrücken oder die Bedeutung von Sprache zu erfassen. Aphasie entsteht, wenn die Gehirnhälfte, die die Sprachzentren beherbergt, geschädigt ist, ohne Beeinträchtigung der Sprechorgane oder des Gehörs.

Benennungsaufgabe (*naming*) Aufgabe in Experimenten, bei der Versuchspersonen Reize laut aussprechen sollen.

Bild-Wort-Interferenz (*picture-word interference*) Experimentelle Methode; Variante des Priming-Paradigmas, bei der Versuchspersonen Bilder benennen sollen, während geschriebene oder gesprochene Ablenker ignoriert werden sollen.

Bottom-up (*bottom-up*) Informationsfluss von Repräsentationen, die dicht an der Signaleingabe liegen, zu weiter entfernten Repräsentationen.

Derivation (*derivation*) Wortbildungstyp. Im Deutschen wird Derivation durch Anfügung eines Suffix (dumm → Dummheit), Rückbildung (schauen → Schau) und Konversion (deutsch vs. Deutsch) unterschieden.

Dyslexie (*dylexisa*) Spezifische Unfähigkeit oder ausgeprägte Schwierigkeit zu lesen oder zu buchstabieren bei ansonsten normalen intellektuellen Fähigkeiten.

Flexion (*inflection*) Form der morphologischen Komplexität, zu der die Deklination und Konjugation gezählt werden.

Formulator (*formulator*) Aufgabe des Sprachproduktionssystems, bei der lexikale Konzepte mit Lemmas verbunden, in eine syntaktische Struktur eingefügt und lautlich spezifiziert werden.

Graphem (*grapheme*) Distinktive Einheit eines Schriftsystems. In Buchstabenschriften symbolisieren sie phonemische Objekte, im Idealfall Phoneme.

Hemmung (*inhibition*) Vorgang, der die Aktivierung von Repräsentationen senkt. Laterale Hemmung (*lateral inhibition*) bezeichnet den Vorgang, dass Einheiten innerhalb einer Repräsentationsebene sich gegenseitig in ihrer Aktivierung hemmen.

Koartikulation (*coarticulation*) Bezeichnung für vorwärts- oder rückwärtsgerichtete Lautanpassungen an benachbarte Laute beim Sprechen.

Kompositum (*compound*) Morphologisch komplexes Wort, in dem Teile, die selbstständig vorkommen können, kombiniert werden.

Konzept (*concept*) Wissen über Objekte, Geschehnisse, Zustände, Handlungen; nichtsprachlich; gespeichert im Langzeitgedächtnis; zusätzliche Repräsentation in sensomotorischen Hirnarealen.

Konzeptualisieren (*conceptualiser*) Vorbereitender Vorgang bei der Sprachproduktion, bei dem auszudrückende Konzepte in eine Reihenfolge von lexikalen Konzepten gebracht werden.

Lemma (*lemma*) Repräsentation im mentalen Lexikon, in der die syntaktisch-strukturellen Eigenschaften von Wörtern codiert sind (z. B. Wortklasse, Genus).

Lexikale Entscheidung (*lexical decision*) Aufgabe in Experimenten, bei der Versuchspersonen entscheiden, ob eine Buchstabenfolge oder ein gesprochener Reiz ein Wort ihrer Sprache ist.

Lexikales Konzept (*lexical concept*) Aus einem oder mehreren Konzepten abgeleitete Einheit, für die im mentalen Lexikon eine Repräsentation vorhanden ist.

Mentales Lexikon (*mental lexicon*) Speicher des sprachlichen Wissens im Langzeitgedächtnis.

Morphem (*morpheme*) Kleinste bedeutungstragende Einheit der Sprache.

Phonem (*phoneme*) Kleinste lautliche Einheit mit bedeutungsunterscheidender Funktion. Phoneme werden beschrieben als Bündel von phonologischen Merkmalen (*features*).

Priming-Paradigma (*priming paradigm*) Experimentelle Methode, bei der die Beziehung zwischen Vorreizen (*primes*) und Zielreizen (*targets*) manipuliert wird.

Segmentierung (*segmentation*) Aktiver Prozess der Sprachverarbeitung, der den konstanten Sprachstrom in einzelne Wörter unterteilt.

Selektion (*selection*) Zeitpunkt, an dem ein Wort ausgewählt wird und somit der weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht.

Silbe (*syllable*) Phonetisch-phonologische Grundeinheit gesprochener Sprache, die intuitiv nachweisbar, aber wissenschaftlich keine einheitliche Definition hat. Silben können strukturell in einen Silbenkopf (*onset*), einen Silbenkern (*nucleus*) und ein Silbenende (*coda*) unterteilt sein, wobei der Silbenkern die minimale Einheit bildet.

Subkategorisierungsinformation (*subcategorisation information*) Strukturelle Eigenschaft von Wörtern; Information über den syntaktischen Rahmen, in dem ein Wort vorkommen kann.

Token (*token*) Token sind einmalige physische Objekte mit bestimmter Lokalisierung in Raum und Zeit. Sie werden als Exemplare desselben Typs identifiziert aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit anderen Individuen und kraft ihrer Übereinstimmung mit dem Typ, den sie vertreten.

Top-down (*top-down*) Repräsentationen, die weiter von der Signaleingabe entfernt sind, beeinflussen Repräsentationen, die näher zur Signaleingabe liegen.

Typ (*type*) Zugrunde liegende abstrakte Einheit mehrerer Token. Ein Typ ist eine Klasse äquivalenter Token.

Verteilte Repräsentation (*distributed representation*) Eine Eigenschaft wird durch ein Muster mehrerer aktivierter Repräsentationen bestimmt.

Wortform (*word form*) Repräsentation der lautlichen oder orthografischen Zusammenstellung eines Wortes.

Wortklasse (*word class*) Information, die spezifiziert, ob ein Wort ein Substantiv, Verb, Adjektiv usw. ist.

Wortstamm (*word stem*) Teil des Wortes, der nach Entfernung von Suffixen übrig bleibt.

Weiterführende Literatur

Breznitz, Z. (Ed.) *Brain Research in Language* (pp. 153-186). New York, NY: Springer. – (In diesem Buch sind Studien zu Themen wie Dyslexie, auditve Verarbeitung, Satzlesen übersichtsartig vorgestellt. Darüber hinaus informiert es über Techniken wie EEG und Frequenzanalysen.)

Crystal, D. (2010). *The Cambridge encyclopaedia of language*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. (Handbuch aus meistens linguistischer Sichtweise über Sprache. Es werden linguistische Theorien von Syntax, Grammatik, Pragmatik und anderen Gebieten vorgestellt, populäre Ideen über Sprache beschrieben sowie die Unterschiedlichkeit und die Systematik verschiedener Sprachen dargestellt.)

Cutler, A. (2012). *Native listening. Language experience and the recognition of spoken words*. Cambridge, MA: MIT Press. (Handbuch über sämtliche Aspekte der Verarbeitung gesprochener Sprache, die Erkennung von Sprachlauten und Prosodie, die Segmentierung gesprochener Sprache, Prozesse der Worterkennung, Laut- und Worterkennung in einer Zweitsprache.)

Dijkstra, T. & de Smedt, K. (Eds.) (1996). *Computational psycholinguistics*. London, UK: Taylor & Francis. (Multidisziplinäre Übersicht über aktuelle Computermodelle in Sprachverarbeitung und Sprachproduktion. Zu Beginn werden Ansätze aus der Künstlichen Intelligenzforschung konnektionistischen Ansätze gegenübergestellt. Im Weiteren finden sich aktuelle Computermodelle aus verschiedenen Bereichen der Psycholinguistik.)

Garnsey, S. M. (Ed.) (1993). *Event-related potentials in the study of language. Special issue language and cognitive processes*. Hove, UK: Erlbaum. – (Dieser Sonderdruck ist eine Artikelsammlung psycholinguistischer ERP-Experimente. Einführende Kapitel informieren über die Grundlagen und die Besonderheiten der Nutzung ereigniskorrelierter Potenziale in psycholinguistischen Experimenten. In weiteren Kapiteln werden ERP-Experimente vorgestellt.)

Gaskell, G., & Zwitserlood, P. (Eds.) (2011). *Lexical representation. A multidisciplinary approach*. Berlin: de Gruyter. (Überblick über sämtliche Aspekte der lexikalen Repräsentation und Verarbeitung, von der Lautverarbeitung zur semantischen Integration. Neurobiologische Grundlagen der Sprachverarbeitung und Worterkennung, konnektionistische Modelle der lexikalen Repräsentation.)

Grosjean, F. & Li, P. (2013). *The Psycholinguistics of Bilingualism*. Malden, MA & Oxford: Wiley-Blackwell. (Einführung in die Mehrsprachigkeit, experimentelle Methoden und funktionelle Bildgebung; geschriebene und gesprochene Sprache; Verarbeitungsmodelle und computationelle Modelle; das bilinguale Gehirn.)

Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, MA: MIT Press. (Umfassendes Buch, das den Sprachproduktionsprozess von der Konzeptualisierung bis zur Artikulation beschreibt. Den Schwerpunkt bildet die Beschreibung der lexikalen Verarbeitungsprozesse während der Sprachproduktion. Außerdem werden die Ursprünge des zurzeit vorherrschenden Modells der Sprachproduktion beschrieben.)

Levelt, W. J. M. (2013). *A history of psycholinguistics: The pre-Chomskyan era*. Oxford: Oxford University Press – (In diesem Buch wird die Entwicklung und Geschichte der psycholinguistischen Forschung beginnend im 18. Jahrhundert bis zur kognitiven Wende in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts dargestellt.)

Liberman, A. M. (1996). *Speech: A special code*. Cambridge, MA: MIT Press. (Dieses Buch zeigt die Entwicklung von Techniken und Methoden zur Untersuchung von Sprachwahrnehmungsprozessen bei Menschen. Es ist eine Sammlung verschiedener Artikel, die Meilensteine in dieser Forschungstradition waren. Die unterschiedlichen Versionen der Motortheorie werden dargestellt.)

Pinker, S. (1999). *Words and rules: The ingredients of language*. New York, NY: Basic. (Auseinandersetzung mit der Frage, welche Teile der Sprache angeboren und welche Teile erlernt werden. Lernt man Regeln oder Listen von Wörtern, die nach Ähnlichkeiten gruppiert werden? Pinker verwendet nicht nur linguistische Argumente, um seine Theorie zu entwickeln, sondern begründet seine Theorie auch mit Ergebnissen aus Experimenten mit bildgebenden Verfahren bzw. molekulargenetischen Befunden.)

Traxler, M. & Gernsbacher, M. A. (Ed.) (2006). *Handbook of psycholinguistics*. Elsevier. (Kompendium über Sprachverstehen und Sprachproduktion. Der Fokus liegt auf Sprachverstehen. Methoden, Aufgaben, Theorien und Effekte werden dargestellt. Themen sind u.a. Lesen, Sprechen, Spracherwerb, Verstehen von Texten oder bildhafter Sprache, aber auch Diskursprozesse, Sprachstörungen und die neuronale Organisation von Sprachprozessen.)

Literatur

Acheson, D. J., & Hagoort, P. (2014). Twisting tongues to test for conflict-monitoring in speech production. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 1–16. doi:10.3389/fnhum.2014.00206.

Aguiar, V. de, Paolazzi, C. L., & Miceli, G. (2015). tDCS in post-stroke aphasia: The role of stimulation parameters, behavioral treatment and patient characteristics. *Cortex*, *63*, 296–316. doi:10.1016/j.cortex.2014.08.015.

Aitchison, J. (1994). *Words in the mind. An introduction to the mental lexicon* (2. Aufl.). Oxford, UK: Blackwell.

Amsel, B. D., Urbach, T. P., & Kutas, M. (2014). Empirically grounding grounded cognition: The case of color. *NeuroImage*, *99*, 149–157. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.05.025.

Bagley, W. C. (1900). The apperception of the spoken sentence: A study in the psychology of language. *American Journal of Psychology*, *12*, 80–120. doi:10.2307/1412429.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–645. doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093639.

Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie*, *87*, 527–570.

Berkum, J. J. A. van, Brown, C. M., Zwitserlood, P., Kooijman, V., & Haggort, P. (2005). Anticipating Upcoming Words in Discourse: Evidence from ERPs and Reading Times. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*, 443–467. doi:10.1037/0278-7393.31.3.443.

Berndt, R. S., & Mitchum, C. C. (Hrsg.). (1995). *Cognitive neuropsychological approaches to the treatment of language disorders*. *Neuropsychological rehabilitation*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Bölte, J. (1997). *The role of mismatching information in spoken word recognition*. Hamburg: Dr. Kovaç.

Bölte, J. (2001). *Graded lexical activation by pseudowords in cross-modal semantic priming: Spreading of activation, backward priming, or repair?* Proceedings Cognitive Science Meeting, Edinburgh, UK.

Bölte, J., & Coenen, E. (2002). Is phonological information mapped onto semantic information in a one-to-one manner? *Brain and Language*, *81*, 384–397. doi:10.1006/brln.2001.2532.

Breitenstein, C., & Knecht, S. (2002). Development and validation of a language learning model for behavioral and functional-imaging studies. *Journal of Neuroscience Methods*, *114*, 173–179.

Breitenstein, C., Kamping, S., Jansen, A., Schomacher, M., & Knecht, S. (2004). Word learning can be achieved without feedback: implications for aphasia therapy. *Restorative neurology and neuroscience*, *22*, 445–458.

Browman, C. P., & Goldstein, L. (1992). Articulatory phonology: An overview. *Phonetica*, *49*, 155–180.

Brown, C., & Hagoort, P. (Hrsg.). (1999). *The Neurocognition of Language*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Brown, R. (1973). *A first language: The early stages*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Bush, V. (1960). *Science the endless frontier*. Oxford, England: National Science Foundation.

Butterworth, B. (1983). Lexical representation. In B. Butterworth (Hrsg.), *Language production* Bd. II New York, NY: Academic Press.

Byrd, D. (1992). Perception of assimilation in consonant clusters: A gestural model. *Phonetica*, *49*, 1–24.

Cappa, S. F. (2011). The neural basis of aphasia rehabilitation: Evidence from neuroimaging and neurostimulation. *Neuropsychological Rehabilitation*, *21*(5), 742–754. doi:10.1080/09602011.2011.614724.

Caramazza, A. (1997). How many levels of processing are there in lexical access? *Cognitive Neuropsychology*, *14*, 177–208. doi:10.1080/026432997381664.

Carreiras, M., Perea, M., Vergara, M., & Pollatsek, A. (2009). The time course of orthography and phonology: ERP correlates of masked priming effects in Spanish. *Psychophysiology*, *46*, 1113–1122. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00844.x.

Cattell, J. M. (1886). The time it takes to see and name objects. *Mind*, *1*, 63–65.

Chomsky, N. (1959). A review of B.F. Skinner's verbal behavior. *Language*, *35*, 26–58.

Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax*. Cambridge, MA: MIT Press.

Chrystal, D. (2010). *The Cambridge Encyclopaedia of Language*. Cambridge, UK: University Press.

Chwilla, D., Hagoort, P., & Brown, C. (1998). The mechanism underlying backward priming in a lexical decision task: Spreading of activation versus semantic matching. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *15*, 531–560. doi:10.1080/027249898391521.

Clahsen, H. (1999). Lexical entries and rules of language: A multidisciplinary study of German inflection. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 991–1060.

Coenen, E., Zwitserlood, P., & Bölte, J. (2001). Variation and assimilation in German: Consequences for lexical access and representation. *Language and Cognitive Processes*, *16*, 535–564. doi:10.1080/01690960143000155.

Coltheart, M. (1978). Lexical access in simple reading tasks. In G. Underwood (Hrsg.), *Strategies of information processing* (S. 151–216). London: Academic Press.

Coltheart, M. (1981). Disorders of reading and their implications for models of normal reading. *Visible Language*, *15*, 245–286.

Coltheart, M. (2013). Acquired dyslexia. In H. Pashler (Hrsg.), *The Encyclopaedia of the Mind*. New York: Sage Books.

Connine, C. M., Blasko, D. G., & Titone, D. (1993). Do the beginnings of spoken words have a special status in auditory word recognition? *Journal of Memory and Language*, *32*, 193–210. doi:10.1006/jmla.1993.1011.

Cornelissen, K., Laine, M., Tarkiainen, A., Järvensivu, T., Martin, N., & Salmelin, R. (2003). Adult brain plasticity elicited by anomia treatment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(3), 444–461. doi:10.1162/089892903321593153.

Cree, G. S., McRae, K., & McNorgan, C. (1999). An attractor model of lexical conceptual processing: Simulating semantic priming. *Cognitive Science*, *23*, 371–414. doi:10.1016/S0364-0213(99)00005-1.

Cutler, A., & Norris, D. (1988). The role of strong syllables in segmentation for lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*, 113–121. doi:10.1037/0096-1523.14.1.113.

Cutler, A., Mehler, J., Norris, D., & Segui, J. (1986). The syllable's differing role in the segmentation of French and English. *Journal of Memory and Language*, *25*, 385–400. doi:10.1016/0749-596X(86)90033-1.

Cutting, C. J., & Ferreira, V. S. (1999). Semantic and phonological information flow in the production lexicon. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, *25*, 318–344. doi:10.1037/0278-7393.25.2.318.

Daneman, M., & Reingold, E. (1995). What eye fixations tell us about phonological recoding during reading? In J. M. Henderson, M. Singer, & F. Ferreira (Hrsg.), *Reading and language processing* (S. 25–50). Mawah, NY: Erlbaum.

Dell, G. S., & O'Sheaghdha, P. G. (1992). Stages of lexical access in language production. *Cognition*, *42*, 287–314. doi:10.1016/0010-0277(92)90046-K.

Dell, G. S., Schwartz, M. F., Martin, N., Saffran, E. M., & Gagnon, D. A. (1997). Lexical access in aphasic and nonaphasic speakers. *Psychological Review*, *104*, 801–838. doi:10.1037/0033-295X.104.4.801.

Dell, G. S., Nozari, N., & Oppenheim, G. M. (2014). Word production: Behavioral and computational considerations. In *The Oxford Handbook of Language Production* (S. 88–104). Oxford: Oxford University Press.

Dijkstra, T., & Kempen, G. (1993). *Einführung in die Psycholinguistik*. Bern: Huber.

Drews, E., & Zwitserlood, P. (1995). Effects of morphological and orthographic similarity in visual word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *21*, 1098–1116.

Drews, E., Zwitserlood, P., Bolwiender, A., & Heuer, U. (1994). Lexikalische Repräsentation morphologischer Strukturen. In S. W. Felix, C. Habel, & G. Rickheit (Hrsg.), *Kognitive Linguistik: Repräsentationen und Prozesse* (S. 273–298). Opladen: Westdeutscher Verlag..

Dumay, N., Frauenfelder, U. H., & Content, A. (2002). The role of the syllable in lexical segmentation in French: Word-spotting data. *Brain and Language*, *81*, 144–161. doi:10.1006/brln.2001.2513.

Eddington, C. M., & Tokowicz, N. (2014). How meaning similarity influences ambiguous word processing: The current state of the literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 13–37. doi:10.3758/s13423-014-0665-7.

Elman, & McClelland, J. L. (1986). Exploiting lawful variability in the speech wave. In J. S. Perkell, & D. H. Klatt (Hrsg.), *Invariance and variability in Speech perception* (S. 360–385). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Feldman, L. B., & Fowler, C. A. (1987). The inflectional noun system in Serbo-Croatian: Lexical representation of morphological structure. *Memory & Cognition*, *15*, 1–12.

Fleischer, W. (1982). *Wortbildung der deutschen Sprache*. Tübingen: Niemeyer.

Fodor, J. A. (1983). *The modularity of the mind*. Cambridge, MA: MIT Press.

Forster, K. I. (1979). Levels of processing and the structure of the language processor. In W. E. Cooper, & E. C. T. Walker (Hrsg.), *Sentence processing: Psycholinguistic studies presented to Merill Garrett* (S. 27–85). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Foss, D. J., & Gernsbacher, M. A. (1983). Cracking the dual code: Toward a unitary model of phoneme identification. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *22*, 609–632. doi:10.1016/S0022-5371(83)90365-1.

Frauenfelder, U. H., & Peeters, G. (1998). Simulating the time course of spoken word recognition. In J. Grainger, & A. M. Jacobs (Hrsg.), *Localist connectionist approaches to human cognition* (S. 101–146). London, UK: Erlbaum.

Friederici, A. D. (1999). The neurobiology of language processing. In A. D. Friederici (Hrsg.), *Language comprehension: A biological perspective* (S. 265–304). Berlin: Springer.

Friederici, A. D. (2011). The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function. *Physiological Reviews*, *91*, 1357–1392. doi:10.1152/physrev.00006.2011.

Fromkin, V. A. (1971). The non-anomalous nature of anomalous utterances. *Language*, *47*, 27–52.

Frost, R., Katz, L., & Bentin, S. (1987). Strategies for visual word recognition and orthographical depth: A multilingual comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 104–115. doi:10.1037/0096-1523.13.1.104.

Ganong, W. F. (1980). Phonetic categorization in auditory word perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *6*, 110–115. doi:10.1037/0096-1523.6.1.110.

Garnsey, S. M. (Ed.) (1993). Event-related brain potentials in the study of language: An introduction. *Language and Cognitive Processes, 8,* 337–640. doi:10.1080/01690969308407581

Garrett, M. F. (1988). Processes in language production. In F. J. Newmeyer (Hrsg.), *Linguistcs: The Cambridge Survey: III. Language: Psychological and biological aspects* (S. 69–96). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Gaskell, M. G. (2003). Modelling regressive and progressive effects of assimilation in speech perception. *Journal of Phonetics*, *31*, 447–463. doi:10.1016/S0095-4470(03)00012-3.

Gaskell, M. G., & Marslen-Wilson, W. D. (1996). Phonological variation and inference in lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*, 144–158. doi:10.1037/0096-1523.22.1.144.

Gaskell, M. G., Hare, M., & Marslen-Wilson, W. D. (1995). A connectionist model of phonological representation in speech perception. *Cognitive Science*, *19*, 407–439. doi:10.1207/s15516709cog1904_1.

Gollan, T. H., & Kroll, J. F. (2001). Bilingual lexical access. In B. Rapp (Hrsg.), *The Handbook of Cognitive Neuropsychology*. *What deficits reveal about the human mind* (S. 321–345). Philadelphia: Psychology Press.

Grosjean, F. & Frauenfelder, U. H. (Eds.). (1997). A guide to spoken word recognition paradigms. *Language and Cognitive Processes, 6*, 553–699.

Grosjean, F., & Li, P. (2013). *The Psycholinguistics of Bilingualism*. Malden, MA & Oxford: Wiley-Blackwell.

Gumnior, H., Bölte, J., & Zwitserlood, P. (2005). Assimilation in existing and novel German compounds. *Language and Cognitive Processes*, *20*, 465–488. doi:10.1080/01690960444002174.

Hagoort, P. (2003). Interplay between syntax and semantics during sentence comprehension: ERP effects of combining syntactic and semantic violations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 883–899. doi:10.1162/089892903322370807.

Hartsuiker, R. J., Jong, N. H. de, & Pickering, M. J. (2005). Semantic and Phonological Context Effects in Speech Error Repair. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *31*, 921–932. doi:10.1037/0278-7393.31.5.921.

Heuven, W. J. B. van, Dijkstra, T., & Grainger, J. (1998). Orthographic neighborhood effects in bilingual word recognition. *Journal of Memory and Language*, *39*, 458–483. doi:10.1006/jmla.1998.2584.

Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech perception. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*, 393–402. doi:10.1038/nrn2113.

Huey, E. B. (1990). On the psychology and physiology of reading. *The American Journal of Psychology*, *11*, 283–302.

Indefrey, P. (2011). The Spatial and Temporal Signatures of Word Production Components: A Critical Update. *Frontiers in Psychology*, *2*, 1–16. doi:10.3389/fpsyg.2011.00255.

Indefrey, P., & Levelt, W. J. M. (2004). The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, *92*, 101–144. doi:10.1016/j.cognition.2002.06.001.

Jescheniak, J., & Schriefers, H. (1997). Lexical access in speech production: Serial or cascaded processing? *Language and Cognitive processes*, *12*, 847–852.

Klatt, D. H. (1979). Speech perception. A model of acoustic-phonetic analysis and lexical access. In R. A. Cole (Hrsg.), *Perception and production of fluent speech* (S. 243–288). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Klatt, D. H. (1986). The problem of variability in speech recognition and in models of speech perception. In J. Perkell, & D. Klatt (Hrsg.), *Invariance and variability in speech processes* (S. 300–319). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (1996). *Neuropsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Kosslyn, S. M. (1994). On cognitive neuroscience. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *6*, 297–303.

Kroll, J. F., & Stewart, E. (1994). Category interference in translation and picture naming: Evidence for asymmetric connections between bilingual memory representations. *Journal of Memory and Language*, *33*, 149–174. doi:10.1006/jmla.1994.1008.

Krott, A., & Lebib, R. (2013). Electrophysiological evidence for a neural substrate of morphological rule application in correct wordforms. *Brain Research*, *1496,* 70–83. doi:10.1016/j.brainres.2012.12.012.

Kuhl, P. K. (1991). Human adults and human infants show a „perceptual magnet effect" for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & Psychophysics*, *50*, 93–107.

Kutas, M., & DeLong, K. A. A. (2008). Sampler of Event-Related Brain Potential (ERP) Analyses of Language Processing. In Z. Breznitz (Hrsg.), *Brain Research in Language* (S. 153–186). New York, NY: Springer.

Kutas, M., Federmeier, K. D., & Urbach, T. (2014). The „negatives" and „positives" of prediction in language. In M. S. Gazzaniga, & G. R. Mangun (Hrsg.), *The Cognitive Neurosciences* (5. Aufl. S. 649–656). Cambridge: MIT Press.

La Heij, W. (1988). Components of Stroop-like interference in picture naming. *Memory & Cognition*, *16*(5), 400–410.

Lahiri, A., & Marslen-Wilson, W. D. (1991). The mental representation of lexical form: A phonological approach to the recognition lexicon. *Cognition*, *38*, 245–294.

Lahiri, A., & Reetz, H. (2002). Underspecified recognition. In C. Gussenhoven, & N. Werner (Hrsg.), *Laboratory Phonology VII* (S. 637–675). Berlin: Mouton.

Leinenger, M. (2014). Phonological coding during reading. *Psychological Bulletin*, *140*, 1534–1555. doi:10.1037/a0037830.

Leuninger, H. (1993). *Reden ist Schweigen, Silber ist Gold*. *Gesammelte Versprecher*. Zürich: Ammann.

Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, MA: MIT Press.

Levelt, W. J. M. (2013). *A history of psycholinguistics: The pre-Chomskyan era*. Oxford: Oxford University Press.

Levelt, W. J. M., Schriefers, H., Vorberg, D., Meyer, A., Pechmann, T., & Havinga, J. (1991). The time course of lexical access in speech production: A study of picture naming. *Psychological Review*, *98*, 122–142. doi:10.1037/0033-295X.98.1.122.

Levelt, W. J. M., Praamstra, P., Meyer, A. S., Helenius, P., & Salmelin, R. (1998). A MEG study of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 553–567. doi:10.1162/089892998562960.

Levelt, W. J. M., Roelofs, A., & Meyer, A. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 1–75. doi:10.1017/S0140525X99001776.

Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1986). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, *21*, 2–36. doi:10.1016/0010-0277(85)90021-6.

Lüttmann, H., Zwitserlood, P., Böhl, A., & Bölte, J. (2011). Evidence for morphological composition at the form level in speech production. *Journal of Cognitive Psychology*, *23*(7), 818–836. doi:10.1080/20445911.2011.575774.

Marslen-Wilson, W. D. (1987). Functional parallelism in spoken word recognition. *Cognition*, *25*, 71–102. doi:10.1016/0010-0277(87)90005-9.

Marslen-Wilson, W. D. (1993). Issues of process and representation in lexical access. In G. Altmann, & R. Shillcock (Hrsg.), *Cognitive models of speech processing: The second Sperlonga meeting* (S. 187–210). Hove: Erlbaum.

Marslen-Wilson, W. D., & Zwitserlood, P. (1989). Accessing spoken words: The importance of word onsets. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 576–585. doi:10.1037/0096-1523.15.3.576.

Marslen-Wilson, W. D., Tyler, L. K., Waksler, R., & Older, L. (1994). Morphology and meaning in the English mental lexicon. *Psychological Review*, *101*, 3–33. doi:10.1037/0033-295X.101.1.3.

Marslen-Wilson, W. D., Moss, H. E., & Halen, S. van (1996). Perceptual distance and competition in lexical access. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *22*, 1376–1392. doi:10.1037/0096-1523.22.6.1376.

Mayer, A., & Orth, J. (1901). Zur qualitativen Untersuchung der Association. *Zeitschrift für Psychologie*, *26*, 1–13.

McClelland, & Elman, J. L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, *18*, 1–86. doi:10.1016/0010-0285(86)90015-0.

McMurray, B., Tanenhaus, M. K., & Aslin, R. N. (2002). Gradient effects of within-category phonetic variation on lexical access. *Cognition*, *86*, B33–B42. doi:10.1016/S0010-0277(02)00157-9.

Meyer, A. S., & Schriefers, H. (1991). Phonological facilitation in picture-word interference experiments: Effects of stimulus-onset asynchrony and types of interfering stimuli. *Journal of Experimental Psychology, Learning, Memory, and Cognition*, *17*, 1146–1160. doi:10.1037/0278-7393.17.6.1146.

Miller, G. A. (1993). *Wörter. Streifzüge durch die Psycholinguistik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Miller, G. A., Heise, G. A., & Lichten, W. (1951). The intelligibility of speech as a function of the context and the test materials. *Journal of Experimental Psychology*, *41*, 329–335.

Moss, H. E., McCormick, S. F., & Tyler, L. K. (1997). The time course of activation of semantic information of spoken word recognition. *Language and Cognitive Processes*, *12*, 695–731. doi:10.1080/016909697386664.

Neely, J. H. (1991). Semantic priming effects in visual word recognition: A selective review of current findings and theories. In D. Besner, & G. W. Humphreys (Hrsg.), *Basic processes in reading: Visual word recognition* (S. 264–336). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Newman, R., Jared, D., & Haigh, C. A. (2012). Does phonology play a role when skilled readers read high-frequency words? Evidence from ERPs. *Language and Cognitive Processes*, *27*, 1361–1384. doi:10.1080/01690965.2011.603932.

Nickels, L. (Hrsg.). (1997). *Spoken word production and its breakdown in aphasia*. Hove, UK: Psychology Press.

Noble, C. E., & McNeely, D. A. (1957). The role of meaningfulness (m) in paired-associate learning. *Journal of Experimental Psychology*, *53*, 16–22. doi:10.1037/h0041215.

Norris, D. (1994). Shortlist: A connectionist model of continuous speech recognition. *Cognition*, *52*, 189–234. doi:10.1016/0010-0277(94)90043-4.

Norris, D., McQueen, J., Cutler, A., & Butterfield, S. (1997). The possible-word constraint in the segmentation of continuous speech. *Cognitive Psychology*, *34*, 191–243. doi:10.1006/cogp.1997.0671.

Norris, D., McQueen, J., & Cutler, A. (2000). Merging information in speech recognition: Feedback is not necessary. *Behavioral and Brain Sciences*, *23*, 299–370. doi:10.1017/S0140525X00003241.

Osgood, C. E., Suci, G. J., & Tannenbaum, P. H. (1958). *The measurement of meaning*. Urbana, IL: University of Illinois Press.

Paap, K. R., Newsome, S. L., McDonald, J. E., & Schvaneveldt, R. W. (1982). An activation-verification model for letter and word recognition: The word superiority effect. *Psychological Review*, *89*, 573–594. doi:10.1037/0033-295X.89.5.573.

Penfield, W., & Roberts, L. (1959). *Speech and brain mechanisms*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Peuser, G. (1978). Aphasie.Eine Einführung in die Patholinguistik. München: Fink.

Piai, V., Roelofs, A., & Schriefers, H. (2011). Semantic interference in immediate and delayed naming and reading: Attention and task decisions. *Journal of Memory and Language*, *64*(4), 404–423. doi:10.1016/j.jml.2011.01.004.

Pinker, S. (1994). *The language instinct*. New York, NY: Morrow.

Pinker, S. (1999). *Words and Rules*. New York: Basic.

Pisoni, D. B., & Luce, P. A. (1987). Acoustic-phonetic representations in word recognition. *Cognition*, *25*, 21–52. doi:10.1016/0010-0277(87)90003-5.

Plaut, D. C. (1999). A connectionist approach to word reading and acquired dyslexia: Extension to sequential processing. *Cognitive Science*, *23*, 543–568. doi:10.1016/S0364-0213(99)00015-4.

Potter, M. C., So, K.-F., Eckhardt, B. von, & Feldman, L. B. (1984). Lexical and conceptual representation in beginning and more proficient bilinguals. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *23*, 23–38. doi:10.1016/S0022-5371(84)90489-4.

Pulvermüller, F., & Fadiga, L. (2010). Active perception: Sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(5), 351–360. doi:10.1038/nrn2811.

Repp, B. H. (1984). Categorical perception: Issues, methods, findings. In N. J. Lass (Hrsg.), *Speech and Language: Advances in basic research and practice* (S. 243–335). New York, NY: Academic Press.

Repp, B. H., & Liberman, A. M. (1987). Phonetic category boundaries are flexible. In S. Harnad (Hrsg.), *Categorical perception* (S. 89–112). New York, NY: Cambridge University Press.

Roelofs, A. (1992). A spreading-activation theory of lemma retrieval in speaking. *Cognition*, *42*, 107–142. doi:10.1016/0010-0277(92)90041-F.

Salmelin, R. (2007). Clinical neurophysiology of language: The MEG approach. *Clinical Neurophysiology*, *118*, 237–254. doi:10.1016/j.clinph.2006.07.316.

Samuel, A. (1996). Does lexical information influence the perceptual restoration of phonemes? *Journal of Experimental Psychology: General*, *125*, 28–51. doi:10.1037/0096-3445.125.1.28.

Saussure, F. de (1960). Cours de linguistique generale. In C. Bally, & A. Sechehaye (Hrsg.), *Course in general linguistics* (S. 25–50). London, UK: Owen. Übersetzung: W. Baskin; Original veröffentlicht 1916

Schaefer, B., Fricke, S., Szczerbinski, M., Fox-Boyer, A. V., Stackhouse, J., & Wells, B. (2009). Development of a test battery for assessing phonological awareness in German-speaking children. *Clinical Linguistics & Phonetics*, *23*(6), 404–430. doi: 10.1080/02699200902770187.

Schreuder, R., & Baayen, H. (1995). Modelling morphological processing. In L. B. Feldman (Hrsg.), *Morphological aspects of language processing* (S. 131–154). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Schriefers, H., Meyer, A. S., & Levelt, P. (1990). Exploring the time course of lexical access in speech production: Picture-word interference studies. *Journal of Memory and Language*, *29*, 86–106.

Sebastian-Gallés, N., Dupoux, E., Segui, J., & Mehler, J. (1992). Contrasting syllabic effects in Catalan and Spanish. *Journal of Memory and Language*, *31*, 18–32. doi:10.1016/0749-596X(92)90003-G.

Seidenberg, M., & McClelland, J. L. (1989). A distributed developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*, 523–568. doi:10.1037/0033-295X.96.4.523.

Sejnowski, T. J., & Churchland, P. S. (1989). Brain and cognition. In M. I. Posner (Hrsg.), *Foundations of cognitive science* (S. 301–358). Cambridge, MA: MIT Press.

Shallice, T., Warrington, E. K., & McCarthy, R. (1983). Reading without semantics. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *35*(A), 112–138. doi:10.1080/14640748308402120.

Skinner, B. F. (1957). *Verbal behavior*. New York, NY: Appleton-Century-Croft.

Smolka, E., Zwitserlood, P., & Rösler, F. (2007). Stem access in regular and irregular inflection: Evidence from German participles. *Journal of Memory and Language*, *57*(3), 325–347. doi:10.1016/j.jml.2007.04.005.

Starreveld, P. A., & La Heij, W. (1995). Semantic interference, orthographic facilitation, and their interaction in naming tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*(3), 686.

Swinney, D. A. (1979). Lexical access during sentence comprehension: (Re)consideration of context effects. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*, 645–659.

Tabossi, A. (1998). Accessing lexical ambiguity in different types of sentential context. *Journal of Memory and Language*, *27*, 324–340. doi:10.1016/0749-596X(88)90058-7.

Taft, M. (1985). Lexical access codes in visual and auditory word recognition. *Language & Cognitive Processes*, *1*, 297–308. doi:10.1080/01690968608404679.

Turennout, M. van, Hagoort, P., & Brown, C. M. (1998). Brain activity during speaking: From syntax to phonology in 40 ms. *Science*, *280*, 787–806.

Verplank, W. S. (1955). The control of the content of conversation: Reinforcement of statements of opinion. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *51*, 668–676.

Wahrig, G. (2012). *Deutsches Wörterbuch* (9. Aufl.). Gütersloh: Bertelsmann Lexikon Verlag. Wahrig-Burfeind (Hrsg.)

Zatorre, R. J., Meyer, E., Gjedde, A., & Evans, A. C. (1996). PET studies of phonetic processing of speech: Review, replication, and reanalysis. In M. Raichle, & P. S. Goldman-Rakic (Hrsg.), *Special issue: Cortical imaging – microscope of the mind, Cerebral Cortex* (Bd. 6, S. 21–30).

Zwitserlood, P. (1989). The locus of the effects of sentential-semantic context in spoken word processing. *Cognition*, *32*, 25–64. doi:10.1016/0010-0277(89)90013-9.

Zwitserlood, P. (1994a). The role of semantic transparency in the processing and representation of Dutch compounds. *Language and Cognitive Processes*, *9*, 341–368. doi:10.1080/01690969408402123.

Zwitserlood, P. (1994b). Access to phonological form representations in language comprehension and production. In C. Clifton, L. Frazier, & K. Rayner (Hrsg.), *Perspectives on sentence processing* (S. 83–106). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Zwitserlood, P. (1999). Gesprochene Wörter im Satzkontext. In A. D. Friederici (Hrsg.), *Sprachrezeption. Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Serie 3* Bd. 2 Göttingen: Hogrefe.

Zwitserlood, P. (2004). Sublexical and morphological information in speech processing. *Brain and Language*, *90*, 368–377. doi:10.1016/S0093-934X(03)00448-6.

Zwitserlood, P., Schriefers, H., Lahiri, A., & Donselaar, W. van (1993). The role of syllables in the perception of spoken Dutch. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 260–271. doi:10.1037/0278-7393.19.2.260.

Zwitserlood, P., Bölte, J., & Dohmes, P. (2000). Morphological effects on speech production: Evidence from picture naming. *Language and Cognitive Processes*, *15*, 563–591. doi:10.1080/01690960050119706.

Zwitserlood, P., Bölte, J., & Dohmes, P. (2002). Where and how morphologically complex words interplay with naming pictures. *Brain and Language*, *81*, 358–367. doi:10.1006/brln.2001.2530.

Sätze und Texte verstehen und produzieren

Barbara Kaup und Carolin Dudschig

14.1 Einleitung: Kommunizieren über Sachverhalte – 468

14.2 Syntaktische Verarbeitung von Sätzen – 470
14.2.1 Syntaktische Struktur von Sätzen – 470
14.2.2 Erfassen der syntaktischen Struktur von Sätzen (Parsing) – 473
14.2.3 In welcher Form liegt unser syntaktisches Wissen vor? – 482

14.3 Semantische Verarbeitung von Sätzen – 485
14.3.1 Semantische Struktur von Sätzen – 485
14.3.2 Erfassen der Satzbedeutung – 489

14.4 Pragmatische Verarbeitung von Sätzen – 493

14.5 Textverstehen – 495
14.5.1 Struktur von Texten – 495
14.5.2 Erfassen der Textbedeutung – 500

14.6 Verstehen als Simulation – 506

14.7 Sprachproduktion – 508
14.7.1 Aspekte der Produktionsforschung – 508
14.7.2 Sprachproduktionsmodelle – 510
14.7.3 Dialog – 516
14.7.4 Zusammenhang Verstehen und Produktion – 517

14.8 Neurobiologische Grundlagen – 517

14.9 Anwendungsbeispiele – 518

14.10 Ausblick – 519

14.11 Weiterführende Informationen – 520

Literatur – 523

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_14

Im Blickfang

14

14.1 Einleitung: Kommunizieren über Sachverhalte

Wörter sind Bausteine der Sprache, aber Wörter allein machen noch keine Sprache aus. Was die Sprache zu einem so mächtigen Ausdrucks- und Kommunikationsmittel für den Menschen macht, ist die Tatsache, dass sie es uns erlaubt, immer und immer wieder über neue beliebig komplexe Sachverhalte zu kommunizieren. Hierfür müssen Wörter in komplexere Strukturen wie Sätze oder Texte eingebettet werden. Kommuniziert werden kann dann über unterschiedliche Arten von Sachverhalten, wie etwa über Sachverhalte, die im unmittelbaren Umfeld gegeben sind (*Die Sonne scheint auf die Terrasse*), über Sachverhalte an anderen Orten (*Heute tobt ein Wirbelsturm in Florida*), über Sachverhalte in anderen Zeiten (*Im Mai wird Irmgard nach Kanada fliegen*), über hypothetische Sachverhalte (*Vielleicht kauft sich Ian bald ein neues Mountainbike*) und sogar über Sachverhalte, die eigentlich unmöglich sind (*Wenn im Garten ein Einhorn stünde …*). Das Faszinierende an Sprache ist, dass mithilfe einer endlichen Anzahl von Wörtern (die unser mentales Lexikon bereitstellt) prinzipiell eine unendliche Anzahl von Sätzen generiert und verstanden werden kann. Unser Wissen über einzelne Wörter und deren Bedeutung reicht hierfür jedoch nicht aus. Wörter stehen in Sätzen in einer bestimmten Beziehung zueinander und nehmen im Satz bestimmte Rollen ein. Zwei Sätze mit denselben Wörtern beschreiben also unter Umständen unterschiedliche Sachverhalte (vgl. 1 vs. 2; 3 vs. 4).

(1) *Elisabeth mag reife Bananen und gekochte Himbeeren.*
(2) *Elisabeth mag gekochte Bananen und reife Himbeeren.*
(3) *Der Hund jagt den Maulwurf.*
(4) *Den Hund jagt der Maulwurf.*

Zusätzlich zu unserem Wissen über die Wörter und deren Bedeutung müssen wir also Wissen darüber haben, welche Beziehungen die Wörter in einem Satz eingehen können. Dieses Wissen wird üblicherweise als syntaktisches Wissen bezeichnet und stellt gemeinsam mit dem lexikalisch-semantischen Wissen, das in ▶ Kap. 13 beschrieben wurde, den Großteil unseres sprachlichen Wissens dar. Auf der Basis dieser beiden Wissensquellen ergibt sich nun die Bedeutung von Sätzen. Allerdings ist hierfür weiteres Wissen notwendig, nämlich das Wissen über sogenannte semantische Kompositionsprinzipien. Mithilfe dieser Prinzipien kann die Bedeutung jedes beliebigen Satzes erfasst werden, solange dessen syntaktische Struktur und die Bedeutung der in ihm enthaltenen Wörter bekannt sind. Diese Prinzipien geben vor, wie die Bedeutungen der Wörter zu einer komplexen Bedeutung kombiniert werden können, und sorgen dafür, dass wir mit unserer Sprache prinzipiell unendlich viele komplexe Sachverhalte ausdrücken können. In diesem Sinne stellt das Wissen über se-

mantische Kompositionsprinzipien streng genommen den Kern unseres sprachlichen Wissens dar. Es erlaubt uns beispielsweise zu erkennen, dass (5) zwei unterschiedliche Sachverhalte beschreiben kann: Entweder sehen alle gemeinten Kinder ein und denselben Pudel, oder jedes Kind sieht einen Pudel, wobei dies unterschiedliche Pudel sein können. Ebenso können wir aus (6) schlussfolgern, dass viele Leute Oliven mögen, und wissen doch, dass aus (7) nicht folgt, dass wenige Leute schön sind.

(5) *Jedes Kind sieht einen Pudel.*
(6) *Viele Leute mögen Oliven und Knoblauch.*
(7) *Wenige Leute sind schön und reich.*

Für eine erfolgreiche Kommunikation sind dies jedoch immer noch nicht alle relevanten Wissensquellen. So ist die sprachliche Kommunikation dann besonders effektiv, wenn bestimmte Konversationsmaximen befolgt werden, wonach etwa der Sprecher nur relevante Dinge äußert und seine Beiträge so informativ gestaltet, wie es die Situation erfordert. Unter Berücksichtigung dieser Maximen lässt sich dann aus (8) schlussfolgern, dass Rolf nicht mehr als vier Kinder hat, auch wenn der Satz im Prinzip natürlich auch mit diesem Sachverhalt übereinstimmen würde.

(8) *Rolf hat vier Kinder.*

Hinzu kommt, dass es im Alltag häufig hilfreich ist, wenn nicht nur die tatsächliche Bedeutung von Sätzen übermittelt wird, sondern auch die dahinterliegende Intention des Sprechers. So ist eine einfache Ja- oder Nein-Antwort auf die Frage in (9) in den allermeisten Fällen wohl unbefriedigend, und die an einer Tür angebrachte Anweisung in (10) soll normalerweise sicher nicht alle Vorbeigehenden zum Klopfen auffordern.

(9) *Können Sie mir sagen, wie viel Uhr es ist?*
(10) *Bitte klopfen!*

Wissen, das nicht die kontextunabhängige Bedeutung sprachlicher Ausdrücke betrifft, sondern die Interpretation sprachlicher Äußerungen in konkreten Kontexten, wird häufig auch als pragmatisches Wissen bezeichnet. Natürlich spielt insgesamt auch das generelle Weltwissen der Beteiligten eine Rolle, beispielsweise wenn ein Sprecher bei einem Bericht über einen Restaurantbesuch entscheidet, welche Information vorausgesetzt werden kann (vgl. 11) und welche versprachlicht werden sollte (vgl. 12). Dieses Wissen wird aber üblicherweise nicht zum sprachlichen Wissen gezählt.

(11) *Im Restaurant gab es einen Kellner.*
(12) *Das Essen war sehr teuer.*

Wirklich komplexe Sachverhalte werden häufig nicht mithilfe von einzelnen Sätzen beschrieben, sondern mit Texten, die aus mehreren Sätzen bestehen. Beim Generieren und Verstehen von Texten kommen dann noch weitere Aspekte hinzu. Nicht jede Aneinanderreihung von Sätzen ist schon ein kohärenter Text. Ein Text gilt üblicherweise als kohärent, wenn die einzelnen Sätze zueinander in inhaltlicher Beziehung stehen und gemeinsam zu einem übergeordneten Thema beitragen. Natürlich gibt es auch hier gewisse Regeln, nach denen sich Sätze zu kohärenten Texten zusammenfügen lassen, und das Verstehen von Texten setzt im gewissen Sinn voraus, dass erfasst wird, in welcher Beziehung die Sätze zueinander stehen. In (13) beispielsweise wird die kausale Beziehung zwischen den Sätzen sprachlich explizit angezeigt (durch das Wort *deshalb*), in (14) hingegen muss sie erschlossen werden. Auch hier ist also bestimmtes Wissen notwendig, speziell Wissen über rhetorische Relationen und *Story Grammars*.

(13) *Ulrike verdient wenig Geld. Deshalb lud Frank sie gestern zum Essen ein.*
(14) *Die Kinder sind heute nicht ins Freibad gegangen. Es hat geregnet, und die Temperatur stieg selten über 15 Grad.*

In der sprachwissenschaftlichen Forschung werden entsprechend der vorangehenden Überlegungen verschiedene Beschreibungsebenen von Sätzen und Texten unterschieden: Die **Syntax** beschäftigt sich mit den Regeln, nach denen Wörter zu komplexeren sprachlichen Einheiten verknüpft werden können. Die **Semantik** beschäftigt sich mit der Bedeutung dieser komplexeren sprachlichen Einheiten und erforscht Prinzipien, die es erlauben, die Bedeutung der komplexeren Einheiten aus der Bedeutung ihrer Bestandteile sowie deren syntaktischer Verknüpfung zu erschließen. Die **Pragmatik** schließlich beschäftigt sich mit der Art und Weise, wie Sätze in bestimmten Äußerungskontexten verwendet und interpretiert werden. Der sprachwissenschaftliche Forschungszweig, der sich speziell mit Texten und deren Struktur beschäftigt, heißt **Textlinguistik**.

Diese unterschiedlichen Beschreibungsebenen sprachlicher Reize spielen in der Psycholinguistik sowohl für die Rezeption von Sprache als auch für die Produktion von Sprache eine entscheidende Rolle. Allerdings beschäftigt sich der überwiegende Anteil psycholinguistischer Forschung mit der Sprachrezeption. Die Sprachproduktion ist von jeher ein eher vernachlässigtes Forschungsgebiet, was u. a. damit zusammenhängen mag, dass die experimentelle Erforschung von Sprachproduktionsprozessen besonders schwierig ist, da sich hier die sprachlichen Stimuli nicht vorgeben und damit nicht so leicht kontrollieren lassen. Erst in jüngster Zeit wird bei der Modellierung des Sprachverarbeitungsprozesses versucht, Sprachverstehen und Sprachproduktion integriert zu erklären. Das vorliegende Kapitel trägt diesem thematischen Ungleichgewicht Rechnung, indem die unterschiedlichen Aspekte der Verarbeitung vornehmlich aus der Perspektive der Sprachrezeptionsforschung referiert werden. ▶ Abschn. 14.2 wird sich mit der syntaktischen Verarbeitung von Sätzen beschäftigen, ▶ Abschn. 14.3 mit der semantischen Verarbeitung von Sätzen und ▶ Abschn. 14.4 mit der pragmatischen Verarbeitung. In ▶ Abschn. 14.5 wird speziell die Textverstehensforschung dargestellt. In ▶ Abschn. 14.6 stellen wir eine neuere Sichtweise in der sprachpsychologischen Forschung vor, der zufolge beim Sprachverstehen Bedeutungsrepräsentationen gebildet werden, die denen ähnlich sind, die auch in der nichtsprachlichen Kognition eine Rolle spielen. Die Sprachproduktion schließlich wird gebündelt in ▶ Abschn. 14.7 behandelt. ▶ Abschn. 14.8 befasst sich mit den neurobiologischen Grundlagen sprachlicher Prozesse und ▶ Abschn. 14.9 mit Anwendungen, die

sich aus sprachpsychologischer Grundlagenforschung ergeben. Schließlich werden wir in ▶ Abschn. 14.10 einen Ausblick auf zukünftige Forschung im Bereich der Sprachpsychologie geben.

▶ Abschn. 14.2, 14.3 und 14.5 sind dabei jeweils so gegliedert, dass zunächst die eher strukturellen Aspekte behandelt werden, wobei typischerweise Überlegungen aus der sprachwissenschaftlichen Forschung im Vordergrund stehen. Danach geht es um die Verarbeitungsperspektive. Hier liegt der Fokus auf experimentellen Befunden und Prozessmodellen aus der sprachpsychologischen Forschung.

14.2 Syntaktische Verarbeitung von Sätzen

Wörter stehen in Sätzen nicht in einer beliebigen Reihenfolge. Manche Sequenzen sind grammatisch wohlgeformt (vgl. 15), andere sind ungrammatisch (vgl. 16); ungrammatische Sequenzen werden durch ein Sternchen am Anfang des Satzes angezeigt. Grammatische Wohlgeformtheit hat nichts mit der Sinnhaftigkeit von Sätzen zu tun. Ein Satz kann sinnvoll und verständlich sein, obwohl er ungrammatisch ist (vgl. 17), und grammatisch wohlgeformt sein, obwohl er wenig Sinn ergibt, illustriert durch (18), das wohl berühmteste Beispiel für einen wohlgeformten sinnlosen Satz (Chomsky 1957).

(15) *Die Kobra verschlang gierig das Krokodil.*
(16) **Augen die Jungen dem Sonne die in stach.*
(17) **Auf den Balkon blüht das Blume.*
(18) *Farblose grüne Ideen schlafen wütend.*

Interessanterweise können Sprecher einer Sprache normalerweise sehr schnell entscheiden, ob ein Satz wohlgeformt ist oder nicht, auch dann, wenn der Satz wenig Sinn ergibt. Dies scheint dafür zu sprechen, dass Menschen über ein gewisses Regelwissen hinsichtlich der syntaktischen Struktur der Sätze in ihrer Muttersprache verfügen. Um einem Missverständnis vorzubeugen: Wenn hier von Regeln gesprochen wird, so sind damit nicht die Regeln gemeint, die in der Schule im Deutschunterricht vermittelt werden (wonach es z. B. *deinetwegen* und nicht *wegen dir* zu heißen hat und das finite Verb in Sätzen, die mit *weil* eingeleitet werden, am Satzende steht). Solche *präskriptiven* Regeln geben an, wie Sprache nach Meinung einiger sein sollte. Die Regeln, um die es uns hier geht, sind hingegen *deskriptiv*. Sie sollen beschreiben, welche Sätze Sprecher einer Sprache tatsächlich akzeptabel finden und welche nicht. Eine Unterscheidung, die hilfreich ist, ist die zwischen der Kompetenz und der Performanz. **Kompetenz** bezieht sich auf das abstrakte Wissen über Sprache, das es einem Sprecher erlaubt, eine Entscheidung über die Wohlgeformtheit einer beliebigen Wortsequenz zu treffen, wenn er dabei beliebig viel Zeit und Speicherressourcen zur Verfügung hat. So können die meisten Sprecher des Deutschen mit etwas Konzentration entscheiden, dass (19) grammatisch wohlgeformt ist, auch wenn dieser Satz vermutlich niemals geäußert würde, da dies die Arbeitsgedächtniskapazitäten (▶ Kap. 12) überschreiten würde. Welche Sätze tatsächlich geäußert und unter normalen Bedingungen verstanden werden, ist eher eine Frage der **Performanz**.

(19) *Der Hund, der die Katze, die die Maus, die den Käse klaute, jagte, anknurrte, heißt Willi.*

Die heutige linguistische Forschung interessiert sich in besonderem Maße für die Kompetenz von Sprechern einer Sprache und wurde wesentlich durch Noam Chomsky beeinflusst, dessen Ziel es war, ein Regelsystem zu entwickeln, das der menschlichen Sprachkompetenz zugrunde liegen könnte. Die Frage, in welcher Form das entsprechende Wissen beim Menschen abgespeichert ist, spielte dabei nur eine untergeordnete Rolle. Tatsächlich wird von einigen psycholinguistischen Forschern bezweifelt, dass syntaktisches Wissen beim Menschen in Form von expliziten Regeln gespeichert ist (▶ Abschn. 14.2.3). Dennoch sind die Erkenntnisse bezüglich des Regelsystems, mithilfe dessen sich die menschliche Sprachkompetenz beschreiben lässt, natürlich von großem Interesse für die psycholinguistische Forschung, die sich sowohl für die Kompetenz wie für die Performanz interessiert. Der folgende Abschnitt widmet sich deshalb diesem Regelsystem, das auch **Grammatik** genannt wird.

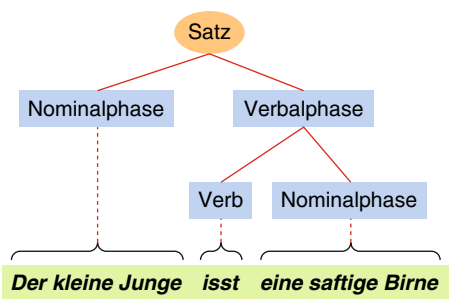
14.2.1 Syntaktische Struktur von Sätzen

Phrasenstrukturgrammatiken

Eine Art von Grammatik, die in der psycholinguistischen Forschung eine zentrale Rolle gespielt hat, sind die Phrasenstrukturgrammatiken. Diese Grammatiken, deren Entwicklung wesentlich durch den Sprachwissenschaftler Noam Chomsky vorangetrieben wurde, bilden unsere Intuition ab, dass Wörter innerhalb von Sätzen in bestimmte Einheiten gruppiert sind, sogenannte *Phrasen*. Der einfache Satz (20) etwa besteht aus der Nominalphrase (NP) *der kleine Junge* und der Verbalphrase (VP) *isst eine saftige Birne*.

(20) *Der kleine Junge isst eine saftige Birne.*

Ein wichtiges Merkmal von Phrasenstrukturgrammatiken betrifft die Annahme, dass die Phrasen in Sätzen hierarchisch angeordnet sind. Phrasen können ihrerseits also wieder Phrasen als Teile enthalten. Die VP in (20) etwa besteht aus einem Verb (*isst*) und einer weiteren NP (*eine saftige Birne*). Zur Abbildung dieser hierarchischen Struktur von Sätzen haben sich in der sprachwissenschaftlichen Forschung Phrasenstrukturbäume durchgesetzt (◘ Abb. 14.1). Etwas platzsparender lassen sich



◘ **Abb. 14.1** Phrasenstrukturbaum

Abb. 14.2 Grammatik für ein kleines Fragment der deutschen Sprache. *S* = Satz, *K* = Konjunktion, *NP* = Nominalphrase, *VP* = Verbalphrase, *Det* (Abkürzung für *determiner*) = Artikel, *Adj* = Adjektiv, *N* = Nomen, *V* = Verb

Eine mögliche syntaktische Struktur und deren schrittweise Ableitung:

S
S K S
NP VP K S
Det Adj N VP K S
Det Adj N VP K S K S
Det Adj N VP K NP VP K S
Det Adj N VP K Det Adj N VP K S
Det Adj N VP K Det Adj N VP K NP VP
Det Adj N VP K Det Adj N VP K Det N VP
Det Adj N VP K Det Adj N VP K Det N V NP
Det Adj N VP K Det Adj N VP K Det N V Det N

Nach Einsetzen von Terminalsymbolen:
Die zickige Frau hüpft und die nette Katze schläft und die Frau liebt die Katze

Eine mögliche andere syntaktische Struktur: Det N V K Det N V Det N
Nach Einsetzen von Terminalsymbolen: *Die Katze schläft und die Frau streichelt die Katze*

Grammatik

Nichtterminalsymbole: S, K, NP, VP, V, N, Det, Adj
Startsymbol: S
Terminalsymbole: und, oder Frau, Katze, die, nette, zickige, schöne, hüpft, schläft, liebt, streichelt

Phrasenstrukturregeln:

[a] S	→ NP VP	[i] Adj	→ nette
[b] S	→ S K S	[j] VP	→ hüpft
[c] NP	→ Det N	[k] VP	→ schläft
[d] NP	→ Det Adj N	[l] V	→ liebt
[e] VP	→ V NP	[m] V	→ streichelt
[f] N	→ Katze	[n] Det	→ die
[g] N	→ Frau	[o] K	→ und
[h] Adj	→ zickige	[p] K	→ oder

die hierarchischen Strukturen auch in Klammerschreibweise notieren:

$[_S\ [_{NP}$ Der kleine Junge$]\ [_{VP}\ [_V$ isst$]\ [_{NP}$ eine saftige Birne.$]]]$

Eine Phrasenstrukturgrammatik lässt sich formal mithilfe eines Startsymbols und drei endlichen Mengen beschreiben: einer Menge von Grundausdrücken (auch Terminalsymbole genannt), einer Menge von Symbolen, die für bestimmte Kategorien von sprachlichen Ausdrücken stehen (auch Nichtterminalsymbole genannt), und einer Menge von Phrasenstrukturregeln, die angeben, aus welchen Bausteinen Sätze und Phrasen zusammengesetzt sind. Phrasenstrukturregeln liegen typischerweise in Form von Ersetzungsregeln vor. Die Regel „S → NP VP“ beispielsweise gibt an, dass das Nichtterminalsymbol „S“ (für Satz) durch eine Sequenz aus den beiden Nichtterminalsymbolen „NP“ und „VP“ ersetzt werden kann. Diese Regel bildet daher die Tatsache ab, dass sich Sätze im Deutschen häufig als Sequenz einer NP gefolgt von einer VP beschreiben lassen.

Neben diesen strukturaufbauenden Regeln, die nur Nichtterminalsymbole enthalten, gibt es auch lexikalische Einsetzungsregeln, in denen auf der rechten Seite ein Terminalsymbol steht (also ein Wort aus dem Lexikon der jeweiligen Sprache, z. B. „N → Frau“). Alle Sequenzen von Terminalsymbolen, die sich mithilfe einer solchen Grammatik aus dem sogenannten Startsymbol (in der Regel „S“) erzeugen lassen, gelten als Sätze der jeweiligen Sprache. Eine Grammatik liefert also nur dann eine angemessene Beschreibung einer bestimmten Sprache, wenn sich mit ihrer Hilfe alle Sätze einer Sprache ableiten lassen, gleichzeitig aber keine Sätze generiert werden können, die nicht zur entsprechenden Sprache gehören. In Abb. 14.2 ist eine Phrasenstrukturgrammatik angegeben, die einen kleinen Teil der deutschen Sprache beschreibt.

Rekursion

In vielen Grammatiken kann auf der Basis von wenigen Regeln prinzipiell eine unendliche Anzahl von Sätzen generiert werden. Diese Grammatiken werden oft auch als *Generative Grammatiken* bezeichnet. Auch mit der Grammatik in Abb. 14.2 können unendlich viele unterschiedliche Sätze generiert werden. Verantwortlich hierfür ist die rekursive Regel b, bei der auf beiden Seiten des Pfeiles dasselbe Nichtterminalsymbol S steht. Solche rekursiven Regeln können prinzipiell beliebig häufig hintereinander aufgerufen werden. Als Resultat ergibt sich ein sehr langer Satz. Auch Sätze wie (19) entstehen durch rekursive Regeln, wobei aus einem Satz ein neuer Satz gebildet wird, in dem ein Relativsatz eingeschoben wird, in den dann wieder ein Relativsatz eingeschoben wird und so weiter. Rekursion wird von vielen Sprachwissenschaftlern als ein wesentliches Merkmal menschlicher Grammatiken angesehen (für eine spezifische Meinung dazu vgl. Chomsky 1980).

Transformationen/Oberflächen- und Tiefenstrukturen

Phrasenstrukturgrammatiken, wie sie bisher diskutiert wurden, erfassen noch nicht vollständig die Kompetenz von Sprechern einer Sprache. Sätze wie (21) und (22) können (mit einer angemessenen Erweiterung der Grammatik in Abb. 14.2) zwar im Prinzip abgeleitet werden, aber die Intuition der meisten Sprecher, dass diese Sätze in einer bestimmten Beziehung zueinander stehen, wäre damit noch nicht erfasst. In seinem Buch *Syntactic Structures* führt Chomsky (1957) deshalb noch eine weitere Art von Regeln ein, die sogenannten Transformationsregeln, die aus einer Sequenz von Symbolen eine andere Sequenz von Symbolen generieren. So gibt es eine Transformationsregel, die aus einem aktiven Satz den entsprechenden Satz im Passiv macht, sowie eine Transformationsregel, die aus einem affirmativen deklarativen Satz eine entsprechende Frage oder auch dessen Negation erstellt (vgl. 23 und 24).

(21) *Max hat die Brötchen gebacken.*
(22) *Die Brötchen wurden von Max gebacken.*
(23) *Hat Max die Brötchen gebacken?*
(24) *Max hat die Brötchen nicht gebacken.*

In einer überarbeiteten Version seiner ursprünglichen Theorie führt Chomsky (1965) in seinem Buch *Aspects of the Theory of Syntax* eine Unterscheidung ein, die insbesondere die frühen psycholinguistischen Arbeiten stark beeinflusst hat und direkt an

seine ursprüngliche Konzeption von Transformation anknüpft. In dieser auch oft als Standardtheorie bezeichneten Version seiner Theorie geht Chomsky davon aus, dass es Phrasenstrukturregeln gibt, die bestimmte Baumstrukturen erzeugen: die *Tiefenstrukturen*. Allerdings sind diese Tiefenstrukturen noch keine tatsächlichen Sätze der Sprache. Die tatsächlichen Sätze der Sprache entstehen erst, nachdem mithilfe von Transformationsregeln die Tiefenstrukturen in verschiedene bedeutungsverwandte *Oberflächenstrukturen* umgewandelt wurden. Jeder Satz besitzt in dieser Version also eine Tiefen- und eine Oberflächenstruktur. Über die Tiefen- und Oberflächenstrukturen interagiert die syntaktische Komponente auch mit den anderen Komponenten des Sprachsystems. Die Bedeutung eines Satzes wird durch dessen Tiefenstruktur determiniert und die Lautgestalt eines Satzes durch dessen Oberflächenstruktur. Die semantische Komponente weist den Tiefenstrukturen eine Bedeutung zu und die phonologische Komponente den Oberflächenstrukturen eine phonologische Repräsentation. Die syntaktische Komponente hat dieser Vorstellung zufolge im Sprachsystem also die Aufgabe, Lautgestalten von Sätzen und Satzbedeutungen zueinander in Beziehung zu setzen. In Abb. 14.3 ist dieses Grammatikmodell grafisch veranschaulicht. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei nicht um ein Verarbeitungsmodell handelt. Für die Verarbeitung lassen sich aber Hypothesen ableiten. Bei der Sprachproduktion muss auf Basis eines bestimmten Gedankens eine entsprechende Tiefenstruktur erstellt werden, die mithilfe von Transformationen in die Oberflächenstruktur und dann in die Lautgestalt überführt werden muss. Beim Sprachverstehen muss umgekehrt aus der Oberflächenstruktur auf die Tiefenstruktur geschlossen werden, wofür je nach Satz mehr oder weniger komplexe Transformationsprozesse notwendig sind. Es ergibt sich also die Vorhersage, dass Sätze umso schwerer zu verstehen sein sollten, je mehr Transformationen daran beteiligt sind (► Abschn. 14.2.2).

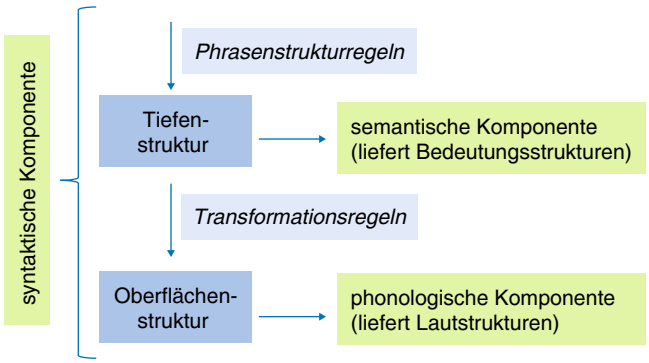


Abb. 14.3 Grammatikmodell in Chomskys Standardtheorie. (Nach Grewendorf 2006)

Subkategorisierung, Rektion und Kongruenz

Vielen Lesern wird bereits aufgefallen sein, dass Phrasenstrukturgrammatiken, wie sie bisher beschrieben wurden, sicherlich keine adäquate Beschreibung des Deutschen oder Englischen sein können. Eine Regel wie „VP → V NP“ generiert nur dann einen korrekten Satz, wenn ein transitives Verb (z. B. *lieben*) eingesetzt wird. Neben transitiven Verben gibt es aber auch intransitive Verben (z. B. *schlafen*), ditransitive Verben (z. B. *schulden*), Verben mit Satzergänzung (z. B. *behaupten*), Verben mit Präpositionalobjekt (z. B. *warten auf*) usw. Diese *Subkategorisierungseigenschaften* von Verben müssen natürlich beachtet werden. In der Grammatik in Abb. 14.2 wurde zur Unterscheidung zwischen intransitiven und transitiven Verben ein Trick angewandt. Es wurden lexikalische Einsetzungsregeln eingeführt, in denen eine VP direkt durch ein intransitives Verb ersetzt werden konnte (z. B. „VP → schläft“), während dies für transitive Verben nicht möglich war. Aber das löst natürlich nur einen kleinen Teil des Problems. Eine Möglichkeit bestünde darin, in den Phrasenstrukturregeln zwischen den unterschiedlichen Eigenschaften von Verben explizit zu unterscheiden. Man hätte dann Regeln wie „VP → V_i“, „VP → V_t NP“ und „VP → V_d NP NP“. Allerdings würden damit einige Gemeinsamkeiten von Verben nicht erfasst werden, z. B. die Art und Weise, wie Verben durch Adverbiale modifiziert werden. Hier müsste für jede Art von Verb eine eigene Regel etabliert werden. Um dies zu vermeiden, wird in der Generativen Grammatik angenommen, dass Subkategorisierungseigenschaften für die strukturaufbauenden Phrasenstrukturegeln keine Rolle spielen. Stattdessen wird postuliert, dass diese Eigenschaften bei den lexikalischen Einsetzungsregeln beachtet werden. Das Nichtterminalsymbol „V“ kann nur dann durch ein bestimmtes Verb aus dem Lexikon ersetzt werden, wenn der Kontext den im Lexikon spezifizierten Subkategorisierungseigenschaften des Verbs entspricht. Ähnliche Überlegungen lassen sich auch hinsichtlich *Rektion* (Kasuszuweisung) und *Kongruenz* (Person und Numerus) anstellen, sollen hier aber aus Platzgründen nicht ausgeführt werden. Einen gut verständlichen Überblick geben Grewendorf et al. (1989).

Argumente vs. Adjunkte

Eine wichtige Unterscheidung, die mit den Subkategorisierungseigenschaften von Verben zu tun hat, ist die zwischen Argumenten und Adjunkten. Die Argumente eines Verbs sind dessen geforderte Ergänzungen. Ein transitives Verb wie *sehen* fordert zwei Argumente, ein Subjekt und ein direktes Objekt. Ohne diese beiden Argumente ist das Verb nicht gesättigt. Für jedes Argument ist im Lexikoneintrag des Verbs auch dessen **thematische Rolle** spezifiziert (z. B. Agens, Patiens; Dowty 1991; Fillmore 1968; Grimshaw 1990). Jedes Argument, das in den Subkategorisierungseigenschaften eines Verbs spezifiziert ist, muss im Satz auch realisiert sein. Entfernt man ein Argument aus dem Satz, so wird er in der Regel ungrammatisch (vgl. 25a vs. 25d; Argumente sind gepunktet), fügt man zusätzliche Argumente hinzu, ebenfalls (vgl. 25e). Adjunkte hingegen sind zusätzliche Angaben, die aus einem Satz entfernt werden können, ohne dass der Satz ungrammatisch würde (vgl. 25a, 25b und 25c; Adjunkte sind unterstrichen). Die Anzahl von Adjunkten ist nicht festgelegt. Prinzipiell können unendlich viele Adjunkte hinzugefügt werden (vgl. 25f).

(25)
a. Sibylla hat Simon heute im Zoo getroffen.
b. Sibylla hat Simon heute getroffen.
c. Sibylla hat Simon getroffen.
d. **Sibylla hat heute im Zoo getroffen.*
*e. *Sibylla hat Simon heute Teresa getroffen.*
f. Sibylla hat heute im Morgengrauen in Berlin bei Regen heimlich Simon im Zoo getroffen.

Allerdings soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass es in diesem Zusammenhang auch eine Reihe von Ausnahmen gibt: Nicht jedes Argument muss in jedem Fall overt im Satz realisiert werden; manchmal bleiben Argumente implizit (z. B. *Fritz isst*; *Das Buch wird geschrieben*; Welke 1988). Eine Möglichkeit, zwischen Argumenten und Adjunkten zu unterscheiden besteht auch darin, zu prüfen, woher sie ihre thematischen Rollen erhalten. Das Verb vergibt die thematischen Rollen nur für Argumente, nicht für Adjunkte (Krifka 2004).

■ Spuren und Köpfe

Chomskys Standardtheorie ist in den nachfolgenden Jahren kontinuierlich weiterentwickelt worden. In neueren Modellen ist die Bedeutung eines Satzes nicht mehr direkt durch die Tiefenstruktur determiniert, sondern wird erst nach der Derivation der Oberflächenstruktur bestimmt. Hierdurch wird der Beobachtung Rechnung getragen, dass bestimmte Transformationen, z. B. die der Passivierung, subtile Veränderungen der Kernbedeutung nach sich ziehen, wie sich am Vergleich zwischen (26) und (27) verdeutlichen lässt (die sich u. a. darin unterscheiden, ob alle im Raum dieselben zwei Sprachen sprechen oder nicht). Außerdem kann neueren Versionen der Theorie zufolge die Oberflächenstruktur Spuren von den bei der Transformation vorgenommenen Phrasenbewegungen enthalten und ist deshalb nicht mit der Oberflächenstruktur der Standardversion gleichzusetzen. Wird Satz (28) zu einer Frage transformiert und im Zuge dessen das Verb ins sogenannte Vorfeld des Satzes gerückt, so ist in der Oberflächenstruktur an der ursprünglichen Position des Verbs eine Spur enthalten (vgl. 29; die Spur t_i steht an der Stelle im Satz, an der das Verb mit dem Index *i* ursprünglich gestanden hat).

(26) *Jeder im Raum spricht mindestens zwei Sprachen.*
(27) *Mindestens zwei Sprachen werden von jedem im Raum gesprochen.*
(28) *Der Junge schläft.*
(29) Schläft$_i$ der Junge t_i?

Ein empirisches Argument für solche Spuren ergibt sich, wenn man den Unterschied zwischen den Sätzen (30) und (31) betrachtet und versucht, die *Wanna*-Konstruktion (Lakoff 1970) darauf anzuwenden. Während in (30) das Zusammenziehen von *want* und *to* für viele Sprecher des Englischen möglich ist (*Who do you wanna dance with?*), ist dies in (31) nicht der Fall (**Who do you wanna dance with Mary?*). Eine Begründung könnte sein, dass in (31) zwischen *want* und *to* eine Spur enthalten ist, die das Zusammenziehen verhindert (Sauerland 2011).

(30) *Who$_i$ do you want to dance with t_i?* [Deutsch: *Mit wem möchtest du tanzen?*]
(31) *Who$_j$ do you want t_j to dance with Mary?* [Deutsch: *Mit wem soll Maria tanzen?*]

Eine weitere wichtige Neuerung betrifft die Erkenntnis, dass sich alle Phrasen als Anordnungen von obligatorischen und optionalen Elementen beschreiben lassen. So besteht eine VP aus einem Verb und potenziell weiteren Elementen, eine NP aus einem Nomen und potenziell weiteren Elementen, eine Adjektivphrase aus einem Adjektiv und potenziell weiteren Elementen usw. Das X-Bar-Schema in (32) trägt dieser Erkenntnis Rechnung, wobei das obligatorische Element X auch als Kopf der Phrase bezeichnet wird.

(32) XP → … X …

Durch dieses Schema können diverse Generalisierungen adäquat beschrieben werden (Überblick in Grewendorf et al. 1989), und es lässt sich hieran auch die Idee einer Universalgrammatik verdeutlichen: Es wird angenommen, dass das X-Bar-Schema allen Sprachen dieser Welt unterliegt, nur dass die Anordnung der Elemente in den Phrasen unterschiedlich ist. Der Kopf ist immer peripher, aber die Position des Kopfes unterscheidet sich: So ist das Englische eine *head-initial*-Sprache, das Japanische hingegen eine *head-final*-Sprache. Die Anordnung der Elemente in den Phrasen wird entsprechend als ein Parameter in der als angeboren angesehenen Universalgrammatik betrachtet, der im kindlichen Spracherwerb aus dem sprachlichen Input erschlossen werden muss (Pinker 1994).

■ Lexikalisierte Grammatiken

In den meisten modernen Grammatiktheorien wird davon ausgegangen, dass der überwiegende Anteil syntaktischen Regelwissens in den Einträgen im mentalen Lexikon (▶ Kap. 13) gespeichert ist. Jeder Eintrag enthält somit bereits Informationen darüber, wie das jeweilige Wort mit anderen Wörtern syntaktisch in Beziehung stehen kann. Für den Strukturaufbau sind dann kaum weitere Regeln notwendig. Die Bedeutung von strukturaufbauenden Phrasenstrukturregeln ist in modernen Grammatiktheorien entsprechend in den Hintergrund gerückt. Ein Beispiel für eine lexikalisierte Grammatik liegt dem Modell von Vosse und Kempen (2000) zugrunde, das in ▶ Abschn. 14.2.2 genauer beschrieben wird. Eine der ersten lexikalisierten Grammatiken wurde von Bresnan (1978) vorgeschlagen.

In diesem Abschnitt haben wir uns mit der syntaktischen Struktur von Sätzen befasst und gesehen, dass man diese mithilfe von Grammatiken beschreiben kann. Die Frage, ob der Mensch ein solches grammatisches Wissen bei der Verarbeitung von Sätzen auch tatsächlich anwendet und in welcher Form dieses Wissen gegebenenfalls beim Mensch repräsentiert ist, behandelt ▶ Abschn. 14.2.2.

14.2.2 Erfassen der syntaktischen Struktur von Sätzen (Parsing)

Wie in ▶ Abschn. 14.2.1 deutlich wurde, geht man in der sprachwissenschaftlichen Forschung davon aus, dass die syntaktische Struktur von Sätzen zwischen deren Lautstruktur und deren Bedeutung vermittelt. Auf dem Weg zur Satzbedeutung muss demnach beim Sprachverstehen die syntaktische Struktur der Sätze ermittelt werden. Dieser Prozess wird auch als *Parsing* bezeichnet. Geht man von den Annahmen der Generativen Grammatik aus, so sind hierbei sowohl die Oberflächenstrukturen von Sätzen als auch deren Tiefenstrukturen relevant. Der Parsing-Prozess sollte demnach aufwendiger sein, je mehr Transformationen zwischen der Tiefen- und der Oberflächenstruktur

eines Satzes liegen. Diese Hypothese spielte insbesondere in den Anfängen der psycholinguistischen Forschung zum Parsing eine große Rolle. Viel Beachtung fand auch die Frage, wie groß die Einheiten sind, in denen die syntaktische Verarbeitung erfolgt. In der jüngeren Forschung ging es dann vornehmlich darum, unterschiedliche Parsing-Strategien genauer zu untersuchen. Dabei stand insbesondere die Frage im Vordergrund, wie beim Parsing mit Mehrdeutigkeiten umgegangen wird, und auch die damit verbundene Frage, zu welchem Zeitpunkt während der syntaktischen Verarbeitung andere Wissensquellen mit einbezogen werden. In all diesen Forschungsarbeiten wird angenommen, dass die Erfassung der syntaktischen Struktur ein notwendiger Bestandteil des Satzverstehens ist. Natürlich könnte man sich auch vorstellen, dass Sätze per Default auf der Basis unseres allgemeinen Weltwissens verarbeitet werden und syntaktische Information nur dann mit einbezogen wird, wenn diese Analyse nicht zum Erfolg führt. Satz (33) würde demnach im Sinne unseres Weltwissens interpretiert, wonach der Koch eine Zwiebel zerhackt.

(33) *Eine Zwiebel zerhackt den Koch.*

Diese Hypothese wird heutzutage jedoch kaum noch vertreten. Dies hat u. a. damit zu tun, dass man auf der Basis dieses Ansatzes nicht erklären kann, wie neue Information vermittelt werden kann, die nicht im Einklang mit dem derzeitigen Wissenstand einer Person steht. Tatsächlich haben Personen aber überhaupt kein Problem, Sätze zu verstehen, deren Inhalte dem Weltwissen zuwiderlaufen, etwa wenn diese Sätze im Kontext von Fantasiebeschreibungen präsentiert werden (Filik und Leuthold 2008; Nieuwland und van Berkum 2006). Zum anderen sind für diesen Ansatz empirische Befunde problematisch, wonach kleinere syntaktische Fehler bei einfachen Sätzen, deren Inhaltswörter leicht mit plausiblen Sachverhalten in Beziehung zu bringen sind (vgl. 34), auch dann zu verlängerten Verarbeitungszeiten führen, wenn diese Fehler nicht bewusst bemerkt werden (Flores d'Arcais 1987).

(34) **Der Koch zerhackt den Zwiebel.*

Eine andere verwandte Hypothese ist, dass die zugrunde liegende Tiefenstruktur von Sätzen allein auf der Basis einiger syntaktischer Hinweisreize in der Oberflächenstruktur der Sätze sowie einfacher Heuristiken erschlossen werden kann. Ansätze dieser Art, wie sie beispielsweise von Bever (1970) sowie Fodor und Garrett (1967) postuliert wurden, sagen zu Recht vorher, dass Sätze wie (19) von vielen Personen zunächst als ungrammatisch eingestuft werden. Allerdings haben sie Schwierigkeiten zu erklären, wie dieselben Personen in einem zweiten Schritt dann doch in der Lage sind, die syntaktische Struktur dieser Sätze adäquat zu erfassen (Bresnan und Kaplan 1982). Heutzutage gehen die allermeisten Forscher in der Sprachpsychologie davon aus, dass beim Sprachverstehen ausgefeiltes syntaktisches Wissen routinemäßig zur Anwendung kommt (außer in den Good-Enough-Processing-Ansätzen; s. unten). Umstritten ist allerdings, in welcher Form dieses Wissen beim Menschen vorliegt (► Abschn. 14.2.3).

Ableitungskomplexität

In einer klassischen Studie untersuchten Miller und McKean (1964) die Hypothese, dass Sätze umso schwerer zu verstehen sind, je mehr Transformationen beim Übergang zwischen Tiefen- und Oberflächenstruktur angewendet werden müssen (*derivational theory of complexity*). Sie präsentierten Personen in jedem Durchgang jeweils ein Satzpaar als Vorlage (vgl. 35 und 36) und wiesen sie an, dieselbe Transformation bei einem nachfolgend präsentierten Zielsatz (vgl. 37) durchzuführen und dann einen Knopf zu drücken, sobald sie damit fertig waren. Tatsächlich waren die Zeiten, die die Personen für diese Aufgabe benötigten, umso länger, je mehr Transformationen die beiden Sätze in der Vorlage trennten.

(35) *Der Hund jagt die Katze. – Die Katze wird vom Hund gejagt.* [eine Transformation]
(36) *Der Hund jagt die Katze. – Die Katze wird vom Hund nicht gejagt.* [zwei Transformationen]
(37) *Die Frau küsst das Kind. – ?*

In verschiedenen Gedächtnisuntersuchungen, die auf den grammatischen Überlegungen von Katz und Postal (1964) basieren, konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Sätze umso leichter miteinander verwechselt werden, je weniger Transformationen sie voneinander trennen (Clifton und Odom 1966), und auch, dass Sätze, die im Sinne dieser Transformationsgrammatik als komplexer anzusehen sind, besonders stark das Gedächtnis belasten (Savin und Perchonock 1965).

Allerdings sind diese Befunde zur Ableitungskomplexität vielfach kritisiert worden, da sie nur sehr indirekt den eigentlichen Verarbeitungsaufwand messen, der für das Verstehen von Sätzen benötigt wird. Beim normalen Verstehen von Sätzen müssen weder explizit Transformationen durchgeführt werden, noch müssen diese Sätze wörtlich längere Zeit im Gedächtnis behalten werden. Nachfolgende Studien mit anderen experimentellen Aufgaben erzielten zum Teil widersprüchliche Ergebnisse und zeigten auch, dass es stark von semantischen Faktoren abhängt, ob Transformationen zu Verarbeitungskosten führen oder nicht (z. B. Slobin 1966; Wason 1965; vgl. auch Ferreira 2003). Insgesamt werden diese Befunde heutzutage eher als Beleg gegen die Hypothese der Ableitungskomplexität gewertet.

Einheiten der syntaktischen Verarbeitung: Inkrementalität

In den Anfängen der psycholinguistischen Forschung zur syntaktischen Verarbeitung nahm man an, dass die syntaktische Verarbeitung auf der Basis von relativ großen Einheiten operiert. Eine Einheit, die dabei verstärkt Beachtung fand, ist die der klausalen Einheit (*clause*). Eine klausale Einheit besteht aus Subjekt und Prädikat. Sätze können aus einer Einheit (vgl. 28) oder mehreren klausalen Einheiten (vgl. 38) zusammengesetzt sein. Der klausalen Hypothese zufolge akkumuliert der Rezipient beim Verarbeiten passiv die lexikalisch-syntaktischen Informationen der einzelnen Wörter, bis das Ende einer klausalen Einheit erreicht ist. Erst dann werden die Wörter in eine syntaktische Struktur gebracht. Für (38) würde das bedeuten, dass erst beim Erreichen des Kommas mit der syntaktischen Strukturierung begonnen wird.

(38) *Als Hartmut auf Islay angekommen war, trank er erst mal ein Glas Whisky.*

Untersucht wurde diese Hypothese u. a. mit dem Klick-Lokalisierungsparadigma (Fodor und Bever 1965; Garrett et al. 1966; Holmes und Forster 1970). Probanden hörten Sätze über Kopfhörer, wobei während der Verarbeitung auf einem Ohr ein Klickgeräusch eingespielt wurde. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, dieses Klickgeräusch im Satz zu lokalisieren. Tatsächlich lokalisierten die Probanden das Klickgeräusch eher an den klausalen Grenzen, auch wenn dieses bereits zuvor eingespielt wurde (z. B. vor dem Wort *class* in 39). Dieses Ergebnis scheint gut zu der Hypothese zu passen, dass klausale Einheiten die relevante Einheit im Parsing-Prozess darstellen. Nachfolgende Untersuchungen stellten diese Interpretation allerdings infrage. In einer Untersuchung von Reber und Anderson (1970) mit demselben Paradigma, in dem die Probanden glaubten, subliminale Klickgeräusche präsentiert zu bekommen, die aber in Wahrheit nicht präsentiert wurden, ergaben sich teilweise ähnliche Effekte, was nahelegt, dass die Ergebnisse in den ursprünglichen Experimenten nicht Wahrnehmungs-, sondern eher Gedächtnis- oder Antwortverzerrungen reflektierten.

(39) *The teacher who taught the biggest class was given extra pay by his principal.*

Tatsächlich gehen mittlerweile nahezu alle Autoren in der Sprachpsychologie davon aus, dass die syntaktische Verarbeitung streng inkrementell erfolgt, d. h., dass Rezipienten bereits bei der Verarbeitung des ersten Wortes eines Satzes beginnen, eine syntaktische Struktur aufzubauen. Es gibt viele Untersuchungen, die hierfür Belege liefern. Eine klassische Studie stammt von Marslen-Wilson und Tyler (1980). In dieser Untersuchung hörten die Probanden sprachliche Stimuli über Kopfhörer und wurden angewiesen, so schnell wie möglich eine bestimmte Taste zu drücken, falls ein zuvor spezifiziertes Zielwort im Satz auftauchte (*word-monitoring task*). Zielwörter kamen in drei unterschiedlichen Kontexten vor: In wohlgeformten Kontexten (vgl. 40), in Kontexten, die nur syntaktisch, nicht aber semantisch wohlgeformt waren (vgl. 41), und in Kontexten, die weder semantisch noch syntaktisch wohlgeformt waren (vgl. 42). Wurden die Zielwörter (*lead*) eher gegen Anfang der Sätze präsentiert, so ergaben sich keine Unterschiede zwischen den drei Kontexten hinsichtlich der Erkennungszeiten. Wurden sie jedoch eher gegen Ende präsentiert, so zeigte sich ein deutlicher Vorteil in den beiden syntaktisch wohlgeformten Kontexten gegenüber den nicht wohlgeformten Kontexten. Am besten schnitten die Kontexte ab, die semantisch und syntaktisch wohlgeformt waren. Dieses Ergebnis passt nicht zu der Annahme, dass Rezipienten bei der syntaktischen Verarbeitung auf klausale Grenzen warten und die Verarbeitung diskontinuierlich verläuft. Vielmehr sprechen die beobachteten Unterschiede dafür, dass Rezipienten bei der syntaktischen Verarbeitung inkrementell vorgehen, die syntaktische Struktur der sich entwickelnden Sätze also Stück für Stück aufbauen. Der besondere Vorteil in den Kontexten, die semantisch und syntaktisch wohlgeformt waren, unterstreicht diese Interpretation noch – schließlich setzt die semantische Analyse die syntaktische Analyse voraus. Mit der Frage, inwiefern auch die semantische Analyse inkrementell verläuft, wie es durch dieses Experiment nahegelegt wird, beschäftigt sich ▶ Abschn. 14.3.2.

(40) *The church was broken into last night. Some of the thieves stole most of the lead off the roof.* [syntaktisch und semantisch wohlgeformt]

(41) *The power was located into great water. No buns puzzle some in the lead off the text.* [syntaktisch wohlgeformt]

(42) *Into was power water the great located. Some the no puzzle buns in lead text the off.* [nicht wohlgeformt]

Parsing: Top-down oder bottom-up?

Theoretisch lassen sich unterschiedliche Parsing-Prozesse unterscheiden, je nachdem ob man von den Wörtern im Satz ausgeht und sich zum Satzknoten („S“) hocharbeitet (*Bottom-up-Parsing*) oder vom Satzknoten ausgeht und sich schrittweise zu den Wörtern herunterarbeitet (*Top-down-Parsing*). Beim Bottom-up-Parsing werden zunächst während der Verarbeitung eines Satzes nur lexikalische Regeln angewandt. Aus (43) würde also während der Verarbeitung die Sequenz „Det Adj N V“ hergestellt, die dann am Ende des Satzes mithilfe von Phrasenstrukturregeln zu einer hierarchischen Struktur erweitert würde. Ein solches Bottom-up-Parsing ist also nicht inkrementell und stellt insofern keine adäquate Beschreibung des menschlichen Parsing-Prozesses dar.

(43) *Die schöne Frau hüpft.*

Beim Top-down-Parsing wird ausgehend vom Satzknoten durch sukzessives Anwenden von Phrasenstrukturregeln eine bestimmte Sequenz von Nichtterminalsysmbolen vorhergesagt (z. B. Det N V), die dann mit den eintreffenden Wörtern im Satz abgeglichen wird. Tritt eine falsche Vorhersage auf (z. B. ein Adjektiv statt eines Nomens an dritter Position), muss die Vorhersage revidiert werden, indem andere Regeln zur Ableitung verwendet werden. Top-down-Parsing ist also prinzipiell inkrementell, aber kognitionspsychologisch betrachtet dennoch nicht besonders plausibel, da es durch die häufigen Reanalyseprozesse viel Verarbeitungskapazität und Speicheraufwand benötigt. In der sprachpsychologischen Forschung geht man dementsprechend davon aus, dass sich der menschliche Parsing-Prozess am besten durch eine Mischung aus Bottom-up und Top-down-Parsing beschreiben lässt, wie es etwa beim *Left-Corner-Parsing* (Johnson-Laird 1983) der Fall ist.

Beim Left-Corner-Parsing wird das erste Wort im Satz verwendet, um auf die darüberliegende Phrase zu schließen und so die jeweiligen Knoten, die für die Vervollständigung dieser Phrase benötigt werden, vorherzusagen. Diese Vorhersagen werden dann mit den jeweiligen nächsten Wörtern im Satz abgeglichen, und gegebenenfalls werden aus diesen Wörtern weitere darüberliegende Phrasen erschlossen und für die Vorhersage genutzt (◘ Abb. 14.4). Gegenüber dem reinen Top-down-Parsing hat das Left-Corner-Parsing den Vorteil, dass nicht ins Blaue hinein Regeln angewandt und Vorhersagen gespeichert werden, die sich später als falsch herausstellen können. Gegenüber dem Bottom-up-Parsing hat es den Vorteil, dass die syntaktische Verarbeitung inkrementell verläuft.

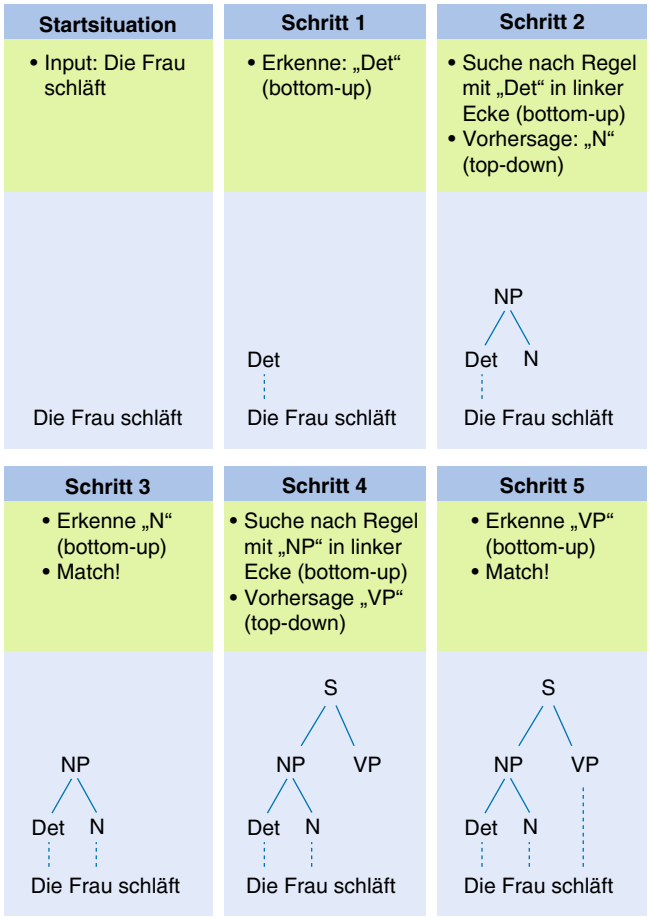


Abb. 14.4 Left-Corner-Parsing: Regeln kommen nur dann zur Anwendung, wenn sie durch den sprachlichen Input nahegelegt werden (bottom-up), werden dann aber verwendet, um nachfolgende Knoten vorherzusagen (top-down). Die syntaktische Verarbeitung läuft bei dieser Strategie inkrementell ab, jedes Wort wird sofort in die syntaktische Struktur eingepasst

14

Holzwege und Reanalyseprozesse

Die Inkrementalität der syntaktischen Verarbeitung zeigt sich auch eindrucksvoll darin, dass man hin und wieder bei der Satzverarbeitung in einer Sackgasse landet, selbst dann, wenn die jeweiligen Sätze grammatisch völlig in Ordnung sind. Als Beispiel mag Satz (44) dienen. Die meisten Leser halten diesen Satz zunächst für ungrammatisch, revidieren diese Einschätzung aber, wenn sie erkennen, dass in diesem Satz Daniela nicht das Subjekt des Relativsatzes sein muss, sondern Birgit diejenige ist, die etwas unternimmt (nämlich zugunsten von Daniela).

(44) *Ich glaube, dass Daniela zugunsten von Birgit etwas unternommen wurde.*

In solche Sackgassen geraten Leser typischerweise dann, wenn die Sätze bis zu einem bestimmten Punkt hinsichtlich ihrer syntaktischen Struktur mehrdeutig sind (*lokale Ambiguität*) und sich die Leser bei der Verarbeitung anfangs auf die falsche Analysealternative festlegen. Später wundern sie sich dann, wenn ein Wort auftaucht, das nicht zu dieser Struktur passen will (in 44 das Wort *wurde*), und leiten eine Reanalyse ein. Solche Sätze, die grammatisch wohlgeformt sind, aber in der Regel vorübergehend zu Verständnisproblemen führen, werden auch als **Holzwegsätze** bezeichnet (*garden path sentences*, benannt nach dem Sprichwort *To lead someone on the garden path*). Im Englischen kommt es zu diesem Phänomen häufig in Sätzen, in denen Relativsätze ohne Relativpronomen eingeleitet werden (reduzierte Relativsätze; *reduced relatives*) und diese dann irrtümlicherweise als VP interpretiert werden. Das klassische Beispiel in (45) stammt von Bever (1970).

(45) *The horse raced past the barn fell.* [Deutsch: *Das Pferd, das an der Scheune vorbeigejagt wurde, fiel.*]

Das Phänomen der Holzwegsätze zeigt, dass die syntaktische Verarbeitung inkrementell verläuft und sich Menschen manchmal vorschnell auf eine bestimmte syntaktische Struktur festlegen (s. oben). Dieses Phänomen deutet darüber hinaus aber auch darauf hin, dass Menschen offenbar Präferenzen für bestimmte syntaktische Strukturen haben. Nur so ist zu erklären, dass es bestimmte Holzwegsätze gibt, die nahezu alle Leser in eine Sackgasse führen. Präferenzen für bestimmte syntaktische Strukturen zeigen sich auch bei der Verarbeitung von Sätzen, die dauerhaft mehrdeutig sind, die also prinzipiell verschiedene Lesarten zulassen, je nachdem welche syntaktische Struktur ihnen zugewiesen wird (*globale Ambiguität*). Holzwegsätze und global ambige Sätze sind demnach für die sprachpsychologische Forschung außerordentlich interessant, da sie einen Einblick in die Verarbeitungsstrategien beim menschlichen Parsing erlauben. Entsprechend groß war ihre Bedeutung auch für die weitere Forschung zum menschlichen Parsing-Prozess und dessen Modellierung, wie in den nächsten Abschnitten deutlich werden wird.

Modelle des menschlichen Parsings

Seit den frühen 1970er Jahren beschäftigt sich die psycholinguistische Forschung intensiv mit der Frage, wie der menschliche Parsing-Prozess am besten zu beschreiben ist, und im Zuge dessen wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Parsing-Modellen vorgeschlagen. In den frühen Parsing-Modellen wurde davon ausgegangen, dass Menschen zwar im Prinzip über ausgefeiltes syntaktisches Wissen verfügen, während der Verarbeitung aber dennoch eher unabhängige Heuristiken für das Parsing verwenden (z. B. basierend auf kanonischer Wortstellung; Bever 1970; vgl. auch Fodor et al. 1974). Diese Modelle haben sich allerdings in der Forschung nicht durchsetzen können und wurden schon bald von Modellen abgelöst, die grammatischen Prinzipien beim Parsing einen höheren Stellenwert einräumen, z. B. der Ansatz von Kimball (1973) oder die *Sausage-Maschine* von Frazier und Fodor (1978). Aus Platzgründen werden wir nicht alle Modelle vorstellen können. Stattdessen skizzieren wir im Folgenden die Hauptdiskussionspunkte, die die Debatte geprägt haben, und stellen einige Parsing-Modelle genauer vor, die für die Forschung bis heute relevant sind.

Wir wollen hier auf drei Aspekte des Sprachverstehens aufmerksam machen, die für die Frage nach der Modellierung des menschlichen Parsing-Prozesses relevant sind:

1. Viele Sätze, mit denen wir im Alltag konfrontiert werden, sind zumindest temporär mehrdeutig und erlauben häufig mehrere zum Teil recht unterschiedliche syntaktische Analysen (s. oben). Satz (46) beispielsweise enthält eine lokale

strukturelle **Ambiguität**. Er erlaubt zunächst zwei unterschiedliche Analysen, wird dann aber beim Wort *war* disambiguiert. Satz (47) erlaubt drei Analysen, wobei die Ambiguität bis zum Ende des Satzes bestehen bleibt (Sind die Zweige modrig? Sind es viele Zweige?). Es liegt hier demnach eine globale syntaktische Ambiguität vor.

(46) *Als der Entdecker von Amerika erfuhr war er ziemlich aufgeregt.*
(47) *… ein mit vielen modrigen Blättern und Zweigen getarntes Versteck.* [aus Grewendorf et al. 1989]

2. Häufig gibt es zwischen den alternativen Analysen Unterschiede hinsichtlich der Vorkommenshäufigkeit der syntaktischen Konstruktion oder hinsichtlich der semantischen Plausibilität der beschriebenen Sachverhalte. Man könnte hieraus Hinweise ableiten, welche Struktur wahrscheinlich die gemeinte ist, aber nicht immer legen die verschiedenen Kriterien dieselbe Schlussfolgerung nahe. So enthält Satz (48) eine globale strukturelle Ambiguität. Eine der beiden Lesarten entspricht der üblicheren Struktur, aber die andere ist semantisch plausibler.

(48) *Die Tomate isst die Frau.*

3. Sprachverstehen ist, zumindest was die gesprochene Sprache anbelangt, höchst zeitkritisch. In der Regel stehen nur Bruchteile einer Sekunde für das Erfassen der korrekten Analyse zur Verfügung, wenn es nicht zu Unterbrechungen im Verstehensprozess kommen soll. Der Rezipient hat also nicht viel Zeit, um lange über unterschiedliche Alternativen und deren vermutliches Zutreffen zu sinnieren.

Ruft man sich diese drei Aspekte in Erinnerung, so wird schnell klar, dass es einige ganz generelle Fragen gibt, die sich hinsichtlich des menschlichen Parsing-Prozesses stellen. Entscheidet man sich immer gleich für nur eine Möglichkeit und wenn ja, auf welcher Basis geschieht dies?

Serielle oder parallele Verarbeitung? Bei serieller Verarbeitung wird im Falle von Mehrdeutigkeiten immer nur eine besonders vielversprechende syntaktische Analysemöglichkeit ausgewählt und weiterverfolgt, bis gegebenenfalls nachfolgende Information dieser widerspricht. Bei der *parallelen Verarbeitung* werden mehrere syntaktische Möglichkeiten parallel verfolgt. Theoretisch haben beide Möglichkeiten Vor- und Nachteile. Die *serielle Verarbeitung* funktioniert im Idealfall schnell, läuft aber leicht Gefahr aufwendige Reanalyseprozesse notwendig zu machen. Die parallele Verarbeitung vermeidet Reanalyse, stellt aber große Ressourcenanforderungen, insbesondere wenn sich Mehrdeutigkeiten im Satz aneinanderreihen, was schnell zu einer Explosion möglicher Lesarten führen kann. Beide Formen des Parsings spielen in der psycholinguistischen Forschung eine große Rolle (s. unten). Eine erschöpfende Parallelverarbeitung, bei der zu einem Zeitpunkt immer alle syntaktisch möglichen Strukturen berechnet werden und gleichberechtigt nebeneinander stehen, kann ausgeschlossen werden, da das Holzwegphänomen bereits zeigt, dass zuweilen eine bestimmte Lesart (in diesem Fall die richtige) nicht verfügbar ist. Diejenigen parallelen Modelle, die in der Forschung eine Rolle gespielt haben, sind dementsprechend eher „begrenzt parallel". Es wird angenommen, dass unter bestimmten Bedingungen mehrere mögliche Strukturen berechnet werden, von denen in der Regel aber eine präferiert ist und im Vordergrund steht. Stellt sich diese im Verlauf der Verarbeitung als falsch heraus, kann leicht auf eine mit berechnete, weniger präferierte Struktur umgeschaltet werden. In machen Ansätzen spielen für die Frage, ob mehrere Strukturen berechnet werden und welche präferiert ist, vor allem Komplexitätsüberlegungen eine Rolle (z. B. Gibson 1998); in den **Constraint**-basierten Ansätzen, die unten genauer besprochen werden, wird die Präferenz durch multiple Kriterien aus vielen verschiedenen Wissensquellen bestimmt.

Autonome oder interaktive Verarbeitung? Vertreter einer modularen Sichtweise von Kognition gehen üblicherweise von einem Zwei-Stufen-Modell des Parsings aus, bei dem in einem ersten Schritt allein auf der Basis syntaktischer Information verarbeitet wird und andere Wissensquellen – etwa Informationen aus der semantischen Analyse, dem allgemeinen Weltwissen oder dem außersprachlichen Kontext – erst in einem zweiten Schritt hinzugezogen werden, sozusagen zur Evaluation der Ergebnisse des ersten Schrittes. Die syntaktische Verarbeitungskomponente arbeitet nach dieser Vorstellung autonom, also unabhängig von anderen Verarbeitungskomponenten, weshalb die entsprechenden Modelle auch als *autonome Modelle* bezeichnet werden. Vertreter einer interaktiven Sichtweise von Kognition hingegen gehen normalerweise von einem Ein-Stufen-Modell des Parsings aus, bei dem alle verfügbaren Wissensquellen von Anfang an herangezogen werden und sich die unterschiedlichen Verarbeitungsprozesse auch gegenseitig beeinflussen können. Beide Konzeptionen sind prinzipiell sowohl mit serieller als auch paralleler syntaktischer Verarbeitung vereinbar.

Garden-Path-Modell Eines der einflussreichsten Modelle des menschlichen Parsings ist das Garden-Path-Modell von Frazier und Rayner (1982), das eine Weiterentwicklung der sogenannten Sausage-Maschine von Frazier und Fodor (1978) darstellt. Es handelt sich um ein autonomes serielles Zwei-Stufen-Modell. Bei syntaktischen Mehrdeutigkeiten wird in einem ersten Schritt rein auf der Basis syntaktischer Prinzipien eine Analysemöglichkeit ausgewählt. Die Auswahl erfolgt also autonom ohne Hinzuziehen weiterer Wissensquellen. In einem zweiten Schritt wird die ausgewählte Struktur dann hinsichtlich ihrer semantischen und pragmatischen Plausibilität evaluiert und gegebenenfalls eine Reanalyse eingeleitet.

Die syntaktische Verarbeitung erfolgt streng inkrementell – jedes Wort wird sofort in die syntaktische Struktur integriert. Zwei syntaktische Prinzipien steuern im Falle einer Mehrdeutigkeit die Auswahl einer Struktur. Das erste Prinzip gibt vor, diejenige Struktur zu wählen, die weniger Knoten postuliert, also weniger komplex ist (*Minimal Attachment*). Falls sich die Alternativen nicht hinsichtlich ihrer Komplexität unterscheiden, kommt das zweite Prinzip zur Anwendung, das besagt, dass neues Material, wenn möglich, an die Unterstruktur angebunden werden soll, die derzeit aufgebaut wird (*Late Closure*). Betrachten wir zur Illustration die Sätze (49) und (50). Satz (49)

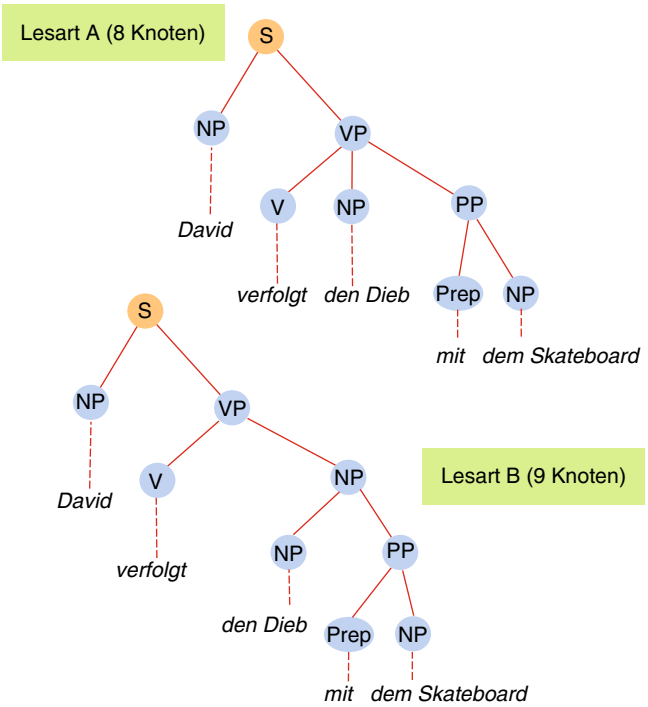


Abb. 14.5 Nach dem Minimal-Attachment-Prinzip wird bei syntaktischer Ambiguität diejenige syntaktische Analyse bevorzugt, die weniger Knoten postuliert (für Satz 49 ist dies Lesart A). Anmerkung: Heutzutage gilt eine „flache" Analyse, wie bei Lesart A, als unüblich

ist strukturell mehrdeutig, wobei die Lesart, wonach David mit dem Skateboard fährt, die weniger komplexe Lesart ist und somit laut Garden-Path-Modell zunächst bevorzugt werden sollte (Abb. 14.5). Satz (50) ist auch syntaktisch ambig, aber hier sind beide Lesarten gleich komplex. Nach dem Late-Closure-Prinzip sollte die Lesart bevorzugt werden, in der der Tote, nicht der Bruder, im Hafen gearbeitet hat. In eine Sackgasse läuft der Rezipient nach diesem Modell, wenn die beiden Prinzipien eine andere Lesart nahelegen als die, die sich am Ende als korrekt entpuppt (z. B. wenn in einem nachfolgenden Satz klar wird, dass es der Bruder war, der im Hafen gearbeitet hat).

(49) *David verfolgt den Dieb mit dem Skateboard.*
(50) *Ich kenne den Bruder des Toten, der im Hafen gearbeitet hat.*

Das Garden-Path-Modell macht korrekte Vorhersagen bezüglich vieler Holzwegsätze. Die Probleme, die sich beispielsweise für den klassischen Satz (45) ergeben, lassen sich mit dem Minimal-Attachment-Prinzip erklären. Bis zum Wort *fell* ist der Satz ambig, wobei die richtige Lesart zunächst nicht gewählt wird, weil sie komplexer ist und mehr Knoten postuliert (vgl. 52 vs. 51).

(51) $[_S\ [_{NP}$ The horse$]\ [_{VP}\ [_V$ raced$]\ [_{PP}$ past the barn$]]]$
(52) $[_S\ [_{NP}\ [_{NP}$ The horse $[_S\ [_V$ raced$]\ [_{PP}$ past the barn$]]]$
$[_{VP}\ [_V$ fell$]]]$

Die Wirksamkeit von Minimal-Attachment und Late-Closure zeigte sich auch in Studien, in denen Lesezeiten erhoben oder Augenbewegungen gemessen wurden. In einer Studie von Frazier und Rayner (1982) ergaben sich, wie durch das Minimal-Attachment-Prinzip vorhergesagt, längere Lesezeiten in (53) als in (54), wobei die Fixationszeiten insbesondere in der Disambiguierungsregion (*seems* in 53) erhöht waren.

(53) *Since Jay always jogs a mile and half seems like a very short distance to him.*
(54) *Since Jay always jogs a mile and a half this seems like a short distance to him.*

In einer Studie von Ferreira und Clifton (1986) konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Minimal-Attachment auch dann wirkt, wenn die dadurch präferierte Leseart semantisch unplausibel ist. So wundern sich Leser nicht nur bei einem Satz wie (55) über das Wort *by*, weil es nicht zur zunächst gewählten einfachen Struktur passt, sondern auch bei einem Satz wie (56), obwohl hier die Struktur mit reduziertem Relativsatz semantisch sehr viel plausibler ist (vgl. auch Rayner et al. 1983).

(55) *The defendant examined by the police …*
(56) *The evidence examined by the police …*

Die Wirkung von Late-Closure zeigte sich in einer Augenbewegungsstudie von van Gompel und Pickering (2001), in der die Probanden z. B. den Satz (57) präsentiert bekamen. Wie durch das Late-Closure-Prinzip vorhergesagt, führten solche Sätze zu einem Garden-Path, der daher rührt, dass die Probanden beim ersten Lesen *the vet* als Objekt der VP interpretierten. Die Tatsache, dass auch ein Satz wie (58) zu einem Garden-Path führt, verdeutlicht wiederum, dass semantische Information oder Information darüber, dass ein bestimmtes Verb (z. B. *struggled*) typischerweise intransitiv verwendet wird, nicht vor der Sackgasse schützt (vgl. auch Adams et al. 1998; Ferreira und Henderson 1990; Mitchell 1987).

(57) *After the dog scratched the vet and his new assistant took off the muzzle.*
(58) *After the dog struggled the vet and his new assistant took off the muzzle.*

Als problematisch für die Theorie erwiesen sich Befunde aus Studien, die andere Sprachen als das Englische untersuchten. So ergaben sich im Deutschen und in einigen anderen Sprachen häufig Präferenzen, die den beiden Prinzipien Minimal-Attachment und Late-Closure, die laut Theorie sprachübergreifend gültig sein sollten, widersprachen (Deutsch: Konieczny et al. 1991, 1997; Spanisch: Cuetos und Mitchell 1988; Niederländisch: Brysbaert und Mitchell 1996; Französisch: Zagar et al. 1997). Dies lässt sich eventuell damit erklären, dass sich die Vorkommenshäufigkeiten der unterschiedlichen Strukturen in den verschiedenen Sprachen unterscheiden (Mitchell et al. 1995). Hinzu kamen Untersuchungsergebnisse, die die Annahme einer autonomen syntaktischen Verarbeitungskomponente stark in Zweifel zu ziehen schienen (s. unten). In einer Revision des Modells, dem Construal-Modell von Frazier und Clifton (1996), spielen die beiden Prinzipien entsprechend nur noch unter bestimmten Bedingungen eine Rolle, und es wird angenommen, dass Ambiguitäten in vielen Fällen unter Hinzunahme nichtsyntaktischer Wissensquellen aufgelöst werden.

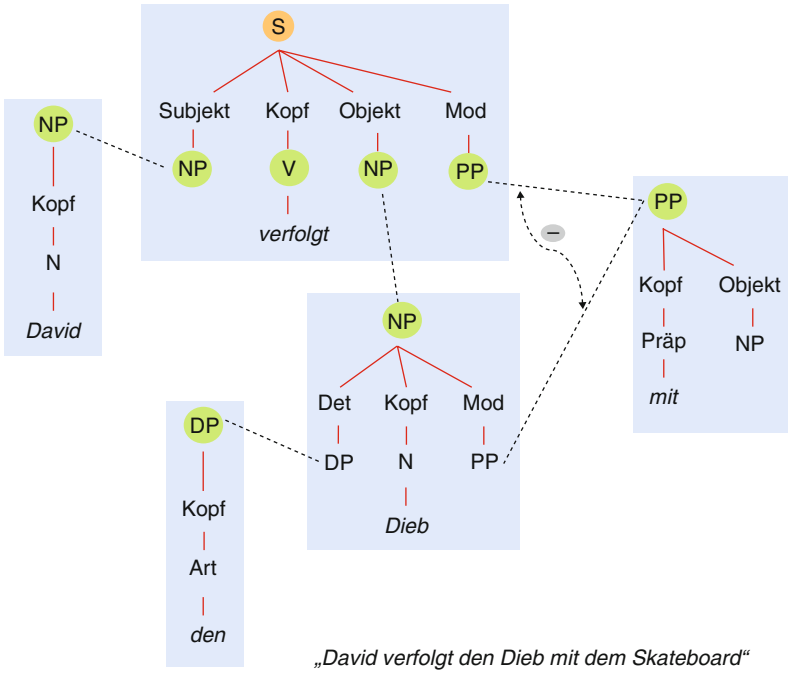


Abb. 14.6 Modell von Vosse und Kempen (2000). Gestrichelte Linien bezeichnen mögliche Anknüpfungspunkte zwischen den einzelnen lexikalischen Rahmen. Existieren mehrere Anbindungsmöglichkeiten für einen Rahmen, so sind die unterschiedlichen Möglichkeiten durch laterale Hemmung verbunden (*gepunktete Linie*). *Mod* = Modifier

Constraint-basierte Ansätze Ganz andere Annahmen als das Garden-Path-Modell machen die Constraint-basierten Ansätze, die in den 1990er Jahren schnell an Bedeutung gewannen (Boland et al. 1990; MacDonald 1994; MacDonald et al. 1994; McRae et al. 1998; Tanenhaus et al. 1989; Taraban und McClelland 1988; Trueswell et al. 1994). Bei der syntaktischen Verarbeitung werden diesen Ansätzen zufolge direkt von Anfang an alle verfügbaren Wissensquellen genutzt, um zur korrekten syntaktischen Analyse zu gelangen. Dabei werden insbesondere Informationen aus der semantischen und pragmatischen Analyse, dem sprachlichen und außersprachlichen Kontext, dem allgemeinen Weltwissen sowie Informationen bezüglich Vorkommenshäufigkeiten syntaktischer Konstruktionen mit in Betracht gezogen. Es wird angenommen, dass die verschiedenen Wissensquellen unterschiedliche Hinweise bezüglich der Adäquatheit der verschiedenen syntaktischen Analysen liefern (sogenannte probabilistische Constraints). Ein bestimmter Constraint könnte beispielsweise die Tatsache repräsentieren, dass im Deutschen das Subjekt häufig vor dem Objekt im Satz erwähnt wird und deshalb eine syntaktische Analyse unterstützen, die dieser Regel folgt. Bei Satz (48) würde dieser Constraint dann die Analyse unterstützen, wonach die Tomate das Subjekt ist. Ein anderer Constraint könnte sich darauf konzentrieren, dass bestimmte Verben wie etwa *essen* oder *to examine* ein belebtes Subjekt benötigen und deshalb in einem Satz wie (56) die Relativsatzanalyse unterstützten. Wiederum andere Constraints könnten bei einem Satz wie (49) das Weltwissen heranziehen und die Analyse unterstützen, wonach David auf dem Skateboard fährt, weil ein Skateboard ein geeignetes Instrument zur Verfolgung darstellt.

In Constraint-basierten Modellen wird nun angenommen, dass diejenige syntaktische Konstruktion, die zum jeweiligen Zeitpunkt von den Constraints zusammengenommen am deutlichsten unterstützt wird, an Aktivierung gewinnt und die Interpretation dominiert. Alternative Konstruktionen bleiben im Rennen, bekommen aber zunehmend weniger der zur Verfügung stehenden Aktivierung ab. Sobald eine Konstruktion so stark aktiviert ist, dass deren Schwelle überschritten ist, legt sich der Rezipient auf diese Konstruktion fest. Verarbeitungsschwierigkeiten ergeben sich, wenn mehrere Konstruktionen ähnlich hoch aktiviert sind und in Wettstreit miteinander geraten. Es dauert dann entsprechend länger, bis die jeweilige Schwelle erreicht ist und die nichtpräferierten Konstruktionen erfolgreich zurück gedrängt sind. In eine Sackgasse gerät der Rezipient, wenn die korrekte Analyse nur geringfügig aktiviert oder sogar gehemmt ist. Ein wichtiger Unterschied zum Garden-Path-Modell besteht also darin, dass sich Verarbeitungsschwierigkeiten nicht durch Reanalyse, sondern durch Wettstreit ergeben. Constraint-basierte Ansätze gehören zu den interaktiven parallelen Ein-Stufen-Modellen.

Zur Illustration betrachten wir im Folgenden ein Modell von Vosse und Kempen (2000) genauer. Dieses Modell basiert auf einer lexikalisierten Grammatik und nimmt an, dass Ambiguität durch Wettstreit gelöst wird. Jedes Wort aktiviert bei der Verarbeitung direkt seinen zugehörigen lexikalischen Rahmen, in dem abgebildet ist, welche syntaktischen Beziehungen dieses Wort mit anderen syntaktischen Bausteinen eingehen kann. Die lexikalischen Rahmen sind Baumstrukturen mit Wurzeln, Ästen und Blättern, in denen das jeweilige Wort der Kopf (*head*) der Struktur ist. Über die Wurzeln und Blätter können die einzelnen lexikalischen Rahmen miteinander verknüpft werden, sofern deren grammatischen Merkmale kompatibel sind (Abb. 14.6). So kann die Wurzel des lexikalischen Rahmens für das Wort *David* nur deshalb mit dem Blatt des lexikalischen Rahmens für das Wort *verfolgt* verknüpft werden, weil dessen grammatischen Merkmale (Nominativ, 3. Person Singular) mit den dort geforderten übereinstimmen.

Häufig gibt es mehrere Möglichkeiten der Verknüpfung. So kann der lexikalische Rahmen für das Wort *mit* hier an zwei Positionen andocken – der Satz ist strukturell ambig. Welche Anbindung bevorzugt wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab, z. B.

davon, wie lange es her ist, dass der lexikalische Rahmen aktiviert wurde (die Aktivierung nimmt mit der Zeit ab), und davon, wie häufig eine bestimmte syntaktische Struktur in der Sprache vorkommt (Frequenzinformation). Wichtig ist, dass sich die unterschiedlichen Anbindungsmöglichkeiten gegenseitig hemmen. Sobald also eine der Anbindungsmöglichkeiten etwas stärker aktiviert ist als die anderen, wird diese sich mit der Zeit immer klarer gegen die anderen Anbindungsmöglichkeiten durchsetzen und den Wettstreit gewinnen. Interessanterweise lässt sich mit diesem Modell auch das Verhalten von Patienten mit syntaktischen Aphasien simulieren, wenn bestimmte Parameter (insbesondere laterale Hemmung betreffend) modifiziert werden. In einer neueren Version dieses Modells (Vosse und Kempen 2009) wurde der Parsing-Prozess um Top-down-Komponenten erweitert, um den vielen empirischen Befunden gerecht zu werden, die zeigen, dass beim menschlichen Sprachverstehen syntaktische Vorhersagen bezüglich der eintreffenden Information eine große Rolle spielen (*predictive parsing*; Kamide und Mitchell 1999; Konieczny 2000; Levy 2008; Pickering und Garrod 2007).

Es liegt mittlerweile eine ganze Reihe von Studien vor, die die Autonomie der syntaktischen Verarbeitung in Zweifel ziehen und damit indirekt Belege für Constraint-basierte Ansätze liefern. Wie aber verhält es sich mit der vermeintlichen Evidenz für autonome syntaktische Verarbeitung, die im vorhergehenden Abschnitt besprochen wurde? Vertreter von Constraint-basierten Ansätzen haben einige der relevanten Studien wiederholt und dabei zeigen können, dass auch andere Wissensquellen einen Einfluss darauf haben, ob Rezipienten bei der Verarbeitung in eine Sackgasse geraten oder nicht. So argumentieren beispielsweise Crain und Steedman (1985) dass eine Konstruktion mit reduziertem Relativsatz, wie sie in (45) vorliegt, typischerweise in Situationen verwendet wird, in denen es mehrere gleichartige Entitäten gibt, von denen eine selektiert werden soll, um sie genauer zu spezifizieren (*referential hypothesis*). Satz (45) wäre also dann angemessen verwendet, wenn es in der beschriebenen Situation viele verschiedene Pferde gab, von denen nur eines entlang der Scheune gejagt wurde. Ohne Kontext ist diese Lesart allerdings wenig plausibel und wird von den Rezipienten entsprechend nicht präferiert. Tatsächlich zeigte sich in einer Studie von Crain und Steedman (1985), dass bei geeignetem Kontext, in dem mehrere gleichartige Entitäten eingeführt wurden (mehrere Frauen in 60), ein Satz wie (59) keine Verständnisprobleme bereitet (vgl. auch Altmann et al. 1992; Altmann und Steedman 1988; Ni et al. 1996). Der Garden-Path Effekt bei Sätzen wie (45) kann also wohl nicht allein durch syntaktische Prinzipien erklärt werden, sondern hat auch damit zu tun, ob die Sätze angemessen verwendet wurden oder nicht (im Fachjargon: ob ihre Präsuppositionen erfüllt sind oder nicht). Dieses Ergebnis zeigt, dass bei der syntaktischen Analyse nicht rein auf der Basis von syntaktischen Prinzipien vorgegangen wird, sondern auch der Diskurskontext eine Rolle spielt.

(59) *The psychologist told the wife that he was having trouble with to leave her husband.*
(60) *A psychologist was counselling two married couples. One of the couples was fighting with him, but the other one was nice to him. The psychologist told the wife …*

In weiteren Studien wurde das Experiment von Ferreira und Clifton (1986) mit leicht geänderten Materialien wiederholt, und es fanden sich tatsächlich deutlich geringere Garden-Path-Effekte für Sätze wie (61), bei denen die semantische Analyse gegen die falsche Struktur spricht, als bei Sätzen wie (62), bei denen beide Strukturen semantisch plausibel sind (Überblick in Trueswell und Tanenhaus 1994). Auch dieses Ergebnis deutet also darauf hin, dass bei der syntaktischen Verarbeitung auch andere als rein syntaktische Wissensquellen verwendet werden.

(61) *The fossil examined …*
(62) *The archaeologist examined …*

Schließlich fanden sich auch Hinweise darauf, dass die Stärke von Garden-Path-Effekten u. a. damit zu tun hat, wie häufig ein bestimmtes Wort in einer bestimmten syntaktischen Struktur vorkommt (frequenzbasierte Information). So wird das Verb *forget* häufig mit einer Objekt-NP komplementiert (vgl. 63), während das Verb *hope* nur mit einem Satzkomplement vorkommt (vgl. 64). Tatsächlich zeigte sich in einer Studie von Trueswell et al. (1993), dass insbesondere Sätze mit Verben der ersten Art zu Garden-Path-Effekten führen, weil hier auch die frequenzbasierten Constraints die falsche Struktur nahelegen. Sätze mit Verben der zweiten Art hingegen scheinen leichter zu verstehen zu sein, was vermutlich daran liegt, dass hier die frequenzbasierten Constraints die richtige Interpretation nahelegen. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass Rezipienten bei der Auswahl der wahrscheinlichsten syntaktischen Struktur durchaus auch frequenzbasierte Information mit einbeziehen und nicht rein nach syntaktischen Prinzipien vorgehen.

(63) *The student forgot the solution was in the book.*
(64) *The student hoped the solution was in the book.*

Die syntaktische Analyse wird offenbar auch durch den situativen Kontext beeinflusst, in dem Sätze verarbeitet werden. In einer berühmt gewordenen Studie von Spivey et al. (2002) befolgten die Probanden auditiv präsentierte Instruktionen wie in (65) und betrachteten dabei visuelle Szenen, während ihre Blickbewegungen aufgezeichnet wurden. In einer Bedingung waren darin ein Apfel auf einem Handtuch enthalten sowie ein leeres Handtuch und eine Box. In diesem Fall schauten die Probanden häufig auf das leere Handtuch, was darauf hindeutet, dass sie beim Hören des lokal ambigen Satzes zunächst davon ausgehen, dass das leere Handtuch das Ziel der Bewegung ist (Abb. 14.7). Anders verhält es sich, wenn die visuelle Szene zwei Äpfel enthält, wovon einer auf einem Handtuch liegt, der andere nicht. In diesem Fall schauten die Probanden nur relativ selten auf das leere Handtuch. Im Einklang mit Constraint-basierten Modellen scheint also auch der situative Kontext, in dem Sätze verarbeitet werden, syntaktische Präferenzen zu beeinflussen (für entsprechende Effekte im Deutschen vgl. Knoeferle et al. 2005).

(65) *Put the apple on the towel in the box.*

Unrestricted-Race-Modell Ein Ansatz, der Ähnlichkeiten sowohl zum Garden-Path-Modell als auch zu Constraint-basierten An-

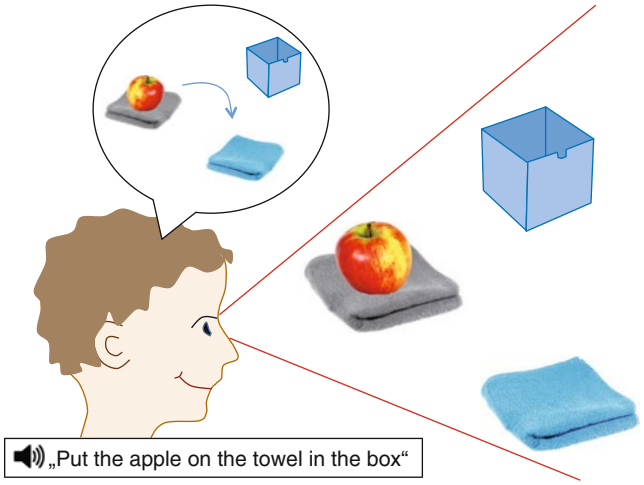


Abb. 14.7 Illustration der Ein-Referenten-Bedingung im Versuch von Spivey et al. (2002). In dieser Konstellation verstehen Probanden den Satz erst so, als ob das Handtuch das Ziel der Bewegung wäre. Sind in der Situation hingegen zwei Äpfel vorhanden, von denen einer auf dem Handtuch liegt, so wird der Satz direkt richtig interpretiert

sätzen aufweist, ist das *Unrestricted-Race*-Modell von van Gompel et al. (2001; vgl. auch van Gompel und Pickering 2007). Nach diesem Modell wird bei einer syntaktischen Ambiguität zunächst mit dem Aufbau aller möglichen syntaktischen Strukturen begonnen, wobei diejenige gewinnt, die am schnellsten aufgebaut werden kann. Nicht fertige Strukturen werden dann gelöscht. Die Schnelligkeit des Aufbaus hängt u. a. davon ab, wie gut die jeweilige Struktur durch die bis zu Beginn der Ambiguität zur Verfügung stehenden Informationen aus verschiedenen Wissensquellen unterstützt wird. In diesem Sinne ist der Ansatz ähnlich zu Constraint-basierten Ansätzen. Allerdings stehen semantische Informationen nur zur Verfügung, wenn sie bereits vor dem Beginn der Ambiguität vorhanden waren. Außerdem treten die einzelnen Strukturen nicht in Wettstreit miteinander. Falls die falsche Analyse das Rennen gewonnen hat, muss später gegebenenfalls reanalysiert werden. In diesem letzten Aspekt gleicht das Unrestricted-Race-Modell also dem Garden-Path-Modell.

Empirische Unterstützung erhält dieses Modell durch eine Studie von van Gompel et al. (2005), in der die Augenbewegungen von Probanden gemessen wurden, während sie Sätze wie (66), (67) und (68) verarbeiteten. In diesen Sätzen kann die Modifikation *woven in the mill* entweder an die erste NP oder die zweite NP angebunden werden. Garden-Path-Modelle sagen für alle drei Sätze vorher, dass zunächst an die zweite NP angebunden wird (Late-Closure). Für (67) ergibt sich dann ein semantisches Problem (Schauspieler werden nicht gewoben), und es kommt zur Reanalyse. Satz (67) sollte entsprechend schwerer zu verstehen sein als (66) und (68). Laut Constraint-basierten Ansätzen sollte speziell Satz (66) Schwierigkeiten bereiten, weil in diesem Satz beide Interpretationen möglich bleiben und deshalb in einen Wettstreit geraten. Die Sätze (67) und (68) werden semantisch disambiguiert, sodass eine Lesart deutlich präferiert wird, und sollten deshalb leichter zu verarbeiten sein. Tatsächlich zeigte sich jedoch, dass (66) einfacher zu verarbeiten war als (67) und (68), was keiner dieser beiden Vorhersagen entspricht. Das Unrestricted-Race-Modell erklärt dieses Ergebnis damit, dass in keinem der drei Sätze zunächst eine der beiden Analysen präferiert ist und der Prozessor insofern manchmal die eine und manchmal die andere Struktur schneller aufgebaut hat. Bei den Sätzen (67) und (68) kommt es dann aber in etwa der Hälfte der Fälle zu einem semantischen Problem, und es muss reanalysiert werden. Für (66) passiert dies nicht.

(66) *The tailor thought that the tunic of the costume woven in the mill looked very beautiful.*
(67) *The tailor thought that the costume of the actor woven in the mill looked very beautiful.*
(68) *The tailor thought that the wearer of the costume woven in the mill looked very beautiful.*

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass die überwältigende Mehrheit der empirischen Studien zur syntaktischen Verarbeitung nahelegt, dass Rezipienten schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt während der Verarbeitung auch nichtsyntaktische Information zurate ziehen. Dies gilt insbesondere für den sprachlichen und außersprachlichen Kontext sowie für frequenzbasierte Information, aber auch für Informationen aus der semantischen Analyse und dem allgemeinen Weltwissen. Diese Befunde scheinen demnach eher gegen autonome Modelle zu sprechen und stattdessen interaktive Modelle zu unterstützen. Ob Verarbeitungsschwierigkeiten allerdings tatsächlich dadurch zustande kommen, dass unterschiedliche syntaktische Strukturen in Wettstreit miteinander geraten oder besser durch Reanalyseprozesse zu beschreiben sind, ist bislang nicht hinreichend geklärt.

Syntaktische Marker, Zeichensetzung, Prosodie

Viele der syntaktischen Ambiguitäten, die bisher besprochen wurden, können umgangen werden, wenn explizite *syntaktische Marker* verwendet werden, die die intendierte syntaktische Struktur hervorheben. Auch *Zeichensetzung* und *Prosodie* helfen. In einer Studie von Hakes (1972) konnte gezeigt werden, dass die Zeiten in einer Phonem-Monitoring-Aufgabe, bei der die Probanden so schnell wie möglich einen Knopf drücken, sobald sie einen bestimmten Laut hören (z. B. /m/), signifikant kürzer ausfielen, wenn die Sätze explizite syntaktische Marker enthielten (z. B. *that* in 69). In einer Studie von Rayner und Frazier (1987) konnte entsprechend gezeigt werden, dass das *that* in (70) die Verarbeitungszeiten auf dem Wort *would* drastisch reduzierte, also offenbar zu größerer Verständlichkeit beitrug. Die Nützlichkeit solcher syntaktischer Marker zeigt sich auch beim Spracherwerb und fällt umso deutlicher aus, je komplexer die syntaktischen Strukturen sind, die gelernt werden sollen (Morgan et al. 1987).

(69) *The blind student felt (that) the material in the art course would be too difficult for him to understand.*
(70) *The contestant imagined (that) the small tropical islands would be completely deserted.*

In einer der wenigen Studien zur Wirkung von Zeichensetzung fanden Mitchell und Holmes (1985) wie erwartet, dass ein Komma die Verständlichkeit eines Satz wie (53) drastisch erhöht (vgl. 71). Auch Zeilenumbrüche, die die korrekte syntaktische

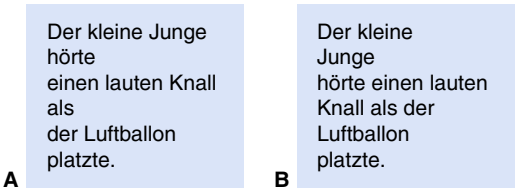


Abb. 14.8 In **A** ist der Satz entsprechend seiner zugrundeliegenden Phrasenstruktur in Zeilen unterteilt. Dies vereinfacht das Lesen gegenüber einer Unterteilung, die auf die Phrasenstruktur keine Rücksicht nimmt (**B**). (Nach Gleitman et al. 2010)

Struktur unterstreichen, sind hilfreich (Kennedy et al. 1989; Abb. 14.8).

(71) *Since Jay always jogs, a mile and half seems like a very short distance to him.*

Bei gesprochener Sprache werden Phrasengrenzen häufig prosodisch markiert, etwa durch eine kurze Pause, durch ein Verlängern des letzten Wortes oder ein Anheben der Stimme zu Beginn der neuen Einheit. Diverse Studien zeigen, dass diese prosodischen Hinweise die syntaktische Verarbeitung von lokal ambigen Sätzen erleichtern und bei der Verhinderung von Garden-Paths in (72) ähnlich effektiv sind wie ein expliziter syntaktischer Marker wie *that* (vgl. 73; z. B. Marslen-Wilson et al. 1992). Prosodische Hinweise sind nicht nur nützlich, um Phrasengrenzen anzuzeigen. Im Deutschen mit seiner relativ freien Wortstellung beispielsweise kann eine Betonung auf der ersten NP auch als Hinweis auf eine nichtkanonische Wortabfolge interpretiert werden (vgl. 74; Weber et al. 2006).

(72) *Max knew / the answer was wrong.* [/ = kurze Pause]
(73) *Max knew that the answer was wrong.*
(74) *Die Katze jagt womöglich der Hund.* [Unterstreichung markiert Betonung]

Auch bei global ambigen Sätzen werden prosodische Hinweise offenbar für die Disambiguierung verwendet. Dabei scheint interessanterweise nicht so sehr die Frage entscheidend, ob an einer bestimmten Stelle eine prosodische Grenze markiert ist, sondern wie stark die Markierung relativ zu anderen prosodischen Grenzen im Satz ist. Satz (75) wird demnach eher so interpretiert, dass die Schwiegereltern von Johnny und Sharon kamen, während (76) eher so interpretiert wird, dass Johnny und die Schwiegereltern kamen (Überblicke in Carlson 2009; Speer und Blodgett 2006).

(75) *Who arrived? Johnny / and Sharon's /// in-laws.* ["/" = kurze Pause; "///" = längere Pause]
(76) *Who arrived? Johnny /// and Sharon's / in-laws.*

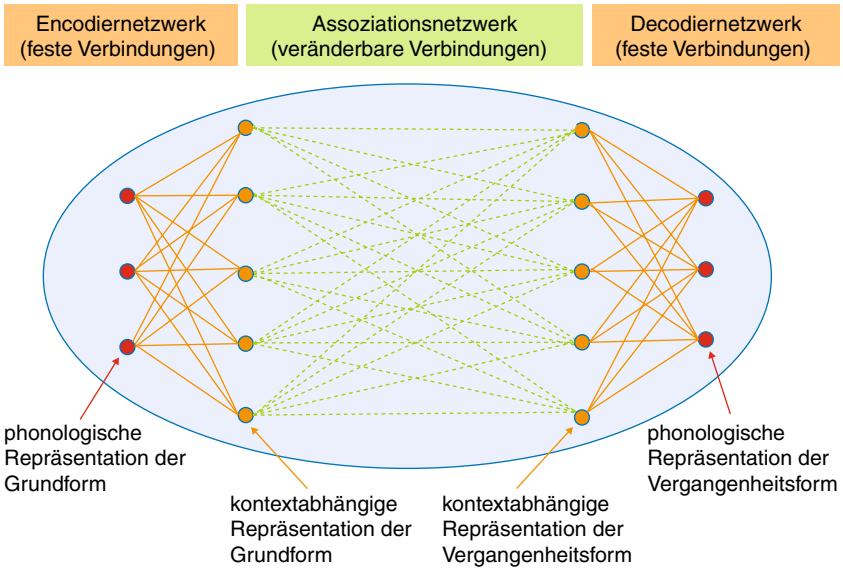
Prosodische Strukturierung spielt offenbar auch beim Lesen eine Rolle. So konnte in EEG-Untersuchungen gezeigt werden, dass Kommata beim Lesen zu ähnlichen EEG-Mustern führen wie prosodisch markierte Grenzen beim Hören von Sätzen (Steinhauer und Friederici 2001). Dieses Ergebnis passt zu der sogenannten *implicit prosody hypothesis* (Fodor 1998), wonach prosodische Aspekte des sprachlichen Stimulus syntaktische Entscheidungen auch beim Lesen beeinflussen können.

14.2.3 In welcher Form liegt unser syntaktisches Wissen vor?

Aus den bisher besprochenen Befunden zur Satzverarbeitung lässt sich schließen, dass Menschen syntaktisches Wissen besitzen und es bei der Verarbeitung auch anwenden. Dieses Wissen lässt sich gut anhand von grammatischen Regeln (z. B. Phrasenstrukturregeln) beschreiben. Eine naheliegende Annahme wäre demnach, dass syntaktisches Wissen beim Menschen in Form von solchen Regeln mental repräsentiert ist. Allerdings scheinen die wenigsten Menschen direkten Zugriff auf diese Regeln zu haben. Sie können sie beispielsweise normalerweise nicht beschreiben. Man spricht entsprechend davon, dass syntaktisches Wissen *implizites Wissen* ist. Was damit gemeint sein könnte, lässt sich am besten anhand von konnektionistischen Modellierungen illustrieren. In vielen konnektionistischen Modellen sind Regeln nicht explizit enkodiert, sondern ergeben sich als Konsequenz aus statistischen Generalisierungen, die auf einer Vielzahl von Erfahrungen mit sprachlichen Daten beruhen. Konnektionistische Modelle können demnach regelhaftes Verhalten erklären, ohne anzunehmen, dass Regeln explizit mental repräsentiert sind (▶ Kap. 11).

Zur Illustration betrachten wir das viel beachtete konnektionistische Modell zur Bildung von Vergangenheitsformen englischer Verben von Rumelhart und McClelland (1988). Die Eingabe in dieses Modell ist eine Repräsentation der phonologischen Grundform eines englischen Verbs (z. B. *fall*), und die Ausgabe ist die phonologische Repräsentation der entsprechenden Vergangenheitsform (z. B. *fell*; Abb. 14.9). Diese phonologischen Repräsentationen sind als Muster von Aktivierungen in der Eingangs- und Ausgangsschicht des Modells repräsentiert (verteilte Repräsentation). Das Modell besteht insgesamt aus vier Schichten von Einheiten, wobei die Einheiten in den verschiedenen Schichten über gewichtete Verbindungen verknüpft sind (w_{ij} bezeichnet das Gewicht der Verbindung zwischen Einheit i und Einheit j). Über diese Verbindungen wird die Aktivierung aus einer Schicht auf die nächste Schicht übertragen. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit j zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiviert wird ($p(a_j = 1)$), hängt davon ab, wie viel Aktivierung bei ihr ankommt (net_j). Es kommt umso mehr Aktivierung bei ihr an, je mehr Einheiten in der vorherigen Schicht aktiviert sind, mit denen sie starke exzitatorische Verbindungen teilt (Regel zur ankommenden Aktivierung).

Die Verarbeitung beginnt nun in Schicht 1 und endet in Schicht 4. In einem ersten Schritt wird die phonologische Grundform des Verbs (in Schicht 1 repräsentiert) in eine geeignete merkmalsbasierte Repräsentation überführt, bei der die Phoneme kontextabhängig repräsentiert sind (Schicht 2). Die Transformation, die beim Übergang zu Schicht 2 vonstattengeht, wird im Folgenden nicht näher besprochen, weil sie für unsere Zwecke irrelevant ist (auch wenn sie in der Literatur zum Teil für heftige Kritik gesorgt hat; Pinker und Prince 1988). Der wesentliche Teil des Modells folgt nun beim Übergang zu Schicht 3. Hier wird die kontextabhängige Repräsentation der Verbgrundform



ankommende Aktivierung

$$net_j = \sum_i (w_{ij}\, a_i)$$

net_j	Aktivierung, die bei Einheit j ankommt.
w_{ij}	Gewicht der Verbindung zwischen Einheit i und Einheit j
a_i	Aktivierung der Einheit i (1 wenn aktiviert, 0 wenn nicht aktiviert)
Σ	Summiert wird über alle Einheiten i, mit denen Einheit j verbunden ist.

Output-Aktivierung

$$p(a_j = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(net_j - \Phi_j)}}$$

$p(a_j = 1)$	Wahrscheinlichkeit, dass Einheit j aktiviert wird.
Φ_j	Schwelle der Einheit j

Deltaregel: $\delta w_{ij} = \eta(s_j - a_j)a_i$

δw_{ij}	Wert, um den das Gewicht geändert wird
η	Lernrate
s_j	Soll-Aktivierung von Einheit j
a_j	Ist-Aktivierung von Einheit j

Beim Lernen wird die Ist- und die Soll-Aktivierung einer Einheit miteinander verglichen. Je größer dieser Unterschied ist, umso stärker werden die Gewichte der eingehenden Verbindungen verändert.

Abb. 14.9 Konnektionistisches Modell von Rumelhart und McClelland (1988) zum Erwerb von Vergangenheitsformen englischer Verben

in eine kontextabhängige Repräsentation der entsprechenden Vergangenheitsform überführt. In diesem Schritt kommt nach genügend Übung das Regelwissen zur Vergangenheitsbildung zum Tragen (s. unten). Zum Schluss muss diese Repräsentation dann wieder in eine phonologische Form decodiert werden. Beim Lernen geht es nun darum, die Gewichte der Verbindungen zwischen Schicht 2 und 3 so anzupassen, dass aus einer Repräsentation der Grundform eines Verbs die richtige Repräsentation der Vergangenheitsform gebildet wird. Dies geschieht über einen einfachen Mechanismus: Während des Lernens wird dem Modell jeweils die korrekte Antwort rückgemeldet. In der Lernphase kann das Modell also den Unterschied zwischen dem selbst generierten Aktivierungsmuster (Ist-Aktivierung) und dem korrekten Aktivierungsmuster (Soll-Aktivierung) nutzen, um die Gewichte zwischen Schicht 2 und 3 so zu verändern, dass in einem nachfolgenden Durchgang mit demselben Ausgangsmuster die Ist-Aktivierung näher an der Soll-Aktivierung liegen würde, als es im derzeitigen Durchgang der Fall war (Deltaregel).

Ist das Lernen erfolgreich, so gelingt es dem Modell, nach hinreichend vielen Durchgängen mit geeignetem Lernmaterial und der entsprechenden schrittweisen Anpassung der Gewichte am Ende relativ fehlerfrei die Vergangenheitsformen der Verben zu generieren. Das Wissen über die Bildungsregeln sowie deren Ausnahmen ist dabei dann nicht explizit in Form von Regeln repräsentiert, sondern implizit in den Verbindungen zwischen Schicht 2 und 3 des Modells gespeichert. Dennoch verhält sich das Modell interessanterweise so, als würde es Regeln und deren Ausnahmen lernen. Trainiert man das Modell zunächst mit einer Reihe von hochfrequenten Verben, von denen die meisten unregelmäßig sind, und dann mit vielen etwas weniger häufigen regelmäßigen Verben, so bildet das Modell erstaunlich gut den Sprachentwicklungsprozess von Kindern nach. Zunächst lernt es recht zuverlässig, die wenigen hochfrequenten Verben mit ihrer korrekten Vergangenheitsform zu assoziieren. In einem zweiten Schritt, wenn es mit vielen regelmäßigen Verben konfrontiert wird, kommt es jedoch zu Leistungseinbußen, die darauf zurück-

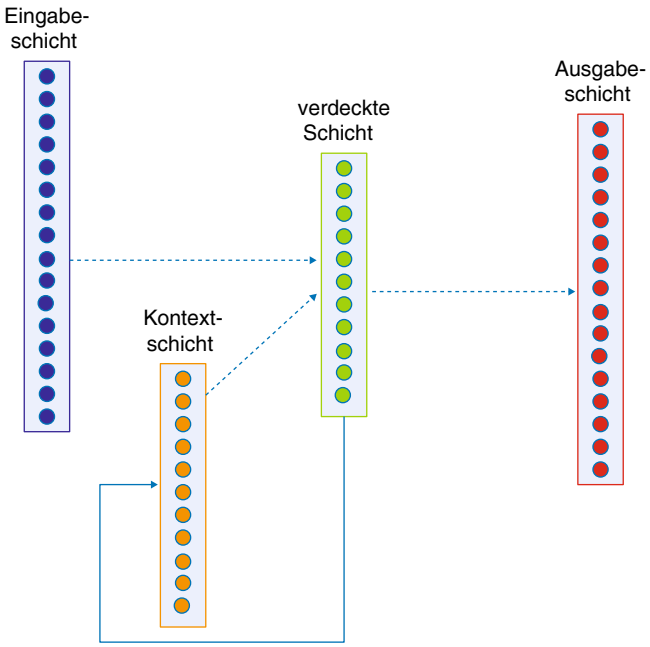


Abb. 14.10 Grundstruktur eines Elman-Netzes. Die Verbindungen zwischen den Schichten sind verkürzt darstellt. Jede Einheit der Eingabeschicht ist mit jeder Einheit der verdeckten Schicht verbunden. Gleiches gilt für die Verbindungen zwischen verdeckter Schicht und Ausgabeschicht und zwischen Kontextschicht und verdeckter Schicht. Diese Verbindungen werden durch Lernen verändert (gestrichelte Linien). Zwischen den Einheiten der verdeckten Schicht und denen der Kontextschicht bestehen feste Verbindungen, die nicht durch Lernen verändert werden (*durchgezogene Linien*; Details in Elman 1990, 1991)

zuführen sind, dass nun übergeneralisiert und die regelhafte Vergangenheitsbildung auch bei einigen der vormals beherrschten unregelmäßigen Verben angewandt wird (statt *fell* bildet das Modell genau wie die Kinder *falled*). Nach hinreichend viel Übung kommt es schließlich jedoch zum korrekten Verhalten auch bei den unregelmäßigen Verben und bei neuen Verben, die das Modell in der Übungsphase gar nicht präsentiert bekommen hatte. Das Modell verhält sich also regelhaft, ohne über explizite Regeln informiert worden zu sein und ohne explizite Regeln gespeichert zu haben.

Man könnte einwenden, dass es sich bei den Regelhaftigkeiten der Vergangenheitsbildung von Verben nicht um besonders komplexe Regeln handelt, die darüber hinaus ja eher die Morphologie als die Syntax betreffen. Die Regeln, die der syntaktischen Struktur von Sätzen zugrunde liegen, sind sicherlich weitaus komplizierter. Hier geht es um hierarchische Strukturen und insbesondere auch um Abhängigkeiten zwischen Elementen, die zeitlich oder räumlich zum Teil weit auseinander liegen (*long-distance dependencies*).

Tatsächlich gibt es mittlerweile aber eine ganze Reihe von konnektionistischen Modellen, in denen syntaktische Regeln auf ähnliche Weise erschlossen und implizit repräsentiert werden, wie es im Modell von Rumelhart und McClelland (1988) der Fall war. Ein Pionier dieser Forschung war Jeffrey Elman. Seine Modelle besitzen durch Rückkopplungen zwischen Netzwerkschichten sozusagen ein zeitliches Gedächtnis und können auf diese Weise zeitliche Abhängigkeiten zwischen Elementen erfassen. Das Netz „liest“ nach und nach die einzelnen Wörter eines Satzes ein und sagt immer die Eigenschaften des jeweils folgenden Wortes vorher. In der Lernphase kann es so (wie oben besprochen) die selbst generierte Vorhersage mit dem tatsächlich folgenden Wort vergleichen und die relevanten Gewichte entsprechend verändern. Nach und nach werden die Vorhersagen immer besser, und das Wissen über die syntaktische Struktur von Sätzen ist dann implizit in den Verbindungsgewichten des Netzwerks gespeichert.

Die Grundstruktur eines solchen *rekurrenten Netzes* ist in Abb. 14.10 dargestellt. Das Netz besteht aus vier Schichten. In der Eingabeschicht ist jeweils das aktuelle Wort als Aktivierungsmuster gespeichert, in der Ausgabeschicht das vorhergesagte nächste Wort. Die verdeckte Schicht vermittelt zwischen Eingabe und Ausgabe, zieht dabei aber die Informationen der Kontextschicht ebenfalls in Betracht. In der Kontextschicht ist jeweils der Zustand der verdeckten Schicht vom vorherigen Durchlauf gespeichert. Sie ist sozusagen das zeitliche Gedächtnis des Modells. Bei jedem neuen Wort werden also auf der Basis der Eigenschaften des aktuellen Wortes (*Eingabeschicht*) und der Eigenschaften der vorherigen Worte (*Kontextschicht*) die Eigenschaften des nächsten Wortes vorhergesagt (*Ausgabeschicht*). Die relevanten Verbindungen sind die zwischen Eingabeschicht und verdeckter Schicht, zwischen Kontextschicht und verdeckter Schicht sowie zwischen verdeckter Schicht und Ausgabeschicht. Diese Gewichte werden beim Lernen angepasst (entsprechend der Backpropagation-Regel; Rumelhart et al. 1986). Die Verbindungen zwischen der verdeckten Schicht und der Kontextschicht werden nicht verändert. Hier wird ja nur kopiert. Jede Einheit ist mit genau einer Einheit verbunden, und die Verbindungen haben alle das Gewicht 1. Füttert man ein solches Netz mit Sätzen unterschiedlicher Struktur (generiert durch eine vereinfachte Grammatik; Abb. 14.2), so zeigt sich, dass das Netz nach der Lernphase auch mit neuen, bisher nicht verarbeiteten Sätzen vergleichsweise gut umgehen kann, also erfolgreich die Eigenschaften des jeweils nächsten Wortes vorhersagt. Das Netz hat also syntaktisches Wissen erworben.

Interessanterweise zeigt eine faktorenanalytische Auswertung der verdeckten Schicht nach dem Lernen, dass das Netz auch grammatische Kategorien erschlossen hat. Nomen und Verben beispielsweise werden durch unterschiedliche Aktivierungsmuster repräsentiert, obwohl dem Netz diese Unterscheidung natürlich nie explizit „mitgeteilt“ wurde. Mittlerweile konnte in weiterführenden Arbeiten gezeigt werden, dass Elman-Netze auch komplexere Grammatiken lernen können und insbesondere auch weit auseinander liegende Abhängigkeiten (*long-distance dependencies)* und eingebettete Strukturen problemlos meistern (Christiansen und Chater 1999).

Als Fazit lässt sich festhalten, dass insbesondere in den letzten Jahren enorme Fortschritte in der konnektionistischen Modellierung syntaktischen Wissens erzielt wurden. In diesen Modellen wird allerdings typischerweise mit stark vereinfachten Grammatiken gearbeitet, und so ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend geklärt, wie mächtig diese Modelle wirklich sind (für eine eher skeptische Sicht vgl. van der Velde et al. 2004). Da in diesen Modellen syntaktisches Wissen jedoch ohne jegliche Vorkenntnis allein auf der Basis von dargebotenen Beispielsätzen erschlossen und implizit repräsentiert wird, sind diese Modelle auch

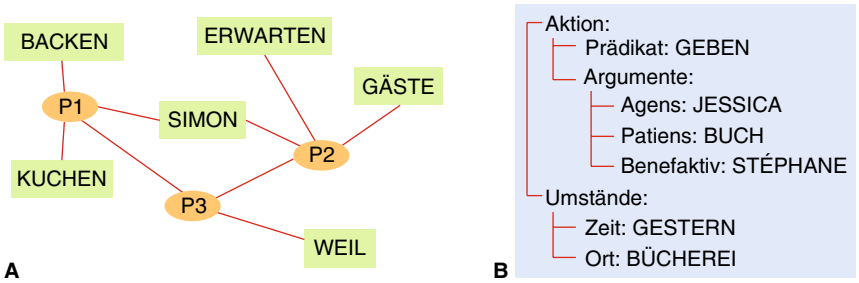


Abb. 14.11 Propositionale Repräsentationen. **A** Grafische Notation für Satz (77). **B** Integrierte Repräsentation für Satz (79). (Nach Kintsch 1998)

äußert relevant für die Spracherwerbsforschung, insbesondere für die Debatte zu Nativismus und Universalgrammatik (Diskussion in Christiansen und Chater 2008; Pinker 1994; Tomasello 1995).

14.3 Semantische Verarbeitung von Sätzen

In ▶ Abschn. 14.2 haben wir uns zunächst damit beschäftigt, wie das Ergebnis der syntaktischen Verarbeitung aussehen könnte. Wir haben uns angesehen, wie sich die syntaktische Struktur von Sätzen beschreiben lässt und welches Wissen prinzipiell notwendig ist, um die syntaktische Struktur von Sätzen erfassen zu können. Darauf aufbauend haben wir uns der Frage zugewandt, wie Personen beim Sprachverstehen diese syntaktische Struktur von Sätzen erfassen. Ähnlich wollen wir auch in diesem Abschnitt zur semantischen Verarbeitung vorgehen. In einem ersten Schritt werden wir uns verschiedene Ansätze dazu ansehen, wie die Bedeutung von Sätzen strukturiert ist und mental repräsentiert sein könnte. In einem zweiten Schritt wenden wir uns dann einigen Fragen zur semantischen Verarbeitung zu.

Hinsichtlich der Frage, wie die Bedeutung von Sätzen strukturiert und mental repräsentiert sein könnte, gibt es relevante Ansätze sowohl aus der Sprachpsychologie als auch aus der Linguistik. In der Sprachpsychologie geht man davon aus, dass die Bedeutung von Sätzen mental in Form von propositionalen Repräsentationen abgelegt ist. Man hat relativ klare Vorstellungen davon, wie diese Repräsentationen im Prinzip geartet sind. Allerdings hat man sich dabei kaum mit der Frage auseinandergesetzt, wie genau sich diese komplexen Repräsentationen auf der Basis der Bedeutung der enthaltenen Wörter generieren lassen. Dies ist insofern bedauerlich, als man die Mühelosigkeit, mit der Menschen immer wieder neue Sätze verstehen und produzieren können, die sie nie in ihrem Leben vorher gehört haben, nur dann erklären kann, wenn man annimmt, dass sich die Bedeutung komplexer Ausdrücke (z. B. Sätze) aus der Bedeutung ihrer Bestandteile und deren syntaktischer Beziehung zueinander ableiten lassen. In der sprachwissenschaftlichen Forschung zur Semantik spielt dieser auch als **Kompositionalität** oder *Frege-Prinzip* bezeichnete Grundsatz eine große Rolle, und es existieren mehrere konkrete Vorschläge zu möglichen Kompositionsmechanismen, die der semantischen Verarbeitung zugrunde liegen könnten. Im folgenden Abschnitt zur semantischen Struktur von Sätzen werden wir zunächst die sprachpsychologischen Annahmen zu propositionalen Repräsentationen und deren Struktur genauer betrachten und dann einen groben Überblick über die in der sprachwissenschaftlichen Forschung postulierten Kompositionsmechanismen geben. Im darauffolgenden Abschnitt werden wir uns dann einigen aktuellen Fragen der Forschung zur semantischen Verarbeitung zuwenden.

14.3.1 Semantische Struktur von Sätzen

Propositionen

In der Psycholinguistik wird klassischerweise angenommen, dass die Bedeutung von Sätzen in Form von propositionalen Repräsentationen gespeichert ist (Kintsch 1974; McKoon und Ratcliff 1992; Schank und Abelson 1977; van Dijk und Kintsch 1983). Eine solche propositionale Repräsentation besteht aus einer oder mehreren Propositionen, die jeweils ein Prädikat und ein oder mehrere Argumente enthalten. Jede **Proposition** repräsentiert die Bedeutung einer Aussage und kann insofern als wahr oder falsch eingestuft werden. Die Elemente von Propositionen sind lexikalische Konzepte. Propositionen stellen also Verbindungen zwischen Konzepten her und entsprechen in ihrer Natur damit den Repräsentationen im semantischen Gedächtnis, in denen unser Wissen über die Welt gespeichert ist (▶ Kap. 11). Propositionen können selbst auch wieder als Argumente in anderen Propositionen vorkommen, wodurch sich eine hierarchische Struktur ergeben kann (vgl. die Repräsentation in 78 für Satz 77). Wichtig ist ferner, dass es sich bei propositionalen Repräsentationen um amodale, also modalitätsunabhängige, Repräsentationen handelt, deren Format nicht davon beeinflusst ist, ob visuelle, auditive, haptische oder emotionale Sachverhaltsaspekte repräsentiert werden.

(77) *Simon backt einen Apfelkuchen, weil er Gäste erwartet.*
(78)
```
P1: backen(Simon, Apfelkuchen)
P2: erwarten(Simon, Gäste)
P3: weil(P2, P1)
```

In der Literatur werden unterschiedliche Notationen für propositionale Repräsentation verwendet. Neben Listennotationen wie in (78) werden häufig auch grafische Notationen verwendet (Abb. 14.11A). Propositionale Repräsentationen sind insbesondere mit dem Namen von Walter Kintsch assoziiert, dessen Forschung zur Bedeutungsrepräsentation die sprachpsychologische Forschung sowohl auf der Satz- als auch auf der Textebene entscheidend beeinflusst hat. In einer neueren Version seiner Theorie zu propositionalen Repräsentationen geht Kintsch (1998) von einer integrierten Repräsentation von Propositionen aus, die durch die thematischen Rollen ihrer Argumente strukturiert ist (Abb. 14.11B für Satz 79). Die thematischen Rollen der Argumente sind im Lexikoneintrag der Verben enthalten und werden – so die Annahme – bei der syntaktischen Verarbeitung beim Ein-

setzen der Verben an die Argumente übergeben. Sie stehen also bei der Erstellung der propositionalen Struktur zur Verfügung.

(79) *Gestern gab Jessica Stéphane in der Bücherei das Buch.*

Für die Annahme, dass Satzbedeutungen beim Sprachverstehen in Form propositionaler Repräsentationen abgelegt sind, sprechen beispielsweise die Ergebnisse von Studien, in denen die Gedächtnisleistung von Personen nach dem Lesen von Sätzen untersucht wurde. So zeigte sich, dass Probanden nach dem Lesen des Satzes (80) bei Vorlage des Hinweisreizes *overlooked* eher das Wort *square* reproduzierten als das Wort *tzar*, was vermutlich damit zusammenhängt, dass *overlooked* und *square* Teil derselben Proposition sind, *tzar* und *overlooked* hingegen nicht. Ähnliche Ergebnisse fanden sich auch in Studien, in denen die Hinweisreize als Primes bei einer Wortwiedererkennungsaufgabe verwendet wurden (Ratcliff und McKoon 1978).

(80) *The mausoleum that enshrined the tzar overlooked the square.*

In einer berühmten Studie von Kintsch und Keenan (1973) konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Probanden umso mehr Zeit für das Lesen eines Satzes benötigen, je komplexer dessen propositionale Struktur ist, auch wenn die Anzahl der Wörter konstant gehalten war. Dieses Ergebnis passt gut zu der Hypothese, dass beim Sprachverstehen propositionale Bedeutungsrepräsentationen aufgebaut werden. Heutzutage bestreiten dennoch viele Sprachpsychologen, dass propositionale Bedeutungsrepräsentationen beim Sprachverstehen eine zentrale Rolle spielen, und betonen stattdessen die Relevanz modaler Bedeutungsrepräsentationen (▶ Abschn. 14.6). Wir möchten hier jedoch zunächst an der Annahme amodaler Bedeutungsrepräsentationen festhalten, da diese Annahme die Sprachverstehensforschung geprägt hat und auch für die sprachwissenschaftliche Forschung zur semantischen Verarbeitung zentral ist. Im folgenden Abschnitt wenden wir uns der Frage zu, wie sich die Bedeutung komplexerer Ausdrücke (z. B. Sätze) aus den Bedeutungen ihrer Bestandteile ergibt.

Kompositionale logische Formen

Es wurde schon mehrfach erwähnt, dass Menschen scheinbar mühelos in der Lage sind, neue, nie zuvor gehörte Sätze zu produzieren und korrekt zu interpretieren. Da dies prinzipiell für unendlich viele Sätze gilt, kann es nicht sein, dass Menschen direkte Korrespondenzen zwischen Sätzen und deren Bedeutungen im Kopf abgespeichert haben. Vielmehr muss angenommen werden, dass bei der Sprachverarbeitung die Bedeutung eines komplexen Ausdrucks aus den Bedeutungen seiner Bestandteile zusammengesetzt wird. Diese Annahme scheint zunächst eher die semantische *Verarbeitung* zu betreffen, allerdings hat sie auch Implikationen für die semantische *Struktur* von Sätzen und ist deshalb hier Gegenstand dieses Kapitels.

Wie bereits erwähnt spielt in der Sprachwissenschaft das Kompositionalitätsprinzip eine entscheidende Rolle (Partee 1984). Nach diesem Prinzip ist die Bedeutung eines komplexen Ausdrucks durch die Bedeutungen seiner Bestandteile und der Art und Weise ihrer Zusammenfügung determiniert. Um die Bedeutung eines beliebigen Satzes erfassen zu können, muss demnach nur die Bedeutung der Wörter und die Struktur des Satzes bekannt sowie Wissen vorhanden sein über einige wenige semantische Kompositionsmechanismen, die die Bedeutungskomposition steuern. In der sprachpsychologischen Forschung hat man sich bislang kaum mit diesen Mechanismen auseinandergesetzt. Man hat propositionale Repräsentationen postuliert, ohne sich im Einzelfall Gedanken zu machen, ob diese auf der Basis des Kompositionalitätsprinzips plausibel sind oder nicht. Sprachwissenschaftliche Überlegungen zu semantischen Kompositionsmechanismen nehmen aber zunehmend Einfluss auf die sprachpsychologische Forschung. Wir werden deshalb im Folgenden einen konkreten Vorschlag zur semantischen Komposition exemplarisch und stark vereinfacht illustrieren. Wir halten uns dabei an die Überlegungen in Heim und Kratzer (1998). Gut verständliche Einführungen dazu finden sich auch in Pylkkänen und McElree (2006), Zimmermann und Sternefeld (2013) sowie Beck und Gergel (2014). Der erste systematische Vorschlag einer kompositionalen Semantik für ein Fragment des Englischen stammt von Richard Montague (1973).

In der kompositionalen Semantik wird die semantische Repräsentation eines Ausdrucks in der Regel streng parallel zu seiner syntaktischen Struktur abgeleitet. In der Syntax werden Ausdrücke in syntaktische Kategorien eingeteilt (z. B. N, V, NP, VP), und diese Kategorien bestimmen, mit welchen anderen Ausdrücken diese Ausdrücke ergänzt werden können und von welcher Kategorie der zusammengesetzte Ausdruck dann ist. Ein intransitives Verb wie *rennen* braucht eine NP (z. B. *der Junge*), um einen Ausdruck der Kategorie „Satz" zu ergeben (*Der Junge rennt*). Ähnlich geht man nun auch in der kompositionalen Semantik vor: Ausdrücke werden in unterschiedliche semantische Typen eingeteilt. Wie bei der Einteilung in syntaktische Kategorien (N, NP, V, VP etc.) legt der semantische Typ eines Ausdrucks fest, durch welche anderen Ausdrücke er ergänzt werden kann bzw. muss, und auch, von welchem semantischen Typ der zusammengesetzte Ausdruck dann ist. So kann ein Ausdruck wie *rennt* mit einem Ausdruck wie *der Junge* kombiniert werden und ergibt dann einen Ausdruck, der wahr oder falsch sein kann (*Der Junge rennt*). Dieses Vorgehen wollen wir im Folgenden etwas genauer betrachten. Dafür müssen einige technische Begriffe eingeführt werden, die später an einem konkreten Beispiel erläutert werden.

Als semantische Basistypen werden in der kompositionalen Semantik Individuen (Typ e) und Wahrheitswerte (Typ t) postuliert. Weitere semantische Typen lassen sich aus diesen beiden Typen ableiten. Der Typ <e,t> beispielsweise bezeichnet eine Funktion, die als Argument ein Individuum verlangt (e) und als Ergebnis einen Wahrheitswert (t) liefert. Von diesem semantischen Typ sind beispielsweise Gattungsnomen wie *Katze*, Adjektive wie *gelb* und intransitive Verben wie *rennen* (Abb. 14.12). Diese Ausdrücke brauchen ein Individuum (Typ e), bevor sich eine logische Form ergibt, die wahr oder falsch sein kann, die also vom Typ t ist. In sprachpsychologischen Termini gesprochen, ergibt sich hier bei Anwendung auf ein Individuum eine Proposition, die je nach Situation wahr oder falsch ist (z. B. P_1: `Katze(Minka)`; P_2: `rennen(der Mann)`; s. oben). Ein transitives Verb wie *zerstören* hingegen ist von einem komple-

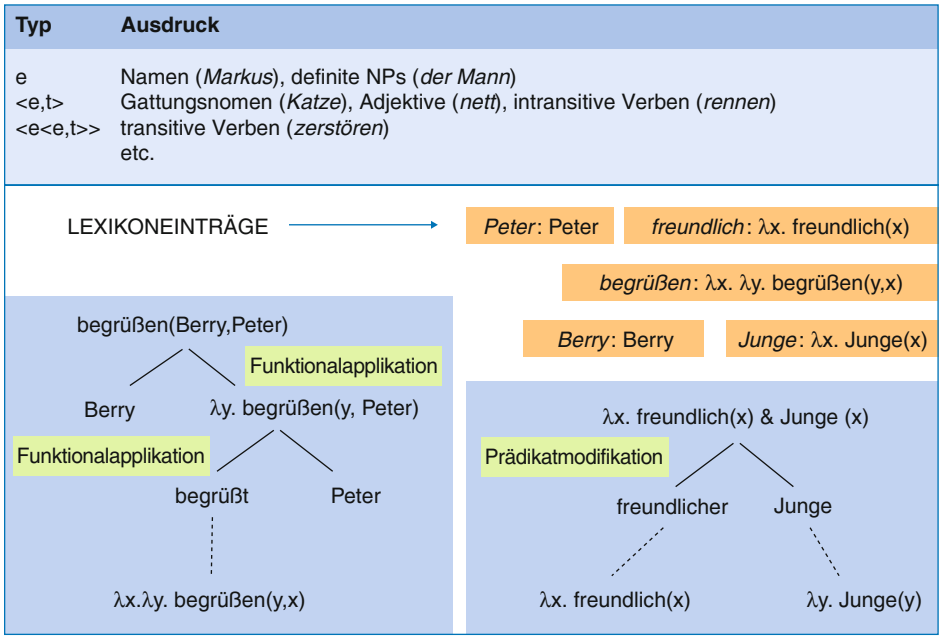


Abb. 14.12 Kompositionale Semantik nach Heim und Kratzer (1998). Es werden hier exemplarisch zwei Kompositionsmechanismen vereinfacht illustriert, mit deren Hilfe auf der Basis von Lexikoneinträgen und der syntaktischen Struktur eines komplexen Ausdrucks dessen Bedeutung ermittelt werden kann. Funktionalapplikation (*unten links*) kommt zur Anwendung, wenn auf der einen Seite der Verzweigung im syntaktischen Strukturbaum eine Funktion und auf der anderen ein passendes Argument steht. Prädikatmodifikation wird angewendet, wenn auf beiden Seiten ein Ausdruck des Typs <e,t> steht (*unten rechts*)

xeren Typ, nämlich <e<e,t>>. Ausdrücke dieses Typs bezeichnen eine Funktion, die zwei Individuen (Typ e) als Argumente erhält und als Ergebnis wiederum einen Wahrheitswert liefert (Typ t). In anderen Worten, ein Ausdruck wie *zerstören* braucht zwei Individuen (eins, das zerstört, und eins, das zerstört wird), bevor sich eine logische Form ergibt, die wahr oder falsch sein kann (*Der Junge zerstört* ist unvollständig, *Der Junge zerstört den Schneemann* hingegen vollständig).

Die Bedeutung eines jeden atomaren Ausdrucks ist nun im Lexikon entsprechend seines semantischen Typs gespeichert, und zwar mithilfe des Lambda-Kalküls. Argumente werden dabei mit Variablen bezeichnet, die durch den Lambda-Operator gebunden werden. Der Lexikoneintrag für das Adjektiv *freundlich* beispielsweise ist eine Funktion, die jedes Individuum x (z. B. *Maria*) abbildet auf die Wahrheitswerte „wahr“ oder „falsch“, je nachdem ob das Individuum freundlich ist oder nicht (je nachdem ob `freundlich(Maria)` wahr ist oder nicht). Der Lexikoneintrag für *begrüßen* ist eine Funktion, die für jedes Paar von Individuen als Ergebnis die Wahrheitswerte „wahr“ oder „falsch“ liefert, je nachdem ob das zweite vom ersten begrüßt wird (s. die Lexikoneinträge für *freundlich* und *begrüßen* in Abb. 14.12).

Wir betrachten hier nun exemplarisch zwei Kompositionsmechanismen, die auf der Basis der syntaktischen Struktur eines komplexen Ausdrucks die semantische Komposition steuern. Der erste Mechanismus wird *Funktionalapplikation* genannt und kommt zur Anwendung, wenn in einer Verzweigung im syntaktischen **Strukturbaum** auf der einen Seite eine Funktion steht und auf der anderen Seite ein passendes Argument. In diesem Fall kann die Funktion auf das Argument angewandt werden. Die resultierende logische Form enthält dann einen Lambda-Ausdruck weniger. Durch sukzessives Anwenden von Funktionalapplikation entsteht demnach unter Rückgriff auf die Wortbedeutung für den Satz (81) die logische Form in (82) (Abb. 14.12).

(81) *Berry begrüßt Peter.*
(82) `begrüßen(Berry, Peter)`

Der zweite Mechanismus, den wir betrachten möchten, wird *Prädikatmodifikation* genannt und kommt zur Anwendung, wenn in einer Verzweigung im syntaktischen Strukturbaum auf beiden Seiten Funktionen des Typs <e,t> stehen. In diesem Fall können die beiden Funktionen zu einer Funktion integriert werden (Abb. 14.12). Funktionalapplikation ist also für das Einbinden von Argumenten, Prädikatmodifikation für das Einbinden von normalen Adjunkten zuständig (zur Unterscheidung zwischen Adjunkten und Argumenten s. ▶ Abschn. 14.2.1).

Mit diesen beiden Kompositionsmechanismen kann bereits ein großer Teil semantischer Komposition modelliert werden, aber natürlich sind gegebenenfalls weitere Prinzipien notwendig, die hier aus Platzgründen nicht besprochen werden. Wichtig ist der Hinweis, dass die postulierten Kompositionsmechanismen nicht unabhängig sind von den Annahmen zu den Lexikoneinträgen. Dies lässt sich z. B. anhand von nichtintersektiven Adjektiven wie *groß* oder *angeblich* verdeutlichen. Eine große Ameise ist nicht notwendigerweise groß, und ein angeblicher Mörder ist nicht notwendigerweise ein Mörder und schon gar nicht angeblich. Die Anwendung von Prädikatmodifikation führt hier also nicht zur gewünschten Bedeutung. Will man an Prädikatmodifikation als semantischem Kompositionsprinzip festhalten, so muss angenommen werden, dass nichtintersektive Adjektive sich von intersektiven Adjektiven wie *freundlich* oder *blau* unterscheiden und insbesondere nicht vom Typ <e,t> sind. Dann nämlich käme Prädikatmodifikation bei diesen Adjektiven schlicht nicht zur Anwendung. Man sieht, dass sich hier die Annahmen zu den semantischen Kompositionsmechanismen und die Annahmen zu den Lexikoneinträgen gegenseitig beeinflussen. So gibt es auch Ansätze zur kompositionalen Semantik, in denen nur ein Kompositionsmechanismus postuliert wird (Funktionalapplikation) und stattdessen komplexere Lexikoneinträge in Kauf genommen werden (z. B. Jacobson 2014).

Unsere Darstellung kompositionaler Semantik stellt in vielerlei Hinsicht eine starke Vereinfachung dar. Auf zwei Vereinfachungen möchten wir hinweisen. Die erste betrifft die Annah-

men zu den semantischen Typen. Mittlerweile gehen die meisten Semantiker davon aus, dass der Basistyp e in verschiedene Untertypen für Objekte, Zustände und Ereignisse aufgespaltet werden muss (Davidson 1967; Krifka 1989; Maienborn 2011) und es auch eigene semantische Typen für Zeiten und Welten gibt. Die Sätze (83) und (84) bringen demnach ein Situationsargument in die semantische Form ein, das für das beschriebene Ereignis bzw. den beschriebenen Zustand steht.

(83) *Robin öffnet die Truhe.*
(84) *Paul liegt faul auf der Wiese.*

Als Argument wird u. a. vorgebracht, dass bei Annahme eines solchen impliziten Situationsarguments verschiedene Adverbiale (z. B. *heimlich*) als Prädikate von Ereignissen bzw. Zuständen aufgefasst werden können (vgl. 85 und 86) und somit deren Inferenzverhalten in direkter Analogie zur adjektivischen Modifikation von Nomina adäquat behandelt werden kann. Ferner wird argumentiert, dass Situationsargumente eine geeignete Anschlussstelle für Zahl- und Frequenzangaben darstellen (vgl. 87) und als Stellvertreter für definite Kennzeichnungen und für Infinitivkomplemente von Perzeptionsverben dienen können (vgl. 88). Als Konsequenz werden dann allerdings die semantischen Typen von Verben komplexer (*rennen* z. B. ist dann nicht mehr vom Typ <e,t>, sondern vom Typ <e<e,t>>). Einen sehr verständlichen Überblick gibt Maienborn (2003).

(85) *Robin hat die Truhe heimlich geöffnet.*
(86) `λe. öffnen(e) & Agens(e,Robin) & Thema(e,die Truhe) & heimlich(e)`
(87) *Robin hat die Truhe zweimal geöffnet.*
(88) *Britta sieht Robin die Truhe öffnen.*

Die zweite Vereinfachung betrifft die Unterscheidung zwischen der **Intension** und der **Extension** von Ausdrücken. In einer extensionalen Semantik wird die Bedeutung eines Satzes mit dessen Wahrheitswert gleichgesetzt. So müssen zwei Sätze als gleichbedeutend angesehen werden, wenn sie denselben Wahrheitswert haben. Ähnliches gilt auch für Ausdrücke anderer Typen. Die Bedeutung des Adjektivs *müde* ist eine Funktion von Individuen auf Wahrheitswerte. Sind zufällig alle Individuen müde, die traurig sind und umgekehrt, so liegen den Bedeutungen der beiden Wörter dieselben Funktionen zugrunde, und sie sind damit als gleichbedeutend anzusehen. Dass man mit einer extensionalen Semantik sprachliche Bedeutung nicht umfassend beschreiben kann, war schon Frege (1892) bekannt und wird schnell deutlich, wenn man sich die Sätze (89) und (90) ansieht. Falls Knut der Bürgermeister von Pirna ist, müssten einer extensionalen Semantik zufolge beide Sätze immer entweder wahr oder falsch sein.

(89) *Oliver glaubt, dass Knut ein Mörder ist.*
(90) *Oliver glaubt, dass der Bürgermeister von Pirna ein Mörder ist.*

Soll der Intuition Rechnung getragen werden, dass (89) wahr und (90) falsch sein kann, wenn Oliver z. B. nicht weiß, dass Knut der Bürgermeister von Pirna ist, so muss von einer extensionalen zu einer intensionalen Semantik übergegangen werden (vgl. die Einführung in Gamut 1991). In einer intensionalen Semantik sind Sätze nicht an sich wahr oder falsch, sondern immer nur in Bezug auf bestimmte Situationen (z. B. in Bezug auf bestimmte Zeitpunkte oder mögliche Welten). So ist der Satz *Peter ist hungrig* zu bestimmten Zeitpunkten wahr, zu anderen aber falsch, und der Satz *Spinnen haben acht Beine* ist zwar in unserer Welt wahr, aber in anderen möglichen Welten eventuell falsch. Sätze beschreiben also Mengen von Situationen und sind nur dann als gleichbedeutend anzusehen, wenn sie dieselben Mengen an Situationen beschreiben. Da die eingebetteten Sätze in (89) und (90) (*Knut ist ein Mörder*; *Der Bürgermeister von Pirna ist ein Mörder*) nicht dieselben Situationen beschreiben, sind sie nicht gleichbedeutend, und so ist es prinzipiell möglich, dass (89) wahr und (90) falsch ist oder umgekehrt.

Ebenso verhält es sich mit den oben diskutierten Ausdrücken *müde* und *traurig*. Auch wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer bestimmten Welt genau diejenigen Individuen traurig sind, die müde sind, so sind die beiden Ausdrücke dennoch nicht gleichbedeutend, da es andere Zeitpunkte und/oder andere Welten gibt, in denen sich die Ausdrücke auf unterschiedliche Mengen von Individuen beziehen. In einer intensionalen Semantik nimmt also die Bedeutung von Adjektiven wie *wütend* oder *traurig* eher Bezug auf die semantischen Merkmale, die vorliegen müssen, damit jemand als wütend oder traurig bezeichnet werden kann. Auch die Gleichsetzung von logischer Form und propositionaler Repräsentation, wie wir sie oben vorgenommen haben, ist nur angemessen, wenn von einer intensionalen Semantik ausgegangen wird. Tatsächlich können aber die besprochenen Kompositionsmechanismen durch einfache Abwandlungen zu einer intensionalen Semantik erweitert werden (Heim und Kratzer 1998, S. 299ff; vgl. auch Zimmermann und Sternefeld 2013).

Distributionelle Semantik

Innerhalb der Kognitionswissenschaft gewinnt in den letzten Jahren die distributionelle Semantik zunehmend an Bedeutung. Sie basiert auf der distributionellen Hypothese, wonach sich die Bedeutung sprachlicher Einheiten aus den Kontexten, in denen sie vorkommen, erschließen lässt („You shall know a word by the company it keeps"; Firth 1957). Das Wort *Hund* beispielsweise kommt häufig zusammen mit Wörtern wie *Halsband*, *Flöhe*, *streicheln* und *Trockenfutter* vor, und laut der distributionellen Hypothese bestimmt dies die Bedeutung des Wortes *Hund*. Das Wort *Katze* kommt mit ähnlichen Wörtern vor, und dies wiederum begründet, warum *Hund* und *Katze* bedeutungsverwandte Wörter sind.

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte im Bereich der distributionellen Semantik erzielt. Es liegen mehrere konkrete computationale Modelle vor, die auf der Basis riesiger Korpora Wortbedeutungen als Vektoren in hochdimensionalen Räumen repräsentieren und die Bedeutungsähnlichkeit der Wörter aus der Distanz zwischen den entsprechenden Vektoren berechnen können. Eine prominente Theorie, die derzeit auch in der kognitionspsychologischen Sprachforschung eine große Rolle spielt, ist die *latente semantische Analyse* (LSA, *latent semantic analysis*; Deerwester et al. 1990; Landauer und Dumais 1997; ▶ Abschn. 14.9). In jüngster Zeit setzt man sich zunehmend mit der Frage ausein-

ander, wie sich die Bedeutung komplexer sprachlicher Einheiten (Phrasen, Sätze) distributionell repräsentieren lässt. Es wurden bereits verschiedene Kompositionsmechanismen vorgeschlagen, mit deren Hilfe sich die Bedeutung komplexer Einheiten aus der Bedeutung ihrer Bestandteile errechnen lässt (Baroni et al. 2014; Jones et al., im Druck; Kintsch 2001; Mitchell und Lapata 2010). Detaillierte Untersuchungen zu der Frage, inwieweit diese Mechanismen kognitionspsychologisch betrachtet plausibel sind und mit den Daten aus Verarbeitungsstudien in Einklang zu bringen sind, liegen bislang jedoch noch nicht vor.

14.3.2 Erfassen der Satzbedeutung

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir uns mit der Frage beschäftigt, wie das Ergebnis der semantischen Analyse aussieht. In diesem Abschnitt geht es nun um die Frage, wie Rezipienten zur semantischen Repräsentation eines Satzes gelangen. Auf der Basis der oben angestellten Überlegungen lässt sich vermuten, dass Rezipienten bei der Sprachverarbeitung sukzessive die Satzbedeutung aus den Bedeutungen der Satzbestandteile zusammensetzen. Eine naheliegende Hypothese wäre, dass sie sich dabei auf die besprochenen Kompositionsmechanismen stützen. Allerdings sind die Modelle in der kompositionalen Semantik nicht als Verarbeitungsmodelle konzipiert und lassen sich auch nicht direkt in Verarbeitungsmodelle überführen. Ein Problem besteht beispielsweise darin, dass nach diesen Modellen die semantische Komposition auf der Basis von vollständigen syntaktischen Repräsentationen der Sätze operiert. Auch wenn man sich in der Forschung noch nicht einig ist, ob die semantische Verarbeitung streng inkrementell ist, so ist doch klar, dass Rezipienten nicht erst dann mit der semantischen Analyse beginnen, wenn die syntaktische Analyse des Satzes abgeschlossen ist. Ein psychologisch plausibles Verarbeitungsmodell auf der Basis der postulierten Kompositionsmechanismen setzt also die Entwicklung einer inkrementellen kompositionalen Semantik voraus. Statt die semantische Verarbeitung im Detail zu modellieren, hat man sich in der Forschung bislang eher mit grundlegenden Fragen zum Verarbeitungsprozess beschäftigt, z. B. mit der Frage nach der Inkrementalität der semantischen Verarbeitung oder der Frage nach den Grenzen der Kompositionalität.

▪ Ambiguität und Inkrementalität

Ambiguitäten sind auch bei der semantischen Analyse allgegenwärtig. So ist in Satz (91) unklar, ob das Adjektiv *intersektiv* gemeint ist (der Tänzer ist schön, der Raucher ist stark) oder nicht (Der Tänzer tanzt schön, ist aber nicht notwendigerweise selber schön). In Satz (92) kann das Adjektiv *resultativ* gemeint sein (das Haar ist als Ergebnis des Kämmens glatt bzw. nass) oder *depiktiv* (das Haar ist beim Kämmen glatt bzw. gerade). In Satz (93) ist unklar, ob Kuno ein bestimmtes Haus mieten möchte, das sich (eventuell zufällig) am Waldrand befindet oder ob die Lokation am Waldrand das Kriterium ist, das erfüllt sein muss, damit Kuno das Haus mieten möchte. Satz (94) lässt offen, ob sich Birgit und Artin je eine Tafel Schokolade kaufen (distributive Lesart) oder ob sie sich eine Tafel gemeinsam kaufen (kollektive Lesart). Satz (95) schließlich verkörpert wie auch Satz (5) eine klassische *Skopusambiguität*, wobei unklar ist, ob jedes Kind denselben Dichter kennt oder ob es sich um unterschiedliche Dichter handelt. All diese Ambiguitäten gehen natürlich mit einer unterschiedlichen semantischen Form der Sätze einher, z. B. die beiden logischen Formen in (96), in denen die Ambiguität für (95) durch die unterschiedliche Reihenfolge der beiden Quantoren in der logischen Form zustande kommt.

(91) *A beautiful dancer/Ein starker Raucher.*
(92) *The stylist combed the hair straight/wet.* [Pylkkänen und McElree 2006]
(93) *Kuno will ein Haus am Waldrand mieten.*
(94) *Birgit und Artin kaufen sich beim Bäcker eine Tafel Schokolade.*
(95) *Einen Dichter kennt jedes Kind.*
(96) `∀x ∃y kennen(x,y)/∃y∀x kennen(x,y)`

Für die Verarbeitung stellt sich nun ähnlich wie bei der syntaktischen Verarbeitung die Frage, wie der Rezipient mit solchen Ambiguitäten umgeht. Wartet der Rezipient, bis der weitere Kontext Information zur Verfügung stellt, die eine eindeutige Interpretation erlaubt (*globale Verarbeitung*), oder legt er sich direkt auf eine Lesart fest, auch auf die Gefahr hin, dass diese später revidiert werden muss (*inkrementelle Verarbeitung*)? Außerdem: Auf der Basis welcher Kriterien findet die Entscheidung für die eine oder andere Lesart statt? Eine naheliegende Hypothese wäre, dass im Zweifelsfall die einfachere Lesart gewählt wird (wie bei der syntaktischen Analyse). Die experimentellen Ergebnisse sind hier uneinheitlich. So konnten bislang beispielsweise für Sätze wie (91) keine Belege dafür gefunden werden, dass die vermeintlich einfachere intersektive Lesart bevorzugt wird (Frazier 1999). Für Sätze wie (93) jedoch zeigt sich mehrheitlich, dass Leser die Lesart bevorzugen, die sich an der Oberflächenreihenfolge der Quantoren orientiert und deshalb vergleichsweise einfach sein sollte (Bott und Schlotterbeck 2015; Filik et al. 2004; Tunstall 1998).

Naheliegend wäre weiterhin die Annahme, dass Rezipienten bei ihrer Wahl für die eine oder andere Lesart Häufigkeitsinformationen mit einbeziehen. So zeigte sich, dass resultative Lesarten von Adjektiven deutlich schneller zu verarbeiten sind als die weniger häufig vorkommenden depiktiven Lesarten (Pylkkänen und McElree 2006). Die Verarbeitungsunterschiede könnten in diesem Fall also tatsächlich darauf zurückzuführen sein, dass die Rezipienten sich bei resultativen Konstruktionen gleich auf die richtige Analyse festlegen, während sie bei depiktiven Konstruktionen reanalysieren müssen. Zusätzlich zu Häufigkeitsinformationen scheinen auch der visuelle Kontext und das Hintergrundwissen der Probanden eine Rolle bei der Festlegung auf bestimmte Lesarten zu spielen. Belege dafür konnten beispielsweise von Sedivy et al. (1999) mithilfe des *Visual-World-Paradigmas* gefunden werden, bei dem die Augenbewegungen von Personen aufgenommen werden, während sie Sätze hören und dabei eine visuelle Szene betrachten. In dieser Studie zeigte sich, dass sich die Rezipienten bei einer Phrase wie *the tall glass* direkt auf eine kontrastive, nichtintersektive Interpretation festlegen, wenn der visuelle Kontext eine solche Interpretation unterstützt (z. B. dadurch, dass mehrere Gläser vorhanden sind, von denen eines größer ist als die anderen).

Bezüglich des Einflusses von Hintergrundwissen wiesen Sanford und Garrod (1998) darauf hin, dass Sätze wie (97) und (98), obwohl sie eine identische Struktur haben, typischerweise unterschiedlich interpretiert werden. Satz (97) wird als wahr betrachtet, wenn jedem Zimmer ein spezifisches Bad zugeordnet ist, das nicht von Gästen aus anderen Zimmern mitbenutzt wird. Satz (98) hingegen wird als wahr betrachtet, wenn jedem Studenten ein spezifischer Tutor zugeordnet ist, der aber durchaus auch für mehrere Studenten zuständig sein kann. Der Grund für die unterschiedlichen Interpretationen hat vermutlich damit zu tun, dass das Hintergrundwissen hier unterschiedliche Interpretationen nahelegt.

(97) *Every bedroom in the hotel has its own bathroom.*
(98) *Every student at the University has her own tutor.*

Leser scheinen also durchaus Präferenzen für bestimmte Lesarten zu haben und sich auch teilweise frühzeitig auf diese festzulegen. Kann man also schließen, dass die semantische Verarbeitung inkrementell verläuft? Eine Beantwortung dieser Frage ist auf der Basis der derzeit vorliegenden experimentellen Studien nicht möglich. Die meisten Autoren gehen heutzutage wohl davon aus, dass der Rezipient sich nicht in allen Fällen direkt auf eine Lesart festlegt, sondern die Entscheidung unter bestimmten Bedingungen etwas verzögert. Unklar ist in vielen Fällen, ob bei der Verzögerung der Entscheidung die verschiedenen möglichen Lesarten parallel mitgeführt werden oder die Repräsentation einfach unterspezifiziert bleibt. Auch die Tatsache, dass die Verarbeitungszeiten am Satzende typischerweise ansteigen (*sentence wrap-up effect*; ▶ Just und Carpenter 1980; ▶ Rayner et al. 2000), passt zu der Hypothese, dass die semantische Verarbeitung teilweise verzögert operiert. Zu diesem Schluss kommen auch Bott und Schlotterbeck (2013) auf der Basis einer Experimentserie zur Interpretation von mehrfach quantifizierten Sätzen. Andererseits gibt es auch Studien, die zeigen, dass Rezipienten sogar häufig dem sprachlichen Input voraus sind und bei der Verarbeitung recht spezifische Vorhersagen dazu machen, was als Nächstes kommt (*predictive processing*). Diese vorhersagenmachende Verarbeitung zeigte sich wiederum in Studien mit dem Visual-World-Paradigma. Beim Lesen eines Satzes wie (99) fokussieren die Versuchspersonen bei *eat* auf das einzige essbare Objekt in der visuellen Szene schon lange bevor das entsprechende Wort präsentiert wurde (Altmann und Kamide 1999). Neben semantischen Selektionsrestriktionen (z. B., dass das direkte Objekt von *essen* etwas Essbares sein muss) spielen dabei scheinbar auch Plausibilitätsüberlegungen eine Rolle. So wird beim Verarbeiten von (100) der Blick je nach grammatischem Subjekt auf das Motorrad oder aber das Karussell gelenkt, wiederum bevor das entsprechende Wort präsentiert wird (Kamide et al. 2003).

(99) *The boy will eat/move the …*
(100) *The man/girl will ride the …*

Grenzen der Kompositionalität: Coercion

Geht man von einer starken Version des Kompositionalitätsprinzips aus, wonach sich die Bedeutung eines komplexen Ausdrucks vollständig aus der Bedeutung seiner Bestandteile und deren syntaktischer Beziehung rekonstruieren lässt, so sollten die Sätze (101) und (102) eigentlich nicht interpretierbar sein. In (101) passt der semantische Typ des Verbs nicht zum semantischen Typ des direkten Objekts, denn ein Verb wie *beginnen* erwartet ein Ereignis (z. B. das Lesen eines Buches), nicht ein Individuum (das Buch). Um den Satz interpretieren zu können, muss dieses Ereignis erschlossen und der semantische Typ der im Satz erwähnten NP entsprechend angepasst werden (*type shifting*; McElree et al. 2001). Ein ähnliches Problem liegt in (102) vor. Das Verb *hüpfen* bezeichnet ein punktuelles Ereignis und lässt sich deshalb nicht mit einer Dauerangabe kombinieren. Um den Satz interpretieren zu können, muss ein zeitlich ausgedehntes Ereignis erschlossen werden, das aus einer Iteration des erwähnten punktuellen Ereignisses besteht (das Mädchen hüpft immer wieder).

(101) *The author began the book.* [Komplement-Coercion]
(102) *Das Mädchen hüpfte drei Stunden lang.* [Aspekt-Coercion]

In beiden Fällen kann die Bedeutung des Satzes also nicht streng kompositional abgeleitet werden. Es sind zusätzliche Interpretationsmechanismen notwendig, die keine direkte Entsprechung in der syntaktischen Struktur der Sätze haben. Die Tatsache, dass solche Sätze gar nicht so selten vorkommen und von den meisten Personen nicht als ungrammatisch angesehen werden, lässt viele Autoren heutzutage annehmen, dass bei deren Interpretation bestimmte nichtkompositionale Reparaturmechanismen eine Rolle spielen. Aus der Verarbeitungsperspektive ergibt sich hieraus die Vorhersage, dass die entsprechenden Sätze einen relativ großen Verarbeitungsaufwand mit sich bringen sollten. Diese Vorhersage konnte in diversen psycholinguistischen Studien bestätigt werden, wobei die Ergebnisse für Komplement-Coercion eindeutiger ausfielen als für Aspekt-Coercion (vgl. 101 vs. 102; Überblick in Pylkkänen und McElree 2006). Auch scheinen nichtreparierbare aspektuelle Inkompatibilitäten wie in Satz (103) erst relativ spät entdeckt zu werden (Bott, im Druck), was nahelegen könnte, dass aspektuelle Eigenschaften eines Ereignisses während der Verarbeitung zunächst unterspezifiziert bleiben (vgl. die Annahmen zur Inkrementalität der semantischen Verarbeitung in ▶ Abschn. 14.3.2).

(103) *Zwei Stunden lang erreichte der Läufer die Ziellinie.*

Ein- vs. Zwei-Stufen-Modelle

Ein Thema, das in der sprachpsychologischen Forschung in den letzten Jahren eine wichtige Rolle gespielt hat, ist die Frage, zu welchem Zeitpunkt während der Verarbeitung Informationen aus anderen Wissensquellen mit einbezogen werden. Es lassen sich zwei extreme Positionen unterscheiden. Nach dem *Zwei-Stufen-Modell* der semantischen Verarbeitung wird angenommen, dass Rezipienten bei der Verarbeitung zunächst auf der Basis ihres sprachlichen Wissens (mentales Lexikon, Kompositionsprinzipien) die kontextunabhängige Bedeutung eines sprachlichen Ausdrucks erstellen. Generelles Hintergrundwissen sowie kontextuelle Information werden dieser Auffassung zufolge erst in einem nachgeschalteten zweiten Verstehensschritt in Betracht gezogen, um die kontextunabhängige Bedeutung anzureichern. Dieses Zwei-Stufen-Modell ist angelehnt an Überlegungen, die

in der sprachwissenschaftlichen Forschung unter dem Stichwort Zwei-Ebenen-Semantik besprochen werden (Bierwisch 1982; Lang und Maienborn 2011).

Im Gegensatz dazu gehen *Ein-Stufen-Modelle* der semantischen Verarbeitung davon aus, dass beim Verstehen die verschiedenen sprachlichen und nichtsprachlichen Informationen simultan verrechnet werden (z. B. Altmann und Kamide 1999; Elman 2009; Hagoort und van Berkum 2007; Levy 2008). Tatsächlich zeigen mittlerweile eine ganze Reihe von Studien, dass Informationen aus anderen, nicht rein sprachlichen Wissensquellen den Verstehensprozess recht früh beeinflussen können, z. B. Informationen aus dem vorherigen Diskurs (z. B. Hess et al. 1995; Nieuwland und van Berkum 2006), Informationen aus dem visuellen Kontext (z. B. Tanenhaus et al. 1995), Informationen aus sprachbegleitenden Gesten (z. B. Özyürek et al. 2007), Informationen über den Sprecher einer Äußerung (z. B. van Berkum et al. 2008) und Informationen aus dem generellen Hintergrundwissen des Rezipienten (z. B. Hagoort et al. 2004; Hare et al. 2009; Isberner und Richter 2014). Wir wollen anhand von zwei dieser Studien das typische experimentelle Vorgehen in diesem Bereich illustrieren. In der Studie von van Berkum et al. (2008) wurden den Probanden die Sätze (104) und (105) auditiv präsentiert, wobei die Sprecherstimme entweder zum Inhalt des Satzes passte oder nicht. Ein Kompatibilitätseffekt zwischen Inhalt und Stimme ließ sich im EEG bereits 200–300 ms nach Beginn des kritischen Wortes (*wine*, *tattoo*) erkennen. Dies spricht den Autoren zufolge gegen ein Zwei-Stufen-Modell der Verarbeitung, wonach sich ein solcher Kompatibilitätseffekt erst sehr viel später im Verstehensprozess hätte zeigen sollen, nämlich erst nachdem der Rezipient die kontextunabhängige Bedeutung erstellt und Informationen aus dem sozialen Kontext mit einbezogen hat.

(104) *Every evening I drink some wine before I go to sleep* [match: adult's voice; mismatch: child's voice]
(105) *I have a large tattoo on my back.* [match: low-class accent; mismatch: high-class accent]

In der Studie von Hagoort et al. (2004) wurden den (niederländischen) Probanden Sätze wie (106) präsentiert, die je nach verwendetem Adjektiv entweder wahr (*gelb*), falsch (*weiß*) oder semantisch anomal (*sauer*) waren. Sowohl die falschen als auch die semantisch anomalen Adjektive führten im Vergleich zur wahren Bedingung zu erhöhten N400-Amplituden. Entgegen der Vorhersage eines Zwei-Stufen-Modells fand sich allerdings kein Unterschied in der Latenz dieses N400-Effekts. Mit anderen Worten, es fand sich kein Unterschied hinsichtlich des Zeitpunktes, zu dem die beiden Verletzungen im Verstehensprozess auffällig wurden. Die Autoren interpretieren dies als Hinweis darauf, dass semantisches und allgemeines Hintergrundwissen sehr früh und parallel zueinander in den Verstehensprozess mit einbezogen werden (für eine Studie mit Deutschem Material siehe Dudschig, Maienborn und Kaup, 2016).

(106) *Niederländische Züge sind gelb/weiß/sauer.*

Auch wenn Untersuchungsergebnisse wie diese dazu geführt haben, dass in der Sprachpsychologie heutzutage eher von einem Ein-Stufen-Modell als von einem Zwei-Stufen-Modell der semantischen Verarbeitung ausgegangen wird, so sind sie dennoch nicht ohne Kritik geblieben. Es kann durchaus sein, dass manche der Ergebnisse nur für die Verarbeitung anormaler Sätze gelten und insofern nicht viel über das normale Sprachverstehen aussagen. Auch ist unklar, welche Rolle einfache semantische Priming-Prozesse beim Zustandekommen der Ergebnisse gespielt haben (Huang und Gordon 2011). Zum Beispiel könnten die erhöhten N400-Amplituden in den beiden Verletzungsbedingungen von (106) darauf zurückzuführen sein, dass beide Adjektive wesentlich schwächer assoziativ mit den anderen Wörtern im Satz verknüpft sind als das Adjektiv in der wahren Bedingung. Es ist also vielleicht gar nicht verwunderlich, dass kein Unterschied in der Latenz des N400-Effekts in den beiden Verletzungsbedingungen zu finden war, da der N400-Effekt gar nicht notwendigerweise die Verletzungserkennung, sondern eventuell lexikalische Assoziationen widerspiegelt. Andererseits zeigen die Ergebnisse einer Studie von Richter et al. (2009), dass Leser, die aufgefordert werden, die orthografische Korrektheit des letzten Wortes eines Satzes wie (106) zu beurteilen, dies schneller bewältigen, wenn die Antwort zum Wahrheitswert des Satzes passt („ja" bei wahren Sätzen, „nein" bei falschen Sätzen), als wenn die Antwort nicht passt. Dieses Ergebnis legt nahe, dass Leser die Sätze tatsächlich unmittelbar als Teil des Verstehensprozesses evaluierten. Es sind also sicherlich weitere Studien notwendig, bevor die Frage, ob sich Verstehensprozesse eher als einstufig oder zweistufig beschreiben lassen, als geklärt angesehen werden kann.

▪ Verarbeitung figurativer Sprache

Im Fall von figurativer Sprache kommt der Rezipient nicht weit, wenn er versucht, die Satzbedeutung aus den (wörtlichen) Bedeutungen der Bestandteile abzuleiten. Hierbei lassen sich unterschiedliche Sorten figurativer Sprache unterscheiden, u. a. Metaphern (vgl. 107), Idiome (vgl. 108), Sprichwörter (vgl. 109) und ironische Ausdrücke (vgl. 110). In manchen Fällen ist die nichtwörtliche Bedeutung stark konventionalisiert (vgl. 108), sodass manche Autoren (z. B. Giora 2002) annehmen, dass diese Ausdrücke als Einheit im mentalen Lexikon gespeichert sind. Bei anderen hingegen erfordert die korrekte nichtwörtliche Interpretation vermutlich aufwendigere Schlussfolgerungsprozesse (vgl. 107).

(107) *Our marriage was a roller coaster ride through hell.* [Gibbs und Colston 2006]
(108) *Klaus kann Hans nicht das Wasser reichen.*
(109) *Alte Liebe rostet nicht.*
(110) *Das ist ja eine tolle Freundin.* [geäußert in einer Situation der Enttäuschung]

Klassischerweise wird angenommen, dass bei der Verarbeitung figurativer Sprache zunächst die wörtliche Bedeutung im Sinne des Kompositionalitätsprinzips berechnet wird. Erst wenn erkannt wird, dass diese wörtliche Bedeutung nicht gemeint sein kann (weil sie keinen Sinn ergibt oder weil sie – wie bei Ironie – nicht zur Äußerungssituation passt), versucht der Rezipient die übertragene Bedeutung herauszuarbeiten. Aus dieser Annahme lässt sich die Hypothese ableiten, dass figurative Ausdrücke grundsätzlich relativ lange Verarbeitungszeiten in Anspruch neh-

men sollten. Außerdem sollten Ausdrücke, die sowohl eine sinnvolle wörtliche als auch eine sinnvolle nichtwörtliche Bedeutung haben, immer im wörtlichen Sinne verstanden werden. Beide Vorhersagen konnten in der psycholinguistischen Forschung bislang nicht bestätigt werden (Überblick in Gibbs und Colston 2006). Mittlerweile sind sich die meisten Autoren einig, dass ein serielles Modell, wonach zunächst die wörtliche und dann die nichtwörtliche Bedeutung generiert wird, wenn überhaupt, für neue, unbekannte figurative Ausdrücke zutrifft. In allen anderen Fällen – so die Annahme – kann die wörtliche und die nichtwörtliche Bedeutung mehr oder weniger parallel verfolgt werden. Hierfür wurden ähnlich wie bei der syntaktischen Verarbeitung unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen. Katz und Ferretti (2001) beispielsweise gehen von einem Constraint-basierten Ansatz aus, wonach die unterschiedlichen Interpretationen in einen Wettstreit um die vorhandene Aktivierung treten und letztendlich diejenige gewinnt, die insgesamt am besten zu den unterschiedlichen Constraints aus verschiedenen Wissensquellen passt. Nach der *Graded-Saliency-Hypothese* von Giora (2002) hingegen spielt die Häufigkeit, mit der bestimmte Wörter oder Phrasen in wörtlicher bzw. übertragener Bedeutung verwendet werden eine entscheidende Rolle (Salienz der Bedeutungen). Der Kontext wird erst mit einbezogen, nachdem diese salienten Bedeutungen aktiviert wurden. Fast allen parallelen Ansätzen ist die Annahme gemein, dass geläufige Idiome einen eigenen lexikalischen Eintrag aufweisen. Beim Verstehen findet ein einfacher Abgleich mit dem Lexikon statt (z. B. Sprenger et al. 2006; Swinney und Cutler 1979). Dies erklärt auch, warum viele Idiome syntaktisch recht unflexibel sind (z. B. *He kicked the bucket* vs. **The bucket was kicked by him*; vgl. aber Holsinger 2013).

Oberflächliche Verarbeitung

In der bisherigen Darstellung des Satzverstehensprozesses sind wir implizit davon ausgegangen, dass das Satzverstehen zu einer vollständigen, detaillierten und akkuraten Bedeutungsrepräsentation des Satzes führt. Diskutiert wurde bisher nur, wie der Rezipient zu dieser Bedeutungsrepräsentation kommt und von welcher Sorte diese Bedeutungsrepräsentation ist. Allerdings häufen sich in der psycholinguistischen Forschung mittlerweile experimentelle Befunde, die nahelegen, dass Rezipienten häufig recht oberflächliche Bedeutungsrepräsentationen bilden, die teilweise sogar unvollständig und inkonsistent sind. Das wohl bekannteste Phänomen ist die *Moses-Illusion*. Hierbei stellt man Leuten eine Frage wie in (111). Die allermeisten Teilnehmer antworten ernsthaft mit „zwei", selbst wenn ihnen im Prinzip sehr wohl bewusst ist, dass es Noah war, der die Tiere mit auf die Arche genommen hat (Erickson und Mattson 1981). Auch bei den Sätzen (112) und (113) fällt nur etwa einem Drittel der Leser die enthaltende Anomalie auf. Der Rest antwortet mit „Da, wo die Verwandten sie begraben haben wollen" und „Ja klar, geht das" (Barton und Sanford 1993). Mit der Annahme, dass Rezipienten beim Verstehen detaillierte Bedeutungsrepräsentationen bilden, deren Bestandteile die Bedeutungen der enthaltenen Wörter sind, lassen sich diese Befunde nur schwer vereinbaren.

(111) *Wie viele Tiere jeder Art nahm Moses mit auf die Arche?*

(112) *Die Regierung überlegte, wo die Überlebenden begraben werden sollen.*

(113) *Kann ein Mann die Schwester seiner Witwe heiraten?*

In weiteren Studien konnte gezeigt werden, dass sich Rezipienten bei komplexeren Satzstrukturen bei der Interpretation häufig durch Plausibilitätsüberlegungen leiten lassen. So wird der Satz (114) in der Regel so interpretiert, dass jede Kopfverletzung, sei sie noch so klein, beachtet werden sollte, obwohl der Satz genau das Gegenteil ausdrückt (Wason und Reich 1979), und Passivsätze wie (115), die einen unplausiblen Sachverhalt ausdrücken, werden häufig im Sinne der Plausibilität uminterpretiert (Ferreira 2003).

(114) *No head injury is too trivial to be ignored.*

(115) *The dog was bitten by a man.*

Ferner lässt sich zeigen, dass sprachlich ausgedrückte Sachverhalte nicht immer sehr sorgfältig evaluiert werden. So fallen Weltwissensverletzungen vielen Lesern gar nicht auf, wenn die entsprechenden Informationen – wie in (116) – in untergeordneten Nebensätzen präsentiert werden und dadurch sprachlich im gewissen Sinne als gesichert markiert werden (Baker und Wagner 1987).

(116) *The liver, which is an organ that is found only in humans, is easily damaged by alcohol.*

Besonders eindrucksvoll ist das Ergebnis einer Studie von Christianson et al. (2001). Probanden sahen Holzwegsätze wie (117), bei denen üblicherweise davon ausgegangen wird, dass die NP *the baby* zunächst als direktes Objekt des Verbs *bathed* aufgefasst wird, im Zuge einer Reanalyse dann aber als Subjekt des Verbs *played* eingesetzt wird (s. oben). Stellte man den Probanden später Verständnisfragen zu den Sätzen, so antworteten sie auf eine Frage wie (118) ausnahmslos korrekt mit „Ja". Allerdings hatten sie offenbar Schwierigkeiten mit Fragen wie (119), die sich auf einen Sachverhalt bezogen, der sich im Zuge der Reanalyse als falsch herausgestellt haben sollte. Auch hier antworteten viele mit „Ja", diesmal allerdings fälschlicherweise. Solche falschen Ja-Antworten zeigten sich nur bei Garden-Path-Sätzen, was ausschließt, dass bei den Antworten einfach geraten wurde. Vielmehr scheint dieses Ergebnis nahezulegen, dass die Probanden bei der Reanalyse ihre Bedeutungsrepräsentationen nicht „aufgeräumt" hatten, sondern alle einmal gebildeten Bedeutungsrepräsentationen auch am Ende des Verstehensprozesses noch aktiv sind, selbst wenn sie sich zwischendurch als falsch herausgestellt hatten (Überblick über diese *Shallow-* bzw. *Good-Enough-Processing*-Ansätze vgl. Ferreira et al. 2002; Sanford und Sturt 2002).

(117) *While Mary bathed the baby played in the crib.*

(118) *Did the baby play in the crib?*

(119) *Did Mary bath the baby?*

Was lässt sich aus diesen Befunden schlussfolgern? Schlussfolgern lässt sich sicherlich, dass Rezipienten beim Verstehen sprachlicher Äußerungen nicht in jedem Fall streng datengetrie-

ben nach dem Kompositionalitätsprinzip vorgehen und dabei eine vollständige, detaillierte und akkurate Bedeutungsrepräsentation der rezipierten Sätze bilden, die sie durch Abgleich mit ihrem allgemeinen Weltwissen auf Wahrheit hin überprüfen. Vielmehr scheinen Rezipienten insbesondere bei syntaktisch komplexen Sätzen manchmal Top-down-Prozesse zu rekrutieren, die vornehmlich nach Plausibilitätsgesichtspunkten vorgehen. Aus den Ergebnissen lässt sich andererseits aber sicherlich nicht schlussfolgern, dass der Verstehensprozess immer oberflächlich abläuft und alle Annahmen zur datengetriebenen semantischen Komposition über Bord geworfen werden können. Hierfür sprechen mindestens zwei Gründe:

1. Rezipienten gehen offensichtlich nicht immer rein nach Plausibilität vor, denn Implausibilitäten wie in (115) werden in weniger komplexen syntaktischen Konstruktionen sehr wohl erkannt.
2. Rezipienten sind auch bei komplexen Sätzen durchaus in der Lage, eine detaillierte, vollständige und akkurate Bedeutungsrepräsentation zu bilden, wenn sie dafür genügend Zeit zur Verfügung haben und wenn es die Situation verlangt.

Es muss also davon ausgegangen werden, dass Menschen tatsächlich bestimmtes sprachliches Wissen zur Verfügung haben, das es ihnen erlaubt, die Bedeutung eines komplexen Ausdrucks aus den Bedeutungen seiner Bestandteile und deren syntaktischer Beziehung zu erschließen. Denkbar wäre, dass beim Verstehen verschiedene Arten von Verstehensprozessen nebeneinander ablaufen, sodass je nach Situation und Aufgabe eher der streng datengetriebene Kompositionsprozess oder der oberflächliche plausibilitätsgetriebene Prozess die Oberhand gewinnt.

14.4 Pragmatische Verarbeitung von Sätzen

Konversationelle Implikaturen

In den bisherigen Abschnitten haben wir uns mit der Frage beschäftigt, wie der Rezipient die Bedeutung dessen ermittelt, was in einem Satz direkt ausgesagt wird. Es gibt allerdings eine ganze Reihe von Bedeutungsaspekten, die in Sätzen nicht direkt ausgedrückt, sondern nur als naheliegend angedeutet werden. Diese Aspekte werden auch als *Implikaturen von sprachlichen Äußerungen* bezeichnet. Die Trennung zwischen dem, was wörtlich ausgedrückt wird, und dem, was nur angedeutet (oder implikatiert) wird, geht zurück auf den Sprachphilosophen Grice (1975), der annimmt, dass sich Gesprächspartner kooperativ verhalten und bestimmte Konversationsmaximen befolgen (vgl. 120).

(120) Konversationsmaximen:
- Mache deinen Beitrag so informativ wie nötig! [Maxime der Quantität]
- Sage nichts, wovon du glaubst, dass es falsch ist oder wofür du keine hinreichenden Gründe hast! [Maxime der Qualität]
- Sage nur Relevantes! [Maxime der Relation]
- Vermeide Unklarheit, Mehrdeutigkeit, Weitschweifigkeit und Ungeordnetheit! [Maxime der Modalität]

In (121) würde Person B die Maxime der Relevanz verletzen, wenn ihr bewusst wäre, dass die Tankstelle bereits seit Jahren geschlossen ist. Hat Person B hingegen die Maxime befolgt, so kann Person A schließen, dass die Antwort von B relevant im Hinblick auf die Äußerung von A ist und entsprechend dass sie ihr Auto an der Tankstelle auch auftanken können wird. Genauso lässt sich aus (122) schließen, dass nicht alle der Kinder schlafen (Maxime der Quantität), und aus (123), dass Katharina sich zuerst setzte und dann ihren Freund anrief, nicht umgekehrt (Maxime der Modalität). Die Inhalte dieser Schlussfolgerungen werden in Anlehnung an die Maximen auch als *konversationelle Implikaturen* bezeichnet. Eine wichtige Eigenschaft konversationeller Implikaturen ist deren Annullierbarkeit (vgl. 124), wodurch sich auch gut erkennen lässt, dass diese Information nicht Teil der eigentlichen Satzbedeutung ist, sonst müsste sich nämlich in (124) ein Widerspruch ergeben. Grewendorf et al. (1989) geben einen Überblick über eine neuere pragmatische Theorie, die auf den Grice'schen Konversationsmaximen beruht (vgl. auch Sperber und Wilson 1986).

(121) *A: Mir ist gerade das Benzin ausgegangen.*
B: Gleich um die Ecke ist eine Tankstelle.
(122) *Einige Kinder schlafen schon.*
(123) *Katharina setzte sich und rief ihren Freund an.*
(124) *Roman hat zwei Katzen, wenn nicht sogar drei.*

In der Sprachrezeptionsforschung hat man sich im Bereich konversationeller Implikaturen bislang hauptsächlich mit skalaren Implikaturen beschäftigt, wie sie in (122) und (124) enthalten sind. Dabei zeigen die experimentellen Studien klar, dass Rezipienten die entsprechenden Schlussfolgerungen ziehen. Uneinigkeit herrscht bezüglich der zeitlichen Aspekte bei der Verarbeitung. In einer Visual-World-Studie von Huang und Snedeker (2011) beispielsweise verarbeiteten die Probanden Sätze wie (125), während sie visuelle Szenen betrachteten, in denen verschiedene Kinder unterschiedlich viele Exemplare eines bestimmten Objekts besaßen (◘ Abb. 14.13). Gemessen wurde die Zeit, die verging, bis die Probanden den Blick auf das richtige Kind gelenkt hatten. Bei *all* und *two* geschah dies unmittelbar nachdem die entsprechenden Wörter geäußert wurden, während bei *some* zusätzliche 800 ms vergingen, bevor das richtige Kind fokussiert wurde. Dieses Ergebnis scheint gut zu den Annahmen der Zwei-Stufen-Modelle zu passen (▶ Abschn. 14.3.2), wonach Bedeutungsaspekte, die nicht direkt Teil der Satzbedeutung sind, erst in einem nachgeschalteten Verstehensschritt einbezogen werden. Allerdings gibt es auch experimentelle Studien, die nahelegen, dass skalare Implikaturen unmittelbar beim Verstehen ermittelt werden (z. B. Grodner et al. 2010). Die Frage nach den zeitlichen Aspekten der Verarbeitung gilt entsprechend bislang als ungeklärt.

(125) *Point to the girl who has [some/two/all] of the [ice cream sandwiches/ice cream cones].*

Präsuppositionen

Ein weiterer Bedeutungsaspekt, der nicht direkt Teil der Satzbedeutung ist, betrifft die Voraussetzungen, unter denen Sätze sinnvoll verwendet werden können. Satz (126) kann nur dann sinnvoll verwendet werden, wenn es gegenwärtig genau einen

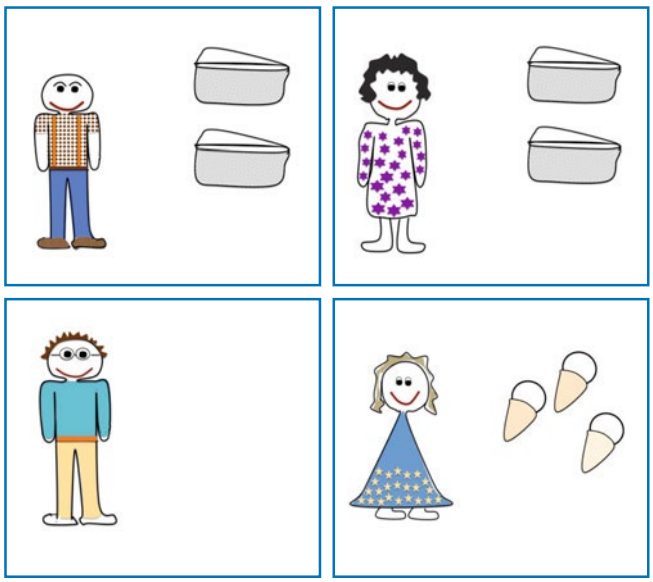


Abb. 14.13 Visuelle Szene aus der Untersuchung von Huang und Snedeker (2011)

König von Frankreich gibt. Man bezeichnet diese vom Sprecher vorausgesetzte Information auch als Präsupposition. Gibt es gegenwärtig keinen König (oder mehrere), so ist die Präsupposition verletzt und die Äußerung pragmatisch abweichend.

(126) *Der gegenwärtige König von Frankreich ist glatzköpfig.* [Russell 1905]

Eine wichtige Eigenschaft von Präsuppositionen ist, dass sie von einer Negation im Satz nicht gelöscht werden. Satz (127) präsupponiert – genau wie sein nichtnegiertes Gegenstück – die Existenz des Königs von Frankreich. Beide Sätze sind pragmatisch abweichend, wenn es keinen König von Frankreich gibt.

(127) *Der gegenwärtige König von Frankreich ist nicht glatzköpfig.*

Zusätzlich zum definiten Artikel gibt es eine ganze Reihe weiterer *Präsuppositionsauslöser*, z. B. faktive Verben wie *wissen, dass* (vgl. 128), Iterativa wie *wieder* (vgl. 129), Verben der Zustandsveränderung wie *aufhören* (vgl. 130) und Spaltsätze (vgl. 131).

(128) *Elisabeth weiß nicht, dass das Fahrrad brennt.* [Präsupposition: Das Fahrrad brennt.]
(129) *Sabine hat heute wieder Salsa getanzt.* [Präsupposition: Sabine hat zuvor schon einmal Salsa getanzt.]
(130) *Sven hat aufgehört zu rauchen.* [Präsupposition: Sven hat geraucht.]
(131) *Es war (nicht) der Bäcker, der den Metzger verklagt hat.* [Präsupposition: Der Metzger wurde verklagt.]

Aus Sicht des Rezipienten erfordern Sätze mit Präsuppositionsauslösern die Schlussfolgerung der präsupponierten Information. Aus (131) kann der Rezipient also schließen, dass der Metzger verklagt wurde, auch wenn der Satz selbst nur sagt, dass es nicht der Bäcker war. Dieser Prozess wird als *Akkommodation* bezeichnet. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass sich Rezipienten über die Präsuppositionen von Sätzen tatsächlich Gedanken machen. So werden Sätze mit Präsuppositionsauslöser deutlich langsamer verarbeitet, wenn sie in Kontexten verwendet werden, in denen ihre Präsuppositionen verletzt sind (Altmann und Steedman 1988; Schwarz 2007). In EEG-Untersuchungen zeigen sich in diesem Fall erhöhte N400-Amplituden (z. B. Burkhardt 2006; van Berkum et al. 2003). Zweifelsfreie Hinweise auf Akkommodationsprozesse konnten bisher jedoch nicht gefunden werden (Tiemann 2014).

Sprechakte

Sprachphilosophen wie Austin (1962) und Searle (1969) haben darauf hingewiesen, dass sprachliche Kommunikation nicht nur der Beschreibung von Sachverhalten dient, sondern dass mit sprachlichen Äußerungen immer auch bestimmte Handlungen vollzogen werden. Diese Handlungen werden auch als **Sprechakte** bezeichnet. Unterschieden werden *Äußerungsakte* (der Sprecher äußert Wörter einer Sprache), *propositionale Akte* (der Sprecher verwendet eine Äußerung mit einer bestimmten Bedeutung), *illokutionäre Akte* (der Sprecher vollzieht mit dem propositionalen Akt eine bestimmte Sprechhandlung, wie etwa Versprechen, Befehlen oder Behaupten) und *perlokutive Akte* (aus der Sprechhandlung ergeben sich Konsequenzen, etwa dass der Rezipient beleidigt ist). In der Sprachpsychologie haben insbesondere **indirekte Sprechakte** Beachtung gefunden, bei denen der illokutionäre Akt nicht explizit ausgedrückt wird (vgl. 132 vs. 133).

(132) *Es zieht.*
(133) *Mach bitte die Tür zu.*

In einer Untersuchung von Shapiro und Murphy (1993) sahen Leser Sätze wie (134) bis (137) und beurteilten, ob sie eine plausible direkte Bedeutung haben. Verzögerte Antworten ergaben sich in den Bedingungen mit plausiblen indirekten Lesarten. Die indirekten Lesarten können also offensichtlich bei der Verarbeitung nicht ignoriert werden, was nahelegt, dass sie nicht erst in einem nachgeschalteten Verarbeitungsprozess ins Bewusstsein treten. Ferner zeigten sich in einer Nachfolgestudie, in der die Probanden auf die Fragen angemessen reagieren sollten, vergleichbare Reaktionszeiten in Bedingungen mit einer oder zwei plausiblen Lesearten, und zwar unabhängig davon, ob es sich bei der einen um die direkte oder die indirekte Lesart handelte. Auch dieses Ergebnis spricht eher für ein paralleles Verarbeitungsmodell und passt demnach gut zu den Ergebnissen von Untersuchungen zur Verarbeitung figurativer Sprache (▶ Abschn. 14.3.2).

(134) *Hörst du zu?* [+ direkt; + indirekt]
(135) *Hast du Kinder?* [+ direkt; – indirekt]
(136) *Kannst du mir das Salz reichen?* [– direkt; + indirekt]
(137) *Kichert dein Sofa?* [– direkt; – indirekt]

Allerdings soll nicht unerwähnt bleiben, dass in einer Studie von Clark (1979) Ladenbesitzer auf die Frage (138) häufig mit einer Antwort wie in (139) reagierten, also zunächst auf den direkten illokutionären Akt antworteten (*Ja*) und dann auf den indirekten illokutionären Akt (*um 18 Uhr*). Dies könnte man eventuell als

Hinweis für eine zweistufige Verarbeitung interpretieren. Eine ähnliche Antwort findet sich aber auch auf eine Frage wie in (140), sodass etwas unklar ist, inwieweit sich das Ja als Antwort auf den direkten illokutionären Akt werten lässt (ausführliche Diskussion in Gibbs 1994).

(138) *Können Sie mir sagen, wann Sie heute schließen?*
(139) *Ja, um 18 Uhr!*
(140) *Würde es Ihnen etwas ausmachen, mir zu sagen, wann Sie heute schließen?*

14.5 Textverstehen

In ▶ Abschn. 14.2, 14.3 und 14.4 haben wir uns mit den Prozessen beschäftigt, die dem Verstehen einzelner Sätze zugrunde liegen. Im Alltag werden Sätze jedoch in den seltensten Fällen isoliert geäußert. In der Regel stehen Sätze im Kontext von anderen Sätzen, mit denen sie gemeinsam einen Text oder einen Dialog bilden. Texte und Dialoge haben eine gewisse Struktur, und das Verstehen von Texten und Dialogen setzt voraus, dass diese Struktur erfasst wird. In diesem Abschnitt werden wir uns zunächst mit strukturellen Aspekten von Texten befassen und dann mit der Frage, wie die Verarbeitung vonstattengeht. Die Sprachverstehensforschung hat sich vornehmlich mit Texten, weniger mit Dialogen befasst. Dialoge wurden insbesondere von Clark (Clark 1996) untersucht und sind in den letzten Jahren auch über seine Forschung hinaus stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt (z. B. Pickering und Garrod 2004). Wir werden uns im Folgenden jedoch auf die Forschung zu Texten konzentrieren.

14.5.1 Struktur von Texten

▪ Textsorten und Story Grammars

Aus einer sehr globalen Perspektive lassen sich zunächst unterschiedliche Sorten von Texten unterscheiden. Wir gehen hier auf drei Textsorten ein:

1. *Narrative Texte* beschreiben in der Regel eine Abfolge von Ereignissen und sind um einen oder mehrere Protagonisten herum organisiert. Sie sind häufig fiktiv, können aber auch wahre Begebenheiten beschreiben. Wichtig sind in der Regel die kausalen Beziehungen zwischen den geschilderten Ereignissen. Romane beispielsweise werden zu den narrativen Texten gezählt.
2. *Expositorische Texte* hingegen dienen der Erklärung komplexer Sachverhalte, oder sie haben zum Ziel, den Leser von einer bestimmten Auffassung zu überzeugen. Beispiele für expositorische Texte sind Lehrbücher, Zeitungsartikel und wissenschaftliche Manuskripte.
3. *Prozedurale Texte* schließlich konzentrieren sich auf die Erklärung konkreter Handlungsabfolgen. Beispiele für prozedurale Texte sind Anleitungen zu bestimmten Computerprogrammen oder das Bedienungshandbuch für ein Smartphone.

Tatsächlich gibt es in der Forschung Hinweise darauf, dass diese unterschiedlichen Arten von Texten unterschiedlich verarbeitet werden. Davon ist allerdings weniger die Tiefe der Verarbeitung betroffen als die Strategien des Verstehens sowie die Art der mentalen Repräsentation, die bei der Verarbeitung gebildet wird (Überblick in Zwaan und Rapp 2006). Der überwiegende Anteil der Textverstehensforschung betrifft narrative Texte.

Texte sind häufig hierarchisch aufgebaut. Ihre Struktur folgt – ähnlich wie die Struktur von Sätzen – bestimmten Regeln, wobei diese für die jeweiligen Textsorten unterschiedlich sind. So besteht ein wissenschaftliches Manuskript in der Experimentellen Psychologie in der Regel aus einer Zusammenfassung, einer Einleitung, einem Methodenabschnitt, einem Ergebnisteil und einer Diskussion. Narrative Texte hingegen sind anders aufgebaut. Das zugrunde liegende Regelsystem wird bei narrativen Texten häufig auch als *Story Grammar* bezeichnet (■ Abb. 14.14). Die meisten Autoren gehen davon aus, dass beim Verstehen eines Textes dessen Struktur rekonstruiert wird und dass diese Struktur dann auch beeinflusst, welche Informationen für wichtig erachtet werden und welche nicht. Tatsächlich werden Sätze, die sich relativ weit oben in der hierarchischen Struktur eines Textes befinden, aufmerksamer gelesen und später besser erinnert (z. B. Cirilo und Foss 1980). Texte, deren natürliche Struktur verändert wird, sind schwerer zu verstehen als solche, deren Struktur erhalten geblieben ist (Thorndyke 1977).

Story → Setting + Episode
Setting → (State)*
Episode → Event + Reaction
Event → Episode | Change of State |Action | Event + Event
Reaction → Internal Response + Overt Response
Internal Response → Emotion | Desire

■ **Abb. 14.14** Beispiel für eine Story Grammar nach Rumelhart (1975). Das Sternchen (*) gibt an, dass ein Element wiederholt werden kann; senkrechte Striche (|) bezeichnen Alternativen

▪ Kohärenz und Kohäsion

Eine wichtige Eigenschaft von Texten ist deren **Kohärenz**. Eine Ansammlung von Sätzen ergibt nur dann einen Text, wenn die Sätze in einer inhaltlichen Beziehung zueinander stehen – wenn sie kohärent sind. Man unterscheidet zwischen globaler und lokaler Kohärenz. *Globale Kohärenz* ist gegeben, wenn die Sätze im Text sich auf ein gemeinsames Thema beziehen, sich nicht widersprechen und im Ganzen einen Sinn ergeben. *Lokale Kohärenz* ist gegeben, wenn ein Satz mit dem vorherigen Satz in einer kohärenten Beziehung steht. So ist das Satzpaar in (141) kohärent, das in (142) hingegen inkohärent.

(141) *Eduard will Geli heiraten. Er kauft beim Juwelier einen schönen Ring.*
(142) *Eduard will Geli heiraten. Im Nil gibt es viele Krokodile.*

Ein Text kann global kohärent sein und dennoch lokale Inkohärenzen enthalten. So sind die beiden unterstrichenen Sätze in (143) lokal inkohärent; eine Beziehung lässt sich nur unter Rückgriff auf den größeren Kontext erkennen, in dem sie vorkommen. Die Sätze in (144) hingegen stehen in lokal kohärenter Beziehung zueinander, aber der Text ist dennoch global inkohä-

rent, da der letzte Satz mit dem Inhalt am Anfang des Textes im Widerspruch steht.

(143) *Diane wanted to lose some weight. She thought she should lose at least 20 pounds. She thought cycling might help her lose some weight. She went to the garage to find her bike. The bike was broken and she couldn't afford a new one. So she went to the grocery store to buy grapefruit and yogurt. It took several years, but Diane finally reached her goal.* [Nach McKoon und Ratcliff 1992]

(144) *Today, Mary was meeting a friend for lunch. She arrived early at the restaurant and decided to get a table. After she sat down, she started looking at the menu. This was her favorite restaurant because it had fantastic health food. Mary, a health nut, has been a strict vegetarian for 10 years. After about ten minutes, Mary's friend arrived. It had been a few months since they had seen each other. Because of this they had a lot to talk about and chatted for over a half hour. Finally, Mary signaled the waiter to come take their orders. Mary checked the menu one more time. She had a hard time deciding what to have for lunch. Mary ordered a cheeseburger and fries.* [Nach Albrecht und O'Brien 1993]

Es gibt bestimmte sprachliche Hinweisreize, die Kohärenz anzeigen. So zeigt die Verwendung eines Pronomens wie *she* an, dass zwei Sätze auf dieselbe Person Bezug nehmen (*Diane wanted … She thought …*), und Konnektiva wie *because* oder *afterwards* signalisieren, dass die in zwei Sätzen beschriebenen Ereignisse auf eine bestimmte Art miteinander verknüpft sind (z. B. kausal oder temporal). Sind Sätze auf diese Weise formal verknüpft, so liegt **Kohäsion** vor. Die sprachlichen Hinweisreize werden entsprechend auch als Kohäsionsmittel bezeichnet. Allerdings wird schnell deutlich, dass Kohäsion keine hinreichende Bedingung für Kohärenz ist. In (143) zeigt das *so* am Anfang des vorletzten Satzes kausale Kohärenz an. Kann diese jedoch vom Leser nicht nachvollzogen werden (z. B. weil die Sätze nicht im passenden Kontext präsentiert werden), so sind die beiden Sätze dennoch für den Leser nicht kohärent.

Bei einem kohärenten Text ist die Textstruktur also durch einen hohen Grad an Vernetztheit charakterisiert, da sich die einzelnen Textaussagen auf dieselben Objekte, Zustände und Ereignisse beziehen. Manchmal kann es aber auch bei kohärenten Texten vorkommen, dass die expliziten Textaussagen isoliert nebeneinander stehen. In diesem Fall ist in der Regel davon auszugehen, dass die Information, die zur Überbrückung benötigt wird, vom Autor des Textes implizit vorausgesetzt wurde. Der Rezipient muss die entsprechende Information beim Verstehen also erschließen. In (145) zeigt die Verwendung der definiten NP im zweiten Satz (*Das Bier*) referenzielle Kohärenz an, die aber nicht unmittelbar offensichtlich wird, da im Satz zuvor kein Bier erwähnt wurde. Wird allerdings erschlossen, dass Bier in den Picknicksachen enthalten war, so ergibt sich eine vernetzte Textstruktur, bei der die geschlussfolgerte Aussage das Bindeglied bildet. Solche Schlussfolgerungen werden entsprechend auch als *Brückeninferenzen* bezeichnet (Clark 1975). Sie betreffen häufig Informationen, von denen der Autor annehmen kann, dass sie dem Rezipienten bekannt sind – oder in anderen Worten, es handelt sich häufig um Informationen aus dem *Common Ground* der beteiligten Personen (Clark und Brennan 1991; Clark und Schaefer 1989).

(145) *Klaus nahm die Picknicksachen aus dem Kofferraum. Das Bier war warm.* [Haviland und Clark 1974]

Given-New-Prinzip

In Texten wird neue Information in der Regel nicht ohne Bezug zu bereits bekannter Information eingeführt. Dabei geht das Bekannte typischerweise dem Neuen voraus. Diese auch als Given-New-Prinzip bezeichnete Gesetzmäßigkeit unterstreicht die Annahme, dass die Bezüge zwischen den einzelnen Sätzen in Texten von besonderer Relevanz sind. Wird nämlich immer zuerst die bekannte und dann die neue Information genannt, lässt sich die neue Information leichter in die bereits gebildete Repräsentation integrieren, als wenn die Anknüpfungspunkte erst später explizit gemacht werden (vgl. 146 vs. 147; zu Evidenz vgl. Hörnig et al. 2005; Yekovich et al. 1979). Einige Autoren argumentieren, dass es sich bei dem Given-New-Prinzip um eine Art impliziter Abmachung zwischen Autor und Rezipient handelt, ähnlich zu den in ▶ Abschn. 14.4 diskutierten Konversationsmaximen (Clark und Haviland 1977).

(146) *To the left of the tree is the house. To the right of the tree is the pond.* [Given-New-Prinzip befolgt]

(147) *To the right of the house is the tree. To the left of the pond is the tree.* [Given-New-Prinzip verletzt]

Mikro- und Makrostruktur von Texten

Die vernetzte Textstruktur, die sich ergibt, wenn die einzelnen Textaussagen zueinander in Beziehung gesetzt werden, wird auch als *Mikrostruktur* des Textes oder als Textbasis bezeichnet (van Dijk und Kintsch 1983). In der Mikrostruktur sind sowohl die expliziten Textaussagen enthalten als auch die geschlussfolgerten Aussagen. Umstritten ist, in welchem Ausmaß die Mikrostruktur durch geschlussfolgerte Information angereichert ist. Manche Autoren gehen davon aus, dass hauptsächlich die für die Kohärenz notwendigen Brückeninferenzen enthalten sind, andere hingegen postulieren wesentlich elaboriertere Mikrostrukturen (▶ Abschn. 14.5.2). Aus der Mikrostruktur eines Textes lässt sich durch Generalisierung und Abstraktion die *Makrostruktur* eines Textes erschließen, die die globale Struktur des Textes abbildet und grob gesprochen einer guten Zusammenfassung des Textes entspricht.

In Anlehnung an die Forschung zur Repräsentation der Satzbedeutung (▶ Abschn. 14.3.1) wird in der Textverstehensforschung üblicherweise angenommen, dass die Mikro- und die Makrostruktur eines Textes in einem propositionalen Format abgespeichert sind. Die Elemente dieser Repräsentationen sind die Propositionen, die den einzelnen Sätzen des Textes zugrunde liegen, und diese Propositionen sind über das Prinzip der Argumentüberlappung miteinander verbunden. Ein kohärenter Text geht also mit einer vernetzten propositionalen Repräsentation einher, weil die Propositionen hierarchisch strukturiert sind und sich gegenseitig als Argument enthalten oder die Propositionen sich auf dieselben Entitäten beziehen und

insofern überlappende Argumente aufweisen (Abb. 14.15). Die propositionale Repräsentation der Mikrostruktur eines Textes wird im Folgenden entsprechend auch als *Textpropositionsrepräsentation* bezeichnet.

Koreferenzielle Bezüge

Es wurde mehrfach betont, dass sich die einzelnen Sätze in kohärenten Texten häufig auf dieselben Entitäten beziehen. Die Sätze enthalten also **Koreferenzen**. Um eine kohärente Repräsentation der Textbedeutung aufbauen zu können, müssen diese Koreferenzen erkannt werden. Koreferenzen können anaphorisch sein. In diesem Fall verweist ein sprachlicher Ausdruck (das anaphorische Element) auf einen anderen sprachlichen Ausdruck (das **Antezedens**) und das Ergebnis ist die Koreferenz der beiden Ausdrücke. In (148) verweist das Pronomen *es* auf die NP *ein neues Fahrrad*. Die beiden Ausdrücke sind koreferent, weil sie auf dieselbe Entität Bezug nehmen (angezeigt durch die gleichen Indizes). Die Koreferenz kann allerdings nur erkannt werden, wenn der anaphorische Verweis korrekt aufgelöst wurde.

(148) *Sibylla hat sich ein neues Fahrrad$_1$ gekauft. Es$_1$ steht vor dem Haus.*

Koreferenzen können auch nichtanaphorisch sein. Dies ist häufig dann der Fall, wenn wiederholt mit demselben Eigennamen auf eine Entität Bezug genommen wird. In (149) sind die beiden Verwendungen des Eigennamens *Fritz* koreferent, aber die korrekte Interpretation der Referenz hängt in den beiden Fällen nicht voneinander ab.

(149) *Fritz und Eduard laufen zur Mensa. Fritz isst dort einen Salat und Eduard Spaghetti.*

Eine Schwierigkeit besteht darin, dass in Texten (nicht nur bei pronominalen anaphorischen Bezügen) häufig unterschiedliche sprachliche Ausdrücke verwendet werden, um auf die gleichen Entitäten Bezug zu nehmen (vgl. 150), und zuweilen auch gleiche sprachliche Ausdrücke, um auf unterschiedliche Entitäten zu referieren (vgl. 151). Bei der Erstellung der propositionalen Mikrostruktur muss also sehr genau darauf geachtet werden, welche sprachlichen Ausdrücke tatsächlich koreferent sind und welche nicht; die Ähnlichkeit des verwendeten sprachlichen Ausdrucks kann kein Kriterium für die Argumentüberlappung von Propositionen sein.

(150) *Maria traf am Samstag ihren Nachbarn$_1$ in der Stadt. Der Glückspilz$_1$ hatte 5000 Euro im Lotto gewonnen.*
(151) *Roland fuhr sein Auto$_1$ am Montag zu Schrott. Am Dienstag kaufte er sich ein neues. Sein Auto$_2$ ist jetzt sein ganzer Stolz.*

Hinsichtlich der Frage, welche anaphorischen Ausdrücke in welchen Situationen verwendet werden, gibt es bestimmte Regelmäßigkeiten. So ist in (143) die häufige Verwendung des Pronomens *she* nicht allein auf Effizienzüberlegungen zurückzuführen. Vielmehr wird in der sprachpsychologischen Literatur angenommen,

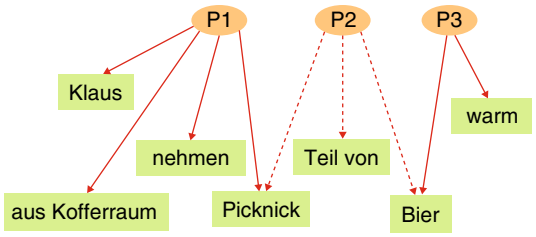


Abb. 14.15 Integrierte propositionale Repräsentation zu Text (145). Die Brückeninferenz, die zur Herstellung lokaler Kohärenz benötigt wurde, ist durch gestrichelte Linien gekennzeichnet

dass Pronomen immer dann verwendet werden, wenn sich die Entität, auf die Bezug genommen werden soll, im *expliziten Fokus* (Sanford und Garrod 1998) befindet. Im expliziten Fokus befinden sich die im Text explizit genannten Entitäten, die zentral mit dem derzeitigen Diskursthema verbunden und deshalb besonders gut verfügbar sind. In narrativen Texten sind dies häufig die Hauptcharaktere. Im *impliziten Fokus* eines Textes hingegen befinden sich Entitäten, deren Erwähnung schon länger zurückliegt bzw. die nur über das allgemeine Hintergrundwissen des Rezipienten mit dem Diskursthema verbunden sind. Bei narrativen Texten sind dies häufig Nebenfiguren und Entitäten, deren Existenz beispielsweise über Brückeninferenzen erschlossen wurde. So kann auf das Bier in (145) nicht mit einem Pronomen Bezug genommen werden, es muss eine nichtpronominale definite NP verwendet werden. Tatsächlich führen Verstöße gegen dieses Prinzip zu Verständnisschwierigkeiten. Würde in (143) statt des Pronomens immer der Eigenname *Diana* wiederholt werden, so würde das merkwürdig klingen, und der Text ließe sich schlechter lesen (*repeated-name penalty*; Gordon et al. 1993). Eine ausgearbeitete Theorie zur Bestimmung des Bezugs von anaphorischen Ausdrücken bietet die *Centering-Theorie* (Grosz und Sidner 1986; Grosz et al. 1995), die zur Klärung dieser Frage allerdings auf die rhetorischen Relationen zwischen Sätzen (s. unten) Bezug nimmt.

Zusätzlich zu den Regelmäßigkeiten hinsichtlich der Frage, welche Art von anaphorischem Ausdruck in welcher Situation verwendet wird, gibt es auch Regelmäßigkeiten hinsichtlich der Frage, welche sprachlichen Ausdrücke in einem Text überhaupt koreferenziell sein können. In (152) kann mittels eines Pronomens auf die Katze Bezug genommen werden. In (153) hingegen ist diese Möglichkeit ausgeschlossen. Dies hat nur zum Teil damit zu tun, dass in der in (153) beschriebenen Situation keine Katze existiert. In (154) existiert ebenfalls keine Katze, aber der pronominale Bezug ist dennoch möglich. Dies liegt vermutlich daran, dass der anaphorische Bezug innerhalb der Beschreibung der kontrafaktischen Situation vorgenommen wird. In (155) nämlich ist der anaphorische Bezug wieder blockiert (durch die Verwendung von *ist* statt *wäre*).

(152) *Klaus besitzt eine Katze$_1$. Sie$_1$ ist schwarz-weiß getigert.*
(153) *Es stimmt nicht, dass Klaus eine Katze$_1$ besitzt. *Sie$_1$ ist schwarz-weiß getigert.*
(154) *Wenn Klaus eine Katze$_1$ besäße, dann wäre sie$_1$ schwarz-weiß getigert.*
(155) *Wenn Klaus eine Katze$_1$ hätte, dann wäre er glücklich. *Sie$_1$ ist schwarz-weiß getigert.*

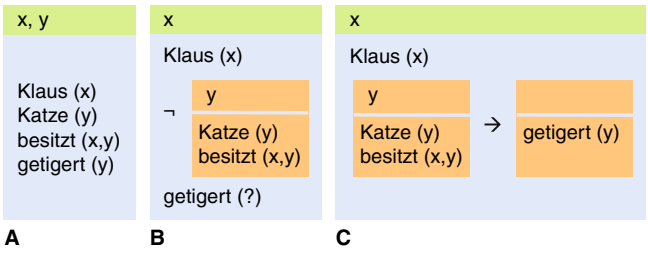


Abb. 14.16 Zugänglichkeit von Diskursreferenten in unterschiedlichen sprachlichen Konstruktionen. DRS **A** Text (152); DRS **B** Text (153); DRS **C** Text (154)

Beispiele wie diese haben dazu geführt, dass viele Autoren heutzutage davon ausgehen, dass strukturelle Eigenschaften von Texten nur adäquat beschrieben werden können, wenn man eine Repräsentation zur Verfügung hat, in der es mentale Stellvertreter für die Entitäten gibt, auf die im Text Bezug genommen wird. Zusätzlich wird angenommen, dass es einem die Repräsentation erlauben muss, zwischen solchen Entitäten zu unterscheiden, die in der Diskurswelt generell vorhanden sind, und solchen, über die zwar gesprochen wird, die aber nur hypothetisch oder vorrübergehend postuliert werden. Diese Repräsentationen werden im Folgenden besprochen.

Diskursentitäten/Diskursmodelle

In allen modernen Textrepräsentationstheorien wird eine Repräsentationsebene postuliert, deren Elemente mentale Stellvertreter sind, die für die Entitäten stehen, auf die der Text Bezug nimmt. In der Literatur werden unterschiedliche Begriffe für diese Repräsentationen verwendet. In der Sprachpsychologie hat sich der Begriff des *Situationsmodells* eingebürgert, in der Linguistik wird häufig von *Diskursmodell* oder Diskursrepräsentation gesprochen. Auch für die Stellvertreter werden unterschiedliche Begriffe verwendet, z. B. *file cards* (Heim 1982), *discourse referents* (Kamp und Reyle 1993), *mental tokens* (Johnson-Laird 1983), *reference objects* (Habel 1986). Wir werden im Folgenden häufig von Diskurs- und Situationsmodell sprechen (je nachdem, ob wir uns auf die psychologische oder linguistische Forschung beziehen) und uns ansonsten bei der Begrifflichkeit und Notation an die Diskursrepräsentationstheorie von Kamp und Reyle (1993) halten. Die wesentlichen Annahmen, die bezüglich koreferenzieller Bezüge gemacht werden, illustrieren wir anhand der Sätze (152) bis (155).

Ein Diskursmodell besteht aus einer Diskursrepräsentationsstruktur (DRS), in die gegebenenfalls andere Diskursrepräsentationsstrukturen eingebettet sind. Zu Beginn eines Textes enthält das Diskursmodell eine leere Haupt-DRS bzw. eine Haupt-DRS, die mit der relevanten Kontextinformation gefüllt ist. Nach und nach werden dann die Textinformationen in diese DRS integriert.

Der Text in (152) führt im ersten Satz – so die Annahme – zwei Diskursreferenten ein, nämlich Klaus und eine Katze. Diese werden als Diskursreferenten in der Haupt-DRS repräsentiert. Die zusätzlichen Informationen, die der Satz über die Diskursreferenten zur Verfügung stellt, werden im Bedingungsteil der DRS eingetragen (Abb. 14.16A). Im zweiten Satz wird auf eine dieser Diskursreferenten mittels einer pronominalen **Anapher** Bezug genommen. Nachdem der anaphorische Bezug erfolgreich aufgelöst wurde, kann die neue Information, die der Satz über den Diskursreferenten vermittelt, in den Bedingungsteil der DRS mit aufgenommen werden. Das Ergebnis ist eine integrierte Repräsentation des Textes.

In (153) wird ausgedrückt, dass ein bestimmter Sachverhalt (nämlich dass Klaus eine Katze hat) nicht gilt. Dieser Sachverhalt wird in einer Sub-DRS repräsentiert, die negiert ist. Die indefinite NP *eine Katze* führt auch in diesem Fall einen Diskursreferenten ein, aber dieser ist in der Sub-DRS eingeschlossen und steht für anaphorische Bezüge außerhalb der Sub-DRS nicht zur Verfügung. Dadurch kann der Intuition Rechnung getragen werden, dass der Diskursreferent in diesem Fall nicht für eine Entität in der globalen Diskurswelt steht und entsprechend auch außerhalb der Sub-DRS nicht anaphorisch aufgegriffen werden kann. In (154) schließlich wird ein hypothetischer Sachverhalt beschrieben, der durch zwei eingebettete Sub-DRS repräsentiert wird, die für den Wenn- und den Dann-Teil des Konditionals stehen. Ein Diskursreferent, der in der Sub-DRS für den Wenn-Teil repräsentiert ist, steht innerhalb der Repräsentation des hypothetischen Sachverhalts für die anaphorische Bezugnahme zur Verfügung (also innerhalb der beiden Sub-DRS). Außerhalb des hypothetischen Sachverhalts ist ein anaphorischer Bezug blockiert.

Diskursrepräsentationsstrukturen erlauben also eine Unterscheidung zwischen Diskursreferenten, die generell zugänglich sind, und solchen, die nur unter bestimmten Bedingungen zugänglich sind, und bilden damit die Einschränkungen hinsichtlich möglicher koreferenzieller Bezüge in den Beispielen (152) bis (155) korrekt ab. Natürlich folgt aus den Annahmen zur Zugänglichkeit nicht, dass alle zugänglichen Diskursreferenten gleich gut verfügbar sind. In der sprachpsychologischen Forschung zu Situationsmodellen wurden die Faktoren, die die Verfügbarkeit von Diskursreferenten jenseits der reinen Zugänglichkeit beeinflussen, explizit untersucht (Überblick in Garrod und Sanford 1994; Gernsbacher 1997).

In der obigen Darstellung wurde wesentlich auf eine bestimmte Eigenschaft von Diskursmodellen rekurriert, nämlich dass sie als Elemente mentale Stellvertreter für die Diskursentitäten enthalten. In der sprachpsychologischen Literatur zu Situationsmodellen wird häufig auch betont, dass Situationsmodelle in Abgrenzung zu Repräsentationen der Textpropositionen keine Repräsentationen des Textes an sich sind, sondern Repräsentationen der im Text geschilderten Sachverhalte. Ihre Struktur orientiert sich nicht an der Struktur des Textes, sondern an der Struktur der beschriebenen Sachverhalte – einem Situationsmodell ist am Ende eines Textes nicht mehr unbedingt anzusehen, wie die entsprechende Information sprachlich vermittelt wurde (Bransford et al. 1972). Zusätzlich wird häufig angenommen, dass Situationsmodelle reichhaltig mit Information aus dem allgemeinen Weltwissen des Rezipienten angereichert werden. Die letzten beiden Annahmen spielen insbesondere auch in der Theorie von Johnson-Laird (1983) eine wesentliche Rolle. Hier werden Situationsmodelle auch häufig als *mentale Modelle* bezeichnet (▶ Abschn. 14.5.2).

Rhetorische Relationen

Einige Autoren argumentieren, dass die Struktur von Texten mit den beiden bisher beschriebenen Repräsentationsformen allein

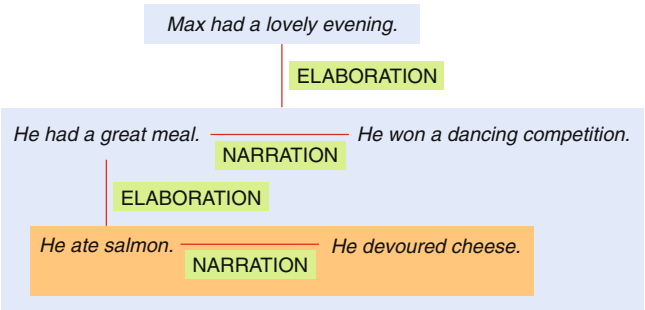


Abb. 14.17 Rhetorische Struktur von Text (158) nach Asher und Lascarides (2003)

nicht hinreichend abgebildet werden kann. Dieser Auffassung zufolge reichen also Diskursmodelle und Repräsentationen, in denen die Textpropositionen über das Prinzip der Argumentüberlappung vernetzt sind, allein nicht aus, um Kohärenz- und Koreferenzphänomene befriedigend beschreiben zu können. Zur Illustration betrachten wir die Satzpaare in (156) und (157).

(156) *Max fell. John helped him up.*
(157) *Max fell. John pushed him.*

Obwohl sich die beiden Satzpaare strukturell sehr ähnlich sind und beide kohärente Texte darstellen, werden sie doch recht unterschiedlich interpretiert. In (156) wird angenommen, dass das im zweiten Satz beschriebene Ereignis eine Folge des im ersten Satz beschriebenen Ereignisses ist. In (157) hingegen ist die zeitliche Reihenfolge umgekehrt. Hier liefert der zweite Satz eine Erklärung für das im ersten Satz beschriebene Ereignis. Dieser Unterschied lässt sich fassen, wenn die rhetorischen Relationen zwischen den Sätzen in Betracht gezogen werden. Nach Asher und Lascarides (2003) muss zwischen *koordinierenden Relationen* und *subordinierenden Relationen* unterschieden werden. Die Relation in (156) wird als *Narration* bezeichnet. Sie stellt eine koordinierende Relation dar, die die narrative Zeit vorwärts rückt. Die Relation in (157) hingegen wird als *Explanation* bezeichnet. Sie ist eine subordinierende Relation. Hier wird das Vorrücken der narrativen Zeit unterbrochen; das Geschehen wird nicht in der Zeit vorangetrieben.

Durch die Unterscheidung zwischen koordinierenden und subordinierenden rhetorischen Relationen lässt sich auch die Intuition abbilden, dass der Text in (158) hierarchisch strukturiert ist. Die hierarchische Struktur kommt dadurch zustande, dass die geschilderten Ereignisse teilweise durch Narration (koordinierend) und teilweise durch *Elaboration* (subordinierend) miteinander verbunden sind (Abb. 14.17).

(158) *Max had a lovely evening last night.*
He had a great meal.
He ate salmon.
He devoured lots of cheese.
He then won a dancing competition.

Es lässt sich also argumentieren, dass die Bedeutung eines Textes nur dann adäquat repräsentiert ist, wenn die genauen rhetorischen Relationen zwischen den einzelnen Aussagen herausgearbeitet sind und ihre potenziell hierarchische Struktur erfasst ist. Für die Kohärenz eines Textes ist es demnach nicht ausreichend, dass die einzelnen Textaussagen implizit zueinander in Beziehung stehen, weil sie überlappende Argumente aufweisen (Abb. 14.15). Vielmehr müssen die Sätze auch über bestimmte rhetorische Relationen verbunden sein. Eine Möglichkeit dieser Auffassung gerecht zu werden, bestünde darin, die Textpropositionsrepräsentation explizit um diese Relationen zwischen Propositionen zu erweitern (Abb. 14.18).

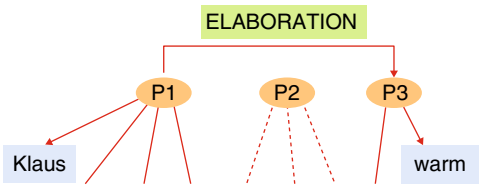


Abb. 14.18 Explizite Repräsentation rhetorischer Relationen in der Repräsentation der Textpropositionen

Die Überlegungen zu rhetorischen Relationen sind insbesondere deshalb für die Forschung zur Struktur von Texten so relevant, da es gewisse Einschränkungen hinsichtlich möglicher rhetorischer Textstrukturen bei kohärenten Texten gibt, die sich mithilfe einer adäquaten Theorie zur rhetorischen Struktur erklären lassen. So wird angenommen, dass neu eintreffende Information jeweils nur an der rechten Grenze der rhetorischen Struktur angebunden werden kann (*Right Frontier Constraint*; Asher 1993). Für Text (158) bedeutet dies, dass neu eintreffende Information nur entweder an die Information des ersten oder die des letzten Satzes angebunden werden kann, weil sich nur diese an der rechten Grenze der Struktur befinden (Abb. 14.17). Dies erklärt, warum eine Fortführung wie in (159) merkwürdig erscheint. Die einzige Möglichkeit, diese Fortführung zu interpretieren, besteht in der Annahme, dass das Dessert nach dem Tanzwettbewerb eingenommen wurde.

(159) *Then he had a great dessert.*

Der Right-Frontier-Constraint erklärt auch, warum Text (160) kohärent ist, Text (161) aber nicht. In (160) sind die ersten beiden Sätze über die Relation Elaboration verbunden. Der erste Satz steht deshalb als Anknüpfungspunkt für den dritten Satz zur Verfügung, der mit dem ersten Satz über die Relation Explanation verknüpft werden muss. In (161) hingegen sind die ersten beiden Sätze über die Relation Narration verbunden, wodurch eine Anknüpfung des dritten Satzes an den ersten Satz blockiert wird.

(160) *John bought a new Toyota.*
He got it from a garage in Washington.
He wanted to try a hybrid engine.
(161) *John bought a new Toyota.*
Then he bought an apartment.
He wanted to try a hybrid engine.

Aus dem Right-Frontier-Constraint lassen sich natürlich auch konkretere Vorhersagen dazu ableiten, welche der prinzipiell zugänglichen Diskursreferenten an einer bestimmten Stelle in einem Text für anaphorische Bezüge tatsächlich zur Verfügung

stehen. Kann neu eintreffende Information nämlich nur an bestimmten Stellen in der Struktur angebunden werden, so gilt dasselbe natürlich auch für die gegebenenfalls darin enthaltenen anaphorischen Ausdrücke. So lässt sich erklären, warum am Ende von (158) nicht mit dem Satz (162) auf den zuvor erwähnten Lachs zurückgegriffen werden kann.

(162) *It was a beautiful pink.*

Tatsächlich ist dies ein weiterer Grund, warum Überlegungen zur rhetorischen Struktur von Texten als höchst relevant für die Textverstehensforschung angesehen werden können. So mag es auch wenig überraschen, dass die bereits oben erwähnte Centering-Theorie (Grosz und Sidner 1986; Grosz et al. 1995), deren Gegenstandsbereich die Bestimmung des Bezugs von anaphorischen Ausdrücken ist, ebenfalls auf rhetorische Relationen und den Right-Frontier-Constraint Bezug nimmt. Neben der Segmented-Discourse-Repräsentationstheorie (SDRT) von Asher und Lascarides (2003) spielt auch die Rhetorische Strukturtheorie (RST) von William und Thompson (1988) in der Literatur zu rhetorischen Relationen eine bedeutende Rolle.

14.5.2 Erfassen der Textbedeutung

Aus den Überlegungen zur Struktur von Texten lässt sich ableiten, dass beim Textverstehen zusätzlich zu einer Oberflächenrepräsentation des Textes, in der zumindest vorübergehend der genaue Wortlaut und die syntaktische Struktur der Sätze enthalten sind, vermutlich zwei Arten von Bedeutungsrepräsentationen eine Rolle spielen. Dies sind zum einen die Repräsentation der Textpropositionen und zum anderen das Diskursmodell. Im Idealfall enthält die Repräsentation der Textpropositionen Propositionen, die untereinander stark vernetzt sind, weil sie auf dieselben Entitäten in der Diskurswelt verweisen und weil sie durch rhetorische Relationen in Beziehung zueinander stehen. Das Diskursmodell hingegen abstrahiert in gewissem Sinne von der Textstruktur und stellt eine integrierte Repräsentation der im Text geschilderten Sachverhalte bereit. Wie in den vorhergehenden Abschnitten deutlich geworden ist, sind für den Aufbau dieser beiden Repräsentationen sowohl Anaphernresolutions- als auch Inferenzprozesse von entscheidender Bedeutung. Allerdings scheint der Erfolg des Verstehensprozesses auch wesentlich dadurch beeinflusst zu sein, ob die gebildeten Repräsentationen in dem allgemeinen Weltwissen des Rezipienten verankert werden können. Im Folgenden werden wir uns zunächst dieser Frage zuwenden, bevor wir die Teilprozesse des Textverstehens genauer besprechen und uns einen Überblick über die wichtigsten Modelle des Textverstehens verschaffen.

▪ Verankerung der Textinformation im semantischen Gedächtnis

In einer viel zitierten Studie von Bransford und Johnson (1972) lasen die Teilnehmer den folgenden Text:

(163) *The procedure is actually quite simple. First you arrange items into different groups. Of course, one pile may be sufficient depending on how much there is to do. If you have to go somewhere else due to a lack of facilities that is the next step; better to do a few things at once than too many. In the short run it may not seem important but complications can easily arise. A mistake can be expensive as well. At first, the whole procedure will seem complicated. Soon, however, it will become just another fact of life. It is difficult to foresee any end to the necessity for this task in the immediate future, but then, one never can tell. After the procedure is completed one arranges the materials into different groups again. Then they can be put in their appropriate places. Eventually, they will be used once more and the whole cycle will have to be repeated. However, that is part of life.*

Eine Gruppe von Personen bekam dabei keine weitere Information. Diese Gruppe schätzte den Text als sehr unverständlich ein und schnitt auch schlecht in einem späteren Gedächtnistest zum Text ab. Eine weitere Gruppe las den Text unter der Überschrift *Washing Clothes*. Diese Gruppe fand den Text recht verständlich und schnitt deutlich besser im anschließenden Gedächtnistest ab. Eine dritte Gruppe bekam die Überschrift nach dem Lesen des Textes präsentiert. Diese Gruppe schätzte den Text ähnlich unverständlich ein wie die erste Gruppe und schnitt auch nicht wesentlich besser im nachfolgenden Gedächtnistest ab. Für das Verstehen scheint es demnach nicht ausreichend, wenn eine vernetzte propositionale Repräsentation gebildet werden kann. Wichtig ist offenbar auch, dass die gebildete propositionale Repräsentation im allgemeinen Hintergrundwissen des Rezipienten verankert werden kann. Dies scheint insbesondere dann zu glücken, wenn der Rezipient von Anfang an eine grobe Vorstellung hat, worum es in dem Text geht und welcher Anteil seines Weltwissens für eine Verankerung herangezogen werden kann. Das Ergebnis dieser Studie passt damit gut zu der Annahme, dass die globale Kohärenz eines Textes für das Verstehen eine besondere Rolle spielt, denn die globale Kohärenz kann vermutlich leichter erfasst werden, wenn es gelingt, die Textinformation mit dem Hintergrundwissen in Beziehung zu setzen.

▪ Anaphernresolution

Um eine integrierte Repräsentation der Textbedeutung aufbauen zu können, müssen die koreferenziellen Bezüge zwischen den einzelnen Sätzen eines Textes herausgearbeitet werden. Ein wesentliches Mittel, um koreferenzielle Beziehungen sprachlich anzuzeigen, sind anaphorische Ausdrücke. Diese müssen beim Verstehen aufgelöst werden. Prinzipiell können anaphorische Ausdrücke auf unterschiedliche Arten aufgelöst werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Oberflächenrepräsentation des Textes nach sprachlichen Ausdrücken zu durchsuchen, die als Antezedenten des anaphorischen Ausdrucks infrage kommen, und jeweils unter Rückgriff auf die Repräsentation der Textpropositionen und das Diskursmodell zu prüfen, wie gut sie im konkreten Fall als Antezedenten geeignet sind. Eine andere Möglichkeit besteht darin, direkt den passenden Diskursreferenten im Diskursmodell zu identifizieren, ohne den Umweg über die Oberflächenrepräsentation des Textes zu gehen. Die Frage, ob eine dieser beiden Routen bevorzugt gegangen wird, wurde in der Forschung zur Anaphernresolution bislang eher selten di-

rekt thematisiert, und die meisten Autoren gehen wohl implizit davon aus, dass beide Prozesse bei der Anaphernresolution eine Rolle spielen. In der Forschung hat man sich eher generell mit der Frage auseinandergesetzt, welche Faktoren die Anaphernresolution beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Forschung stehen im Einklang mit der Hypothese, dass bei der Anaphernresolution unterschiedliche Repräsentationen eine Rolle spielen.

So konnte in einigen Experimenten gezeigt werden, dass anaphorische Ausdrücke leichter zu verarbeiten sind, wenn weniger sprachliches Material zwischen dem Antezedens und dem anaphorischen Ausdruck erwähnt wurde (Clark und Sengul 1979; O'Brien 1987). Dieser Distanzeffekt legt nahe, dass bei der Anaphernresolution eine oberflächennahe Repräsentation des Textes nach möglichen Antezedenten durchsucht wird. Auch die grammatische Struktur von Texten scheint relevant zu sein. Nach dem Prinzip der parallelen Funktion (*parallel-function principle*; Sheldon 1974) bevorzugen Rezipienten Anaphern, bei denen der anaphorische Ausdruck und das Antezedens dieselbe grammatische Funktion im Satz erfüllen (vgl. 164 vs. 165). Anaphorische Sätze, die diesem Prinzip gehorchen, sind einfacher zu verarbeiten als solche, die diesem Prinzip nicht gehorchen, und in ambigen Fällen (vgl. 166) werden die anaphorischen Ausdrücke im Einklang mit dem Prinzip der parallelen Funktion aufgelöst (Smyth 1994). In vielen Untersuchungen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass das grammatische Genus des anaphorischen Ausdrucks bei der Anaphernresolution automatisch mit einbezogen wird (Arnold et al. 2000; vgl. auch Corbett und Chang 1983).

(164) *Sebastian gab Irmgard das Buch. Er fand es lustig.* [Prinzip der parallelen Funktion erfüllt]
(165) *Irmgard gab Sebastian das Buch. Er fand es lustig.* [Prinzip der parallelen Funktion nicht erfüllt]
(166) *John pushed Sammy and Evelyn kicked him.*

Auch gibt es Befunde, die auf Einflussfaktoren hinweisen, die vermutlich eher auf der Ebene der Textpropositionen zu verorten sind. So scheint bei der Anaphernresolution die Given-New-Strukturierung von Sätzen (▶ Abschn. 14.5.1) eine wichtige Rolle zu spielen: Rezipienten erwarten Pronomen im gegebenen Teil des aktuellen Satzes und die Antezedenten im neuen Teil des vorangegangenen Satzes (Yekovich et al. 1979). Besonders interessant in diesem Zusammenhang ist auch der Befund, dass es vom vorangehenden Verb abhängt, ob ein anaphorischer Bezug auf das Subjekt oder das Objekt des Satzes erwartet wird. Bei dem Verb *anrufen* wird ein nachfolgendes Pronomen bevorzugt so interpretiert, dass es sich auf das Subjekt des vorangehenden Satzes bezieht, während es bei dem Verb *bewundern* das Objekt ist, das bevorzugt als Antezedens herangezogen wird (vgl. 167 vs. 168; Garvey und Caramazza 1974; Grober et al. 1978). Der Grund könnte damit zusammenhängen, dass sich die beiden Verben in ihrer impliziten Kausalität unterscheiden: Bei *anrufen* ist es typischerweise das Subjekt, welches das Ereignis verursacht, bei *bewundern* hingen das Objekt. Die unterschiedlichen Präferenzen bei der Anaphernresolution würden in diesem Fall also daher rühren, dass der Rezipient erwartet, im zweiten Teil eine Erklärung für das Ereignis im ersten Teil präsentiert zu bekommen (▶ Abschn. 14.5.1). Tatsächlich sind die beobachteten Unterschiede in den Präferenzen besonders stark, wenn die Satzglieder mit dem Konnektor *weil* verbunden sind (Überblick über die recht umfangreiche Forschung zu diesem Feld in Hartshorne 2013).

(167) *Kai ruft Franz an, weil er …* [Präferenz: Subjekt]
(168) *Kai bewundert Franz, weil er …* [Präferenz: Objekt]

Neben diesen eher textnahen Faktoren gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, deren Interpretation allerdings weniger eindeutig ist. So lassen sich anaphorische Ausdrücke leichter auflösen, wenn sie sich auf etwas beziehen, was im Satz als Erstes erwähnt wurde (*advantage of first mention*; Gernsbacher und Hargreaves 1988), und auch wenn sie durch einen Eigennamen eingeführt wurden (Sanford et al. 1988). Hier ist unklar, ob dies auf die relative Prominenz der entsprechenden Ausdrücke in einer textnahen Repräsentation oder auf die relative Prominenz der entsprechenden Diskursreferenten im Diskursmodell zurückzuführen ist.

Schließlich gibt es aber auch eine Reihe von Befunden, die nahelegen, dass die Struktur der geschilderten Sachverhalte bei der Auflösung anaphorischer Bezüge eine Rolle spielt. So scheint die Leichtigkeit, mit der anaphorische Bezüge aufgelöst werden können, von räumlichen und zeitlichen Sachverhaltsaspekten beeinflusst zu sein (z. B. Anderson et al. 1983; Glenberg et al. 1987; Rinck und Bower 1995). In der Studie von Anderson et al. (1983) lasen Untersuchungsteilnehmer Texte wie in (169), in denen ein Referent eingeführt wurde, der an das im Hauptteil des Textes geschilderte Ereignis (essen gehen) gebunden war (Kellner). Nach einem Zeitsprung, der die übliche Dauer des im Text beschriebenen Ereignisses überschritt (*five hours later*), war eine anaphorische Referenz auf diesen Referenten (*he*) nur noch schwer zu verstehen. Grammatische Faktoren können für dieses Ergebnis nicht verantwortlich gemacht werden. Vielmehr scheinen Referenten im Diskursmodell unterschiedlich prominent zu sein, je nachdem, ob sie in der aktuellen Situation eine Rolle spielen oder nicht. Befunde dieser Art bekräftigen also die Relevanz des Diskursmodells bei der Anaphernresolution (weitere Befunde dieser Art s. unten).

(169) *In the Restaurant.*
The Browns were eating a meal in a restaurant. The waiter was hovering around the table. This restaurant was well known for its food. Forty minutes/Five hours later the restaurant was empty. They/He had enjoyed eating/serving all the good food.

Auch die in ▶ Abschn. 14.5.1 berichteten Befunde, wonach pronominale Anaphern besonders schnell aufgelöst werden können, wenn sie sich auf Entitäten beziehen, die sich im Fokus des geschilderten Geschehens befinden, passen zu dieser Auffassung. Allerdings gilt dies ja vornehmlich für Entitäten, die explizit eingeführt wurden und sich daher im expliziten Fokus des Diskursmodells befinden. Entitäten, die nur inferiert wurden, können in der Regel nicht gut mittels pronominaler Anaphern aufgegriffen werden. Dieser Befund verdeutlicht erneut, dass bei der Anaphernresolution unterschiedliche Textaspekte eine Rolle spielen.

Tatsächlich werden in allen modernen Anaphernresolutionstheorien auch unterschiedliche Textaspekte berücksichtigt.

Almor (1999) beispielsweise nimmt an, dass ein anaphorischer Ausdruck umso informativer sein muss, je weniger salient sein Antezedens ist, wobei die Salienz der Antezedenten von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst sein kann. In der bereits erwähnten Centering-Theorie (Grosz und Sidner 1986) wird angenommen, dass jeder Satz eines kohärenten Textes einen rückwärtsgerichteten Teil hat (*backward-looking center)*, der den Satz mit dem vorherigen Satz in Verbindung setzt, sowie einen oder mehrere vorwärtsgerichtete Teile (*forward-looking centers)*, die mögliche Anknüpfungspunkte für nachfolgende Sätzen liefern. Der rückwärtsgerichtete Teil wird häufig mittels Pronomen realisiert, und die unterschiedlichen vorwärtsgerichteten Teile sind nach Salienz sortiert, wobei die Salienz wiederum von unterschiedlichen Faktoren abhängt. Badecker und Straub (2002) postulieren explizit ein interaktives Constraint-basiertes Modell, bei dem die unterschiedlichen Antezedenten in einen Wettstreit treten, den derjenige gewinnt, der durch die unterschiedlichen Constraints insgesamt am meisten unterstützt wird.

Inferenzen

Ein Großteil der Information, die für den Aufbau einer kohärenten und elaborierten Bedeutungsrepräsentation benötigt wird, ist in den meisten Texten nicht explizit ausgedrückt, sondern muss vom Rezipienten auf der Basis seines Hintergrundwissens hinzugefügt werden. Solche hinzugefügten Informationen werden als **Inferenzen** bezeichnet. Inferenzprozesse können sehr unterschiedlicher Natur sein. Das Spektrum reicht von wohldurchdachten Schlussfolgerungsprozessen, die beispielsweise angestoßen werden, wenn der Zusammenhang zwischen zwei Sätzen nicht offensichtlich ist, bis hin zu passiven Resonanzprozessen, durch die bestimmte relatierte Information aus dem Hintergrundwissen des Rezipienten automatisch aktiviert wird (van den Broek et al. 2005). Neben den bereits besprochenen Brückeninferenzen (▶ Abschn. 14.5.1), die dadurch gekennzeichnet sind, dass die inferierte Information für den Aufbau einer kohärenten Bedeutungsrepräsentation benötigt wird, gibt es auch *elaborative Inferenzen*, durch die die gebildete Bedeutungsrepräsentation lediglich angereichert wird. Elaborative Inferenzen lassen sich weiter unterteilen, etwa in Instrumentinferenzen (vgl. 170) und prädiktive Inferenzen (vgl. 171) (Überblick in Singer 1994).

(170) *Claudia servierte ihren Gästen auf dem Balkon eine köstliche Suppe.* [Inferenz: Es wurde eine Schöpfkelle zum Servieren verwendet]

(171) *Der müde Politiker verließ nach seiner Rede die Bühne und lief zu seinem Stuhl.* [Inferenz: Der Politiker setzt sich auf den Stuhl]

Einigkeit besteht in der Literatur darüber, dass Rezipienten bei der Verarbeitung von Texten Brückeninferenzen routinemäßig ziehen (Graesser et al. 1994). Debattiert wird jedoch nach wie vor, inwieweit auch elaborative Inferenzen routinemäßig gezogen werden. Hier werden ganz unterschiedliche Auffassungen vertreten. Der *Minimalismushypothese* zufolge (McKoon und Ratcliff 1992) werden elaborative Inferenzen nur gezogen, wenn sie hochverfügbare Informationen betreffen, die durch einen passiven Resonanzprozess verfügbar gemacht werden können. Demgegenüber postuliert die konstruktivistische Sicht (Graesser et al. 1994), dass vornehmlich solche Inferenzen gezogen werden, die den Rezipienten bei seinem *effort after meaning* unterstützen. Hiernach versuchen Rezipienten, eine Repräsentation aufzubauen, die ihren Lesezielen gerecht wird, die lokal und global kohärent ist und die widerspiegelt, warum bestimmte Sachverhalte im Text erwähnt werden. Die meisten Autoren vertreten heutzutage eine Zwischenposition (z. B. van den Broek et al. 2005) und tragen damit auch der Tatsache Rechnung, dass es teilweise von den Umständen abhängt, ob in einer spezifischen Situation bestimmte elaborative Inferenzen gezogen werden oder nicht (z. B. Murray et al. 1993).

Welche Information wird erinnert?

Ein Thema, das bereits die frühe Textverstehensforschung beschäftigt hat, ist die Frage, wie ein Text im Gedächtnis behalten wird. Dies ist nicht verwunderlich, denn aus dem, was ein Leser von einem Text erinnert, lassen sich Rückschlüsse auf die gebildeten Repräsentationen ziehen. Schon in einer Studie von Sachs (1967) konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenrepräsentation eines Textes nicht lange aufbewahrt wird. Schon nach kurzer Zeit konnten Leser nicht mehr unterscheiden, welchen der beiden bedeutungsgleichen Sätze (172) und (173) sie zuvor gelesen hatten, wohl aber, dass es nicht der bedeutungsverändernde Satz (174) gewesen war.

(172) *He sent a letter about it to Galileo, the great Italian scientist.* [original]

(173) *He sent Galileo, the great Italian scientist, a letter about it.* [bedeutungsgleich]

(174) *Galileo, the great Italian scientist, sent him a letter about it.* [bedeutungsverändert]

In einer Studie von Bransford et al. (1972) konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass Rezipienten vornehmlich die im Text beschriebene Situation im Gedächtnis behalten, nicht die propositionale Struktur des Textes. Nach dem Lesen eines Satzes wie (175) konnten die Probanden nicht unterscheiden, welche Version (*them* vs. *it*) sie zuvor gelesen hatten, obwohl sich die propositionale Struktur der beiden Sätze durchaus unterscheidet. Wurde jedoch anstelle des Wortes *on* das Wort *beside* verwendet, so konnten Rezipienten sehr wohl entscheiden, welchen der beiden Sätze sie gelesen hatten. In diesem Fall beschrieben die beiden Versionen (*them* vs. *it*) ja auch unterschiedliche Situationen. Die Ergebnisse dieser Studie lassen sich demnach gut mit der Annahme in Einklang bringen, dass das Ergebnis des Textverstehens eine integrierte Repräsentation des geschilderten Sachverhalts ist (Situationsmodell/mentales Modell), und damit, dass dies die Repräsentation ist, die im Gedächtnis aufbewahrt wird. Allerdings gibt es mittlerweile auch Hinweise darauf, dass Oberflächenmerkmale im Gedächtnis behalten werden können, wenn die Art und Weise, wie etwas ausgedrückt wurde, pragmatisch relevant ist (Bates et al. 1978).

(175) *Three turtles rested on a floating log and a fish swam beneath them/it.*

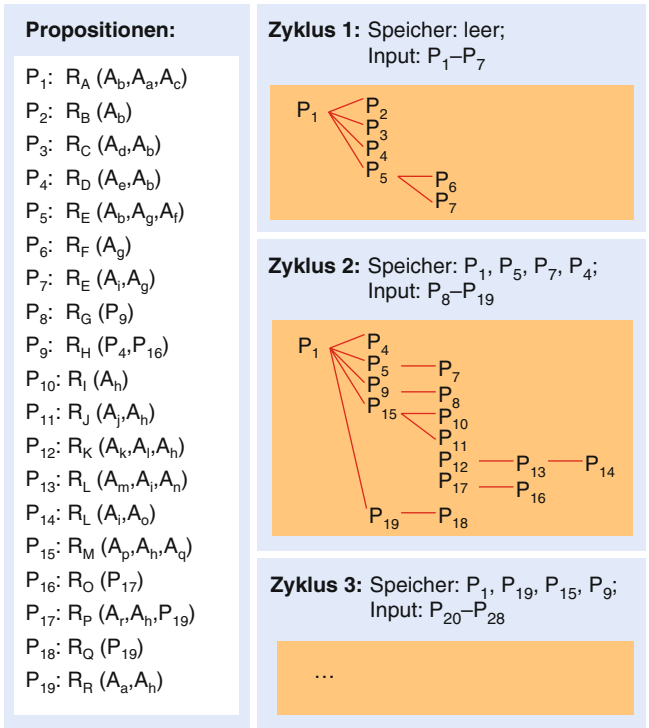
Modelle des Textverstehens

In der Literatur zum Textverstehen existieren viele verschiedene Verarbeitungsmodelle, die den Fokus auf unterschiedliche Aspekte des Textverstehens lenken. Manche Modelle betrachten genauer die Prozesse, die dem Aufbau der Textpropositionsrepräsentation zugrunde liegen, andere legen den Fokus der Aufmerksamkeit auf den Aufbau des Diskursmodells. Wieder andere Theorien thematisieren insbesondere die Frage, wie das Hintergrundwissen des Rezipienten beim Textverstehen aktiviert und in die aufgebaute Repräsentation integriert wird. Wir werden im Folgenden drei Modelle genauer betrachten, mitentwickelt von Walter Kintsch, der die Textverstehensforschung mit seinen theoretischen Überlegungen im besonderen Maße beeinflusst hat. Auch wenn diese drei Modelle nur einen kleinen Ausschnitt aus den existierenden Modellen in der Textverstehensforschung darstellen, so umreißen sie unserer Meinung nach doch recht gut die Bandbreite an Modellierungsvorstellungen in der Literatur.

Das Modell von Kintsch und van Dijk (1978) Dieses Modell stellt eines der ersten ausgearbeiteten Textverstehensmodelle dar. Der Fokus des Modells liegt vornehmlich auf dem Aufbau einer kohärenten integrierten Repräsentation der Textpropositionen, der sogenannten Textbasis oder Mikrostruktur. Eine Besonderheit dieses Modells besteht darin, dass es die Begrenzung des menschlichen Arbeitsgedächtnisses als Parameter mit einbezieht. In jedem Verarbeitungszyklus wird abhängig von Eigenschaften des Lesers und des Textes eine bestimmte Menge n_i an Propositionen eingelesen (maximale Anzahl: n) und mithilfe des Prinzips der Argumentüberlappung zueinander in Beziehung gesetzt. Im nächsten Schritt werden die nächsten n_j Propositionen eingelesen und an die vorherigen Propositionen angebunden, usw. So entsteht nach und nach ein sogenannter Kohärenzgraph, in dem die Propositionen des Textes zueinander in Beziehung gesetzt sind (◘ Abb. 14.19).

Für die Anbindung der jeweils neu eingelesenen Propositionen wird allerdings immer nur ein Teil der vorherigen Propositionen verfügbar gehalten. Die Anzahl der verfügbar gehaltenen Propositionen ist in jedem Zyklus konstant, sie hängt von der Arbeitsgedächtniskapazität des jeweiligen Lesers ab (Parameter: s). Welche Propositionen dabei in einem bestimmten Zyklus ausgewählt werden, hängt u. a. von den Lesestrategien des Lesers ab. Eine erfolgreiche Strategie ist die *Leading-Edge-Strategie*, bei der zunächst alle Propositionen entlang der unteren Kante des Graphen ausgewählt werden, solange jede ausgewählte Proposition einen höheren Index aufweist als die vorher ausgewählte Proposition (also im Text später erwähnt wurde). Als Nächstes werden auf der höchstmöglichen Ebene des Graphen Propositionen entsprechend ihrer Indizes ausgewählt (höhere Indizes zuerst). Diese Strategie wählt also zum einen zentrale Propositionen aus, die mit vielen anderen Propositionen in Beziehung stehen (*frequency*), und zum anderen solche, deren Erwähnung im Text noch nicht lang zurückliegt (*recency*). Dies erhöht die Chancen, dass bei den verfügbar gehaltenen Propositionen solche dabei sind, die mit den neu einzulesenden Propositionen Argumente teilen.

Das Modell macht auch Vorhersagen dazu, wie gut die einzelnen Propositionen eines Textes im Gedächtnis behalten werden. In jedem Schritt sind s frühere Propositionen und n_x neue Propositionen im Arbeitsspeicher. Mit einer Wahrscheinlichkeit von p wird jede dieser Propositionen im Langzeitgedächtnis gespeichert. Propositionen, die häufig zum Verbleib im Arbeitsspeicher ausgewählt wurden, haben also insgesamt eine höhere Chance, auch tatsächlich im Gedächtnis verankert zu werden.



◘ **Abb. 14.19** Zyklische Verarbeitung eines Textes im Modell von Kintsch und van Dijk (1978). Die dem Text zugrunde liegenden Propositionen sind schematisch dargestellt. Sie bestehen jeweils aus einer Relation (RX) und einem oder mehreren Argumenten (Ax), wobei auch Propositionen als Argumente vorkommen (z. B. in P9). In jedem Verarbeitungszyklus werden neue Propositionen eingelesen und in den im Arbeitsspeicher verfügbar gehaltenen Kohärenzgraphen integriert (Prinzip der Argumentüberlappung). Ein Teil dieses neuen Graphen wird dann für den nächsten Verarbeitungszyklus verfügbar gehalten (Leading-Edge-Strategie)

Zusätzlich zu den Annahmen zum Aufbau der Mikrostruktur werden in diesem Modell auch konkrete Annahmen zum Aufbau der Makrostruktur gemacht, die hier aber nicht weiter betrachtet werden sollen. Insgesamt ergeben sich damit für einen konkreten Text in Abhängigkeit der Parameter n, s und p recht genaue Vorhersagen bezüglich der aufgebauten Repräsentationen sowie deren Verankerung im Gedächtnis. Diese können dann wiederum mit den Wiedergabeprotokollen und Zusammenfassungen verglichen werden, die Personen nach dem Lesen des jeweiligen Textes anfertigen. Bei der Modellierung gelang die beste Passung mit den empirischen Daten, wenn in jedem Zyklus die Propositionen eines Satzes eingelesen und bis zu vier Propositionen des Kohärenzgraphen für den nächsten Zyklus verfügbar gehalten wurden.

Für die Textverstehensforschung war das Modell von Kintsch und van Dijk (1978) als erstes prozedurales Modell des Textverstehens äußerst fruchtbar und hat zahlreiche Nachfolgeuntersuchungen angestoßen. Seine Attraktivität hat sicherlich auch damit zu tun, dass es erlaubt, simulierte Daten mit menschlichen Daten zu vergleichen, und so Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden

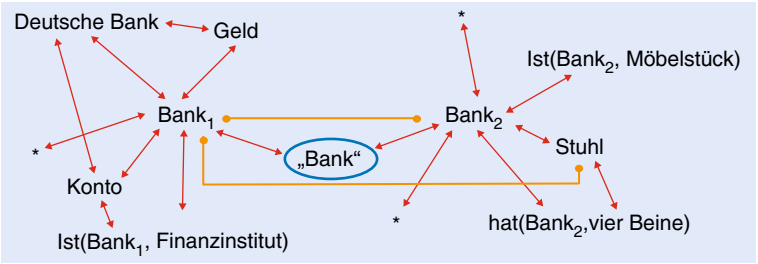


Abb. 14.20 Ausschnitt aus dem assoziativen Netz für „Bank“. Exzitatorische Verbindungen sind durch Pfeile, inhibitorische durch Kreise gekennzeichnet. Die Sternchen stehen für weitere Knoten, die hier nicht genauer gekennzeichnet sind. (Angelehnt an Kintsch 1988)

Verstehensprozesse ermöglicht. So kann das Modell auch für weitergehende Untersuchungen zum Textverstehen herangezogen werden, etwa die Frage betreffend, unter welchen Bedingungen welche Strategie zur Auswahl von Propositionen herangezogen wird (umfangreiche Ausführungen hierzu in Kintsch und van Dijk 1978).

Das Modell von van Dijk und Kintsch (1983) Nach der Situationsmodelltheorie von van Dijk und Kintsch (1983) bilden Rezipienten beim Textverstehen drei verschiedene aufeinander aufbauende Repräsentationen: eine Oberflächenrepräsentation des Textes, eine Repräsentation der Textpropositionen (▶ Abschn. 14.3.1) und eine Repräsentation des beschriebenen Sachverhalts, das sogenannte Situationsmodell (▶ Abschn. 14.5.1).

Frühe Belege für die Annahme, dass Situationsmodelle beim Textverstehen gebildet werden, stammen aus Gedächtnisstudien, in denen gezeigt werden konnte, dass Rezipienten bereits kurze Zeit nach dem Lesen eines Textes nur noch Angaben zum beschriebenen Sachverhalt, nicht aber zu den Eigenschaften des gelesenen Textes machen konnten (s. oben; vgl. auch Bransford und Franks 1971). Dies gilt insbesondere dann, wenn der Text den Aufbau eines geeigneten Diskursmodells erlaubt. Ist der Text auf den relevanten Dimensionen ambig – wie Text (176), in dem es explizit um räumliche Beziehungen geht, diese aber mehrdeutig sind –, so können sich Leser später relativ gut an Texteigenschaften erinnern (Mani und Johnson-Laird 1982). Dieses Ergebnis passt zu der Annahme, dass Leser unter normalen Umständen versuchen, sowohl eine Repräsentation des Textes an sich (z. B. eine propositionale Repräsentation) als auch ein Diskursmodell aufzubauen.

(176) *The bookshelf is to the right of the chair. The chair is in front of the table. The bed is behind the chair.*

Spätere Studien legten den Fokus dann auf die Verfügbarkeit von Diskursentitäten beim Textverstehen und zeigten, dass diese nicht nur von der Struktur des Textes an sich abhängt, sondern auch maßgeblich von der Struktur des beschriebenen Sachverhalts beeinflusst wird. In einer Studie von MacDonald und Just (1989) beispielsweise reagierten Personen in einer Wortwiedererkennungsaufabe nach dem Lesen eines Satzes wie (177) schneller auf das Wort *bread* als auf das Wort *cookies*. Dieses Ergebnis passt gut zu der Annahme, dass sie ein Diskursmodell aufgebaut hatten, in dem ein Brot, aber keine Plätzchen repräsentiert waren und die Plätzchen deshalb relativ schlecht verfügbar waren. In einer Studie von Kaup (2001) konnte gezeigt werden, dass dieser Verfügbarkeitsunterschied nicht allein auf die Negation zurückzuführen ist, sondern tatsächlich das Vorhandensein in der Situation widerspiegelt.

(177) *Every weekend Mary bakes bread but no cookies for the children.*

In einer berühmten Studie von Glenberg et al. (1987) konnten entsprechende Verfügbarkeitsunterschiede beim Textverstehen demonstriert werden, ohne dass die Verfügbarkeit von Entitäten explizit getestet wurde. In diesem Experiment lasen Personen Texte wie in (178), in denen im ersten Satz ein bestimmtes Zielobjekt eingeführt wurde (*striped tie*), auf das im letzten Satz mittels einer pronominalen Anapher (*it*) zurückgegriffen wurde. Je nach Version befand sich das Zielobjekt am Ende der Geschichte entweder bei dem Protagonisten oder nicht (*put on* vs. *took off*). Es zeigte sich, dass die Lesezeiten für den anaphorischen Satz am Ende der Geschichte signifikant kürzer waren, wenn sich das Zielobjekt in räumlicher Nähe zum Protagonisten befand. Die Verfügbarkeit des Zielobjekts war hier also abhängig von räumlichen Aspekten des beschriebenen Sachverhalts (Distanz zum Protagonisten), nicht von räumlichen Aspekten des Textes (die Distanz im Text zwischen dem anaphorischen Element *it* und dem Antezedens *striped tie* war in beiden Versionen gleich). Dieses Ergebnis zeigt, dass Rezipienten beim Lesen des Textes ein Modell der beschriebenen Situation aufgebaut hatten, das dann auch zum Zweck der Anaphernresolution herangezogen wurde. In diesem Modell sind Objekte offenbar umso verfügbarer, je näher sie dem Protagonisten sind (vgl. auch Morrow et al. 1987). Ähnliche Ergebnisse konnten auch in Studien gefunden werden, in denen zeitliche Sachverhaltsaspekte variiert wurden (Kelter et al. 2004; Claus und Kelter 2006).

(178) *Bob wanted to be dressed appropriately for the party. He [put on/took off] his striped tie and then looked around for his wife. He just couldn't decide what to wear. He wondered if it would look nice with his blue jacket.*

Manche Autoren haben aus Ergebnissen wie diesen den Schluss gezogen, dass die beim Textverstehen gebildeten Diskursmodelle nichtsprachliche Repräsentationen sind, deren Struktur analog zu der Struktur der beschriebenen Sachverhalte ist. Solche analogen Diskursmodelle werden in Anlehnung an Johnson-Lairds Theorie häufig auch als *mentale Modelle* bezeichnet (Johnson-Laird 1983). Johnson-Lairds Mentale-Modell-Theorie kann als Vorläufer der in ▶ Abschn. 14.6 behandelten Simulationstheorie des Sprachverstehens angesehen werden, da hier bereits explizit betont wird, dass es beim Verstehen darum geht, das Erleben

der geschilderten Sachverhalte mental zu simulieren (Überblick in Kelter 2003).

Eine Weiterentwicklung der Situationsmodelltheorie, die auch die Befunde zu raumzeitlichen Sachverhaltsaspekten berücksichtigt, ist das *Event-Indexing-Modell* von Zwaan und Radvansky (1998). In diesem Modell wird angenommen, dass Rezipienten beim Verstehen jeweils das aktuell geschilderte Ereignis in einem Situationsmodell repräsentieren und dieses sukzessive aktualisieren. Ein kohärenter Text zeichnet sich dadurch aus, dass sich die geschilderten Ereignisse auf mehreren Sachverhaltsdimensionen überschneiden. Relevant dabei sind nach Meinung der Autoren die Dimensionen „Raum", „Zeit", „Entität", „Motivation" und „Kausalität" (Überblick über dieses Modell und die zahlreichen empirischen Belege in Zwaan und Rapp 2006).

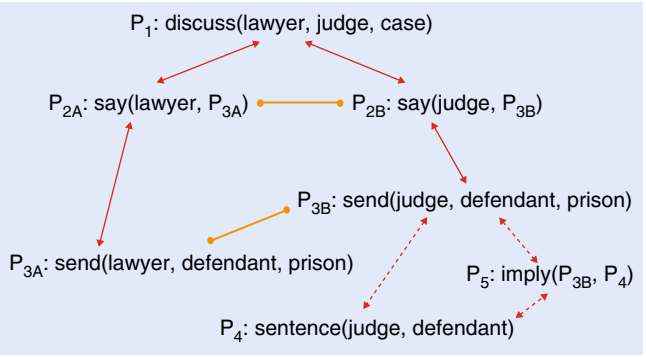
Eine mit der Situationsmodelltheorie verwandte Theorie, die die Textverstehensforschung stark beeinflusst hat, ist die *Scenario-Mapping-Theorie* von Sanford und Garrod (1981), in der angenommen wird, dass der Verstehensprozess von Anfang an durch situationsbasiertes Wissen getrieben ist. Wichtig ist hier die Annahme, dass dieses Wissen bereits wesentlich die Erstellung der Textpropositionsrepräsentation beeinflusst und nicht erst in einem nachgeschalteten Schritt relevant wird. Eine ähnliche Annahme liegt auch dem Modell von Kintsch (1988) zugrunde, das im nächsten Abschnitt besprochen wird.

Das Modell von Kintsch (1988) Dieses Modell behandelt vornehmlich die Frage, wie das Hintergrundwissen des Rezipienten in den Verstehensprozess mit einbezogen wird und diesen beeinflusst. Eine wichtige Grundannahme des Modells betrifft die Wissensrepräsentation. Kintsch (1988) nimmt an, dass die Textinformation und das Hintergrundwissen des Rezipienten im selben Format vorliegen, nämlich in Form von assoziativen Netzen. Die Elemente dieser assoziativen Netze sind Konzepte und Propositionen, und die Verbindungen zwischen diesen Elementen sind exzitatorisch oder inhibitorisch gewichtet (◘ Abb. 14.20). Wie im Modell von Kintsch und van Dijk (1978) läuft das Verstehen eines Textes in Zyklen ab. Jeder Zyklus ist durch zwei Phasen des Verstehens gekennzeichnet. Zunächst wird auf der Basis des sprachlichen Inputs und des Hintergrundwissens des Rezipienten eine (möglicherweise inkonsistente) Textbasis konstruiert (*construction*). In einem zweiten Schritt wird diese Textbasis dann zu einer kohärenten und konsistenten Repräsentation integriert (*integration*).

In der Konstruktionsphase werden zunächst die Propositionen ermittelt, die dem sprachlichen Input zugrunde liegen. Da die Zuordnung zu Propositionen nicht immer eindeutig ist, kann es vorkommen, dass widersprüchliche Propositionen gebildet werden (hier unterscheidet sich das Modell von den früheren Modellen von Kintsch). So wäre bei (179) etwa denkbar, dass sowohl die Proposition gebildet wird, wonach Frank zum Geldinstitut geht, als auch die Proposition, wonach Frank eine Sitzgelegenheit aufsucht (vgl. 180). Für den Text in (181) könnte es sein, dass beide Möglichkeiten, das Pronomen aufzulösen, parallel realisiert würden (vgl. 182).

(179) *Frank ging zur Bank.*

(180) P_1: gehen(Frank, $Bank_1$);
P_2: gehen(Frank, $Bank_2$)



◘ **Abb. 14.21** Textbasis für Text (181). Propositionen P4 und P5 stammen aus dem Hintergrundwissen des Rezipienten. Konnektivitätsmatrix: P1–P2A: 0.9; P1–P2B: 0.9; P1–P3A: 0.7; P1–P3B: 0.7; P1–P4: 0.0; P1–P5: 0.0; P2A–P2B: –1; P2A–P3A: 0.9; P2A–P3B: 0.0; P2A–P4: 0.0; P2A–P5: 0.0; P3A–P3B: –1; P3A–P4: 0.0; P3A–P5: 0.0; P3B–P4: 0.5; P3B–P5: 0.5; P4–P5: 0.5

(181) *The lawyer discussed the case with the judge. He said „I shall send the defendant to prison".*

(182) P_1: discuss(lawyer, judge, case);
P_{2A}: say(lawyer, send(lawyer, defendant, prison)); P_{2B}: say(judge, send(judge, defendant, prison))

Im nächsten Schritt der Konstruktionsphase aktivieren nun die gebildeten Propositionen andere Propositionen im Hintergrundwissen des Rezipienten, mit denen sie assoziiert sind. Die einzelnen Propositionen werden dabei als Hinweisreize für den Gedächtnisabruf angesehen (Raaijmakers und Shiffrin 1981). Für den Text in (181) könnte angenommen werden, dass die Propositionen P_4 und P_5 aktiviert würden (◘ Abb. 14.21). Im dritten Schritt der Konstruktionsphase werden gegebenenfalls weitere Propositionen gezielt inferiert, sofern sie für den Aufbau einer vernetzten Textbasis notwendig sind. Im letzten Schritt der Konstruktionsphase schließlich werden die Verbindungen zwischen allen aktivierten Propositionen berechnet (Konnektivitätsmatrix). Propositionen, die bereits im Hintergrundwissen verbunden sind, vererben ihr Verbindungsgewicht an die Textbasis. Die restlichen Propositionen erlangen ein Verbindungsgewicht, das ihrer Distanz im Text entspricht (s. Legende zu ◘ Abb. 14.21).

Das Ziel der Integrationsphase besteht nun darin, das konstruierte assoziative Netz in eine kohärente und konsistente Repräsentation zu überführen. Vornehmlich geht es darum, inkonsistente Propositionen aus der Repräsentation zu entfernen. In der Integrationsphase wird dafür so lange Aktivierung durch das assoziative Netz geschickt, bis sich ein stabiler Zustand ergibt. Genauer: Ein anfänglicher Aktivierungsvektor, der jeder Proposition in der Textbasis eine Aktivierungsstärke zuweist, wird mit der Konnektivitätsmatrix multipliziert. Der neue Aktivierungsvektor wird dann normiert (negative Werte werden auf null gesetzt, und positive Werte werden durch die gesamte Aktivierung im Netz geteilt) und wieder mit der Konnektivitätsmatrix multipliziert. Dies wird so lange wiederholt, bis sich der Aktivierungsvektor von Schritt zu Schritt kaum noch ändert. Das resultierende Netz entspricht dann der Interpretation des Textes. Für den Text in (181) ergibt sich bei einem anfänglichen Aktivierungsvektor, der jeder Proposition eine Aktivierung von .25 zuweist, bereits nach 19 Multiplikationen

ein stabiler Zustand, bei dem die Propositionen P_{2A} und P_{3A} eine Aktivierung von 0 und P_{2B} und P_{3B} eine Aktivierung von über 2.5 aufweisen. Der Algorithmus hat sich in diesem Fall also für die naheliegende Interpretation entschieden, wonach der Richter dafür sorgt, dass der Angeklagte ins Gefängnis kommt.

Wie kommt es zu dieser Interpretation? Rein technisch gesehen sind beide Möglichkeiten das Pronomen aufzulösen zunächst gleich plausibel. Allerdings existieren im Hintergrundwissen des Rezipienten im vorliegenden Fall nur zu einer der beiden Möglichkeiten assoziierte Propositionen (die Propositionen P_4 und P_5, die direkt mit P_{3B} und indirekt mit P_{2B} verbunden sind). Da diese beim Verstehen mit aktiviert werden, gewinnt die Proposition P_{3B} gegenüber der Proposition P_{3A} an Aktivierung, ebenso die Proposition P_{2B} gegenüber der Proposition P_{2A}. Da P_{3A} und P_{3B} sowie P_{2A} und P_{2B} jedoch inhibitorisch miteinander verbunden sind, wird dieses Ungleichgewicht von Durchgang zu Durchgang stärker, bis sich die Aktivierung von P_{3A} und P_{2A} auf null reduziert. Die Lesart, wonach sich das Pronomen auf den Richter bezieht, hat sich also deshalb durchgesetzt, weil der Rezipient passendes Hintergrundwissen zur Verfügung hat, wonach Richter Angeklagte verurteilen und dadurch ins Gefängnis bringen.

Das Modell von Kintsch (1988) ist auf verschiedene Phänomene im Bereich des Textverstehens angewandt worden und ist – wie das Modell von Kintsch und van Dijk (1978) auch – für die Textverstehensforschung insbesondere deshalb attraktiv, weil es erlaubt, den menschlichen Textverstehensprozess zu simulieren. So lässt sich mit dem Modell etwa modellieren, welche Konzepte bei der Verarbeitung einer lexikalischen Ambiguität im Diskurskontext zu welchen Zeitpunkten wie stark aktiviert sind. Das Modell sagt beispielsweise korrekt vorher, dass beim Lesen von (183) zunächst sowohl das assoziierte Konzept „money“ als auch das assoziierte Konzept „candy“ aktiviert ist. Am Ende des Verstehensprozesses hingegen ist nur noch „money“ aktiviert, die Aktivierung von „candy“ ist auf null gesunken (Till et al. 1988).

(183) *The townspeople were amazed to find that all the buildings had collapsed except the mint.*

In neueren Modellen von Kintsch wird der *Construction-Integration-Prozess* mit den in Abschnitt ▶ Abschn. 14.3.1 erwähnten vektorbasierten Ansätzen kombiniert, um beispielsweise zu erklären, wie metaphorische Bedeutungen wie in *The colour runs* erfasst werden können (vgl. das *Predication-Modell* von Kintsch 2001). Des Weiteren ist die Grundidee des *Construction-Integration-Modells* auch verwandt mit der Memory-Based-Processing-Sicht, in der insbesondere automatische Resonanzprozesse beim Textverstehen betont werden (McKoon und Ratcliff 1998; O'Brien et al. 1998). Ferner spielen solche Resonanzprozesse auch im *Landscape-Modell* von van den Broek und Kollegen eine Rolle, in dem es insbesondere um das Zusammenspiel von automatischen und kontrollierten Prozessen beim Textverstehen geht, sowie um die Frage, wie dieses Zusammenspiel von individuellen und situativen Faktoren beeinflusst wird (Yeari und van den Broek 2011).

14.6 Verstehen als Simulation

In unserer bisherigen Darstellung des Sprachverstehensprozesses sind wir stillschweigend davon ausgegangen, dass die beim Sprachverstehen aufgebauten Bedeutungsrepräsentationen symbolischer Natur sind und in einem amodalen propositionalen Repräsentationsformat vorliegen (▶ Abschn. 14.3.1). In der sprachpsychologischen Forschung nehmen heutzutage jedoch immer mehr Forscher an, dass die sprachliche und die nichtsprachliche Kognition bei der Bedeutungsrepräsentation auf dieselben mentalen Subsysteme zugreifen. Sprachverstehen besteht demnach darin, das direkte Erleben der geschilderten Sachverhalte mental zu simulieren, wobei angenommen wird, dass dabei auf die modalen Repräsentationssysteme zurückgegriffen wird, die beim direkten Erleben eine Rolle spielen (z. B. Barsalou 1999, 2008; Fischer und Zwaan 2008). Vertreter des Simulationsansatzes postulieren, dass die Interaktion mit der Umwelt Erfahrungsspuren im Gehirn hinterlässt, die beim Aufbau der mentalen Simulationen, die die Grundlage aller kognitiven Tätigkeiten ausmachen, partiell reaktiviert und verwendet werden. Wörter und Syntax werden als Menge von Hinweisreizen verstanden, die zur Aktivierung bestimmter Erfahrungsspuren führen und deren Integration steuern (Zwaan 2004). Konkret wird angenommen, dass Wörter häufig gemeinsam mit den Objekten, Zuständen und Ereignissen vorkommen, auf die sie sich beziehen, sodass sich mit der Zeit eine Assoziation zwischen Erfahrungsspuren, die die Wörter und deren Referenten hinterlassen, ausbildet (◘ Abb. 14.22). Später, wenn die Wörter ohne die jeweiligen Referenten auftreten, werden die Erfahrungsspuren, die der Umgang mit den Referenten im Gehirn hinterlassen hat, reaktiviert. Treten die Wörter im Kontext von Sätzen oder Texten auf, so wird angenommen, dass die einzelnen aktivierten Erfahrungsspuren so zu einer integrierten Simulation kombiniert werden, dass diese Simulation die Bedeutung des Satzes oder Textes widerspiegelt (Zwaan und Madden 2005). Liest man beispielsweise, dass Daniela den duftenden Schokoladenkuchen aus dem heißen Ofen nimmt, als der Wecker des Ofens klingelt, so würden – so die Annahme – visuelle, auditive, olfaktorische, haptische, motorische, emotionale und motivationale Erfahrungsspuren aktiviert werden, die mit den erwähnten Wörtern assoziiert sind und so miteinander kombiniert werden, dass eine mentale Simulation der geschilderten Situation entsteht.

In den letzten Jahren wurde eine Fülle empirischer Belege für diese Auffassung erbracht. Zum einen zeigen neurowissenschaftliche Studien, dass die Areale, in denen sprachlich vermittelte Situationen abgebildet werden, sich mit denen überlappen, in denen tatsächlich erlebte Situationen repräsentiert werden (Pulvermüller 2005). Zum anderen zeigen Verhaltensstudien Interaktionseffekte zwischen der sprachlich geschilderten Situation auf der einen Seite und der experimentellen Situation auf der anderen. In einer Studie von Glenberg und Kaschak (2002) wurden Sätze, die eine bestimmte Bewegung beschreiben (vgl. 184), signifikant schneller als sinnvoll eingestuft, wenn die im Experiment für diese Entscheidung benötigte Bewegung mit der im Satz beschriebenen Bewegung übereinstimmte (Ja-Antwort durch Bewegung zum Körper hin), als wenn dies nicht der Fall war (Ja-Antwort durch Bewegung vom Körper weg).

(184) *He opened the drawer.*

Dieser *Action-Sentence Compatibility Effect* (ACE) zeigt auf eindrucksvolle Weise, dass sprachliche Bedeutung und Bewegungsplanung interagieren, was darauf hindeutet, dass die beim Sprachverstehen gebildeten Bedeutungsrepräsentationen nicht amodal sind. Der ACE zeigt sich auch *während* der Satzverarbeitung: In einer Studie von Zwaan und Taylor (2006) lasen Personen Sätze wie in (185) wortweise, wobei jedes neue Wort durch eine 5°-Drehung eines Drehknaufs auf den Bildschirm geholt werden konnte (je nach Bedingung musste der Drehknauf im oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht werden). Bei der Verarbeitung des Verbs zeigte sich ein deutlicher ACE: Die Drehung wurde schneller initiiert, wenn ihre Richtung zu der im Satz angedeuteten Drehung passte, als wenn dies nicht der Fall war.

(185) *To quench his thirst the marathon runner eagerly opened the water bottle.*

Neben dem ACE gibt es auch eine Reihe anderer Effekte, die auf ein sensomotorisches Grounding der Bedeutungsrepräsentationen hinweisen, und zwar nicht nur bei konkretem und leicht vorstellbarem Material, sondern etwa auch bei negierten Sachverhalten (Herbert et al. 2011) und abstraktem Material (Boroditsky und Ramscar 2002), wobei in letzterem Fall angenommen wird, dass abstrakte, nicht direkt erfahrbare Sachverhaltsdimensionen auf erfahrbare Dimensionen abgebildet und so simuliert werden können (Barsalou und Wiemer-Hastings 2005).

Theoretisch steckt der Simulationsansatz noch sehr in den Anfängen. So ist beispielsweise weitgehend offen, wie die Bedeutungskonstitution auf Satzebene genau vonstattengeht. Insbesondere die Frage, welche Rolle die kompositionale Bestimmung der Bedeutung sprachlicher Ausdrücke spielt, wird zumeist gar nicht diskutiert, oder aber Kompositionalität wird ohne Weiteres den als überholt verstandenen propositionalen Ansätzen zugeschrieben (z. B. Zwaan und Madden 2005; vgl. aber Barsalou 1999).

Eine Klärung dieser Frage ist auf der Basis der bislang vorliegenden Ergebnisse kaum zu erreichen. In den bisherigen empirischen Arbeiten zum Simulationsansatz ist meist „nur" gezeigt worden, *dass* die beim Sprachverstehen gebildeten Repräsentationen sensomotorisch verankert sind. Klärungsbedarf besteht etwa im Hinblick auf die Frage, ob die Effekte wort-, satz- oder diskursbasiert sind: Simulationseffekte ergeben sich sowohl, wenn isolierte Wörter dargeboten werden, als auch, wenn sie innerhalb von Sätzen vorkommen. In vielen Studien zum Satzverstehen bleibt deshalb unklar, ob die gefundenen Effekte wort- oder satzbasiert sind (Kaup et al., im Druck). Für die Sichtweise, dass Rezipienten tatsächlich satzbasiert simulieren, sprechen die Ergebnisse von Studien, in denen der Einfluss grammatischer Variationen wie etwa Aspekt (Bergen und Wheeler 2010) oder Fokus (Taylor und Zwaan 2008) untersucht wurde. In der Studie von Taylor und Zwaan (2008) zeigte sich, dass ein ACE, der ansonsten zeitlich beschränkt ist auf die Verarbeitung des die Bewegung spezifizierenden Verbs (z. B. *opened*; s. oben), aufrechterhalten werden kann, wenn ein nachfolgendes Adverb diese Bewegung modifiziert (vgl. 186).

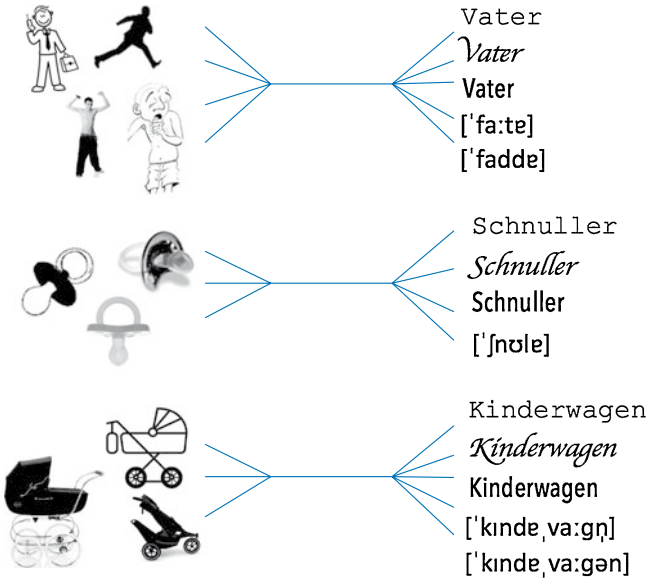


Abb. 14.22 Assoziationen zwischen den Erfahrungsspuren, die die Wörter und deren Referenten hinterlassen. (Angelehnt an Zwaan und Madden 2005)

In einer Studie von Claus (2015) zeigten sich entsprechende Simulationseffekte in elliptischen Sätzen, in denen das Verb ausgelassen wurde (vgl. 187), und zwar genau an der Stelle im Satz, an der die Auslassung erkennbar wurde (markiert durch Unterstreichung). Befunde wie diese legen also nahe, dass es nicht das Verarbeiten einzelner Wörter oder Wortkombination ist, das die beobachteten Effekte bewirkt, sondern eine sich inkrementell aufbauende mentale Simulation der beschriebenen Sachverhalte. Endgültig klären lässt sich diese Frage aber wohl nur durch systematischere Untersuchungen, in denen wort-, satz- und diskursbasierte Effekte klar voneinander zu trennen sind.

(186) *The fan handed the runner a water bottle which he opened quickly.*
(187) *Tina öffnet eine Fantaflasche auf dem Balkon und Adrian eine Saftflasche im Kinderzimmer.*

Eine weitere wichtige bislang ungeklärte Frage betrifft die Funktionalität mentaler Simulationen beim Sprachverstehen. Sind Simulationen nur ein optionales Nebenprodukt des Verstehens, oder tragen sie zum Verstehensprozess bei? Die bislang vorliegenden Ergebnisse in diesem Bereich sind unklar. Einerseits hat sich gerade in letzter Zeit in Studien, in denen die Verarbeitung abstrakter Information untersucht wurde, gezeigt, dass die direkt wahrnehmbaren Sachverhaltsdimensionen, auf die die abstrakte Information beim Simulieren vermeintlich abgebildet wird, beim Verstehen nicht automatisch aktiviert werden (z. B. Ulrich und Maienborn 2010). Dieser Befund scheint schwer mit der Annahme in Einklang zu bringen, dass Simulationen für das Verstehen notwendig sind. Andererseits zeigen durchaus einige Studien Einbußen im Verstehen, wenn das Simulieren der entsprechenden Sachverhaltsaspekte erschwert wird.

In einer Studie von Glenberg et al. (2008) bewegten Probanden zunächst ca. 20 min lang 600 Bohnen von einem Ausgangsbehälter mit großer Öffnung in einen Zielbehälter mit kleiner

Öffnung, wobei die Bewegung zum Zielbehälter dabei entweder eine Bewegung vom Körper weg oder eine Bewegung zum Körper hin implizierte. In einer zweiten Phase des Experiments lasen die Probanden dann Sätze, die wiederum entweder eine Bewegung zum Körper hin (vgl. 184) oder eine Bewegung vom Körper weg beschrieben (derselbe Satz mit *closed* statt *opened*). Es zeigte sich, dass diese Sätze langsamer als sinnvoll eingeschätzt werden konnten, wenn die beschriebene Bewegung der zuvor physikalisch durchgeführten Bewegung zum Zielbehälter entsprach, das motorische System für diese Bewegung also ermüdet war und nicht vollständig für die Simulation zur Verfügung stand. Würden mentale Simulationen für das Verstehen keine funktionale Rolle spielen, sollte die Zeit, die zum Verstehen der Sätze benötigt wird, unabhängig davon sein, ob die entsprechenden Bewegungen simuliert werden können oder nicht. Unklar bleibt bei dieser Erklärung allerdings, warum die Ermüdung nur die Bewegung zum Zielbehälter hin betroffen haben soll und nicht auch die ebenfalls wiederholt durchgeführte Rückbewegung zum Ausgangsbehälter. Möglicherweise hat dies damit zu tun, dass die Bewegung hin zum Zielbehälter aufgrund der relativ kleinen Öffnung präziser geplant und ausgeführt werden musste als die Rückbewegung. Auch wenn Effekte dieser Art als vielversprechend für den Simulationsansatz des Sprachverstehens zu werten sind, liegt ihnen doch ein relativ grobes Maß dafür zugrunde, wie gut das sprachliche Material verstanden wird. Für eine tatsächliche Absicherung einer kausalen Beziehung zwischen Verstehen und Simulation sind sicherlich weitere systematische Untersuchungen notwendig, die zeigen, dass unterschiedliche Aspekte des Sprachverstehens durch die Manipulation der experimentellen Situation beeinflusst werden können.

14.7 Sprachproduktion

Menschen können Sätze und Texte nicht nur mühelos verstehen, sie können sie auch in einer ungeheuren Geschwindigkeit produzieren. Menschen sprechen typischerweise mit einer Geschwindigkeit von bis zu 150 Wörtern pro Minute (Rauscher et al. 1996). Die Tatsache, dass bei einer solchen Geschwindigkeit immer wieder neue Ideen und Informationen kommuniziert werden können und dabei verhältnismäßig wenig Fehler passieren, zeigt in besonderem Maße, welch hochkomplexe Prozesse im Hintergrund agieren müssen.

Beim Sprachverstehen werden verschiedene Prozesse durchlaufen: von der Wahrnehmung des sprachlichen Stimulus bis hin zu dessen syntaktischer, semantischer und pragmatischer Analyse. Bei der Sprachproduktion ist man mit dem umgekehrten Problem konfrontiert. An erster Stelle steht bei der Produktion meist ein Gedanke, der kommuniziert werden soll. Dieser muss in ein sprachliches Format überführt werden. Dafür müssen die geeigneten Wörter und eine passende syntaktische Struktur ausgewählt werden. Meist gibt es mehrere Möglichkeiten, einen Gedanken oder eine **Botschaft** sprachlich zu formulieren; das bedeutet, es muss zwischen mehreren Alternativen auf der Wortebene (z. B. *Frau* vs. *Dame*), aber auch auf der syntaktischen Ebene (z. B. aktiv vs. passiv) gewählt werden. Schließlich muss der entsprechende Satz prosodisch korrekt artikuliert werden (Ferreira 1993; Wheeldon 2000; Wheeldon und Lahiri 1997). Es ist naheliegend anzunehmen, dass die Prozesse des Sprachverstehens und die der Sprachproduktion eng zusammenhängen. Dennoch wird in der Literatur oftmals strikt zwischen den beiden Prozessen getrennt. Erst in jüngster Zeit weisen immer mehr Autoren darauf hin, dass Verstehen und Produzieren nicht unabhängig voneinander zu erklären sind (z. B. Poeppel und Hickok 2004).

Obwohl die Sprachproduktion in ihrer Bedeutung für den Menschen dem Sprachverstehen sicherlich in nichts nachsteht, gibt es bis heute immer noch sehr viel mehr empirische Studien zum Verstehen als zum Produzieren sprachlicher Äußerungen (Harley 2013). Wie zu Beginn dieses Kapitels bereits erwähnt, hat dieses Ungleichgewicht vermutlich damit zu tun, dass sich der Sprachproduktionsprozess deutlich schlechter experimentell untersuchen lässt als der Sprachverstehensprozess. Bei der Untersuchung des Sprachproduktionsprozesses geht es in der Regel um die Frage, wie aus Gedanken sprachliche Äußerungen entstehen. Probanden bekommen typischerweise ein Bild vorgelegt und sollen dieses beschreiben. Wird hierbei nicht sehr konkret vorgegeben, wie der zu produzierende Satz aussehen soll, so werden in der Regel sehr unterschiedliche Sätze von den Probanden produziert. Es lässt sich einfach schwer kontrollieren, welche sprachlichen Äußerungen ein Mensch aus seinen Gedanken formuliert. Aber gerade diese Schnittstelle am Übergang zwischen Denken und Sprache macht die Forschung zur Sprachproduktion so grundlegend wichtig und interessant. Vielleicht ist die Sprachproduktion sogar der direkteste Zugang zu komplexeren menschlichen Denkprozessen, da die Produktion bestimmter sprachlicher Einheiten nur das direkte Resultat eines Denkprozesses sein kann (Von Stutterheim und Nüse 2003).

14.7.1 Aspekte der Produktionsforschung

Wie das Sprachverstehen kann auch die Sprachproduktion in mehrere Subprozesse unterteilt werden. Typischerweise werden in der Sprachproduktionsliteratur drei Subprozesse postuliert: die **Konzeptualisierung**, die **Formulierung** auf lexikalischer, syntaktischer und phonologischer Ebene sowie die **Artikulation** (Abb. 14.23). Diese drei Prozesse gehen direkt einher mit drei Fragen: Was möchte ich sagen? Wie kann ich diese Information in einen sinnvollen Satz verpacken? Wie spreche ich das aus? In der ersten Phase, der sogenannten Konzeptualisierungsphase, wird also entschieden, was kommuniziert werden soll. Dabei greift der Sprecher u. a. auf sein allgemeines Weltwissen, auf seine Gefühle, auf sein Wissen über die aktuelle Situation und sein Wissen über den Gesprächspartner zurück. Am Ende der Konzeptualisierungsphase liegt dem Sprecher eine präverbale Botschaft vor, die in der nachfolgenden Formulierungsphase in ein sprachliches Format gebracht wird (Levelt 1989). In dieser Phase müssen dann die entsprechenden Wörter ausgewählt und in eine korrekte syntaktische Struktur gebracht werden. Im letzten Schritt muss diese Nachricht externalisiert werden, z. B. durch Artikulation, Aufschreiben oder Gebärden. Hier wird deutlich: Sprachproduktion ist nicht gleichzusetzen mit Sprechen, auch Schreiben und Gebärden sind Formen der Sprachproduktion. Wie oben er-

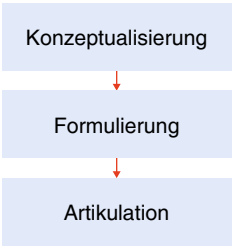


Abb. 14.23 Subprozesse der Sprachproduktion

wähnt gibt es insgesamt deutlich weniger Forschung zur Sprachproduktion im Vergleich zum Sprachverstehen. Innerhalb der Sprachproduktionsforschung gibt es nochmals deutlich weniger Forschung zu den Prozessen des Schreibens im Vergleich zum Sprechen. Tatsächlich unterscheidet sich die schriftlich verfasste Sprache deutlich von der gesprochenen Sprache (Akinnaso 1982; Chafe und Tannen 1987). Beim Schreiben werden beispielsweise häufig komplexere Strukturen und mehr Passivkonstruktionen verwendet (Drieman 1962; O'Donnell 1974), und in der Regel sind die verwendeten Wörter und Sätze bei geschriebener Sprache länger als bei gesprochener Sprache (Drieman 1962). Trotz dieser Unterschiede weiß man inzwischen allerdings auch, dass viele Prozesse bei geschriebener und gesprochener Sprache gleichermaßen ablaufen (z. B. Cleland und Pickering 2006).

In diesem Abschnitt werden wir uns hauptsächlich mit dem Sprechen und den zugrunde liegenden Mechanismen beschäftigen, da das Sprechen die primäre Form menschlicher Sprachproduktion darstellt. Zunächst werden wir jedoch auf zwei Aspekte der Produktionsforschung genauer eingehen, nämlich auf die Relevanz von Gesten bei der Sprachproduktion und auf das Phänomen der Versprecher. Danach wenden wir uns den verschiedenen Produktionsmodellen zu, wobei wir motorische Aspekte des Produktionsprozesses außer Acht lassen (▶ Kap. 13).

Gesten

Beobachtet man Menschen beim Sprechen, stellt man schnell fest, dass das Sprechen von spezifischer Mimik und Gestik begleitet wird. In der Sprachproduktionsforschung wurde diesen Aspekten lange Zeit wenig Beachtung geschenkt. Inzwischen gibt es jedoch erste Hinweise darauf, dass Gesten nicht nur ein irrelevantes Nebenprodukt der Sprachproduktion sind. Kinder benutzen Gesten zum Kommunizieren, bevor sie sprechen können, und es zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Fähigkeit, Gesten einzusetzen, und der darauffolgenden Sprachentwicklung (Gullberg et al. 2008; Iverson und Goldin-Meadow 2005). Kinder machen sich dabei Gesten zunutze, um Dinge zu kommunizieren, die sie noch nicht verbal ausdrücken können. Kennt das Kind z. B. den Namen eines Tieres nicht, möchte jedoch die Aufmerksamkeit seiner Mutter darauf lenken, zeigt es zu dem Tier. Auch wenn ein Kind bereits erste Wörter sprechen kann, nutzt es weiterhin Gesten, um Dinge auszudrücken, die es noch nicht verbal kommunizieren kann. Zeigt das Kind z. B. auf ein Tier und sagt „meins", entspricht die vermittelte Information einem Zwei-Wort-Kombination. Iverson und Goldin-Meadow (2005) konnten zeigen, dass Gesten die Vorstufe zur Sprachentwicklung darstellen und direkt der Entwicklung bestimmter sprachlicher Fähigkeiten vorausgehen (z. B. der Bildung von Zwei-Wort-Sätzen). Die genaue Funktion von Gesten bei der Sprachproduktion von Erwachsenen ist nach wie vor umstritten (Kendon 1997). Werden Gesten produziert, ohne dass dabei gesprochen wird, transportieren die Gesten auch bei Erwachsenen meist einen eigenen Informationsgehalt. Bei Gesten, die das Sprechen begleiten, ist deren Funktionsweise jedoch eher ungewiss.

In einem Experiment untersuchten Krauss et al. (1995), ob Gesten dem Zuhörer beim Verstehen helfen. Die Hälfte der Probanden sah ein Video einer Person, die ein abstraktes Symbol, ein Geräusch oder einen Tee verbal beschrieb und dabei gestikulierte. Die andere Hälfte der Probanden hörte nur die sprachliche Beschreibung und sah dabei kein Video. Den Probanden lagen mehrere Alternativen vor, aus denen sie den soeben beschriebenen Gegenstand auswählen sollten. Probanden, die eine Person sprechen und gestikulieren gesehen hatten, hatten dabei keinen Vorteil bei der Wahl des richtigen Gegenstands gegenüber Probanden, die nur die sprachliche Information bekommen hatten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Gesten in diesem Fall keinen zusätzlichen Informationsgehalt transportiert haben. Jedoch bedeutet dies nicht automatisch, dass Gesten irrelevant für die Sprachproduktion sind. Es gibt inzwischen Hinweise darauf, dass Gesten nicht dem Gegenüber beim Verstehen helfen, sondern dem Sprecher behilflich sind und bereits in der Konzeptualisierungsphase die Sprachproduktion unterstützen können (Alibali et al. 2000; Kita 2000; Kita und Özyürek 2003). Es gibt auch Hinweise darauf, dass Gesten unausgesprochene Gedanken reflektieren und damit einen direkten Zugang zu unseren Denkprozessen liefern (Goldin-Meadow und Alibali 2013). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass Gesten die kognitive Belastung beim Sprechen reduzieren und somit beim Sprechen mehr Kapazität für andere Aufgaben freimachen (Goldin-Meadow et al. 2001). Selbst Kinder, die von Geburt an blind sind, gestikulieren bei der Sprachproduktion (Iverson und Goldin-Meadow 1997), was ebenfalls darauf hinweist, dass Gesten mehr sind als nur ein Beiprodukt der Sprachproduktion oder nur kulturell begründet sind. Im Simulationsansatz geht man heute davon aus, dass Gesten das Resultat eines verkörperten Denkprozesses sind und direkt mit den Simulationsprozessen bei der Sprachverarbeitung in Verbindung stehen (Hostetter und Alibali 2008; ▶ Abschn. 14.6).

Heutzutage gehen die meisten Autoren also davon aus, dass Gesten eine funktionale Rolle bei der Sprachproduktion zukommt, wenn auch noch umstritten ist, welcher Art diese Rolle genau ist (Goldin-Meadow 1999; Goldin-Meadow und Alibali 2013). Dabei werden derzeit mehrere Funktionsweisen diskutiert (Überblick in Goldin-Meadow und Alibali 2013):

- Gesten helfen dem Sprecher bei der Produktion und führen ihn durch den Produktionsprozess.
- Gesten haben eine Funktion für den Zuhörer, sie vermitteln zusätzliche Information und erleichtern dabei das Verstehen.
- Beides ist der Fall.

Versprecher

Fehler beim Sprechen sind allgegenwärtig. Selbst professionelle Sprecher (z. B. Tagesschaumoderatoren) machen immer mal wieder einen Fehler. Jens Riewa moderierte einmal die „Lot-

tovorhersage“ an, Karl-Heinz-Köpcke sprach vom „Bundesaußenseiter Genscher“, und laut Dagmar Berghoff gewann Boris Becker das „WC-Turnier“. Ein sehr bekannter Versprechertyp ist der Freud'sche Versprecher. Hierbei werden Wörter in einen Satz eingebaut, die darin eigentlich gar nicht vorkommen sollten. In der Tiefenpsychologie wird argumentiert, dass diesen Versprechern oftmals unterdrückte Gedanken zugrunde liegen. Jedoch erwähnte bereits Freud (1901), dass die Analyse der Versprecher auch einen Einblick in die „vermutenden Gesetze der Sprachbildung verraten kann“.

Auch wenn man sich in der Sprachproduktionsforschung in erster Linie dafür interessiert, wie der Mensch Wörter, Phrasen, Sätze und Texte korrekt produziert, so liefern Versprecher doch sehr wichtige Anhaltspunkte hinsichtlich der verschiedenen Subprozesse bei der Sprachproduktion. Bei der wissenschaftlichen Analyse von Versprechern sammelt man typischerweise große Korpora gesprochener Sprache und analysiert darin vorkommende Versprecher. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts setzten sich die ersten Forscher mit der Sammlung von Versprechern auseinander (Meringer und Mayer 1895). Fromkin (1971) erstellte eine sehr detaillierte Klassifikation von Versprechern. Neben der Sammlung von Versprechern im Alltag und der Korpusanalyse haben sich später auch Methoden bewährt, mit denen man aktiv Versprecher provozieren kann.

Baars et al. (1975) führten eine Studie durch, in der die Probanden aufgefordert wurden, schnell Wortpaare vorzulesen. Dabei analysierten sie die typischen Versprecher. Wie bei der Analyse natürlicher Versprecher zeigte sich, dass Probanden dazu tendieren, beim Versprechen eher sinnhafte Wörter als unsinnige Wörter zu bilden. Diese Studie wird oft als ein Meilenstein in der Sprachproduktionsforschung betrachtet, da sie gezeigt hat, dass man Versprecher im Labor untersuchen kann (für eine Untersuchung im Deutschen vgl. Bröder und Bredenkamp 1996).

Versprecher können auf mehreren Dimensionen klassifiziert werden, und oftmals ist es schwer, einen Versprecher eindeutig einer Versprecherkategorie zuzuordnen. Auch die Kategorien, in die Versprecher eingeteilt werden, sind keineswegs unumstritten (Cherubim 1980; Fromkin 1971; Garnham et al. 1981; Leuninger 1999; Marx 2000). Versprecher können zum einen danach klassifiziert werden, welche sprachliche Einheit vom Versprechen betroffen ist. Versprecher können nämlich auf fast jeder sprachlichen Einheit vorkommen. Sie können die Phonem-, die Silben-, die Morphem-, die Wort-, die Phrasen- oder die Satzebene betreffen. Des Weiteren kann klassifiziert werden, welcher Prozess einem Fehler unterliegt. Typische Fehlerprozesse sind die Substitution (Ersetzung), die Kontamination (Überblendung), die Antizipation (Vorwegnahme), die Perseveration (Nachklingen), die Transposition oder Methathesis (Umstellung), die Omission (Auslassung) und die Addition (Hinzufügung) (Fromkin 1971; Harley 1984, 2013). Fast jeder dieser Fehlertypen kann auf jeder sprachlichen Ebene vorkommen. Ein typischer Versprecher der Transpositionskategorie ist der **Spoonerismus**. Hier werden Morpheme oder Phoneme am Wortanfang vertauscht, wobei typischerweise neue Wörter und eine oftmals amüsante Satzbedeutung entstehen (vgl. 188 und 189). Ein Satz mit Versprecher ist hier und im Folgenden markiert durch hochgestelltes Fragezeichen.

(188) *The Lord is a loving shepherd.*
(189) *?The Lord is a shoving leopard.*

Jeder Versprecher deutet darauf hin, dass beim Produktionsprozess etwas schiefgelaufen ist. Aus den Fehlern, die während des Sprechens auftreten, lassen sich demnach Schlussfolgerungen hinsichtlich der Subprozesse bei der Produktion ziehen. Das Wissen darüber, welche Arten von Versprechern auftreten, z. B. die Vertauschung von Nomen in (191) im Vergleich zu (190), und insbesondere auch das Wissen darüber, welche Arten von Versprechern nicht auftreten, z. B. die Vertauschung von Inhalts- und Funktionswörtern in (192), bildeten den Ausgangspunkt für die Entwicklung aller heutigen Sprachproduktionsmodelle (Dell 1986).

(190) *Ich schrieb einen Brief an meine Mutter.*
(191) *?Ich schrieb eine Mutter an meinen Brief.*
(192) *(?Ich schrieb einen an Brief meine Mutter.)*

In der Forschung zu Versprechern bei der Sprachproduktion wurde auch untersucht, ob und wie häufig Menschen ihre Fehler bei der Produktion korrigieren. Es zeigte sich, dass mehr als die Hälfte der eigenen Fehler während des Sprechens bemerkt und im Anschluss korrigiert wird. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass es einen **Monitoring**-Prozess gibt, der das sprachliche System bei der Sprachproduktion überwacht und gegebenenfalls eine Korrektur veranlasst (Levelt 1983; Überblick in Postma 2000).

14.7.2 Sprachproduktionsmodelle

Sprachproduktionsmodelle können hinsichtlich verschiedener Gesichtspunkte klassifiziert werden. Bedauerlicherweise hat sich bis heute keine eindeutige Klassifizierung durchsetzen können (Herrmann 2003). Ein grundlegender Aspekt, der alle Sprachproduktionsmodelle betrifft, ist die Frage nach der Autonomie der einzelnen Verarbeitungsstufen, die im Produktionsprozess durchlaufen werden.

Autonome Modelle sind durch **Modularität** gekennzeichnet. Hier wird davon ausgegangen, dass der Sprachproduktion autonome, d. h. in sich abgeschlossene, Verarbeitungsstufen zugrunde liegen, die als eigenständige Module jeweils für eine spezifische Aufgabe bei der Satzproduktion zuständig sind. Diese Verarbeitungsstufen werden dabei für eine in den Modellannahmen festgelegte sprachliche Einheit (z. B. Wort, Phrase, Satz) nacheinander durchlaufen. Eine neue Verarbeitungsstufe wird erst dann erreicht, wenn die vorausgehende Verarbeitungsstufe abgeschlossen ist. Am Ende dieser Abfolge steht der sprachliche Output, also der gesprochene Satz.

Ein klassisches Beispiel für autonome Modelle sind die im Folgenden besprochenen *seriellen Modelle* der Sprachproduktion, in denen eine sprachliche Einheit (im extremsten Fall ein kompletter Satz) in jeder Verarbeitungsstufe vollständig verarbeitet wird, bevor die Einheit an die nächste Verarbeitungsstufe weitergeleitet wird. Aber auch *inkrementelle Modelle* der Sprachproduktion können als autonome Modelle betrachtet werden.

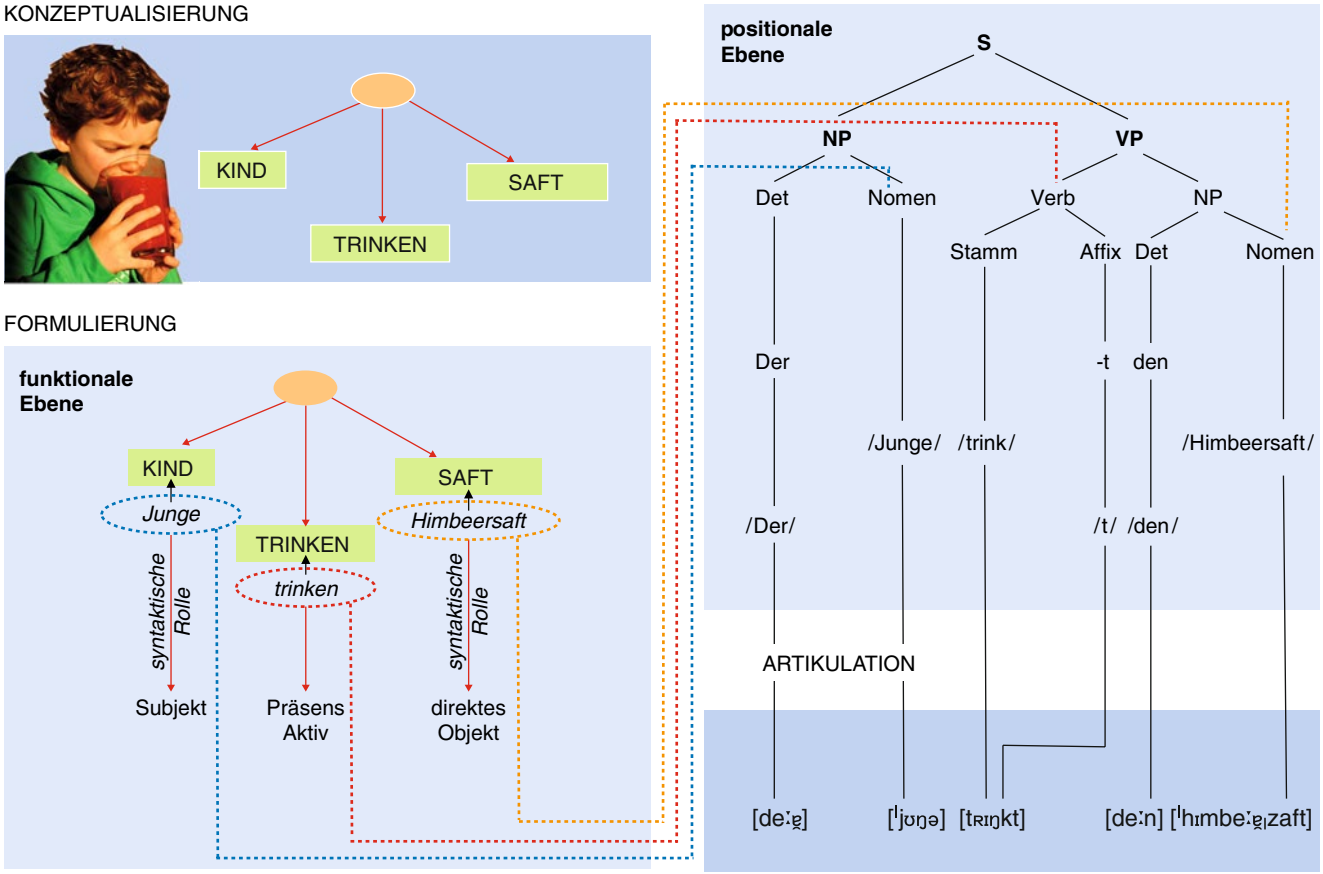


Abb. 14.24 Auf der der ersten Stufe (Konzeptualisierung) werden die Propositionen bestimmt, und eine präverbale, konzeptuelle Repräsentation der Botschaft liegt vor. Die Formulierung ist in eine funktionale und positionale Ebene geteilt. Auf der funktionalen Ebene werden die Inhaltswörter ausgewählt und den syntaktischen Rollen zugewiesen. Auf der positionalen Ebene wird der syntaktische Strukturbaum erstellt, die zuvor ausgewählten Inhaltswörter werden nun ihren Positionen im Satz zugewiesen, und die Funktionswörter werden ausgewählt. Im Anschluss werden die Inhalts- und die Funktionswörter in ihre phonologische Repräsentationen überführt. Am Ende des Produktionsprozesses werden die phonologischen Repräsentationen in konkrete phonetische Repräsentation überführt und artikuliert (Angelehnt an Barsalou 2014)

Hier können zwei sprachliche Einheiten zwar gleichzeitig in verschiedenen Verarbeitungsstufen bearbeitet werden, jedoch sind die einzelnen Verarbeitungsstufen in sich abgeschlossen, und es findet kein interaktiver Austausch zwischen den Verarbeitungsstufen statt.

Den autonomen Modellen der Sprachproduktion stehen die sogenannten *interaktiven Modelle* der Sprachproduktion gegenüber. Die zentrale Annahme dieser Modelle besagt, dass die unterschiedlichen Verarbeitungsstufen in ständigem gegenseitigen Austausch stehen. Dabei kann fast jede Verarbeitungsstufe von fast jeder anderen Verarbeitungsstufe beeinflusst werden.

Serielle Modelle

Fromkin (1971) entwickelte als Nebenprodukt ihrer Untersuchungen menschlicher Versprecher eines der ersten Modelle der Sprachproduktion. Die Sprachproduktion wird hier als ein serieller Prozess beschrieben, in dem mehrere Stufen nacheinander durchlaufen werden müssen.

Aufbauend auf Fromkins Analysen erstellte Garrett (1975) das wohl einflussreichste Prozessmodell der Sprachproduktion, das mit seinen drei autonomen Stufen die Grundlage für alle weiteren Sprachproduktionsmodelle lieferte. Ebenso wie Fromkins (1971) Modell basiert Garretts (1975) Modell auf der Analyse und Kategorisierung von Versprechern, die auf potenzielle Subprozesse bei der Produktion hinweisen. Darüber hinaus analysierte Garrett (1992) auch Verzögerungen im Sprachfluss und aphasische Störungsbilder.

Garrett (1975) unterscheidet mehrere modulare Verarbeitungsstufen, die strikt seriell durchlaufen werden. Wichtig ist die Annahme, dass nachgeordnete Verarbeitungsstufen keinerlei Informationen an die vorausgehenden Stufen zurückmelden (Abb. 14.24). Die erste Stufe ist die Konzeptualisierungsstufe, auf der die präverbale Botschaft erzeugt wird. Hier wird je nach Situation und Sprechanlass entschieden, was kommuniziert werden soll. Am Ende der Konzeptualisierung liegt eine propositionale Struktur der Äußerung vor. Auf dem Weg zur resultierenden sprachlichen Äußerung folgen dann weitere Verarbeitungsstufen, die unabhängig von äußeren und kontextuellen Einflüssen durchlaufen werden. Damit bestimmt allein die präverbale Botschaft die resultierende Sprachäußerung. Gefolgt wird die Konzeptualisierungsstufe von einer semantisch-syntaktischen Verarbeitungsstufe, auf der die gesamte syntaktische Struktur der Äußerung festgelegt wird und die einzelnen Wörter ausgewählt werden, mit denen die Blätter des syntaktischen Strukturbaumes befüllt werden. Diese Stufe ist in zwei getrennte Ebenen unterteilt: die funktionale und die positionale Ebene. Auf der

funktionalen Ebene werden die Inhaltswörter des Satzes ausgewählt, der syntaktische Rahmen für das Verb mit seinen Subkategorisierungseigenschaften wird abgerufen, und die Inhaltswörter werden den entsprechenden syntaktischen Funktionen (Subjekt, Objekt etc.) zugewiesen. Es liegt zu diesem Zeitpunkt eine Art abstrakte Satzrepräsentation vor. Im Anschluss wird auf der *positionalen Ebene* mithilfe der abstrakten Satzrepräsentation der Phrasenstrukturbaum konstruiert und der Satz in eine positional geordnete Struktur gebracht. Hier werden nun die Funktionswörter des Satzes ausgewählt und gemeinsam mit den bereits vorliegenden Inhaltswörtern den entsprechenden Stellen im Strukturbaum zugeordnet. Auf der positionalen Ebene wird schließlich auch die Lautstruktur der Äußerung geplant. Final wird auf der Artikulationsstufe die Aussprache des zuvor spezifizierten Satzes gesteuert.

Laut Garrett (1975) werden auf jeder Verarbeitungsstufe bestimmte Aspekte der sprachlichen Äußerung spezifiziert. Die entsprechenden Informationen stehen dann nur auf der jeweiligen Stufe zur Verfügung. Bei der Sprachproduktion können laut Garrett demnach nur solche Informationen vertauscht oder vermischt werden, die auf derselben Verarbeitungsstufe spezifiziert werden. Wie oben erwähnt, werden die Inhaltswörter einer Äußerung auf der funktionalen Ebene ausgewählt und dort ihren entsprechenden syntaktischen Funktionen zugewiesen (z. B. Subjekt, Objekt). Funktionswörter hingegen werden erst auf der positionalen Ebene ausgewählt. Es ergibt sich also die Vorhersage, dass zwei Inhaltswörter versehentlich vertauscht werden könnten. Eine Vertauschung zwischen Inhalts- und Funktionswörtern hingegen sollte nicht vorkommen.

Die Forschung zu Versprechern bei der Sprachproduktion liefert tatsächlich Belege für diese Vorhersage. Bei der Wortvertauschung wird oftmals ein Wort mit einem anderen derselben Wortkategorie vertauscht (z. B. *David trinkt Kuchen und isst dabei Milch*). Dies geschieht laut Garrett (1975) auf der funktionalen Ebene, auf der die Inhaltswörter ausgewählt werden (z. B. *David*, *Milch*, *Kuchen*). Dabei werden vor allem Wörter derselben Kategorie vertauscht (z. B. ein Objekt mit einem anderen Objekt), was sich damit erklären lässt, dass auf dieser Verarbeitungsstufe die Wörter ihren syntaktischen Funktionen zugeordnet werden. Konsistent mit der postulierten Trennung in eine funktionale und eine positionale Ebene bei der Sprachproduktion kommt es hingegen fast nie zu einem Fehler wie in (194), also zu einer Vertauschung zwischen Funktions- und Inhaltswort im korrekten Satz (vgl. 193).

(193) *Die Katze geht nach Hause.*
(194) *(*Die Katze nach geht Hause.)*

Bei Vertauschungen von Inhaltswörtern spielt demnach nicht die Nähe der Wörter im Satz zueinander eine Rolle; es werden nicht Wörter vertauscht, die im Satz direkt aufeinander folgen, sondern Wörter, die eine ähnliche syntaktische Funktion haben, was zu der Hypothese passt, dass Inhaltswörter auf der funktionalen Ebene ausgewählt und ihren syntaktischen Funktionen zugewiesen werden. Bei anderen Arten von Fehlern, z. B. bei der Lautvertauschung, spielt die Position im Satz bzw. die Oberflächennähe jedoch eine deutliche Rolle. So werden Laute typischerweise eher innerhalb einer Phrase vertauscht (z. B. *leckt schmecker* statt *schmeckt lecker*), was zu der Hypothese passt, dass die lautliche Spezifizierung der sprachlichen Äußerung auf der positionalen Ebene erfolgt. Dabei wird ein ähnlicher Mechanismus wie bei der Wortvertauschung propagiert: Bei der Generierung der phonologischen Struktur des Satzes wird eine Stelle, die z. B. für einen Konsonanten vorgesehen ist, mit einem Konsonanten befüllt, der eigentlich für eine andere Stelle vorgesehen war.

Als problematisch hat sich mittlerweile jedoch die Annahme erwiesen, dass der Sprachproduktionsprozess streng seriell erfolgt und die gesamte **syntaktische Planung** einer Äußerung abgeschlossen ist, bevor mit der Artikulation begonnen wird. Generell lassen sich Serialitätsannahmen immer nur für eine festgelegte sprachliche Einheit untersuchen (z. B. Satz oder klausale Einheit), weshalb generelle Schlussfolgerungen bezüglich Serialität im Produktionsprozess ohnehin problematisch sind (vgl. auch McClelland 1979). Problematisch für Garretts (1975) Modell sind auch die Freud'schen Versprecher, bei denen es zu Vertauschungen von Informationen kommt, die aus unterschiedlichen Verarbeitungsstufen stammen. Beim Freud'schen Versprecher kommt typischerweise ein unterdrückter oder eigentlich vermiedener Gedanke aus Versehen zum Ausdruck. Dies zeigt, dass auch nach abgeschlossener Konzeptualisierung, Intentionen und Gedanken den Produktionsprozess weiterhin beeinflussen können. Fehler dieser Art sprechen dafür, dass mehrere Verarbeitungsstufen gleichzeitig aktiv sein und sich auch gegebenenfalls gegenseitig beeinflussen können. Auch kommt es gelegentlich zu einer Vertauschung von ganzen Sätzen, was ebenfalls gegen die Annahme zu sprechen scheint, dass diese am Ende der Konzeptualisierungsphase präverbal spezifiziert sind und dann rein seriell durch die einzelnen Verarbeitungsstufen geschoben werden.

Inkrementelle Modelle

Levelt und Bock (Bock 1982; Levelt 1989; Bock und Levelt 1994) entwickelten inkrementelle Modelle der Sprachproduktion, die den gleichzeitigen Ablauf mehrerer Verarbeitungsstufen erlauben. Im Gegensatz zu Garretts (1975) Modell steht die syntaktische Struktur einer Äußerung in diesen Modellen nicht zu Beginn des Artikulationsprozesses fest. Die syntaktische Struktur bildet sich erst im Laufe des Artikulationsprozesses; man spricht deshalb von einer inkrementellen Erzeugung der syntaktischen Struktur. Eine Grammatik, die eine solche inkrementelle Erzeugung der syntaktischen Struktur erlaubt, wurde von Kempen und Hoenkamp (1987) entwickelt. Mit dieser Inkrementellen Prozeduralen Grammatik (IPG) können einzelne Satzeinheiten parallel und unabhängig voneinander vorbereitet und später entsprechend spezifizierter Regeln zusammengefügt werden.

Wie oben bereits erwähnt wurde, handelt es sich bei dem Modell von Levelt (1989) auch um ein modularisiertes Modell der Sprachproduktion. Jedes Subsystem ist spezialisiert auf eine oder mehrere spezifische Aufgaben, die autonom bearbeitet werden. Interessanterweise ist hierbei trotz der Modularität eine inkrementelle Produktion möglich. Das bedeutet z. B., dass ein Teil des Satzes bereits aus der Konzeptualisierungsebene in die Formulierungsebene weitergeleitet worden sein kann, wobei ein anderer Teil des Satzes noch in der Konzeptualisierungsphase ist (Abb. 14.25). Es muss also nicht die gesamte Äußerung auf einer Verarbeitungsstufe abgeschlossen sein, bevor die nächste

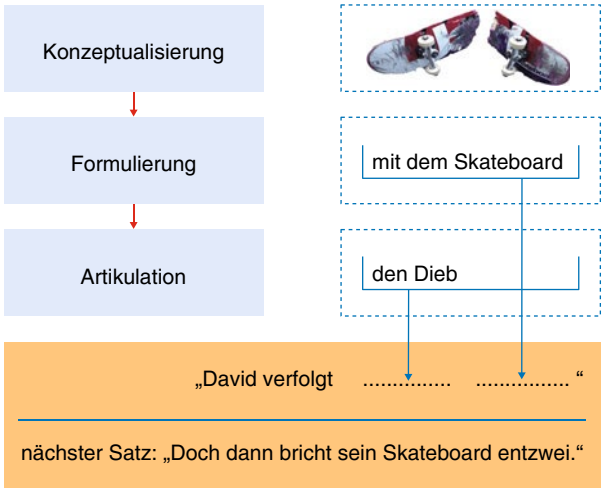


Abb. 14.25 Produktionsmodell. (Nach Levelt 1989)

Verarbeitungsstufe erreicht werden kann. Deshalb kann sich die syntaktische Struktur im Verlauf des Produktionsprozesses schrittweise entwickeln. Ebenso kann eine neue Äußerung bereits konzeptualisiert werden, während sich eine vorausgehende Äußerung noch in der Formulierungs- und Artikulationsphase befindet. Ein zentraler Aspekt eines solchen Modells ist immer die Frage danach, welche Informationseinheit zusammenhängend geplant und durch den Produktionsprozess geleitet wird. Levelt postuliert, dass ein phonologisches Wort, d. h. die Sequenz von Phonemen, die ohne Sprechpause zusammenhängend ausgesprochen wird, zusammenhängend vorausgeplant wird.

Wichtig zu beachten ist dabei, dass inkrementelle Modelle immer noch von einer Serialität des Sprachproduktionsprozesses ausgehen: Eine einzelne Satzeinheit wird seriell durch das Produktionssystem geleitet und nicht gleichzeitig auf mehreren Stufen verarbeitet (vgl. auch McClelland 1979). Insgesamt sieht das Modell drei Subprozesse der Sprachproduktion vor: Konzeptualisierung, Formulierung und Artikulation.

Im Vergleich zu Garrett (1975) macht Levelt (1989) einige konkretere Aussagen zur Konzeptualisierungsphase. Er unterscheidet zwischen einer Makro- und einer Mikroplanungsebene in der Konzeptualisierungsphase. Während der Makroplanung wird die Sprechabsicht festgelegt, entsprechende Informationen und Wissen werden ausgewählt und gegebenenfalls Unterziele definiert. In der Mikroplanung wird festgelegt, was im Fokus der Aussage stehen soll, und der zu kommunizierenden Information werden propositionale Strukturen zugeordnet. Am Ende der Mikroplanungsphase liegt eine präverbale Botschaft im propositionalen Format vor. Die Aufgaben der Formulierungsphase sind vergleichbar mit denen der syntaktischen Verarbeitungsstufe in Garretts Modell: In der Formulierungshase werden die individuellen Wörter durch Zugriff auf das mentale Lexikon ausgewählt und in eine grammatisch korrekte Struktur gebracht. Danach findet laut Levelt die phonologische Enkodierung statt. In der finalen Artikulationsphase werden die Wörter in der richtigen Reihenfolge durch entsprechende Muskelaktivität des artikulatorischen Systems wiedergegeben.

Das inkrementelle Modell von Levelt (1989) kann viele Phänomene der menschlichen Sprachproduktion erklären und passt insbesondere auch sehr gut zu der Tatsache, dass Menschen sprachliche Äußerungen ohne große Unterbrechungen produzieren können. Nicht unumstritten ist jedoch die Annahme geblieben, dass der Sprachproduktionsprozess durch eine strenge Modularität einzelner Verarbeitungsstufen gekennzeichnet ist.

■ Interaktive Modelle (Aktivierungsausbreitungsmodelle)

Bei der Analyse von Versprechern zeigt sich ein Phänomen, das auf eine Wechselwirkung der – nach den soeben beschriebenen Modellen – modularisierten Verarbeitungsstufen hindeutet: Wörter, die sowohl semantisch als auch phonologisch (*rat*) mit dem korrekten Wort (*cat*) verwandt sind, haben eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit beim Versprechen als Wörter, die nur semantisch (*dog*) oder nur phonologisch (*mat*) ähnlich zu dem eigentlichen Wort sind (Dell und Reich 1981). Dell (1986) nahm dies zum Anlass, ein interaktives, hierarchisches Netzwerkmodell der Sprachproduktion zu entwickeln, das in der Tradition des Modells von McClelland und Rumelhart (1981) zu sehen ist. Hierbei handelt es sich um ein konnektionistisches Modell der Sprachproduktion, das Sprachproduktion als einen hoch interaktiven Prozess beschreibt. Eine genaue Beschreibung dieses komplexen Modells würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Der Leser sei auf die detaillierten Ausführungen in Dell (1986) verwiesen.

■ Inkrementalität

Ein zentrales Thema in der Forschung zur Sprachproduktion betrifft die Frage nach der Inkrementalität des Sprachproduktionsprozesses. Hierbei wird debattiert, ob bei der Produktion einzelne Spracheinheiten sofort ausgedrückt werden, sobald diese fertig geplant und vorbereitet sind, oder erst eine größere syntaktische Einheit geplant werden muss, die dann zusammenhängend ausgesprochen werden kann. Konkret würde das bedeuten, dass bei einer inkrementellen Vorgehensweise mit dem Sprechen begonnen wird, noch bevor alle Teile einer Äußerung oder eines Satzes fertig geplant und vorbereitet sind (Kempen und Hoenkamp 1987). Wie bereits erklärt wurde, gehen inkrementelle Modelle der Sprachproduktion davon aus, dass einzelne Verarbeitungsstufen im Sprachproduktionsprozess gleichzeitig ablaufen können. So kann z. B. ein Teil einer Äußerung konzeptualisiert werden, während ein anderer bereits artikuliert wird.

Es gibt inzwischen eine Vielzahl an Untersuchungen zur Inkrementalität bei der Sprachproduktion, die überwiegend darauf hindeuten, dass Sprache inkrementell produziert wird (Überblick in Wheeldon 2012). Wheeldon und Lahiri (1997) führten eine Studie durch, in der Probanden eine Phrase präsentiert bekamen (*das Wasser*) gefolgt von einer Frage (*Was suchst du*?). Die Probanden sollten die Frage so schnell wie möglich beantworten und dabei die vorab präsentierte Phrase verwenden. Die richtige Antwort wäre in diesem Fall *Ich suche das Wasser*. In dieser Untersuchung wurde die Zeit analysiert, die Probanden brauchten, bis sie begannen, das erste Wort auszusprechen. Levelts (1989) inkrementelles Modell der Sprachproduktion würde vorhersagen, dass die Zeit bis zum Beginn des Sprechens von der Komplexität des ersten phonologischen Wortes im Satz abhängen sollte. Genau dies zeigte sich auch: Probanden begannen umso schneller zu sprechen, je weniger komplex die erste phonologische Einheit in der Antwort war. Im Gegensatz dazu hing die Zeit bis zum

Beginn des Sprechens nicht von der Anzahl der phonologischen Wörter im Satz ab. Diese Befunde sprechen dafür, dass die erste phonologische Einheit unabhängig vom restlichen Verlauf des Satzes geplant und artikuliert wird, was auf Inkrementalität bei der Produktion hindeutet. Smith und Wheeldon (1999) zeigten ebenfalls durch die Analyse der benötigten Zeit, bis Probanden einen Satz (Bildbeschreibung) initiierten, dass die Komplexität der ersten Phrase den größten Einfluss auf die Zeit bis zum Sprechbeginn hat. Jedoch zeigte sich auch, dass etwas Zeit vor Sprechbeginn auch der zweiten Phrase gewidmet ist. Dies deutet darauf hin, dass zwar mit dem Sprechen begonnen wird, bevor die gesamte Äußerung vollständig geplant ist, dass aber mit der Planung mancher Satzelemente jenseits der ersten Phrase bereits vor Sprechbeginn der ersten Phrase begonnen wird.

Griffin (2001) zeigte Probanden drei Bilder (z. B. ein Auto [A]; eine Hand [B]; einen Trinkbehälter [C]), wobei die Probanden einen Satz der Art *Das Auto und die Hand sind über dem Becher* produzieren sollten. Dabei wurde variiert, ob es für die zuletzt zu benennenden Gegenstände (B und C) jeweils nur eine geläufige Benennung gibt (z. B. *Hand*) oder ob aus einer Anzahl an Alternativen ausgewählt werden muss (so kann das Bild eines Trinkbehälters als *Tasse* oder *Becher* bezeichnet werden). Des Weiteren wurde die Häufigkeit der dominanten Bezeichnung für die Objekte B und C systematisch manipuliert. Bei manchen Objekten war die dominante Bezeichnung ein generell häufig verwendetes Wort, bei anderen ein eher selten verwendetes Wort. Es zeigte sich, dass Probanden länger auf Objekte schauten, für die es mehrere mögliche Bezeichnungen gab und deren dominante Bezeichnung ein selten verwendetes Wort war. Es zeigte sich jedoch kein Einfluss der Eindeutigkeit der Benennung oder der Worthäufigkeit auf die Zeit bis zum Sprechbeginn der ersten Phrase (Benennung von Objekt A). Das heißt, die Artikulation der ersten Phrase wurde immer gleich schnell initiiert, unabhängig von der Schwierigkeit der Wortselektion in den darauffolgenden Phrasen. Griffin schlussfolgerte, dass die Wortselektion bei der Satzproduktion und die phonologische Encodierung inkrementell ablaufen können.

Auch in Augenbewegungsstudien konnten Hinweise auf Inkrementalität bei der Satzproduktion gefunden werden. Griffin und Bock (2000) zeigten Probanden visuelle Szenen (z. B. eine Szene, in der ein Hund einen Postboten verfolgt), wobei es die Aufgabe der Probanden war, diese Szenen in einem Satz zu beschreiben. Es zeigte sich, dass Probanden etwas weniger als 1 s vor dem Aussprechen eines Wortes (z. B. *Hund*) auf dem Bild den entsprechenden Referenten fixierten. Das heißt, die Probanden fixierten während der Satzproduktion nach und nach die Referenten auf dem Bild, und zwar genau in der Reihenfolge, wie sie im Satz auftraten. Die Autoren schlussfolgerten, dass dies für eine inkrementelle Vorgehensweise bei der Wahl der einzelnen Wörter bei der Satzproduktion spricht.

Ferreira (1996) untersuchte die Inkrementalität bei der Sprachproduktion anhand von syntaktischer Flexibilität. Er konnte zeigen, dass es für Probanden einfacher ist, einen Satz zu bilden, wenn es mehrere Möglichkeiten gibt, diesen Satz zu formulieren, wenn also eine gewisse syntaktische Flexibilität gegeben ist. Der Einfluss syntaktischer Flexibilität wurde anhand von Verben untersucht, die im Englischen nur eine oder zwei Satzstrukturen zulassen. Zum Beispiel erlaubt das Verb *to give* sowohl eine doppelte Objektstruktur ohne zusätzliche Präposition (vgl. 195) als auch einen präpositionalen Dativ (vgl. 196). Im Gegensatz dazu erlaubt das Verb *to donate* nur die Verwendung des präpositionalen Dativs (vgl. 197 vs. 198).

(195) *I gave the children the toys.*
(196) *I gave the toys to the children*
(197) *I donated the toys to the children.*
(198) **I donated the children the toys.*

Ferreira gab den Probanden den Beginn eines Satzes vor, z. B. *I gave …* oder *I donated …* Kurz danach präsentierte er Wörter, mit denen der Satz vervollständigt werden sollte, z. B. *children* und *toys*. Es zeigte sich, dass Probanden Sätze schneller initiierten, wenn diese auf mehrere Arten vervollständigt werden konnten. Müsste die syntaktische Struktur vor Sprechbeginn festliegen, so hätte man laut Ferreira eher mit einer Verzögerung bei syntaktischer Flexibilität rechnen können, denn dann hätte die Wahl zwischen den Alternativen vor Sprechbeginn stattfinden müssen, und dies hätte zusätzliche Zeit in Anspruch nehmen sollen. Ferreira interpretiert das Ergebnis seines Experiments demnach als Evidenz für die Annahme, dass bei der Sprachproduktion inkrementell vorgegangen wird.

Die Tatsache, dass syntaktische Flexibilität sogar zu einem beschleunigten Sprechbeginn führt, interpretiert er so, dass Sprecher im Fall von syntaktischer Flexibilität einfach das Objektnomen als Erstes aussprechen können, das am stärksten aktiviert ist, und dann die syntaktische Struktur in Nachhinein anpassen können. Ist also beispielsweise *toys* stark aktiviert, kann (197) produziert werden, ist hingegen *children* verfügbarer, wird (195) produziert. Im Gegensatz dazu muss bei fehlender Flexibilität gegebenenfalls das korrekte Nomen erst stark genug aktiviert werden, bevor mit dem Aussprechen des ersten Objektnomens begonnen werden kann. In (197) könnte erst mit dem Aussprechen des ersten Objektnomens begonnen werden, wenn *toys* auch entsprechend verfügbar ist.

Tatsächlich werden Ferreiras (1996) Ergebnisse in der Literatur immer wieder als Hinweis für Inkrementalität bei der Sprachproduktion interpretiert, da die schnelle Wahl des ersten Objektnomens im Falle von syntaktischer Flexibilität dafür zu sprechen scheint, dass Sprecher die syntaktische Struktur je nach gewähltem Nomen dynamisch anpassen können. Kritisch anzumerken ist hierbei allerdings, dass die Ergebnisse auch mit einer schnelleren Planung vor Sprechbeginn im Falle der syntaktischen Flexibilität erklärt werden könnten.

Eine zentrale Frage, die direkt mit der Inkrementalitätsfrage bei der Satzproduktion zusammenhängt, ist, welche Aspekte einer Äußerung (semantisch, phonologisch etc.) bei der Satzproduktion vor Sprechbeginn vorausgeplant werden. In einem strikt seriellen Modell, das keinerlei Gleichzeitigkeit zulässt, müssten alle relevanten Informationen vor Sprechbeginn für den kompletten Satz vorliegen. Wie erwähnt, deuten jedoch eine Vielzahl an Studien darauf hin, dass bei der Satzproduktion inkrementell vorgegangen wird und noch nach Sprechbeginn Teile des Satzes geplant und zur Artikulation vorbereitet werden. Meyer (1996) untersuchte, wie weit Sprecher bei der Satz- oder Phrasenproduktion vorausplanen. Probanden mussten einfache Phrasen oder

Sätze generieren, die jeweils zwei Nomen enthielten. Sie sahen Bilder von zwei Objekten und sollten auf dieser Grundlage eine Phrase (z. B. *ein Knochen und eine Schnecke*) oder einen Satz (z. B. *Der Knochen ist neben der Schnecke*) bilden. Dabei wurden Distraktoren auditiv präsentiert, die entweder semantisch oder phonologisch ähnlich zum ersten oder zum zweiten Nomen in dem zu generierenden Satz waren (vgl. 199).

(199) *Der Knochen ist neben der Schnecke* [Muskel: semantischer Distraktor Nomen_1; Knospe: phonologischer Distraktor Nomen_1; Affe: semantischer Distraktor Nomen_2; Schere: phonologischer Distraktor Nomen_2]

Es zeigte sich, dass die Zeit, bis die Probanden mit dem Sprechen begannen, immer dann verlängert war, wenn der Distraktor semantisch ähnlich zum ersten oder zum zweiten Nomen war, und auch dann, wenn eine phonologische Ähnlichkeit zum ersten Nomen bestand. Dies deutet darauf hin, dass semantische Informationen bereits vor dem Sprechbeginn vorliegen, und zwar für mehr als nur die erste Einheit im Satz. Im Gegensatz dazu scheinen phonologische Informationen nicht für alle Einheiten im Satz vor Sprechbeginn vorzuliegen.

In Anlehnung an die Studie von Meyer (1996) untersuchten Wagner et al. (2010), ob der Einfluss, den ein semantischer Distraktor auf die Dauer bis zum Sprechbeginn hat, durch eine Nebenaufgabe modifiziert werden kann. Ziel ihrer Studie war es zu analysieren, ob es einer gewissen Flexibilität unterliegt, welche Einheiten bei der Sprachproduktion vorausgeplant werden. Probanden sahen Bilder mit zwei Objekten, die nebeneinander angeordnet waren. Sie wurden instruiert, entweder einen einfachen Satz wie in (200) oder einen komplexen Satz wie in (201) zu formulieren.

(200) *Der Frosch ist neben der Tasse.*
(201) *Der blaue Frosch ist neben der blauen Tasse.*

Zeitgleich zu den Bildern wurde ein Distraktor auditiv präsentiert, der entweder ähnlich oder unähnlich zum ersten Nomen (z. B. *Kröte* vs. *Tuba*) oder zum zweiten Nomen (z. B. *Becher* vs. *Socke*) war. Zusätzlich mussten die Probanden unterschiedliche Nebenaufgaben lösen: entweder eine Aufgabe, die das Arbeitsgedächtnis beanspruchte, oder eine Aufgabe, in der entschieden werden musste, ob die dargestellten Objekte größer oder kleiner sind als ein vorgegebener Standard. Wenn bei der Satzproduktion unabhängig von der Komplexität vorausgeplant werden muss, bevor mit dem Sprechen begonnen werden kann, dann sollte sich in diesem Experiment kein Einfluss der Nebenaufgabe auf die Wirkung des Distraktors zeigen. Es zeigte sich jedoch, dass der Distraktor bei komplexen Sätzen je nach Nebenaufgabe unterschiedlich wirkte. Vor allem der zum zweiten Nomen ähnliche Distraktor beeinflusste nicht immer die Sprachproduktion. Das deutet darauf hin, dass Menschen je nach kognitiver Belastung sehr flexibel darin sind, bis zu welcher Einheit sie bei der Produktion von Sätzen vorausplanen (vgl. auch van de Velde et al. 2014). Darüber hinaus wurde auch gezeigt, dass sich eine Arbeitsgedächtnisbelastung auf die Wahl der syntaktischen Struktur auswirken kann (Slevc 2011).

Auch Ferreira und Swets (2002) untersuchten, unter welchen Voraussetzungen die Sprachproduktion inkrementell abläuft. Probanden bekamen Rechenaufgaben unterschiedlicher Schwierigkeit vorgelegt und wurden angewiesen, das Ergebnis auf standardisierte Weise zu berichten, nämlich (1) indem sie nur das Ergebnis nannten, (2) indem sie das Ergebnis in den Satz *... ist das Ergebnis* oder (3) indem sie das Ergebnis in den Satz *Das Ergebnis ist ...* einbauten. Es zeigte sich, dass für alle drei Möglichkeiten, das Ergebnis mitzuteilen, die Dauer bis zum Sprechbeginn identisch war und nur von der Schwierigkeit des Problems abhing. Die Dauer der Äußerung an sich war nicht beeinflusst durch die Schwierigkeit des Problems. Demnach warteten die Probanden offensichtlich, bis sie das Problem gelöst hatten, bevor sie mit dem Sprechen begannen. Jedoch zeigte sich in einem zweiten Experiment klare Evidenz für ein inkrementelles Vorgehen beim Sprechen. Hier wurden die Probanden unter Zeitdruck gesetzt. Es wurde ein Zeitpunkt festgelegt, bis zu dem die Probanden mit dem Sprechen begonnen haben mussten. In dem Fall zeigte sich, dass sowohl die Dauer der Äußerung als auch die Zeit bis zum Beginn des Sprechens durch die Problemschwierigkeit beeinflusst waren.

Zusammen genommen deuten diese Befunde darauf hin, dass bei der Sprachproduktion bestimmte Prozesse inkrementell ablaufen können. Dabei spielen jedoch auch äußere Einflüsse eine Rolle, ob und inwieweit beim Sprechen vorausgeplant wird. In einer Studie von Konopka und Meyer (2014) konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass es auch von inhaltlichen Aspekten abhängt, inwieweit Sprecher bei der Produktion vorausplanen. Stehen die einzelnen Einheiten im Satz in einer engen Beziehung zueinander, dann tendieren die Sprecher eher dazu, beide Einheiten vorab zu planen. Wird dagegen kein direkter Zusammenhang zwischen den Einheiten nahegelegt, dann wird eine Einheit vor der anderen Einheit geplant.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass man inzwischen davon ausgeht, dass bei der Sprachproduktion inkrementell vorgegangen wird, wobei teilweise unter strategischer Kontrolle steht, ob und was genau vorausgeplant wird. Neben der Frage nach der Größe der Einheiten, die vorausgeplant werden, stellt sich auch die Frage danach, welche Einheiten gegebenenfalls gemeinsam geplant werden. Plant man Einheiten voraus, deren sprachliche Realisierung an der Oberfläche aufeinanderfolgt? Oder werden eher Einheiten gemeinsam vorausgeplant, die entsprechend der hierarchischen Struktur der Äußerung zusammenhängen? Lee et al. (2013) konnten zeigen, dass die hierarchische Satzstruktur entscheidend ist und die Einheiten zusammen vorbereitet werden, die strukturell voneinander abhängen.

Wahl der syntaktischen Struktur

Sprachproduktionsmodelle beschreiben sehr detailliert, welche Verarbeitungsstufen bei der Produktion beteiligt sind; jedoch bleibt oftmals offen, wie eigentlich entschieden wird, welche der verschiedenen syntaktischen Umsetzungsoptionen im konkreten Fall gewählt wird (Hartsuiker und Westenberg 2000). Schauen wir uns Abb. 14.26 an, so gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, den dargestellten Sachverhalt auszudrücken (vgl. 202, 203 und 204), und zwischen diesen Möglichkeiten muss ein Sprecher bei der Sprachproduktion wählen.

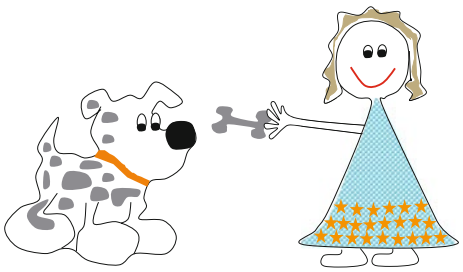


Abb. 14.26 Beispielskizze eines Bildes, das von Probanden beschrieben werden sollte

(202) *Der Hund bekommt einen Knochen von dem Mädchen.*
(203) *Das Mädchen gibt dem Hund einen Knochen.*
(204) *Der Knochen wird dem Hund von dem Mädchen gegeben.*

Bock (1982, 1986a, b) untersuchte in einer Reihe von Studien, welche Prozesse bei der Wahl der syntaktischen Struktur eine Rolle spielen. Es wurde dabei eine Vielzahl von Faktoren identifiziert, die beeinflussen, in welcher Abfolge Wörter in einem Satz produziert werden. Dabei werden Dinge, die salient sind und im Fokus der Aufmerksamkeit stehen, eher zu Beginn im Satz erwähnt (Forrest 1996). Auch kürzere und einfachere Phrasen werden, wenn möglich, früh im Satz platziert (Stallings et al. 1998). Prototypische Vertreter einer Kategorie werden in der Regel eher erwähnt als weniger prototypische Vertreter einer Kategorie (Kelly et al. 1986). Die Ergebnisse von semantischen Priming-Studien zeigten darüber hinaus, dass Konzepte, die durch semantisches Priming verfügbar gemacht wurden, an früherer Stelle im Satz erwähnt wurden als Konzepte, die nicht voraktiviert worden waren (Bock 1986a). Sehen Probanden beispielsweise als Prime das Wort *Gottesdienst* und danach ein Bild von einer Kirche, die vom Blitz getroffen wird, beschreiben sie das Bild eher im Passiv (*Die Kirche wird vom Blitz getroffen*). Ebenso beachten Sprecher in der Regel den Neuigkeitsgehalt einer Information und erwähnen Bekanntes vor Neuem im Satz entsprechend dem Given-New-Prinzip (Bock und Irwin 1980; ▶ Abschn. 14.5.1).

Ferreira und Dell (2000) konnten zeigen, dass Sprecher tatsächlich auch eher solche syntaktischen Strukturen wählen, die es erlauben, bereits bekannte Information zu Beginn des Satzes zu erwähnen. Wurde der Hund bereits erwähnt, so tendieren Sprecher eher zu (202). Wurde hingegen das Mädchen zuvor erwähnt, so wird (203) verwendet. Ferreira (1994) konnte zeigen, dass prominentere Rollen (z. B. Agens, *Experiencer*) eher am Anfang des Satzes benannt werden. Allerdings gibt es auch Hinweise darauf, dass Sprecher bei der Wahl der syntaktischen Struktur nicht nur auf die Wortabfolge achten. In einer Studie von McDonald et al. (1993) zeigte sich, dass bevorzugt solche syntaktischen Strukturen gewählt werden, in denen Nomen, die sich auf belebte Objekte beziehen, als Subjekt verwendet werden.

Befunde wie die, die im vorangehenden Absatz berichtet wurden, legen die Hypothese nahe, dass Informationen vom Sprecher in der Regel so verpackt werden, dass sie möglichst einfach vom Gegenüber verstanden werden (▶ Abschn. 14.5.1). Allerdings gilt diese Hypothese des *audience design* mittlerweile als umstritten (Barr und Keysar 2006). Die berichteten Befunde müssen stattdessen wohl eher dahingehend interpretiert werden, dass Informationen vom Sprecher so verpackt werden, dass er selbst zu Sprechbeginn auf relativ viel zurückgreifen kann, das bereits erwähnt und strukturiert wurde.

Zusätzlich zu diesen Studien, in denen es vornehmlich um inhaltliche Aspekte bei der Wahl der syntaktischen Struktur geht, gibt es auch Studien, die sich mit dem Phänomen befassen, dass Menschen dazu tendieren, syntaktische Strukturen aus vorausgegangenen Sätzen zu übernehmen bzw. zu wiederholen (**syntaktische Persistenz**). Syntaktische Persistenz wurde z. B. in Untersuchungen von großen Korpora gefunden, und es konnte gezeigt werden, dass eine solche Persistenz beim Sprachverstehen einen erleichternden Einfluss hat (Branigan et al. 1995). Syntaktische Persistenz zeigt sich auch in Priming-Studien. Ein typischer Untersuchungsablauf sieht dabei wie folgt aus (Bock 1986b): Probanden bekommen einen Prime-Satz präsentiert, den sie nachsprechen sollen. Jeder Proband bekommt diesen Satz z. B. in einer von zwei Versionen, sodass die Hälfte der Probanden eine Satzkonstruktion im Aktiv liest (*David fasst den Dieb*), die andere eine Satzkonstruktion im Passiv (*Der Dieb wird von David gefasst*). Danach sehen die Probanden ein Bild, das ein unabhängiges Ereignis darstellt und sollen dieses Ereignis in einem Satz beschreiben. Es zeigt sich, dass Probanden bevorzugt die Satzstruktur aus dem Prime-Satz für die Beschreibung des Zielsatzes heranziehen, und zwar unabhängig von der inhaltlichen Nähe zwischen Prime- und Zielsatz. Bock und Griffin (2000) sowie Bock et al. (2007) konnten zeigen, dass syntaktisches Priming bis zu zehn Sätze nach dem Prime-Satz anhalten kann. Inzwischen weiß man, dass syntaktisches Priming sogar stattfindet, wenn der Prime in einer anderen Sprache präsentiert wird, z. B. wenn ein Prime-Satz auf Spanisch präsentiert wird und darauffolgend ein englischer Satz produziert werden soll (Hartsuiker et al. 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz der Flexibilität der menschlichen Sprache und deren Möglichkeit, eine unendliche Anzahl an Sätzen zu bilden, sich dennoch zeigt, dass bei der Sprachproduktion sehr gerne auf Wiederholungen von einzelnen Wörtern, Phrasen, aber auch ganzen syntaktischen Strukturen zurückgegriffen wird. Dabei scheint vor allem das Ziel im Vordergrund zu stehen, den Produktionsprozess durch Rückgriff auf vorherige Strukturen zu vereinfachen.

14.7.3 Dialog

In der Forschung zur Sprachproduktion werden häufig isolierte Äußerungen eines Sprechers untersucht. Allerdings kommen solche isolierten Äußerungen im Alltag eher selten vor. Im Alltag sprechen wir meist in einem Dialog mit einem oder mehreren Partnern (Garrod und Anderson 1987). In der Regel fällt es Menschen relativ leicht, mit jemandem im Dialog zu reden – oftmals sogar viel leichter, als einen Monolog zu halten. Man würde dies nicht unbedingt so erwarten, denn im Dialog scheinen auf den ersten Blick deutlich mehr Prozesse beteiligt zu sein als beim Monolog. So muss das Sprechen im Dialog mit dem des Gegenübers koordiniert und zeitlich abgestimmt werden, und auch das Wissen des Gesprächspartners muss immer mit berücksichtigt werden (Garrod und Pickering 2004; Nickerson 1999).

Garrod und Pickering (2004, 2009) stellen jedoch die Hypothese auf, dass Menschen eigentlich dafür gemacht sind, im Dialog zu reden. Sie argumentieren, dass ein automatischer Prozess, das **Interactive Alignment**, Menschen im Dialog mit ihren Partnern auf fast allen sprachlichen Repräsentationsebenen (z. B. Wortwahl, syntaktische Struktur) vereint und sie durch den Dialog führt. Dieser Prozess der Aufeinanderabstimmung ist der Grund, warum das Sprechen im Dialog oft einfacher fällt als im Monolog. Er hilft nicht nur dabei, die vielfältigen Anforderungen, die beim Dialog entstehen, auszugleichen, sondern er vereinfacht sogar die Prozesse des Produzierens und Verstehens im Dialog. Diese Hypothese ist stark angelehnt an Mechanismen, die aus der Handlungsplanung beim Ausführen von gemeinsamen Handlungen bekannt sind. Der Dialog wird hierbei als eine Art *joint action* beschrieben, die automatisch und ohne Einsatz zusätzlicher kognitiver Ressourcen ablaufen kann. Grundlage für einen solchen Mechanismus ist die Idee, dass Produktion und Verstehen auf ähnlichen Repräsentationen basieren. Damit dienen die Äußerungen des Gesprächspartners auf verschiedenen Ebenen der Sprachproduktion als Prime und vereinfachen somit den darauffolgenden Produktionsprozess. Beim Sprechen handelt es sich demnach um einen gemeinsamen Akt, wobei der eine Sprecher dem anderen Sprecher die direkte Vorlage gibt. Im Idealfall gelingt es den Gesprächspartnern im Dialog, ein gemeinsames Situationsmodell (Zwaan und Radvansky 1998) zu konstruieren, auf das im weiteren Dialog zurückgegriffen werden kann.

14.7.4 Zusammenhang Verstehen und Produktion

Im letzten Jahrzehnt zeigte sich in der Wahrnehmungs- und Handlungspsychologie immer deutlicher, dass Wahrnehmung und Handlung sehr eng zusammenhängen und teilweise untrennbar verbunden sind (z. B. Hommel 2004; ▶ Kap. 22; ▶ Kap. 2). In der Sprachpsychologie zeigte sich eine ähnliche Entwicklung bezüglich der Sprachproduktion und des Sprachverstehens. Neue Modelle der menschlichen Sprachverarbeitung sind oftmals darauf ausgelegt, sowohl Sprachverstehen als auch Sprachproduktion zu erklären. Die Idee, dass das Verstehens- und das Produktionssystem interagieren, ist nicht vollkommen neu. Bereits Levelt (1983) hatte postuliert, dass beim Produktionsprozess das Verstehenssystem durch eine interne Feedbackschleife über die geplante Aussage informiert wird und mit diesem Monitoring-Prozess gegebenenfalls Korrekturen im Sprachproduktionsprozess eingeleitet werden (vgl. auch Wheeldon und Levelt 1995). Neuere Modelle gehen jedoch über die reine Monitoring-Funktion des Verstehenssystems hinaus. Inzwischen gibt es sogar Hinweise darauf, dass diese Interaktion zwischen Produktion und Verstehen auch umgekehrt stattfindet: Pickering und Garrod (2007) postulieren, dass dem Produktionssystem eine wichtige Rolle beim Sprachverstehen zukommt. Demnach benutzen Menschen ihr Produktionssystem während des Verstehensprozesses, um Vorhersagen über das zu machen, was ihr Gegenüber als Nächstes sagen wird. Die Interaktion zwischen Produktion und Verstehen funktioniert dabei analog zu dem von Wilson und Knoblich (2005) postulierten Modell der Beteiligung des motorischen Systems bei der Wahrnehmung von Handlungen anderer.

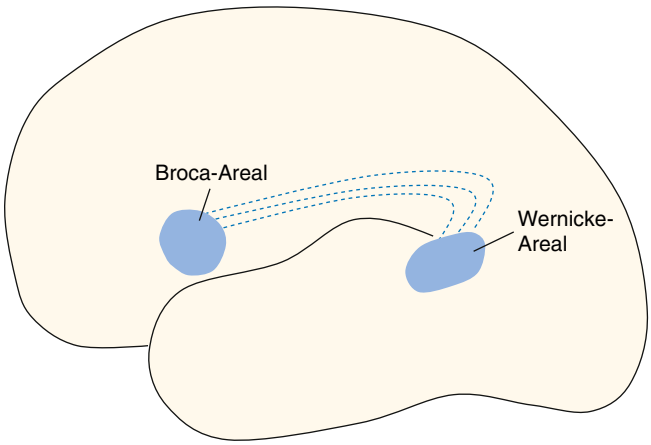


Abb. 14.27 Seitenansicht eines menschlichen Gehirns; in Blau eingezeichnet die beiden traditionellen Sprachzentren im Gehirn

14.8 Neurobiologische Grundlagen

Ein großer Teil unseres Wissens über die menschliche Sprache stammt aus reinen Verhaltensstudien. In den letzten Jahrzehnten gewinnen jedoch bildgebende und elektrophysiologische Untersuchungen zunehmend an Bedeutung in der Sprachforschung. Mit den Untersuchungen der neuronalen Grundlagen des Sprachverstehens wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts in den Studien von Broca (1861), Wernicke (1874/1974) und Lichtheim (1885) begonnen. Wernicke (1874/1974) berichtete, dass Läsionen im linken superior temporalen Gyrus (auditorischer Cortex) mit einer Störung beim Verstehen gesprochener Sprache zusammenhängen. Broca wies auf die Bedeutung des inferioren Frontalhirns bei motorischen Prozessen der Sprachproduktion hin. Lange Zeit galten das Wernicke-Areal (posterior superior temporal; Wernicke 1874/1974) und das Broca-Areal (inferior frontal; Broca 1861) in der dominanten Hemisphere als die beiden wichtigsten Zentren der menschlichen Sprache (Abb. 14.27).

Das Wernicke-Areal, lokalisiert zwischen dem visuellen und dem auditorischen Cortex, wurde primär durch seine Rolle beim Sprachverstehen charakterisiert, spielt jedoch auch bei der Produktion von gesprochener und geschriebener Sprache eine Rolle. Das Broca-Areal ist vor allem durch seine Rolle bei der Sprachproduktion charakterisiert worden. Das Wernicke- und das Broca-Areal sind durch einen Nervenstrang verbunden, die Fasciculus arcuatus. Patienten, bei denen diese Verbindung gestört ist, leiden an der sogenannten Leitungsaphasie und haben Probleme beim Nachsprechen.

Inzwischen gehen die Untersuchungen zu den neuronalen Grundlagen der menschlichen Sprache jedoch weit über Patientenstudien hinaus. Mit immer besseren Methoden zur Analyse neuronaler Abläufe im Gehirn hat sich in den letzten Jahrzehnten ein breites Forschungsfeld zur Untersuchung der neuronalen Grundlagen des menschlichen Sprachverstehens und -produzie-

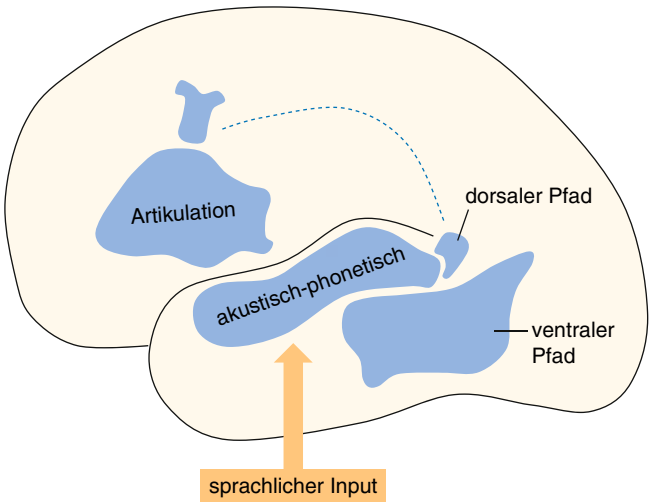


Abb. 14.28 Zwei-Pfad-Modell. (Nach Hickok und Poeppel 2000, 2004)

rens gebildet. Ein großer Teil der Studien beschäftigt sich damit, die in der psycholinguistischen Forschung definierten Subprozesse des Sprachverstehens oder der Sprachproduktion einer spezifischen Hirnregion zuzuordnen. Ausgangspunkt dieser Studien sind damit die Standardmodelle der menschlichen Sprachverarbeitung, mit der Unterteilung der Prozesse in phonologische, syntaktische, semantische und pragmatische Verarbeitung. So geht man inzwischen davon aus, dass der linkshemisphärische temporale Cortex und der inferiore frontale Cortex bei der Verarbeitung der Syntax eine zentrale Rolle spielen. Die semantische Verarbeitung ist eher temporalfrontal zu lokalisieren (Friederici 2011). Inzwischen gibt es sehr detaillierte Vorstellungen darüber, in welchem Areal welche Art von semantischer Information (z. B. abstrakte Konzepte vs. konkrete Konzepte) verarbeitet und gespeichert wird (Binder et al. 2009).

Nachdem man relativ detailliert spezifische sprachliche Subprozesse im Gehirn lokalisiert hat (Überblick z. B. in Price 2010), ist man inzwischen daran interessiert, das Zusammenspiel dieser Prozesse zu verstehen. Neuere neuroanatomische Modelle der menschlichen Sprache setzen sich demnach nicht nur mit der Zuordnung von neuroanatomischen Strukturen zu spezifischen sprachlichen Subprozessen auseinander, sondern zielen auch darauf ab, funktionale Abläufe während der Sprachverarbeitung abzubilden und erklären zu können (Friederici 2011). Es gibt eine ganze Reihe neurokognitiver Modelle der menschlichen Sprachfähigkeit, die teilweise den Fokus auf unterschiedliche Aspekte legen (Überblick in Bornkessel-Schlesewsky und Schlesewsky 2009). Ein Modell, das im letzten Jahrzehnt sehr an Bedeutung gewonnen hat, ist das Modell von Hickok und Poeppel (2000, 2004; Abb. 14.28), das sowohl das Sprachverstehen als auch die Sprachproduktion umfasst.

Hickok und Poeppel haben sich zur Aufgabe gemacht, ein neuroanatomisches Modell der Sprache zu entwickeln, das übergreifend Ergebnisse aus Patientenstudien und bildgebenden Studien erklären kann. Das Modell ist sehr stark an Modelle der visuellen und auditiven Wahrnehmung angelehnt. In den Modellen der visuellen Informationsverarbeitung wird zwischen einem ventralen und einem dorsalen Pfad unterschieden, wobei der ventrale Pfad verantwortlich ist zu identifizieren, *was* gesehen wurde, und der dorsale Pfad für das *Wo* verantwortlich ist (Mishkin et al. 1983). In den letzten Jahrzehnten wurden diese Zwei-Pfad-Modelle der visuellen Informationsverarbeitung weiterentwickelt. Im ventralen Pfad wird eine Interaktion mit dem konzeptuellen System postuliert. Über den dorsalen Pfad wird die Interaktion mit dem motorischen System gesteuert (Milner und Goodale 1995; ▶ Kap. 2). Entsprechend zu diesem Modell wurde nun ein Zwei-Pfad-Modell der Sprache entwickelt, wobei der eine Pfad die Interaktion zwischen sensorischem Input und dem konzeptuellen System regelt (ventraler Pfad) und der andere Pfad die Interaktion zwischen Sprachverarbeitung und motorischem System (dorsaler Pfad). Laut diesem Modell wird der sprachliche Input über ein akustisch-phonetisches Netzwerk sowohl an den ventralen wie auch an den dorsalen Pfad weitergeleitet (Abb. 14.28). Der dorsal ausgerichtete auditorisch-motorische Pfad übernimmt z. B. Funktionen der Sprachsegmentation (Burton et al. 2000), der ventrale Pfad hingegen spielt eine entscheidende Rolle bei der Bedeutungsanalyse.

14.9 Anwendungsbeispiele

Mentale Simulationen beim Lesenlernen und Fremdspracherwerb

Der Simulationsansatz des Sprachverstehens postuliert einen engen Zusammenhang zwischen sprachlichen und sensomotorischen Prozessen im Gehirn (z. B. Glenberg und Kaschak 2002; Hauk et al. 2004; ▶ Abschn. 14.6). Dieser Ansatz eröffnet vielfältige Anwendungsfelder. Glenberg et al. (2004) machten sich z. B. die Grundannahmen des Simulationsansatzes zunutze, um Kinder beim sinnerfassenden Lesen zu unterstützen. In ersten Studien konnten die Autoren zeigen, dass es Kindern, die gerade Lesen lernen, einfacher fällt, die Bedeutung eines Satzes zu erfassen, wenn sie beim Lesen die gelesene Szene mit Spielzeugen nachbilden. In den Studien lasen Kinder Sätze wie (205) und hatten vor sich Spielzeugfiguren aus dem Bauernhofkontext liegen. Nach dem Lesen eines Satzes bildeten sie jeweils die beschriebene Szene nach und wendeten sich dann dem nächsten Satz zu. Bei Satz (205) würden sie also Ben auf den Traktor setzen und zu den Kürbissen schieben und dabei eventuell ein knatterndes Geräusch produzieren, das einem fahrenden Traktor ähnlich ist. Die Kinder machten beim Lesen also multimodale sensomotorische Erfahrungen (visuell, motorisch, haptisch, auditiv etc.), die zumindest zum Teil den Erfahrungen ähnlich sind, die auch beim tatsächlichen Erleben der Situation eine Rolle spielen.

(205) *Ben fährt den Traktor zu den Kürbissen.*

Es zeigte sich, dass das Nachbilden der Situation den Kindern beim Verstehen des Satzinhalts deutlich besser half als das wiederholte Lesen des Satzes. In einem zweiten Schritt wurden die Kinder angeleitet, die im Satz beschriebene Situation nur in ihrer Vorstellung nachzubilden. Es zeigte sich, dass auch das aktive Vorstellen der im Satz beschriebenen Situation beim Verstehen hilft. Glenberg (2011, 2014) entwickelte daraus das *Moved-by-Reading-Programm*, das neue Wege zum Lesenlernen aufzeigt. Im Gegensatz zum rein visuellen Vorstellen der im Satz beschriebe-

nen Situation (Paivio 1986) wird in dem Moved-by-Reading-Programm die Rolle der direkten sensomotorischen Erfahrung und deren Übertragung auf die mentale Vorstellung betont. Wichtig ist hierbei, dass die Kinder erst in einem zweiten Schritt lernen, die aktive Manipulation der Spielzeuge durch eine imaginäre Manipulation zu ersetzen. Dies soll sicherstellen, dass nicht nur die visuellen Aspekte der Szene (z. B. Traktor nähert sich den Kürbissen) in der Vorstellung, sondern auch beispielsweise motorische Anteile (z. B. Ben legt die Hände ans Lenkrad) simuliert werden.

Auch im Bereich des Zweitspracherwerbs gibt es erste Stimmen, die basierend auf dem Simulationsansatz des Sprachverstehens fordern, dass eine Zweitsprache auf interaktive Art und Weise gelernt werden sollte (Macedonia 2014). Im Gegensatz zum Lernen von Vokabeln aus Vokabellisten (z. B. Yamamoto 2014) sollten die Wörter und Sätze der Zweitsprache beim Lernen demnach möglichst direkt mit sensomotorischen Erfahrungen verknüpft werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die im Simulationsansatz postulierte enge Verknüpfung zwischen Sprache und Sensomotorik neue Wege für das Lesenlernen und den Zweitsprachunterricht aufzeigt. Jedoch muss in zukünftigen Studien noch detaillierter untersucht werden, wie genau dieser Zusammenhang idealerweise genutzt werden kann, um Kinder und Erwachsene beim Lernen zu unterstützen.

■ Automatische Bewertung von Aufsätzen und Klausurantworten

In der distributionellen Semantik haben sich Methoden wie die latente semantische Analyse (LSA; *latent semantic analysis*) etabliert, die es erlauben, die Bedeutungsähnlichkeit zwischen sprachlichen Stimuli zu errechnen (▶ Abschn. 14.3.1; Deerwester et al. 1990; Landauer und Dumais 1997). In diesen Analysen werden typischerweise auf der Basis großer Textkorpora semantische Räume erstellt, in denen sprachliche Stimuli (Wörter, Sätze, Texte) dann als Vektoren repräsentiert sind und sich deren Ähnlichkeit durch die Distanz zwischen den jeweiligen Vektoren abschätzen lässt. In den letzten Jahren haben sich in diesem Bereich interessante Anwendungsgebiete aufgetan. Bei der Bewertung von studentischen Aufsätzen oder offenen Antworten in Klausuren treten typischerweise eine Reihe von Problemen auf, wenn die Bewertung von Hand durchgeführt wird. Zum Beispiel spielt die Reihenfolge der Bewertung eine große Rolle (Hughes et al. 1983). Nach einem sehr guten Aufsatz tendieren menschliche Bewerter dazu, den nächsten Aufsatz eher kritisch zu bewerten.

Die Bewertung von Aufsätzen mithilfe der LSA hat sich in mehreren Studien als guter Ersatz oder Ergänzung zur menschlichen Bewertung bewährt (z. B. Foltz et al. 2000; Lenhard et al. 2007). Typischerweise wird hierzu ein semantischer Raum auf der Basis eines Lehrbuches erstellt, welches das Thema des Aufsatzes behandelt. In der Studie von Foltz et al. (2000) waren das die ersten vier Kapitel des Buches *The Psychology of Language* (Carroll 1994). Die Aufgabe der Studierenden lautete: „Beschreiben Sie das interaktive Aktivierungsmodell von McClelland und Rumelhart und wie es den Wortüberlegenheitseffekt erklären kann“ (McClelland und Rumelhart 1981). Aus den Beschreibungen der Studierenden wurden mehrere LSA-Maße errechnet, um die Qualität des Aufsatzes objektiv bewerten zu können. Zum Beispiel wurde die Ähnlichkeit jedes Satzes aus dem Aufsatz zu dessen ähnlichstem Satz im Buch analysiert. Ein hoher mittlerer Wert auf diesem Maß zeigt an, dass die Sätze des Aufsatzes den Inhalt des Buches gut wiedergeben. Für ein anderes Maß wurden unabhängige Leser der Buchkapitel gebeten, die zehn zentralen Sätze auszuwählen, deren Inhalte ihrer Meinung nach in jedem Fall in einem Aufsatz mit gegebener Aufgabenstellung (s. oben) vorkommen sollten. Anhand dieses Maßes sollte festgestellt werden, inwiefern der Verfasser des Aufsatzes die zentralen Thesen des Modells erfasst und in seinem Aufsatz vermittelt hat. Für ein weiteres Maß wurde die Ähnlichkeit des Aufsatzes zu einem vorab per Hand bewerteten Pool von Aufsätzen berechnet. Hierbei wurden die fünf ähnlichsten Aufsätze zu jedem Aufsatz mithilfe der LSA-Methode ermittelt und die mittlere Note dieser Aufsätze als Note für den zu bewertenden Aufsatz verwendet.

Insgesamt zeigte sich für diese und weitere LSA-basierte Ähnlichkeitsmaße eine erstaunlich hohe Korrelation mit den Noten, die von menschlichen Bewertern vergeben wurden. Für manche Maße zeigte sich sogar, dass diese besser miteinander korrelierten als die Noten, die unterschiedliche Bewerter den Aufsätzen gegeben hatten. LSA ist aber nicht nur zur Bewertung von Aufsätzen für die Dozenten hilfreich. Es wurde auch untersucht, inwiefern Studierende von einer automatisierten Rückmeldung zu ihren Aufsätzen profitieren können. So kann mittels LSA auf thematische Lücken im Aufsatz hingewiesen werden, die dadurch zustande kommen, dass gewissen Themengebiete nicht ausführlich genug besprochen wurden. Es zeigte sich, dass die Qualität der studentischen Aufsätze durch eine solche Rückmeldung deutlich verbessert werden konnte (Foltz et al. 2000). LSA-basierte Methoden können im Prinzip in allen Bereichen eingesetzt werden, in denen Texte zu relevanten Themengebieten in elektronischer Form vorliegen.

14.10 Ausblick

In diesem Kapitel haben wir die Kernthemen der satz- bzw. textbasierten Sprachverstehens- und Sprachproduktionsforschung vorgestellt. Dabei lag der Fokus einerseits auf der Frage, wie Sätze und Texte strukturiert sind, und andererseits auf der Frage, welche Prozesse dem Verstehen und Produzieren von Sätzen und Texten zugrunde liegen.

Bei der Beschreibung des Sprachverstehensprozesses haben wir uns auf die Prozesse konzentriert, die beim Verstehen von gesprochener und geschriebener Sprache gleichermaßen relevant sind. Prozesse, die speziell beim Lesen eine Rolle spielen, haben wir nicht betrachtet. Der interessierte Leser sei hier auf die Überblicksdarstellungen in Engbert et al. (2005) und Reichle et al. (2003) verwiesen. Bei der Beschreibung des Sprachproduktionsprozesses haben wir uns auf die Produktion gesprochener Sprache beschränkt. Einen Überblick über die Forschung zum Schreiben gibt Kellogg (1999), und ein Überblick über die Forschung zum Gebärden findet sich in Pfau et al. (2012). Ebenfalls außer Acht gelassen haben wir die Forschung zu interindividuellen Unterschieden bei der Sprachverarbeitung (Cain et al. 2004; Farmer et al. 2012).

Wie in unserem Kapitel deutlich geworden ist, hat sich die psycholinguistische Forschung auf der Satz- und Textebene bislang mit stark vereinfachten, wenn nicht sogar eher unrealistischen Szenarien beschäftigt. In den allermeisten Studien wurden vergleichsweise einfache und artifizielle Sätze oder Texte als Material verwendet, und in fast allen Studien wurde die Sprachverarbeitung isoliert beim einzelnen Individuum untersucht. Eine Herausforderung für die nächsten Jahre besteht sicherlich darin, die experimentellen Untersuchungen auf komplexere und natürlichere Materialien und Situationen auszuweiten, und insbesondere darin, die Sprachverarbeitung im sozialen Kontext zu untersuchen. Erste Schritte in dieser Richtung wurden in der Forschung zum Dialogverhalten gemacht (▶ Abschn. 14.7.3). Entsprechend wird man sich in den nächsten Jahren auch verstärkt damit auseinandersetzen müssen, Modelle der menschlichen Sprachfähigkeit zu entwickeln, die sich auf das Zusammenspiel von Verstehens- und Produktionsprozessen konzentrieren.

Eine Debatte, die die derzeitige psycholinguistische Forschung intensiv beschäftigt, ist die nach den Repräsentationsformaten sprachlicher Bedeutung. Während klassischerweise angenommen wird, dass Sachverhalte bei der Sprachverarbeitung in einem amodalen propositionalen Format gespeichert sind, schreiben neuere Sprachverarbeitungsmodelle modalen sensomotorischen Repräsentationen und Prozessen eine entscheidende Rolle im Sprachverarbeitungsprozess zu. Extreme Positionen gehen sogar davon aus, dass Bedeutung ausschließlich modal in Form von Erfahrungssimulationen repräsentiert ist (▶ Abschn. 14.6). Diese Hypothese hat sich in den vergangenen 20 Jahren als enorm fruchtbar erwiesen, hat aber auch dazu geführt, dass sich die sprachpsychologische Forschung zunehmend von der linguistischen Forschung abgewendet hat. Der Strukturbezug von Sprache ist in den letzten Jahren in der psycholinguistischen Forschung entsprechend in den Hintergrund getreten. In jüngster Zeit gewinnt aber die Auffassung an Bedeutung, dass man für eine umfassende Beschreibung der sprachlichen Kognition sowohl modale als auch amodale Bedeutungsrepräsentationen postulieren muss (z. B. Binder und Desai 2012; Dove 2009; Zwaan 2014). Als Argument wird u. a. die kompositionale Struktur von Sprache betont (Kaup und Ulrich, im Druck).

Sollte sich diese Position eines „Repräsentationspluralismus“ in der Sprachpsychologie durchsetzen, lässt sich erstens erwarten, dass sich die Forschung in Zukunft besonders mit dem Zusammenspiel zwischen modalen und amodalen Prozessen bei der Sprachverarbeitung beschäftigen wird. So wäre beispielsweise zu klären, wie aus amodalen modale Bedeutungsrepräsentationen entstehen können und umgekehrt. Außerdem wäre zu klären, unter welchen Umständen welche Bedeutungsrepräsentationen gebildet werden. Zweitens gehen wir davon aus, dass sich die sprachpsychologische Forschung in der Zukunft wieder stärker auch an der linguistischen Forschung orientiert und so auch die semantischen Kompositionsprozesse auf Satzebene in den Fokus der sprachpsychologischen Forschung rücken. Vielleicht kann in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Sprachpsychologie und Linguistik dann auch eine kognitiv plausible inkrementelle kompositionale Semantik entwickelt werden. Drittens erwarten wir eine Zunahme der Forschung zum Zusammenhang zwischen sprachlicher und nichtsprachlicher Kognition. Dabei ist zum einen die Frage interessant, wie sich sprachliche und nichtsprachliche Kognition gegenseitig beeinflussen können. Zum anderen muss geklärt werden, welche der an der Sprachverarbeitung beteiligten Mechanismen sprachspezifisch sind und welche auch bei der nichtsprachlichen Kognition eine Rolle spielen. Das Zusammenspiel zwischen sprachlicher und nichtsprachlicher Kognition erscheint uns auch zentral, wenn es darum geht, eine umfassende Theorie der menschlichen Kognition zu entwickeln.

14.11 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Beim Verstehen von Sätzen spielen unterschiedliche Analyseebenen eine Rolle, die die syntaktische Struktur sowie die semantische und pragmatische Interpretation von Sätzen betreffen. Erfolgreiches Verstehen setzt sowohl sprachliches Wissen als auch allgemeines Weltwissen voraus.
- Bei der syntaktischen Verarbeitung werden Sätze hinsichtlich der zugrunde liegenden syntaktischen Struktur analysiert. Eine besondere Herausforderung stellen strukturelle Mehrdeutigkeiten dar.
- Bei der syntaktischen Verarbeitung kommt ausgefeiltes grammatisches Wissen zur Anwendung. Allerdings bezweifeln viele Forscher, dass dieses Wissen mental in Form von expliziten Regeln abgespeichert ist.
- Die syntaktische Verarbeitung verläuft inkrementell. Rezipienten beginnen gleich beim ersten Wort eines Satzes mit dem Aufbau der syntaktischen Struktur.
- Bei der semantischen Analyse wird, aufbauend auf dem Wissen über die Bedeutungen der im Satz enthaltenen Wörter sowie dem Wissen über deren syntaktische Beziehung, eine Bedeutungsrepräsentation für den Satz erstellt. Zur Anwendung kommen dabei semantische Kompositionsprinzipien.
- Bei der pragmatischen Analyse geht es um die Bedeutungsaspekte, die im Satz nicht explizit ausgedrückt, sondern nur als naheliegend angedeutet wurden. Außerdem versucht der Rezipient hier zu erfassen, welche Intention der Sprecher mit seiner Äußerung verfolgt.
- Beim Textverstehen muss der Rezipient die Beziehungen zwischen den einzelnen Aussagen im Text erfassen. Dabei sind sowohl die thematischen Relationen zwischen den Aussagen als auch Koreferenzbeziehungen relevant. Der Aufbau einer kohärenten Textrepräsentation verlangt in der Regel aufwendige Inferenz- und Anaphernresolutionsprozesse.
- In welchem Format Bedeutung beim Verstehen repräsentiert wird, wird derzeit noch diskutiert. Viele Forscher gehen davon aus, dass Bedeutung in Form von propositionalen Repräsentationen abgespeichert wird. Andere Forscher postulieren, dass beim Verstehen die geschilderten Objekte, Zustände und Ereignisse mental simuliert werden und dabei insbesondere sensomotorische Prozesse eine wichtige Rolle spielen.

- Bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Sprachproduktion wird analysiert, wie der Mensch aus seinen Gedanken sprachliche Äußerungen formuliert. Hierzu müssen mehrere Verarbeitungsstufen (Konzeptualisierung, Formulierung und Artikulation) durchlaufen werden.
- Autonome Modelle der Sprachproduktion postulieren, dass einzelne Verarbeitungsstufen beim Produktionsprozess modular, d. h. in sich abgeschlossen, arbeiten. Der zu produzierende Satz (oder eine kleinere Einheit) wird in vorgegebener Richtung durch die einzelnen Verarbeitungsstufen geleitet.
- Interaktive Modelle der Sprachproduktion postulieren, dass alle Verarbeitungsstufen in ständigem Austausch stehen.
- Bei der Sprachproduktion beginnt der Sprecher mit der Artikulation von einzelnen Sprecheinheiten, bevor der Satz semantisch, syntaktisch oder phonologisch vollständig geplant und vorbereitet ist. Dies wird auch als inkrementelle Sprachproduktion bezeichnet.

Schlüsselbegriffe

Ambiguität (*ambiguity*) Sprachliche Stimuli können auf unterschiedlichen Ebenen mehrdeutig sein. Es gibt Mehrdeutigkeiten auf lexikalischer Ebene, wenn ein Wort mehrere Bedeutungen hat. Mehrdeutigkeiten auf syntaktischer Ebene liegen vor, wenn ein Satz mit mehreren syntaktischen Analysen vereinbar ist. Mehrdeutigkeiten auf semantischer Ebene liegen vor, wenn ein Satz mit unterschiedlichen Interpretationen kompatibel ist ohne syntaktisch mehrdeutig zu sein. Pragmatische Mehrdeutigkeiten liegen vor, wenn beispielsweise unklar ist, welche Intention ein Sprecher mit einer Äußerung verfolgt. Man unterscheidet außerdem zwischen lokalen Ambiguitäten, die nur vorrübergehend existieren, und globalen Ambiguitäten, bei denen auch später im Satz keine disambiguierende Information bereitgestellt wird.

Anapher (*anaphor*) Wiederaufnahme in Texten (z. B. in Form von Pronomen, definite Nominalphrase) von etwas, das zuvor erwähnt wurde. Mittels anaphorischer Ausdrücke kann in Texten Kohärenz erzeugt werden.

Antezedens (*antecedent*) Sprachlicher Ausdruck, auf den sich ein anaphorischer Ausdruck bezieht. So ist in dem Satzpaar „Ein Junge geht die Straße entlang. Er ist blond." die NP *ein Junge* das Antezedens des anaphorischen Ausdrucks *Er*.

Artikulation (*articulation*) Endphase der Sprachproduktion; hier werden die Laute (oder Gebärden) motorisch im Vokaltrakt (oder mit den Armen/Händen) gebildet und veräußerlicht.

Botschaft (*message*) Bezeichnet bei der Sprachproduktion die zu kommunizierende Nachricht, die in präverbaler Form vorliegt.

Coercion (*coercion*) Zwang zur Uminterpretation, wenn die streng kompositionale Bestimmung der Bedeutung scheitert.

Constraints (*constraints*) Randbedingungen und Kriterien, die mehr oder weniger erfüllt sein können. So könnte bei der Sprachverarbeitung ein Constraint darin bestehen, dass die aufgebaute Struktur so einfach wie möglich sein sollte.

Extension (*extension*) Die Extension eines Begriffs ist das, worauf er sich bezieht. Die Extension von *Hund* ist die Menge aller Hunde und die Extension von *glücklich* die Menge aller Individuen, die glücklich sind. Die Extension eines Satzes ist sein Wahrheitswert.

Formulierung (*formulation*) Zweite Phase bei der Sprachproduktion, bei der eine syntaktisch, phonologisch und phonetisch korrekte Form der präverbalen, zu kommunizierenden Botschaft gebildet wird.

Grammatik (*grammar*) Regelsystem, das erlaubt zu entscheiden, ob eine bestimmte Sequenz von Wörtern ein wohlgeformter Satz einer bestimmten Sprache ist oder nicht.

Holzwegsätze (*garden path sentences*) Sätze, bei denen viele Leser zunächst eine syntaktische Struktur aufbauen, die sich noch vor Satzende als falsch erweist.

Indirekter Sprechakt (*indirect speech act*) Nicht explizit ausgedrückte Handlung, die mit einer sprachlichen Äußerung vollzogen wird (Versprechen, Befehlen, Drohen etc.).

Inferenz (*inference*) Information, die im Satz oder Text nicht explizit ausgedrückt ist, aber vom Rezipienten erschlossen wird. Man unterscheidet Brückeninferenzen, die notwendig sind, um eine kohärente Repräsentation aufzubauen, von elaborativen Inferenzen, bei denen die Repräsentation nur ausgeschmückt wird. Brückeninferenzen werden häufig auch als Rückwärtsinferenzen und elaborative Inferenzen als Vorwärtsinferenzen bezeichnet.

Inkrementalität (*incrementality*) Der Begriff bezieht sich auf den Zeitverlauf der Verarbeitung. Bei der Sprachrezeption wird inkrementell verarbeitet, wenn mit der Verarbeitung eines sprachlichen Ausdrucks (z. B. Satz) begonnen wird, obwohl er noch nicht vollständig vorliegt. Bei der Produktion wird inkrementell verarbeitet, wenn mit der Verarbeitung eines sprachlichen Ausdrucks (z. B. Satz) auf einer bestimmten Verarbeitungsstufe begonnen wird, obwohl die Verarbeitung auf der vorherigen Stufe noch nicht abgeschlossen ist.

Intension (*intension*) Die Intension eines sprachlichen Ausdrucks ist sein konzeptueller Gehalt. Sätze sind in einer intensionalen Semantik nicht an sich wahr oder falsch, sondern immer nur in Bezug auf bestimmte Situationen (Zeiten, Welten) es sei denn es handelt sich um Tautologien oder Kontradiktionen. Die Intension eines Satzes ist eine Funktion, die für jede Situation angibt, ob der Satz wahr oder falsch ist.

Interactive Alignment (*interactive alignment*) Automatischer Prozess, der durch die Sprachproduktion im Dialog führt. Dies geschieht durch eine Angleichung der beiden Sprecher auf fast allen Ebenen der Sprachproduktion (z. B. lexikalisch, syntaktisch).

Kohärenz (*coherence*) Inhaltlicher Zusammenhang zwischen Sätzen.

Kohäsion (*cohesion*) Formaler Zusammenhalt zwischen Sätzen, der durch spezielle sprachliche Hinweisreize vermittelt wird (z. B. Pronomina, Deiktika, Konnektiva).

Kompetenz (*competence*) Das Wissen, das ein Sprecher über seine Sprache besitzt und das seinem sprachlichen Verhalten zugrunde liegt.

Kompositionalität (*compositionality*) Semantisches Prinzip, wonach die Bedeutung eines aus Teilausdrücken zusammengesetzten Ausdrucks durch die Bedeutung seiner Teile sowie der Art und Weise ihrer Zusammensetzung bestimmt ist. Dieses Prinzip geht auf den Logiker Gottlob Frege zurück und wird deshalb teilweise auch als Frege-Prinzip bezeichnet.

Koreferenz (*coreference*) Zwei sprachliche Ausdrücke gelten als koreferent, wenn sie sich auf dieselbe Diskursentität beziehen. Häufig sind das Antezedens und der anaphorische Ausdruck koreferent.

Konzeptualisierung (*conceptualization*) Erste Phase der Sprachproduktion, auf der die präverbale Botschaft entsteht und damit der Inhalt der sprachlichen Äußerung unter Berücksichtigung der aktuellen Situation, unseres Vorwissens und anderen Umgebungsfaktoren festgelegt wird.

Modularität (*modularity*) Sichtweise, wonach der menschliche Geist in einzelne Module unterteilt ist, die unabhängig voneinander arbeiten und die jenseits von Ein- und Ausgabeprozessen nicht miteinander interagieren. Jerry Fodor gilt als einer der stärksten Verfechter.

Monitoring (*monitoring*) Überwachung der bei der Sprachproduktion produzierten Äußerung, die gegebenenfalls in Korrekturprozesse mündet.

Performanz (*performance*) Beobachtbares sprachliches Verhalten, das begrenzt ist durch Kapazitätsbeschränkungen des kognitiven Apparats, aber auch durch temporäre Faktoren (z. B. Müdigkeit, Ablenkung).

Pragmatik (*pragmatics*) Beschäftigt sich mit dem kontextabhängigen Gebrauch von Sprache und mit dem sprachlichen Handeln (Sprechakte).

Propositionen (*propositions*) In der Sprachpsychologie bezeichnet der Begriff „Proposition" eine Form der Bedeutungsrepräsentation einer Aussage. Es handelt sich um eine symbolische und amodale Repräsentation, die aus einer Relation und einem oder mehreren Argumenten besteht. Die Elemente von Propositionen sind Konzepte oder selbst wieder Propositionen.

Semantik (*semantics*) Bedeutung sprachlicher Zeichen.

Spoonerismus (*spoonerism*) Versprecher, bei dem Phoneme zu Wortbeginn vertauscht werden, woraus meist neue sinnhafte (aber nicht beabsichtigte) Äußerungen entstehen.

Sprechakt (*speech act*) Handlung, die mit einer sprachlichen Äußerung vollzogen wird.

Subkategorisierungseigenschaften (*subcategorization*) Die Subkategorisierungseigenschaften eines Verbs beziehen sich auf die Art und Anzahl der Ergänzungen, die es fordert. Die Angaben darüber stehen im sogenannten Subkategorisierungsrahmen des Verbs. Ein ditransitives Verb wie *geben* verlangt zwei Objekt-NPs (Subkategorisierungsrahmen: „___ NPNP").

Syntaktische Planung (*syntactic planning*) Wahl der syntaktischen Struktur bei der Sprachproduktion.

Syntaktische Persistenz (*syntactic persistence*) Tendenz, syntaktische Strukturen aus vorausgehenden Sätzen bei der Produktion eines neuen Satzes zu übernehmen.

Syntax (*syntax*) Regelsystem zur Kombination elementarer Einheiten (z. B. Wörter) zu zusammengesetzten Einheiten (z.B. Phrasen oder Sätzen).

Strukturbaum (*phrase-structure-tree*) Eine mögliche Darstellung der hierarchischen Phrasenstruktur von Sätzen. Die Einträge werden als Knoten bezeichnet, die Verbindungslinien zwischen den Knoten als Äste. Der oberste Eintrag wird manchmal als Wurzel und die Einträge am unteren Ende als Blätter bezeichnet.

Textlinguistik (*text linguistics*) Teildisziplin, die sich mit der Struktur satzübergreifender sprachlicher Strukturen beschäftigt.

Thematische Rollen (*thematic roles*) Die unterschiedlichen Rollen, die die Argumente eines Prädikats in einem beschriebenen Ereignis einnehmen können. So erwartet das Verb *fressen* zwei Argumente, eines für denjenigen, der frisst (Agens), und eines für das, was gefressen wird (Patiens oder Thema).

Weiterführende Literatur

Altmann, G. T. (1997). *The ascent of Babel: an exploration of language, mind, and understanding*. New York, NY: Oxford University Press. (Populärwissenschaftliche Einführung in die psycholinguistische Forschung.)

Bergen, B. K. (2012). *Louder than words: The new science of how the mind makes meaning*. New York: Basic Books. (Populärwissenschaftlicher Überblick über die Simulationstheorie des Sprachverstehens.)

Christiansen, M. H. & Chater, N. (Eds.) (2001). *Connectionist psycholinguistics*. Westport, CT: Ablex. (Sammelband zu konnektionistischen Modellen der Sprachverarbeitung.)

Gaskell, G. (Ed.) (2009). *Oxford Handbook of Psycholinguistics*. New York, NY: Oxford University Press. (Sammelband zu diversen Themen der Sprachverstehens- und Sprachproduktionsforschung; 49 Einzelbeiträge.)

Graesser, A. C., Gernsbacher, M. A. & Goldman, S. R. (Eds.). (2003). *Handbook of discourse processes*. Mahwah, NJ: Erlbaum. (Sammelband zu diversen Themen der Diskurs- und Textverstehensforschung; 13 Einzelbeiträge.)

Grewendorf, G. (2006). *Noam Chomsky* (Vol. 574). CH Beck. (Deutschsprachiger Überblick über Chomskys wissenschaftliches und politisches Werk.)

Hogan, P. C. (Ed.). (2011). *The Cambridge encyclopedia of the language sciences*. Cambridge University Press. (Umfassende Enzyklopädie mit Kurzeinträgen zu den unterschiedlichsten Themen der linguistischen und psycholinguistischen Forschung.)

Kintsch, W. (1989). *Comprehension: A Paradigm for cognition*. Cambridge: Cambridge University Press. (Überblick über den Textverstehensprozess mit all den Facetten, die in den verschiedenen Modellen von Kintsch eine Rolle spielen.)

Maienborn, C., von Heusinger, K. & Portner, P. (2012) (Eds.). *Semantics. An international handbook of natural language meaning*. Berlin, New York: Mouton de Gruyter. (Dreibändiges Handbuch mit umfassender Information zu nahezu allen Aspekten semantischer Forschung. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer sprachwissenschaftlichen Perspektive.)

Pinker, S. (1994). *The language instinct*. Cambridge: MIT Press. (Bestseller zu Chomskys These einer angeborenen Universalgrammatik; teilweise etwas polemisch.)

Spivey, M., Joanisse, M. & McRae, K. (Eds.). (2012). *The Cambridge handbook of psycholinguistics*. Cambridge University Press. (Umfassender Sammelband zu diversen Themen der psycholinguistischen Forschung; 34 Einzelbeiträge.)

Traxler, M. & Gernsbacher, M. A. (Eds.) (2006). *Handbook of Psycholinguistics*. New York, NY: Academic Press. (Umfassender Sammelband zu diversen Themen der Sprachpsychologie.)

Webseiten

- http://www.amlap.org – Informationen über die jährliche Konferenz zu „Architectures and Mechanisms of Language Processing", eine der zentralen internationalen psycholinguistischen Konferenzen.
- http://cohmetrix.com – Programm zur Berechnung von Texteigenschaften, inklusive Verständlichkeit, Kohäsion, Kohärenz.
- http://www.ids-mannheim.de/cosmas2/ – Korpusrecherche- und Analysesystem des Instituts der Deutschen Sprache in Mannheim.
- http://www.linguistlist.org – The Linguist List, Informationen über Stellenangebote und Konferenzen im sprachwissenschaftlichen Bereich.
- http://lsa.colorado.edu/ – Ermöglicht die Durchführung latent-semantischer Analysen für englisches Material.
- http://CRAN.R-project.org/package=LSAfun – Ermöglicht die Durchführung latent-semantischer Analysen für deutsches Material.
- http://www.mpi.nl – Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen.
- http://celex.mpi.nl/ – CELEX Datenbank des MPI für Psycholinguistik in Nijmegen – hier lassen sich diverse Informationen zu deutschen Wörtern nachschlagen, z.B. deren Vorkommenshäufigkeiten und Nachbarschaften.
- http://www.psych.rl.ac.uk/ – Datenbank für die englische Sprache – hier lassen sich verschiedene linguistische und psycholinguistische Merkmale für englische Wörter nachschlagen.
- http://wortschatz.uni-leipzig.de/ – Äußerst hilfreiches Wortschatzportal.
- http://www.societyfortextanddiscourse.org – Homepage der Society for Text and Discourse, die einmal jährlich die gleichnamige Konferenz ausrichtet.

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei Daniela Ahlberg, Eduard Berndt, Katharina Braungart, Fritz Günther, Birgit Öttl, Till Pachalli, Irmgard de la Vega, Jessica Strozyk und Sibylla Wolter für ihre Hilfe beim Korrekturlesen dieses Kapitels. Bei Sigrid Beck, Oliver Bott, Berry Claus, Fritz Hamm, Robin Hörnig, Andreas Konietzko, Hartmut Leuthold, Claudia Maienborn, Rolf Ulrich und Andrea Weber bedanken wir uns zudem für die überaus hilfreichen Änderungsvorschläge zu einer Vorversion dieses Kapitels.

Die Arbeit an diesem Kapitel wurde unterstützt durch eine Sachbeihilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Projekt Z2 im SFB 833 „Bedeutungskomposition").

Literatur

Adams, B. C., Clifton, C., & Mitchell, D. C. (1998). Lexical guidance in sentence processing? *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*, 265–270.

Akinnaso, F. N. (1982). On the differences between spoken and written language. *Language and Speech*, *25*, 97–125.

Albrecht, J. E., & O'Brien, E. J. (1993). Updating a mental model: Maintaining both local and global coherence. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 1061–1070.

Alibali, M. W., Kita, S., & Young, A. J. (2000). Gesture and the process of speech production: We think, therefore we gesture. *Language and Cognitive Processes*, *15*, 593–613.

Almor, A. (1999). Noun-phrase anaphora and focus: The informational load hypothesis. *Psychological Review*, *106*, 748–765.

Altmann, G., & Kamide, Y. (1999). Incremental interpretation at verbs: Restricting the domain of subsequent reference. *Cognition*, *73*, 247–264.

Altmann, G., & Steedman, M. (1988). Interaction with context during human sentence processing. *Cognition*, *30*, 191–238.

Altmann, G., Garnham, A., & Dennis, Y. (1992). Avoiding the garden path: Eye movements in context. *Journal of Memory and Language*, *31*, 685–712.

Anderson, A., Garrod, S. C., & Sanford, A. J. (1983). The accessibility of pronominal antecedents as a function of episode shifts in narrative text. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *35*, 427–440.

Arnold, J. E., Eisenband, J. G., Brown-Schmidt, S., & Trueswell, J. C. (2000). The rapid use of gender information: Evidence of the time course of pronoun resolution from eyetracking. *Cognition*, *76*, B13–B26.

Asher, N. (1993). *Reference to Abstract Objects in Discourse*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Asher, N., & Lascarides, A. (2003). *Logics of conversation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Austin, J. L. (1962). *Philosophical Papers. How to do things with words*. Oxford: Oxford University Press.

Baars, B. J., Motley, M. T., & MacKay, D. G. (1975). Output editing for lexical status in artificially elicited slips of the tongue. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*, 382–391.

Badecker, W., & Straub, K. (2002). The processing role of structural constraints on interpretation of pronouns and anaphors. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *28*, 748–769.

Baker, L., & Wagner, J. L. (1987). Evaluating information for truthfulness: The effects of logical subordination. *Memory & Cognition*, *15*, 247–255.

Baroni, M., Bernardi, R., & Zamparelli, R. (2014). Frege in space: A program for compositional distributional semantics. *Linguistic Issues in Language Technologies*, *9*, 5–110.

Barr, D. J., & Keysar, B. (2006). Perspective taking and the coordination of meaning in language use. In M. Traxler, & M. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (2. Aufl. S. 901–938). Oxford, UK: Elsevier.

Barsalou, L. W. (1999). Perceptions of perceptual symbols. *Behavioral and brain sciences*, *22*, 637–660.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–645.

Barsalou, L. W., & Wiemer-Hastings, K. (2005). Situating abstract concepts. In D. Pecher, & R. A. Zwaan (Hrsg.), *Grounding Cognition*. Cambridge: Cambridge University Press.

Barsalou, L. W. (2014). Cognitive Psychology: An overview for cognitive scientists. New York: Psychology Press.

Barton, S. B., & Sanford, A. J. (1993). A case study of anomaly detection: Shallow semantic processing and cohesion establishment. *Memory & Cognition*, *21*, 477–487.

Bates, E., Masling, M., & Kintsch, W. (1978). Recognition memory for aspects of dialogue. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *4*, 187–197.

Beck, S., & Gergel, R. (2014). *Contrasting English and German Grammar*. Berlin: De Gruyter.

Bergen, B., & Wheeler, K. (2010). Grammatical aspect and mental simulation. *Brain and Language*, *112*, 150–158.

Berkum, J. J. A. van, Brown, C. M., Hagoort, P., & Zwitserlood, P. (2003). Event related brain potentials reflect discourse-referential ambiguity in spoken language comprehension. *Psychophysiology*, *40*, 235–248.

Berkum, J. J. van, Van Den Brink, D., Tesink, C. M., Kos, M., & Hagoort, P. (2008). The neural integration of speaker and message. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*, 580–591.

Bever, T. G. (1970). The cognitive basis for linguistic structures. In J. R. Hayes (Hrsg.), *Cognition and the development of language* (S. 279–362). New York: Wiley.

Bierwisch, M. (1982). Formal and lexical semantics. *Linguistische Berichte*, *80/82*, 3–17.

Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*, 527–536.

Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *19*, 2767–2796.

Bock, J. K. (1982). Toward a cognitive psychology of syntax: Information processing contributions to sentence formulation. *Psychological Review*, *89*, 1–47.

Bock, J. K. (1986a). Meaning, sound, and syntax: Lexical priming in sentence production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *12*, 575–586.

Bock, J. K. (1986b). Syntactic persistence in language production. *Cognitive Psychology*, *18*, 355–387.

Bock, K., & Griffin, Z. M. (2000). The persistence of structural priming: Transient activation or implicit learning? *Journal of Experimental Psychology: General*, *129*, 177–192.

Bock, K. J., & Irwin, D. E. (1980). Syntactic effects of information availability in sentence production. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*, 467–484.

Bock, J. K., & Levelt, W. J. M. (1994). Language production: Grammatical encoding. In M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (S. 945–984). San Diego: Academic Press.

Bock, K., Dell, G. S., Chang, F., & Onishi, K. H. (2007). Persistent structural priming from language comprehension to language production. *Cognition*, *104*, 437–458.

Boland, J. E., Tanenhaus, M. K., & Garnsey, S. M. (1990). Evidence for the immediate use of verb control information in sentence processing. *Journal of Memory and Language*, *29*, 413–432.

Bornkessel-Schlesewsky, I., & Schlesewsky, M. (2009). *Processing syntax and morphology: A neurocognitive perspective*. Oxford: Oxford University Press.

Boroditsky, L., & Ramscar, M. (2002). The roles of body and mind in abstract thought. *Psychological Science*, *13*, 185–189.

Bott, O. (in press). The processing domain of aspectual interpretation. In B. Arsenijevic, B. Gehrke & R. Marín (Eds.): *Subatomic Semantics of Event Predicates. Studies in Linguistics and Philosophy*. Springer: Dordrecht.

Bott, O., & Schlotterbeck, F. (2015). The processing domain of scope interaction. *Journal of Semantics*, *39*, 39–92.

Branigan, H. P., Pickering, M. J., Liversedge, S. P., Stewart, A. J., & Urbach, T. P. (1995). Syntactic priming: Investigating the mental representation of language. *Journal of Psycholinguistic Research*, *24*, 489–506.

Bransford, J. D., & Franks, J. J. (1971). The abstraction of linguistic ideas. *Cognitive Psychology*, *2*, 331–350.

Bransford, J. D., & Johnson, M. K. (1972). Contextual prerequisites for understanding: Some investigations of comprehension and recall. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *11*, 717–726.

Bransford, J. D., Barclay, J. R., & Franks, J. J. (1972). Sentence memory: A constructive versus interpretive approach. *Cognitive Psychology*, *3*, 193–209.

Bresnan, J. (1978). A realistic transformational grammar. In G. Miller, J. Bresnan, & M. Halle (Hrsg.), *Linguistic Theory and Psychological Reality* (S. 1–59). Cambridge, MA: MIT Press.

Bresnan, J., & Kaplan, R. M. (1982). Introduction: Grammars as mental representations of language. In J. Bresnan (Hrsg.), *The mental representation of grammatical relations*. Cambridge, Mass: MIT Press.

Broca, P. (1861). Perte de la parole, ramollissement chronique et destruction partielle du lobe antérieur gauche du cerveau. *Bulletin de la Société Anthropologique*, *2*, 235–238.

Bröder, A., & Bredenkamp, J. (1996). SLIP-Technik, Prozeßdissoziationsmodell und multinomiale Modellierung: neue Werkzeuge zum experimentellen Nachweis „Freudscher Versprecher?". *Zeitschrift für experimentelle Psychologie*, *43*, 175–202.

Broek, P. van den, Rapp, D. N., & Kendeou, P. (2005). Integrating memory-based and constructionist processes in accounts of reading comprehension. *Discourse Processes*, *39*, 299–316.

Brysbaert, M., & Mitchell, D. C. (1996). Modifier attachment in sentence parsing: Evidence from Dutch. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *49*, 664–695.

Burkhardt, P. (2006). Inferential bridging relations reveal distinct neural mechanisms: Evidence from event-related brain potentials. *Brain and Language*, *98*, 159–168.

Burton, M., Small, S., & Blumstein, S. (2000). The role of segmentation in phonological processing: an fMRI investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*, 679–690.

Cain, K., Oakhill, J., & Lemmon, K. (2004). Individual differences in the inference of word meanings from context: The influence of reading comprehension, vocabulary knowledge, and memory capacity. *Journal of Educational Psychology*, *96*, 671–681.

Carlson, K. (2009). How prosody influences sentence comprehension. *Language and Linguistics Compass*, *3*, 1188–1200.

Carroll, D. (1994). *Psychology of language*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole.

Chafe, W., & Tannen, D. (1987). The relation between written and spoken language. *Annual Review of Anthropology*, *16*, 383–407.

Cherubim, D. (Hrsg.). (1980). *Fehlerlinguistik. Beiträge zum Problem der sprachlichen Abweichung*. Tübingen: Niemeyer.

Chomsky, N. (1957). *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton.

Chomsky, N. (1965). *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge: The MIT Press.

Chomsky, N. (1980). Rules and representations. *Behavioral and Brain Sciences*, *3*, 1–15.

Christiansen, M. H., & Chater, N. (1999). Toward a connectionist model of recursion in human linguistic performance. *Cognitive Science*, *23*, 157–205.

Christiansen, M. H., & Chater, N. (2008). Language as shaped by the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, *31*, 489–509.

Christianson, K., Hollingworth, A., Halliwell, J., & Ferreira, F. (2001). Thematic roles assigned along the garden path linger. *Cognitive Psychology*, *42*, 368–407.

Cirilo, R. K., & Foss, D. J. (1980). Text structure and reading time for sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *19*, 96–109.

Clark, H. H. (1975). *Bridging*. Proceedings of the 1975 workshop on Theoretical issues in natural language processing. (S. 169–174). Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics.

Clark, H. H. (1979). Responding to indirect speech acts. *Cognitive Psychology*, *11*, 430–477.
Clark, H. H. (1996). *Using language*. Cambridge: Cambridge University Press.
Clark, H. H., & Brennan, S. E. (1991). Grounding in Communication. In L. B. Resnick, J. M. Levine, & S. D. Teasley (Hrsg.), *Perspectives on Socially Shared Cognition* (S. 127–149). Washington: APA Books.
Clark, H. H., & Haviland, S. E. (1977). Comprehension and the given – new contract. In R. O. Freedle (Hrsg.), DiscourseProduction and Comprehension (S. 1–40). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Clark, H. H., & Schaefer, E. F. (1989). Contributing to discourse. *Cognitive Science*, *13*, 259–294.
Clark, H. H., & Sengul, C. M. J. (1979). In search of referents for nouns and pronouns. *Memory & Cognition*, *7*, 35–41.
Claus, B. (2015). Verb gapping: an action-gap compatibility study. *Acta Psychologica*, *156*, 104–113.
Claus, B., & Kelter, S. (2006). Comprehending narratives containing flashbacks: evidence for temporally organized representations. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 1031–1044.
Cleland, A. A., & Pickering, M. J. (2006). Do writing and speaking employ the same syntactic representations? *Journal of Memory and Language*, *54*, 185–198.
Clifton Jr, C., & Odom, P. (1966). Similarity relations among certain English sentence constructions. *Psychological Monographs: General and Applied*, *80*, 1–35.
Corbett, A. T., & Chang, F. R. (1983). Pronoun disambiguation: Accessing potential antecedents. *Memory & Cognition*, *11*, 283–294.
Crain, S., & Steedman, M. (1985). On not being led up the garden path: The use of context by the psychological parser. *Natural Language Parsing*, 320–358.
Cuetos, F., & Mitchell, D. C. (1988). Cross-linguistic differences in parsing: Restrictions on the use of the Late Closure strategy in Spanish. *Cognition*, *30*, 73–105.
Davidson, D. (1967). The logical form of action sentences. In N. Resher (Hrsg.), *The logic of Decision and Action*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
Deerwester, S., Dumais, S. T., Furnas, G. W., Landauer, T. K., & Harshman, R. (1990). Indexing by Latent Semantic Analysis. *Journal of the American Society for Information Science*, *41*, 391–407.
Dell, G. S. (1986). A spreading-activation theory of retrieval in sentence production. *Psychological Review*, *93*, 283–321.
Dell, G. S., & Reich, P. A. (1981). Stages in sentence production: An analysis of speech error data. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 611–629.
Dijk, T. A. van, & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
Dove, G. (2009). Beyond perceptual symbols: A call for representational pluralism. *Cognition*, *110*, 412–431.
Dowty, D. (1991). Thematic proto-roles and argument selection. *Language*, *67*, 547–619.
Drieman, G. H. (1962). Differences between written and spoken language: An exploratory study. *Acta Psychologica*, *20*, 78–100.
Dudschig, C., Maienborn, C., & Kaup, B. (2016). Is there a difference between stripy journeys and stripy ladybirds? The N400 response to semantic and world-knowledge violations during sentence comprehension. Brain and Cognition, 103, 38–49.
Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, *14*, 179–211.
Elman, J. L. (1991). Distributed representations, simple recurrent networks, and grammatical structure. *Machine Learning*, *7*, 195–225.
Elman, J. L. (2009). On the meaning of words and dinosaur bones: Lexical knowledge without a lexicon. *Cognitive Science*, *33*, 547–582.
Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E., & Kliegl, R. (2005). SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, *112*, 777–813.
Erickson, T. D., & Mattson, M. E. (1981). From words to meaning: A semantic illusion. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *20*, 540–551.
Farmer, T. A., Misyak, J. B., & Christinsen, M. H. (2012). In M. Spivey, M. Joanisse, & K. McRae (Hrsg.), *In* (S. 353–364). Cambridge: Cambridge University Press.
Ferreira, F. (1993). Creation of prosody during sentence production. *Psychological Review*, *100*, 233–253.
Ferreira, F. (1994). Choice of passive voice is affected by verb type and animacy. *Journal of Memory and Language*, *33*, 715–736.
Ferreira, F. (2003). The misinterpretation of noncanonical sentences. *Cognitive Psychology*, *47*, 164–203.
Ferreira, F., & Clifton Jr, C. (1986). The independence of syntactic processing. *Journal of Memory and Language*, *25*, 348–368.
Ferreira, F., & Henderson, J. M. (1990). Use of verb information in syntactic parsing: Evidence from eye movements and word-by-word self-paced reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 555–568.
Ferreira, F., & Swets, B. (2002). How incremental is language production? Evidence from the production of utterances requiring the computation of arithmetic sums. *Journal of Memory and Language*, *46*, 57–84.
Ferreira, F., Bailey, K. G., & Ferraro, V. (2002). Good-enough representations in language comprehension. *Current Directions in Psychological Science*, *11*, 11–15.
Ferreira, V. S. (1996). Is it better to give than to donate? Syntactic flexibility in language production. *Journal of Memory and Language*, *35*, 724–755.
Ferreira, V. S., & Dell, G. S. (2000). Effect of ambiguity and lexical availability on syntactic and lexical production. *Cognitive Psychology*, *40*, 296–340.
Filik, R., & Leuthold, H. (2008). Processing local pragmatic anomalies in fictional contexts: Evidence from the N400. *Psychophysiology*, *45*, 554–558.
Filik, R., Paterson, K. B., & Liversedge, S. P. (2004). Processing doubly quantified sentences: Evidence from eye movements. *Psychonomic Bulletin & Review*, *11*, 953–959.
Fillmore, C. (1968). The case for case. In E. Bach, & R. T. Harms (Hrsg.), *Universals in linguistic theory* (S. 1–88). New York: Holt, Rinehart und Winston.
Firth, J. R. (1957). A synopsis of linguistic theory 1930–1955. *Studies in Linguistic Analysis*, Philological Society (Great Britain), 1–32.
Fischer, M. H., & Zwaan, R. A. (2008). Grounding Cognition in Perception and Action. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*, 825–850.
Flores d'Arcais, G. B. (1987). *Syntactic processing during reading for comprehension*. Attention and Performance, Bd. XII, S. 619–633). The Psychology of Reading
Fodor, J. D. (1998). Learning to parse? *Journal of Psycholinguistic Research*, *27*, 285–319.
Fodor, J. A., & Bever, T. G. (1965). The psychological reality of linguistic segments. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *4*, 414–420.
Fodor, J. A., & Garrett, M. (1967). Some syntactic determinants of sentential complexity. *Perception & Psychophysics*, *2*, 289–296.
Fodor, J. A., Bever, T. G., & Garrett, M. F. (1974). *The psychology of langauge*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
Foltz, P. W., Gilliam, S., & Kendall, S. (2000). Supporting content-based feedback in on-line writing evaluation with LSA. *Interactive Learning Environments*, *8*, 111–127.
Forrest, L. B. (1996). Discourse goals and attentional processes in sentence production: The dynamic construal of events. In A. E. Goldberg (Hrsg.), *Conceptual Structure, Discourse and Language* (S. 149–162). Stanford, CA: The Center for the Study of Language and Information Publications.
Frazier, L. (1999). *On sentence interpretation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
Frazier, L., & Clifton, C. (1996). *Construal*. Cambridge, MA: MIT Press.
Frazier, L., & Fodor, J. D. (1978). The sausage machine: A new two-stage parsing model. *Cognition*, *6*, 291–325.
Frazier, L., & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology*, *14*, 178–210.
Frege, G. (1892). Über Sinn und Bedeutung. *Zeitschrift für Philosophie und Philosophische Kritik, N.F*, *100*, 25–50.. Neuabdruck in Frege (1962)
Freud, S. (1901). *Zur Psychopathologie des Alltagslebens. Über Vergessen, Versprechen, Vergreifen, Aberglaube und Irrtum*. In: Project Gutenberg eBook.
Friederici, A. D. (2011). The brain basis of language processing: from structure to function. *Physiological Reviews*, *91*, 1357–1392.
Fromkin, V. A. (1971). The non-anomalous nature of anomalous utterances. *Language*, *47*, 27–52.
Gamut, L. T. F. (1991). *Intensional Logic and Logical Grammar*. Logic, Language, and Meaning, Bd. 2. Chicago: University of Chicago Press.

Garnham, A., Shillcock, R. C., Brown, G. D., Mill, A. I., & Cutler, A. (1981). Slips of the tongue in the London-Lund corpus of spontaneous conversation. *Linguistics*, *19*, 805–818.
Garrett, M. F. (1975). The analysis of sentence production. In G. H. Bower (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* Bd. 9 New York: Academic Press.
Garrett, M. F. (1992). Disorder of lexical selection. *Cognition*, *42*, 143–180.
Garrett, M. F., Bever, T., & Fodor, J. (1966). The active use of grammar in speech perception. *Perception & Psychophysics*, *1*, 30–32.
Garrod, S., & Anderson, A. (1987). Saying what you mean in dialogue: A study in conceptual and semantic co-ordination. *Cognition*, *27*, 181–218.
Garrod, S., & Pickering, M. J. (2004). Why is conversation so easy? *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 8–11.
Garrod, S., & Pickering, M. J. (2009). Joint action, interactive alignment, and dialog. *Topics in Cognitive Science*, *1*, 292–304.
Garrod, S. C., & Sanford, A. J. (1994). Resolving sentences in a discourse context: How discourse representation affects language understanding. In M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (S. 675–698). San Diego: Academic Press.
Garvey, C., & Caramazza, A. (1974). Implicit causality in verbs. *Linguistic Inquiry*, *5*, 459–464.
Gernsbacher, M. A. (1997). Two decades of structure building. *Discourse Processes*, *23*, 265–304.
Gernsbacher, M. A., & Hargreaves, D. J. (1988). Accessing sentence participants: The advantage of first mention. *Journal of Memory and Language*, *27*, 699–717.
Gibbs, R. W. (1994). *The poetics of mind: Figurative thought, language, and understanding*. Cambridge: Cambridge University Press.
Gibbs, R. W., & Colston, H. L. (2006). Figurative language. In M. Traxler, & M. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (2. Aufl. S. 835–862). Oxford, UK: Elsevier.
Gibson, E. (1998). Linguistic complexity: Locality of syntactic dependencies. *Cognition*, *68*, 1–76.
Giora, R. (2002). Literal vs. figurative language: Different or equal? *Journal of Pragmatics*, *34*, 487–506.
Gleitman, H., Gross, J., & Reisberg, D. (2010). *Psychology*. New York, NJ: Norton.
Glenberg, A. M. (2011). How reading comprehension is embodied and why that matters. *International Electronic Journal of Elementary Education*, *4*, 5–18.
Glenberg, A. M. (2014). How acting out in school boosts learning. *Scientific American*. http://www.scientificamerican.com/article/how-acting-out-in-school-boosts-learning/
Glenberg, A. M., & Kaschak, M. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*, 558–565.
Glenberg, A. M., Meyer, M., & Lindem, K. (1987). Mental models contribute to foregrounding during text comprehension. *Journal of Memory and language*, *26*, 69–83.
Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S., & Kaschak, M. P. (2004). Activity and Imagined Activity Can Enhance Young Children's Reading Comprehension. *Journal of Educational Psychology*, *96*, 424–436.
Glenberg, A. M., Sato, M., & Cattaneo, L. (2008). Use-induced motor plasticity affects the processing of abstract and concrete language. *Current Biology*, *18*, R290–R291.
Goldin-Meadow, S. (1999). The role of gesture in communication and thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 419–429.
Goldin-Meadow, S., & Alibali, M. W. (2013). Gesture's role in speaking, learning, and creating language. *Annual Review of Psychology*, *64*, 257–283.
Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Kelly, S. D., & Wagner, S. (2001). Explaining math: Gesturing lightens the load. *Psychological Science*, *12*, 516–522.
Gompel, R. P. van, & Pickering, M. J. (2001). Lexical guidance in sentence processing: A note on Adams, Clifton, and Mitchell (1998). *Psychonomic Bulletin & Review*, *8*, 851–857.
Gompel, R. P. van, & Pickering, M. J. (2007). Syntactic parsing. *The Oxford handbook of psycholinguistics*, Gareth Gaskell. Oxford University Press, NY, 289–307.
Gompel, R. P. van, Pickering, M. J., & Traxler, M. J. (2001). Reanalysis in sentence processing: Evidence against current constraint-based and two-stage models. *Journal of Memory and Language*, *45*, 225–258.
Gompel, R. P. van, Pickering, M. J., Pearson, J., & Liversedge, S. P. (2005). Evidence against competition during syntactic ambiguity resolution. *Journal of Memory and Language*, *52*, 284–307.
Gordon, P. C., Grosz, B. J., & Gilliom, L. A. (1993). Pronouns, names, and the centering of attention in discourse. *Cognitive Science*, *17*, 311–347.
Graesser, A. C., Singer, M., & Trabasso, T. (1994). Constructing inferences during narrative text comprehension. *Psychological Review*, *101*, 371–395.
Grewendorf, G. (2006). *Noam Chomsky*. München: CH Beck.
Grewendorf, G., Hamm, F., & Sternefeld, W. (1989). *Sprachliches Wissen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
Grice, H. P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole, & J. Morgan (Hrsg.), *Speech acts* Syntax and semantics, (Bd. 3, S. 41–58). New York: Academic Press.
Griffin, Z. M. (2001). Gaze duration during speech reflect word selection and phonological encoding. *Cognition*, *82*, B1–B14.
Griffin, Z. M., & Bock, K. (2000). What the eyes say about speaking. *Psychological Science*, *11*, 274–279.
Grimshaw, J. (1990). *Argument structure*. Cambridge, MA: MIT Press.
Grober, E. H., Beardsley, W., & Caramazza, A. (1978). Parallel function strategy in pronoun assignment. *Cognition*, *6*, 117–133.
Grodner, D. J., Klein, N. M., Carbary, K. M., & Tanenhaus, M. K. (2010). „Some," and possibly all, scalar inferences are not delayed: Evidence for immediate pragmatic enrichment. *Cognition*, *116*, 42–55.
Grosz, B. J., & Sidner, C. L. (1986). Attention, intentions, and the structure of discourse. *Computational Linguistics*, *12*, 175–204.
Grosz, B. J., Weinstein, S., & Joshi, A. K. (1995). Centering: A framework for modeling the local coherence of discourse. *Computational Linguistics*, *21*, 203–225.
Gullberg, M., De Bot, K., & Volterra, V. (2008). Gestures and some key issues in the study of language development. *Gesture*, *8*, 149–179.
Habel, C. (1986). *Prinzipien der Referentialität. Untersuchungen zur propositionalen Repräsentation von Wissen*. Berlin: Springer.
Hagoort, P., & Berkum, J. van (2007). Beyond the sentence given. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *362*, 801–811.
Hagoort, P., Hald, L., Bastiaansen, M., & Petersson, K. M. (2004). Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension. *Science*, *304*, 438–441.
Hakes, D. T. (1972). Effects of reducing complement constructions on sentence comprehension. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *11*, 278–286.
Hare, M., Jones, M., Thomson, C., Kelly, S., & McRae, K. (2009). Activating event knowledge. *Cognition*, *111*, 151–167.
Harley, T. A. (1984). A Critique of Top-down Independent Levels Models of Speech Production: Evidence from Non-plan-Internal Speech Errors. *Cognitive Science*, *8*, 191–219.
Harley, T. A. (2013). *The psychology of language: From data to theory*. New York: Psychology Press.
Hartshorne, J. K. (2013). What is implicit causality? *Language and Cognitive Processes*, *29*, 1–21.
Hartsuiker, R. J., & Westenberg, C. (2000). Word order priming in written and spoken sentence production. *Cognition*, *75*, B27–B39.
Hartsuiker, R. J., Pickering, M. J., & Veltkamp, E. (2004). Is syntax separate or shared between languages? Cross-linguistic syntactic priming in Spanish-English bilinguals. *Psychological Science*, *15*, 409–414.
Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, *41*, 301–307.
Haviland, S. E., & Clark, H. H. (1974). What's new? Acquiring new information as a process in comprehension. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*, 512–521.
Heim, I. (1982). *The semantics of definite and indefinite noun phrases* (Doctoral dissertation, University of Massachusetts).
Heim, I., & Kratzer, A. (1998). *Semantics in generative grammar*. Bd. 13. Oxford: Blackwell.
Herbert, C., Deutsch, R., Sütterlin, S., Kübler, A., & Pauli, P. (2011). Negation as a means for emotion regulation? Startle reflex modulation during processing of negated emotional words. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *11*, 199–206.

Herrmann, T. (2003). Theorien und Modelle der Sprachproduktion. In G. Rickheit, T. Herrmann, & W. Deutsch (Hrsg.), *Psycholinguistik. Ein internationals Handbuch* (S. 213–228). Berlin, New York: DeGruyter.

Hess, D. J., Foss, D. J., & Carroll, P. (1995). Effects of global and local context on lexical processing during language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*, 62–82.

Hickok, G., & Poeppel, D. (2000). Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 131–138.

Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, *92*, 67–99.

Holmes, V. M., & Forster, K. I. (1970). Detection of extraneous signals during sentence recognition. *Perception & Psychophysics*, *7*, 297–301.

Holsinger, E. (2013). Representing Idioms: Syntactic and contextual effects on idiom processing. *Language and Speech*, *56*, 373–394.

Hommel, B. (2004). Event files: Feature binding in and across perception and action. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 494–500.

Hörnig, R., Oberauer, K., & Weidenfeld, A. (2005). Two principles of premise integration in spatial reasoning. *Memory & Cognition*, *33*, 131–139.

Hostetter, A. B., & Alibali, M. W. (2008). Visible embodiment: Gestures as simulated action. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*, 495–514.

Huang, Y. T., & Gordon, P. C. (2011). Distinguishing the time course of lexical and discourse processes through context, coreference, and quantified expressions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*, 966–978.

Huang, Y. T., & Snedeker, J. (2011). Logic and conversation revisited: Evidence for a division between semantic and pragmatic content in real-time language comprehension. *Language and Cognitive Processes*, *26*, 1161–1172.

Hughes, D. C., Keeling, B., & Tuck, B. F. (1983). The effects of instructions to scorers intended to reduce context effects in essay scoring. *Educational and Psychological Measurement*, *43*, 1047–1050.

Isberner, M. B., & Richter, T. (2014). Does validation during language comprehension depend on an evaluative mindset? *Discourse Processes*, *51*, 7–25.

Iverson, J. M., & Goldin-Meadow, S. (1997). What's communication got to do with it? Gesture in children blind from birth. *Developmental Psychology*, *33*, 453–467.

Iverson, J. M., & Goldin-Meadow, S. (2005). Gesture paves the way for language development. *Psychological Science*, *16*, 367–371.

Jacobson, P. (2014). *Compositional semantics: An introduction to the syntax/semantics interface*. New York, NY: Oxford University Press.

Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Bd. 6. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Jones, M. N., Willits, J. A. & Dennis, S. (im Druck). Models of semantic memory. In J. R. Busemeyer & J. T. Townsend (Eds.) *Oxford Handbook of Mathematical and Computational Psychology*. New York, NY: Oxford University Press.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, *87*, 329–354.

Kamide, Y., & Mitchell, D. C. (1999). Incremental pre-head attachment in Japanese parsing. *Language and Cognitive Processes*, *14*, 631–662.

Kamide, Y., Altmann, G., & Haywood, S. L. (2003). The time-course of prediction in incremental sentence processing: Evidence from anticipatory eye movements. *Journal of Memory and Language*, *49*, 133–156.

Kamp, H., & Reyle, U. (1993). *From Discourse to Logic*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Katz, A. N., & Ferretti, T. R. (2001). Moment-by-moment reading of proverbs in literal and nonliteral contexts. *Metaphor and Symbol*, *16*, 193–221.

Katz, J. J., & Postal, P. M. (1964). *An integrated theory of linguistic descriptions*. Cambridge: MIT Press.

Kaup, B. (2001). Negation and its impact on the accessibility of text information. *Memory & Cognition*, *20*, 960–967.

Kaup, B. & Ulrich, R. (im Druck). Die Beziehung zwischen sprachlicher und nichtsprachlicher Kognition: Die Bedeutung von Repräsentationsformaten. *Psychologische Rundschau.*

Kaup, B., de la Vega, I., Strozyk, J., & Dudschig, C. (im Druck). The role of sensorimotor processes in meaning composition. In M. H. Fischer & Y. Coello (Eds.), Foundations of Embodied Cognition: Conceptual and Interactive Embodiment. London: Psychology Press.

Kellogg, R. T. (1999). *The psychology of writing*. New York: Oxford University Press.

Kelly, M. H., Bock, J. K., & Keil, F. C. (1986). Prototypicality in a linguistic context: Effects on sentence structure. *Journal of Memory and Language*, *25*, 59–74.

Kelter, S. (2003). Mentale Modelle. In G. Rickheit, T. Herrmann, & W. Deutsch (Hrsg.), *Psycholinguistik-Psycholinguistics* (S. 505–517). Berlin, Germany: De Gruyter.

Kelter, S., Kaup, B., & Claus, B. (2004). Representing a described sequence of events: a dynamic view of narrative comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*, 451–464.

Kempen, G., & Hoenkamp, E. (1987). An incremental procedural grammar for sentence formulation. *Cognitive Science*, *11*, 201–258.

Kendon, A. (1997). Gesture. *Annual Review of Anthropology*, *26*, 109–128.

Kennedy, A., Murray, W. S., Jennings, F., & Reid, C. (1989). Parsing complements: Comments on the generality of the principle of minimal attachment. *Language and Cognitive Processes*, *4*, SI51–SI76.

Kimball, J. (1973). Seven principles of surface structure parsing in natural language. *Cognition*, *2*, 15–47.

Kintsch, W. (1974). *The representation of meaning in memory*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction-integration model. *Psychological review*, *95*, 163.

Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. Cambridge, UK: Cambridge University press.

Kintsch, W. (2001). Predication. *Cognitive Science*, *25*, 173–202.

Kintsch, W., & Keenan, J. (1973). Reading rate and retention as a function of the number of propositions in the base structure of sentences. *Cognitive Psychology*, *5*, 257–274.

Kintsch, W., & Dijk, T. A. van (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, *85*, 363–394.

Kita, S. (2000). How representational gestures help speaking. In D. McNeill (Hrsg.), *Language and Gesture* (S. 162–185). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Kita, S., & Özyürek, A. (2003). What does cross-linguistic variation in semantic coordination of speech and gesture reveal?: Evidence for an interface representation of spatial thinking and speaking. *Journal of Memory and Language*, *48*, 16–32.

Knoeferle, P., Crocker, M. W., Scheepers, C., & Pickering, M. J. (2005). The influence of the immediate visual context on incremental thematic role-assignment: Evidence from eye-movements in depicted events. *Cognition*, *95*, 95–127.

Konieczny, L. (2000). Locality and parsing complexity. *Journal of Psycholinguistic Research*, *29*, 627–645.

Konieczny, L., Hemforth, B., & Strube, G. (1991). Psychologisch fundierte Prinzipien der Satzverarbeitung jenseits von Minimal Attachment. *Kognitionswissenschaft*, *1*, 58–70.

Konieczny, L., Hemforth, B., Scheepers, C., & Strube, G. (1997). The role of lexical heads in parsing: Evidence from German. *Language and Cognitive Processes*, *12*, 307–348.

Konopka, A. E., & Meyer, A. S. (2014). Priming sentence planning. *Cognitive Psychology*, *73*, 1–40.

Krauss, R. M., Dushay, R. A., Chen, Y., & Rauscher, F. (1995). The communicative value of conversational hand gesture. *Journal of Experimental Social Psychology*, *31*, 533–552.

Krifka, M. (1989). *Nominalreferenz und Zeitkonstitution*. Bd. 10. Paderborn: W. Fink.

Krifka, M. (2004). *Argumentstruktur und Verbsemantik*. Skript zum Grundkurs C WS 2004/5. Humboldt-Universität zu Berlin.

Lakoff, G. (1970). Global rules. *Language*, 46(3), 627–639.

Landauer, T. K., & Dumais, S. T. (1997). A solution to Plato's problem: The Latent Semantic Analysis theory of acquisition, induction and representation of knowledge. *Psychological Review*, *104*, 211–240.

Lang, E., & Maienborn, C. (2011). Two-level semantics: Semantic form and conceptual structure. In C. Maienborn, K. von Heusinger, & P. Portner (Hrsg.), *Semantics: An international handbook of natural language meaning* (Bd. I, S. 709–740). Berlin: Mouton de Gruyter.

Lee, E. K., Brown-Schmidt, S., & Watson, D. G. (2013). Ways of looking ahead: Hierarchical planning in language production. *Cognition*, *129*, 544–562.

Lenhard, W., Baier, H., Hoffmann, J., & Schneider, W. (2007). Automatische Bewertung offener Antworten mittels Latenter Semantischer Analyse. *Diagnostica*, *53*, 155–165.
Leuninger, H. (1999). *Reden ist Schweigen, Silber ist Gold: gesammelte Versprecher*. München: DTV.
Levelt, W. J. M. (1983). Monitoring and self-repair in speech. *Cognition*, *14*, 41–104.
Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, MA: Bradford.
Levy, R. (2008). Expectation-based syntactic comprehension. *Cognition*, *106*, 1126–1177.
Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain*, *7*, 433–484.
MacDonald, M. C. (1994). Probabilistic constraints and syntactic ambiguity resolution. *Language and Cognitive Processes*, *9*, 157–201.
MacDonald, M. C., & Just, M. A. (1989). Changes in activation levels with negation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 633.
MacDonald, M. C., Pearlmutter, N. J., & Seidenberg, M. S. (1994). The lexical nature of syntactic ambiguity resolution. *Psychological Review*, *101*, 676.
Macedonia, M. (2014). Bringing back the body into the mind: gestures enhance word learning in foreign language. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1467.
Maienborn, C. (2003). *Die logische Form von Kopula-Sätzen*. Berlin: Akademie Verlag.
Maienborn, C. (2011). Event semantics. In C. Maienborn, K. von Heusinger, & P. Portner (Hrsg.), *Semantics. An International Handbook of Natural Language Meaning* (Bd. 1, S. 802–829). Berlin, New York: Mouton de Gruyter.. HSK 33.1
Mani, K., & Johnson-Laird, P. N. (1982). The mental representation of spatial descriptions. *Memory & Cognition*, *10*, 181–187.
Marslen-Wilson, W. D., & Tyler, L. K. (1980). The temporal structure of spoken language understanding. *Cognition*, *8*, 1–71.
Marslen-Wilson, W. D., Tyler, L. K., Warren, P., Grenier, P., & Lee, C. S. (1992). Prosodic effects in minimal attachment. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *45*, 73–87.
Marx, E. (2000). *Versprecher und Genusverarbeitung. Analyse spontaner und experimentell erzeugter Sprechfehler*. Wiesbaden: DUV.
McClelland, J. L. (1979). On the time relations of mental processes: An examination of systems of processes in cascade. *Psychological Review*, *86*, 287–330.
McCelland, J., & Rumelhart, D. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: part 1. An account of basic findings. *Psychological Review*, *88*, 375–407.
McDonald, J. L., Bock, K., & Kelly, M. H. (1993). Word and world order: Semantic, phonological, and metrical determinants of serial position. *Cognitive Psychology*, *25*, 188–230.
McElree, B., Traxler, M. J., Pickering, M. J., Seely, R. E., & Jackendoff, R. (2001). Reading time evidence for enriched composition. *Cognition*, *78*, B17–B25.
McKoon, G., & Ratcliff, R. (1992). Inference during reading. *Psychological Review*, *99*, 440–466.
McKoon, G., & Ratcliff, R. (1998). Memory-based language processing: Psycholinguistic research in the 1990s. *Annual Review of Psychology*, *49*, 25–42.
McRae, K., Spivey-Knowlton, M. J., & Tanenhaus, M. K. (1998). Modeling the influence of thematic fit (and other constraints) in on-line sentence comprehension. *Journal of Memory and Language*, *38*, 283–312.
Meringer, R., & Mayer, C. (1895). *Versprechen und Verlesen: eine philologisch-linguistische Studie*. Stuttgart: Göschen.
Meyer, A. S. (1996). Lexical access in phrase and sentence production: Results from picture-word interference experiments. *Journal of Memory and Language*, *35*, 477–496.
Miller, G. A., & McKean, K. O. (1964). A chronometric study of some relations between sentences. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *16*, 297–308.
Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*, *27*, Oxford Psychology Series 27. New York: Oxford University Press.
Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414–417.
Mitchell, D. C. (1987). Lexical guidance in human parsing: Locus and processing characteristics. In M. Coltheart (Hrsg.), *Attention and performance XII* (S. 601–618). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Mitchell, D. C., Cuetos, F., Corley, M. M., & Brysbaert, M. (1995). Exposure-based models of human parsing: Evidence for the use of coarse-grained (nonlexical) statistical records. *Journal of Psycholinguistic Research*, *24*, 469–488.
Mitchell, D. C., & Holmes, V. M. (1985). The role of specific information about the verb in parsing sentences with local structural ambiguity. *Journal of Memory and Language*, *24*, 542–559.
Mitchell, J., & Lapata, M. (2010). Composition in distributional models of semantics. *Cognitive Science*, *34*, 1388–1429.
Montague, R. (1973). The proper treatment of quantification in ordinary English. In K. J. J. Hintikka, J. M. E. Moravcsik, & P. Suppes (Hrsg.), *Approaches to Natural Language* (S. 221–242). Dordrecht: Reidel.
Morgan, J. L., Meier, R. P., & Newport, E. L. (1987). Structural packaging in the input to language learning: Contributions of prosodic and morphological marking of phrases to the acquisition of language. *Cognitive Psychology*, *19*, 498–550.
Morrow, D. G., Greenspan, S. L., & Bower, G. H. (1987). Accessibility and situation models in narrative comprehension. *Journal of Memory and Language*, *26*, 165–187.
Murray, J. D., Klin, C. M., & Myers, J. L. (1993). Forward inferences in narrative text. *Journal of Memory and Language*, *32*, 464–473.
Ni, W., Crain, S., & Shankweiler, D. (1996). Sidestepping garden paths: Assessing the contributions of syntax, semantics and plausibility in resolving ambiguities. *Language and Cognitive Processes*, *11*, 283–334.
Nickerson, R. S. (1999). How we know – and sometimes misjudge – what others know: Imputing one's own knowledge to others. *Psychological Bulletin*, *125*, 737–759.
Nieuwland, M. S., & Berkum, J. J. van (2006). When peanuts fall in love: N400 evidence for the power of discourse. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*, 1098–1111.
O'Brien, E. J. (1987). Antecedent search processes and the structure of text. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*, 278–290.
O'Brien, E. J., Rizzella, M. L., Albrecht, J. E., & Halleran, J. G. (1998). Updating a situation model: A memory-based text processing víew. *Journal of Experimental Psychology: Learníng, Memory, and Cognition*, *24*, 1200–1210.
O'Donnell, R. C. (1974). Syntactic differences between speech and writing. *American Speech*, *49*, 102–110.
Özyürek, A., Willems, R., Kita, S., & Hagoort, P. (2007). On-line integration of semantic information from speech and gesture: Insights from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*, 605–616.
Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.
Partee, B. (1984). Compositionality. *Varieties of Formal Semantics*, *3*, 281–311.
Pfau, R., Steinbach, M., & Woll, B. (Hrsg.). (2012). *Sign language: An international handbook*. Bd. 37. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
Pickering, M. J., & Garrod, S. (2004). Toward a mechanistic psychology of dialogue. *Behavioral and Brain Sciences*, *27*, 169–190.
Pickering, M. J., & Garrod, S. (2007). Do people use language production to make predictions during comprehension? *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 105–110.
Pinker, S. (1994). *The language instinct*. Cambridge: MIT Press.
Pinker, S., & Prince, A. (1988). On language and connectionism: Analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition. *Cognition*, *28*, 73–193.
Poeppel, D., & Hickok, G. (2004). Towards a new functional anatomy of language. *Cognition*, *92*, 1–12.
Postma, A. (2000). Detection of errors during speech production: a review of speech monitoring models. *Cognition*, *77*, 97–132.
Price, C. J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1191*, 62–88.
Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, *6*, 576–582.
Pylkkänen, L., & McElree, B. (2006). The syntax-semantics interface: On-line composition of sentence meaning. In M. Traxler, & M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (S. 537–577). New York, NY: Academic Press.
Raaijmakers, J. G., & Shiffrin, R. M. (1981). Search of associative memory. *Psychological Review*, *88*, 93–134.

Ratcliff, R., & McKoon, G. (1978). Priming in item recognition: Evidence for the propositional structure of sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *17*, 403–417.

Rauscher, F. H., Krauss, R. M., & Chen, Y. (1996). Gesture, speech, and lexical access: The role of lexical movements in speech production. *Psychological Science*, *7*, 226–231.

Rayner, K., & Frazier, L. (1987). Parsing temporarily ambiguous complements. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *39*, 657–673.

Rayner, K., Carlson, M., & Frazier, L. (1983). The interaction of syntax and semantics during sentence processing: Eye movements in the analysis of semantically biased sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *22*, 358–374.

Rayner, K., Kambe, G., & Duffy, S. A. (2000). The effect of clause wrap-up on eye movements during reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *53*, 1061–1080.

Reber, A. S., & Anderson, J. R. (1970). The perception of clicks in linguistic and nonlinguistic messages. *Perception & Psychophysics*, *8*, 81–89.

Reichle, E. D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (2003). The E-Z Reader model of eye movement control in reading: Comparisons to other models. *Behavioral and Brain Sciences*, *26*, 445–476.

Richter, T., Schroeder, S., & Wöhrmann, B. (2009). You don't have to believe everything you read: background knowledge permits fast and efficient validation of information. *Journal of Personality and Social Psychology*, *96*, 538–558.

Rinck, M., & Bower, G. H. (1995). Anaphora resolution and the focus of attention in situation models. *Journal of Memory and Language*, *34*, 110–131.

Rumelhart, D. E. (1975). Notes on a schema for stories. In D. G. Bobrow, & M. A. Collins (Hrsg.), *Representation and understanding: Studies in Cognitive Science* (S. 211–236). New York: Academic Press.

Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1988). On learning the past tenses of English verbs. In J. L. McClelland, & D. E. Rumelhart (Hrsg.), *Parallel Distributed Processing* (Bd. II, S. 216–271). Cambridge, MA: MIT Press.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back propagating errors. *Nature*, *323*, 533–536.

Russell, B. (1905). On denoting. *Mind*, *14*, 479–493.

Sachs, J. S. (1967). Recopition memory for syntactic and semantic aspects of connected discourse. *Perception & Psychophysics*, *2*, 437–442.

Sanford, A. J., & Garrod, S. C. (1981). *Understanding written language: Explorations of comprehension beyond the sentence*. New York: Wiley.

Sanford, A. J., & Garrod, S. C. (1998). The role of scenario mapping in text comprehension. *Discourse Processes*, *26*, 159–190.

Sanford, A. J., Moar, K., & Garrod, S. C. (1988). Proper names as controllers of discourse focus. *Language and Speech*, *31*, 43–56.

Sanford, A. J., & Sturt, P. (2002). Depth of processing in language comprehension: Not noticing the evidence. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*, 382–386.

Sauerland, U. (2011). Traces. In P. C. Hogan (Hrsg.), *The Cambridge Encyclopedia of the Language Sciences* (S. 866–867). Cambridge: Cambridge University Press.

Savin, H. B., & Perchonock, E. (1965). Grammatical structure and the immediate recall of English sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *4*, 348–353.

Schank, R. C., & Abelson, R. (1977). *Scripts, Plans, Goals, and Understanding*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Schlotterbeck, F., & Bott, O. (2013). Easy Solutions for a Hard Problem? The Computational Complexity of Reciprocals with Quantificational Antecedents. *Journal of Logic, Language and Information*, *22*, 363–390.

Schwarz, F. (2007). Processing presupposed content. *Journal of Semantics*, *24*, 373–416.

Searle, J. (1969). *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge: Cambridge University Press.

Sedivy, J. C., Tanenhaus, K. M., Chambers, C. G., & Carlson, G. N. (1999). Achieving incremental semantic interpretation through contextual representation. *Cognition*, *71*, 109–147.

Shapiro, A., & Murphy, G. (1993). Can you answer a question for me? Evidence for a salience-based theory of indirect speech act. *Journal of Memory and Language*, *32*, 211–229.

Sheldon, A. (1974). The role of parallel function in the acquisition of relative clauses in English. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *13*, 272–281.

Slevc, L. R. (2011). Saying what's on your mind: Working memory effects on sentence production. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *37*, 1503–1514.

Slobin, D. I. (1966). Grammatical transformations and sentence comprehension in childhood and adulthood. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *5*, 219–227.

Singer, M. (1994). Discourse inference processes. In M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (S. 479–515). San Diego, CA: Academic Press.

Smith, M., & Wheeldon, L. (1999). High level processing scope in spoken sentence production. *Cognition*, *73*, 205–246.

Smyth, R. (1994). Grammatical determinants of ambiguous pronoun resolution. *Journal of Psycholinguistic Research*, *23*, 197–229.

Speer, S., & Blodgett, A. (2006). Prosody. In M. Traxler, & M. A. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of psycholinguistics* (S. 505–537). Amsterdam: Academic Press.

Sperber, & Wilson, D. (1986). *Relevance: Communication and cognition*. Oxford: Backwell.

Spivey, M. J., Tanenhaus, M. K., Eberhard, K. M., & Sedivy, J. C. (2002). Eye movements and spoken language comprehension: Effects of visual context on syntactic ambiguity resolution. *Cognitive Psychology*, *45*, 447–481.

Sprenger, S. A., Levelt, W. J. M., & Kempen, G. (2006). Lexical access during the production of idiomatic phrases. *Journal of Memory and Language*, *54*, 161–184.

Stallings, L. M., MacDonald, M. C., & O'Seaghdha, P. G. (1998). Phrasal ordering constraints in sentence production: Phrase length and verb disposition in heavy-NP shift. *Journal of Memory and Language*, *39*, 392–417.

Steinhauer, K., & Friederici, A. D. (2001). Prosodic boundaries, comma rules, and brain responses: The closure positive shift in ERPs as a universal marker for prosodic phrasing in listeners and readers. *Journal of Psycholinguistic Research*, *30*, 267–295.

Swinney, D. A., & Cutler, A. (1979). The access and progressing of idiomatic expressions. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *18*, 523–534.

Tanenhaus, M. K., Carlson, G., & Trueswell, J. C. (1989). The role of thematic structures in interpretation and parsing. *Language and Cognitive Processes*, *4*, SI211–SI234.

Tanenhaus, M. K., Spivey-Knowlton, M. J., Eberhard, K. M., & Sedivy, J. C. (1995). Integration of visual and linguistic information in spoken language comprehension. *Science*, *268*, 1632–1634.

Taraban, R., & McClelland, J. L. (1988). Constituent attachment and thematic role assignment in sentence processing: Influences of content-based expectations. *Journal of Memory and Language*, *27*, 597–632.

Taylor, L., & Zwaan, R. A. (2008). Motor resonance and linguistic focus. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*, 896–904.

Thorndyke, P. W. (1977). Cognitive structures in comprehension and memory of narrative discourse. *Cognitive Psychology*, *9*, 77–110.

Tiemann, S. (2014). *The Processing of 'wieder' ('again') and Other Presupposition Triggers* (Doctoral dissertation, Universität Tübingen).

Till, R. E., Mross, E. F., & Kintsch, W. (1988). Time course of priming for associate and inference words in a discourse context. *Memory & Cognition*, *16*, 283–298.

Tomasello, M. (1995). Language is not an instinct. *Cognitive Development*, *10*, 131–156.

Trueswell, J. C., & Tanenhaus, M. K. (1994). Toward a lexicalist framework for constraint-based syntactic ambiguity resolution. In C. Clifton, L. Frazier, & K. Rayner (Hrsg.), *Perspectives in Sentence Processing* (S. 155–179). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Trueswell, J. C., Tanenhaus, M. K., & Kello, C. (1993). Verb-specific constraints in sentence processing: separating effects of lexical preference from garden-paths. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 528–553.

Trueswell, J. C., Tanenhaus, M. K., & Garnsey, S. M. (1994). Semantic influences on parsing: Use of thematic role information in syntactic ambiguity resolution. *Journal of Memory and Language*, *33*, 285–318.

Tunstall, S. L. (1998). *The interpretation of quantifiers: semantics & processing* (Doctoral dissertation, University of Massachusetts Amherst).

Ulrich, R., & Maienborn, C. (2010). Left-right coding of past and future in language: The mental timeline during sentence processing. *Cognition*, *117*, 126–138.

Von Stutterheim, C., & Nüse, R. (2003). Processes of conceptualization in language production: language-specific perspectives and event construal. *Linguistics*, *41*, 851–882.

Velde, F. van der, Van der Voort van der Kleij, G. T., & Kamps, M. de (2004). Lack of combinatorial productivity in language processing with simple recurrent networks. *Connection Science*, *16*, 21–46.

Velde, M. van de, Meyer, A. S., & Konopka, A. E. (2014). Message formulation and structural assembly: Describing „easy" and „hard" events with preferred and dispreferred syntactic structures. *Journal of Memory and Language*, *71*, 124–144.

Vosse, T., & Kempen, G. (2000). Syntactic structure assembly in human parsing: a computational model based on competitive inhibition and a lexicalist grammar. *Cognition*, *75*, 105–143.

Vosse, T., & Kempen, G. (2009). The Unification Space implemented as a localist neural net: predictions and error-tolerance in a constraint-based parser. *Cognitive Neurodynamics*, *3*, 331–346.

Wagner, V., Jescheniak, J. D., & Schriefers, H. (2010). On the flexibility of grammatical advance planning during sentence production: Effects of cognitive load on multiple lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*, 423–440.

Wason, P. C. (1965). The contexts of plausible denial. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *4*, 7–11.

Wason, P. C., & Reich, S. S. (1979). A verbal illusion. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *31*, 591–597.

Weber, A., Grice, M., & Crocker, M. W. (2006). The role of prosody in the interpretation of structural ambiguities: A study of anticipatory eye movements. *Cognition*, *99*, B63–B72.

Welke, K. (1988). *Einführung in die Valenz- und Kasustheorie*. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut.

Wernicke, C. (1874/1974). *Der aphasische Symptomenkomplex* (pp. 1–70). Berlin Heidelberg: Springer.

Wheeldon, L. (2000). Generating prosodic structures. In L. R. Wheeldon (Hrsg.), *Aspects of language production* (S. 249–274). Philadelphia, PA: Psychology Press.

Wheeldon, L. (2012). Producing spoken sentences: The scope of incremental planning. In S. Fuchs, M. Weirich, D. Pape, & P. Perrier (Hrsg.), *Speech planning and dynamics* Speech production and perception, (Bd. 1, S. 97–118). Frankfurt, Germany: Peter Land.

Wheeldon, L., & Lahiri, A. (1997). Prosodic units in speech production. *Journal of Memory and Language*, *37*, 356–381.

Wheeldon, L. R., & Levelt, W. J. (1995). Monitoring the time course of phonological encoding. *Journal of Memory and Language*, *34*, 311–334.

William, M., & Thompson, S. (1988). Rhetorical structure theory: Towards a functional theory of text organization. *Text*, *8*, 243–281.

Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin*, *131*, 460–473.

Yamamoto, Y. (2014). Multidimensional vocabulary acquisition through deliberate vocabulary list learning. *System*, *42*, 232–243.

Yeari, M., & Broek, P. W. van den (2011). A cognitive account of discourse understanding and discourse interpretation: The landscape model of reading. *Discourse Studies*, *13*, 635–643.

Yekovich, F. R., Walker, C. H., & Blackman, H. S. (1979). The role of presupposed and focal information in integrating sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *18*, 535–548.

Zagar, D., Pynte, J., & Rativeau, S. (1997). Evidence for early closure attachment on first pass reading times in French. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *50*, 421–438.

Zimmermann, T. E., & Sternefeld, W. (2013). *Introduction to semantics: an essential guide to the composition of meaning*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.

Zwaan, R. A. (2004). The immersed experiencer: Toward an embodied theory of language comprehension. In B. H. Ross (Hrsg.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 43, S. 35–62). New York: Academic Press.

Zwaan, R. A. (2014). Embodiment and language comprehension: reframing the discussion. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*, 229–234.

Zwaan, R. A., & Madden, C. J. (2005). Embodied sentence comprehension. In D. Pecher, & R. A. Zwaan (Hrsg.), *Grounding cognition: The role of perception and action in memory, language, and thinking* (S. 224–245). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Zwaan, R. A., & Radvansky, G. A. (1998). Situation models in language comprehension and memory. *Psychological Bulletin*, *123*, 162–185.

Zwaan, R. A., & Rapp, D. N. (2006). Discourse comprehension. In M. Traxler, & M. Gernsbacher (Hrsg.), *Handbook of Psycholinguistics* (2. Aufl. S. 725–764). Oxford, U.K: Elsevier.

Zwaan, R. A., & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 1–11.

Zwitserlood, P., & Bölte, J. (2015). Psycholinguistik 1: Worterkennung und Wortproduktion. In J. M. Müsseler, & M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie*. Berlin: Springer.

Denken und Problemlösen

Kapitel 15 **Logisches Denken – 533**
Markus Knauff und Günther Knoblich

Kapitel 16 **Problemlösen – 587**
Michael Öllinger

Kapitel 17 **Urteilen und Entscheiden – 619**
Arndt Bröder und Benjamin E. Hilbig

Dieser Teil widmet sich den Fragen des Denkens und Problemlösens. Im allgemeinsten Sinne umfasst Denken alle inneren Aktivitäten und Prozesse, die Begriffe, Vorstellungen, Ideen und andere Inhalte mental umgestalten und verändern. Im Vergleich zu anderen psychischen Funktionen (z. B. dem Wahrnehmen) können beim Denken die Inhalte von der gerade gegebenen Umweltsituation losgelöst sein, weshalb Denken so schwer empirisch zugänglich ist. So sieht man beispielsweise einer Person in der U-Bahn nicht an, ob sie gerade über die Zubereitung des Abendessens, ein schwieriges mathematisches Problem oder über die Planung ihres nächsten Urlaubs nachdenkt.

In ▶ Kap. 15 geht es darum, ob und wie Menschen mithilfe logischen Denkens aus gegebener Evidenz folgerichtige Schlüsse ziehen. Eine Kernfrage in diesem Zusammenhang ist, ob die „menschliche Logik“ mit Rationalitätsnormen wie der „formalen Logik“ im Einklang steht oder ob systematische Abweichungen auftreten. Diskutiert wird auch, welche Maßstäbe an rationales Denken angelegt werden sollen.

In ▶ Kap. 16 wird auf Prozesse eingegangen, die zum Lösen eines Problems beitragen. Ein Problem zeichnet sich dadurch aus, dass zwischen Anfangs- und Zielzustand Hindernisse oder Barrieren liegen. Kennzeichnend für Probleme ist auch, dass es noch keine vertraute Lösungsstrategie gibt, um die Barrieren oder Hindernisse zu überwinden. Es handelt sich also um nichtroutinierte Situationen. Die Problemlöseforschung beschäftigt sich damit, wie Menschen solche Problemlösestrategien entwickeln und Barrieren überwinden.

Schließlich werden in ▶ Kap. 17 Prozesse des Urteilens und Entscheidens behandelt. Hier geht es um Einflussfaktoren, Prozesse und Strategien, die sowohl „gute“ als auch „irrationale“ Urteile und Entscheidungen hervorbringen – wie also beispielsweise Fehlleistungen zustande kommen, wie wir relevante Informationen suchen und wie diese verarbeitet werden.

Logisches Denken

Markus Knauff und Günther Knoblich

15.1 Einleitung: Logik und vernünftiges Denken – 534

15.2 Sicheres logisches Schließen – 536
15.2.1 Konditionales Schließen – 536
15.2.2 Syllogistisches Schließen – 543
15.2.3 Relationales Schließen – 548

15.3 Unsicheres logisches Schließen – 551
15.3.1 Anfechtbares Schließen – 552
15.3.2 Überzeugungsänderung – 552
15.3.3 Denken mit mehr als zwei Wahrheitswerten – 556
15.3.4 Nichtmonotones Schließen – 557
15.3.5 Defaults und präferierte mentale Modelle – 559
15.3.6 Nachdenken über Mögliches und Notwendiges – 560
15.3.7 Ramsey-Test – 561
15.3.8 Bayesianisches Denken – 561
15.3.9 Induktives Denken – 562

15.4 Neuronale Korrelate des logischen Denkens – 563
15.4.1 Logisches Denken im intakten Gehirn – 564
15.4.2 Logisches Denken nach Hirnschädigungen – 565

15.5 Drei wichtige Fragen der Psychologie des logischen Denkens – 566
15.5.1 Welche Rolle spielt Wissen für das logische Denken? – 566
15.5.2 Hilft Visualisierung beim logischen Denken? – 570
15.5.3 Ist logisches Denken rationales Denken? – 573

15.6 Anwendungsbeispiele – 575

15.7 Ausblick – 578

15.8 Weiterführende Informationen – 578

Literatur – 580

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_15

Im Blickfang

Zwei Anekdoten über das logische Denken

Beginnen wir dieses Kapitel über das logische Denken mit einer (etwas) lustigen und einer (etwas) traurigen Anekdote. Vor einiger Zeit unterhielten wir uns mit einem Kollegen, einem bekannten Psychologen, der wenig davon hält, wenn sich Psychologen mit Logik befassen. Im Verlauf des Gesprächs sagte einer von uns den Satz: „Wenn Menschen logisch denken können, dann sind wir rational." Etwas später kamen wir dann zu der Schlussfolgerung: „Menschen können nicht logisch denken, also sind wir nicht rational." Unser Kollege freute sich und belehrte uns, dass wir nun aber einen großen logischen Lapsus begangen hätten. Aus der konditionalen Aussage „Wenn logisch, dann rational" und der Annahme, dass Menschen nicht logisch denken können, folgt nach den Regeln der Aussagenlogik nicht, dass Menschen nicht rational sind. Viele Menschen machen diesen Fehler, weil sie aus „Wenn a, dann b" und „nicht a" schließen, dass „nicht b" der Fall ist. Wir gestehen, erstens, die Geschichte ist nicht so wahnsinnig lustig. Zweitens haben wir uns die Geschichte nur ausgedacht, auch wenn wir dabei einige echte Kollegen vor Augen hatten. Und drittens: Ehrlich gesagt, würde uns der beschriebene logische Fehler nicht wirklich unterlaufen. Die Anekdote verdeutlicht aber einen großen Vorteil des logischen Denkens. Logik hilft, schlüssig und folgerichtig zu argumentieren und Fehler in der Argumentation anderer aufzudecken. Mit Logik können wir allein aufgrund der Struktur von Argumenten entscheiden, ob eine Schlussfolgerung zulässig ist. Die Themen menschliche Rationalität, logisches Denken und richtiges Argumentieren sind deshalb seit Jahrtausenden untrennbar verbunden.

Die zweite Geschichte ist wirklich *nicht* ausgedacht: Ein anderer Kollege, ein in Italien bekannter Psychotherapeut, behandelte einmal eine Patientin, die große Angst davor hatte, sich mit dem HI-Virus zu infizieren und an AIDS zu sterben. Die Patientin kam in stationäre Behandlung, weil sie eine Zeitung gelesen und dabei ein Foto von Rock Hudson entdeckt hatte, der bekanntlich an AIDS verstorben ist. Die Frau war nun sehr besorgt, dass sie sich durch das Berühren der Zeitung mit dem HIV angesteckt haben könnte. Ihre Überlegung war folgendermaßen:

Der Fotograf muss Hudson sehr nahe gewesen sein, denn das Bild war eine Nahaufnahme. Also kann der Fotograf sich mit dem HI-Virus infiziert haben. Als er das Foto entwickelt hat, kann er also das Virus auf das Foto übertragen haben. Das Negativ des Fotos war mit dem Abzug in Kontakt, also kann das Virus auf das Foto übertragen worden sein. Der Arbeiter, der die Druckmaschine bediente, hat das Foto berührt und kann das Virus auf die Druckmaschine übertragen haben. Also kann die Druckmaschine das Virus auf alle gedruckten Zeitungen übertragen haben. Als ich die Zeitungen berührt habe, kann ich mich also mit dem Virus infiziert haben. (Johnson-Laird et al. 2006, S. 823)

Diese Beschreibung macht eine weitere Besonderheit des logischen Schlussfolgerns deutlich: In der formalen Logik wird streng zwischen der *Form* und dem *Inhalt* eines Schlusses unterschieden, auch wenn dies – wie wir in diesem Kapitel sehen werden – bei realen Schlüssen von Menschen oft nicht der Fall ist. Eine Schlussfolgerung kann demnach *logisch gültig*, aber die Konklusion *inhaltlich falsch* sein, wenn man von falschen Prämissen ausgeht. Die Welt von Menschen mit Zwangsstörungen oder Wahnvorstellungen kann also logisch konsistent sein, jedoch zu falschen Schlüssen führen, wie bei der beschriebenen Patientin. Vor allem aber hilft uns die Logik dabei, vom faktisch Gegebenen abzuweichen und über Alternativen zu dem nachzudenken, was tatsächlich der Fall ist. Wir können uns ausmalen, was in anderen möglichen Welten gilt, und dann weitere Schlüsse ziehen, sodass unsere Vorstellungen von dieser Welt eine konsistente Gesamtheit ergeben. In der Literatur und im Kino werden uns oft solche logisch widerspruchsfreien Alternativen zur Wirklichkeit beschrieben.

15.1 Einleitung: Logik und vernünftiges Denken

15

Logisches Denken und *Rationalität* sind seit Jahrtausenden zentrale Themen für Philosophen, die sich mit den Voraussetzungen, dem Zustandekommen und dem begründeten Zweifel an Erkenntnissen, Wissen und Überzeugungen befassen. **Logik** spielt dabei eine wichtige Rolle, weil sie angibt, wie man *richtig* denkt und argumentiert. Wenn wir uns zum Beispiel eine Meinung über etwas bilden – sagen wir die Ursachen des Klimawandels –, hilft uns die Logik, Informationen aus unterschiedlichen Quellen zu verbinden, die Aussagen verschiedener Experten auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen und auch unsere eigenen Überzeugungen kritisch zu hinterfragen und zu revidieren, wenn wir feststellen, dass sie Widersprüche enthalten oder auf falschen Schlussfolgerungen beruhen. Wenn wir uns dann eine Meinung gebildet haben, möchten wir in der Regel auch andere von unserem Standpunkt überzeugen. Hierbei ist die Logik ebenfalls eine große Hilfe. Logik hilft uns bei der Entwicklung einer stichhaltigen *Argumentation*, sie bringt Struktur in unsere Argumente und macht sie für Gesprächspartner nachvollziehbar. Und sie hilft uns, Fehler in der Argumentation anderer zu erkennen, aufzudecken und zu entkräften, wenn wir unserem Gegenüber z. B. logische Fehler oder Widersprüche in der Argumentation nachweisen können. Insgesamt macht die Logik eine Diskussion fairer, weil nur die Schlüssigkeit von Argumenten zählt und nicht Redegewandtheit, rhetorische Tricks oder unfaire verbale Angriffe.

Obwohl logisches Denken und logisches Argumentieren zwei Seiten derselben Medaille sind, konzentriert sich das vorliegende Kapitel auf die Frage, wie rationales, vernünftiges *Denken* verläuft, also ein Denken, das frei ist von Fehlern und Widersprüchen. Im Mittelpunkt stehen dabei die kognitiven Prozesse (Gedanken, Überzeugungen, Überlegungen usw.), mit denen wir zu Schlussfolgerungen gelangen und logische Konsequenzen herleiten. Dabei bilden wir uns eine mentale Repräsentation davon, was der Fall ist oder sein könnte und wenden kognitive Prozesse auf diese Repräsentation an, um diese zu verändern oder neue Repräsentationen zu schaffen. Das Ergebnis ist dann eine neue Annahme, die logisch zwingend und unbezweifelbar wahr ist, sofern die ursprünglichen Annahmen wahr sind.

Für die Rolle der Logik beim Argumentieren, muss hier auf die einschlägige Literatur verwiesen werden (z. B. van Eemeren und Grootendorst 2004). An vielen Stellen dieses Kapitel hilft es aber, darüber nachzudenken, wie eine Schlussfolgerung als Folge von Argumenten in einem Vortrag, einer Rede oder einer Diskussion wirken würde. Sind die Schlussfolgerung und der damit verbundene Standpunkt überzeugend? Was halten Sie beispielsweise von folgender Argumentation zum Klimawandel?

Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, ist die Erderwärmung zu bremsen.
Die CO_2-Emission wird nicht *reduziert.*

Also ist die Erderwärmung nicht *zu bremsen.*

Die ersten beiden Sätze (über der Linie) nennt man *Prämissen*; der dritte Satz (unter der Linie) wird in der Psychologie als *Konklusion* bezeichnet. Aus Sicht der formalen Logik ist diese Terminologie nicht ganz korrekt, da streng genommen erst geprüft werden muss, ob die sogenannte Konklusion logisch zwingend aus den Prämissen folgt. Erst dann kann der Satz, logisch gesehen, als Konklusion bezeichnet werden. Die Psychologie ist hier aber weniger streng und bezeichnet auch die Aussage als Konklusion, die noch (meist von Probanden in Laborexperimenten) auf logische Gültigkeit überprüft werden muss. Sie werden in diesem Kapitel lernen, wieso die Konklusion im obigen Beispiel (Erderwärmung nicht zu bremsen), *kein* logisch gültiger Schluss ist, wenn man den Regeln der klassischen Logik folgt.

Als Erfinder der Logik gilt Aristoteles (384–322 v. Chr.), weil er vermutlich der erste Mensch war, der die Struktur und Gültigkeit von Argumenten untersucht hat, unabhängig vom Inhalt der Aussagen. Schon vor ihm haben sich Philosophen damit befasst, wie man in Versammlungen und Diskussionen andere Menschen mit guten Argumenten und richtigen Schlussfolgerungen von seiner Meinung überzeugt. Erst Aristoteles hat aber ein logisches System entwickelt, das für die Logik bis heute von einmaliger Bedeutung ist (Kneale und Kneale 1962). Heute ist die *formale Logik* ein komplexes Forschungsgebiet, das sich mit dem Zusammenhang zwischen der logischen Form von Aussagen und der Gültigkeit von Schlussfolgerungsbeziehungen zwischen diesen Formen befasst. Gute Einführungen in die formale Logik geben Forbes (1994) und Schöning (2000).

Für die Psychologie stellt sich die Frage anders. Philosophen, die sich mit Logik befassen, interessiert, wie vernünftiges Denken verlaufen *sollte*. Das ist die *normative* Herangehensweise. Psychologen interessiert, wie das Denken *tatsächlich* verläuft. Das ist die *deskriptive* Herangehensweise. Es gibt kaum einen Bereich der Psychologie, in dem das Verhältnis zwischen normativen Theorien und deskriptiven Theorien eine so große Rolle spielt. Eine *normative Theorie* macht darüber Aussagen, wie etwas sein soll, während eine *deskriptive Theorie* Aussagen darüber macht, was in der „Realität" empirisch der Fall ist. Im Unterschied zu normativen Theorien können deskriptive Theorien also geprüft und ggf. falsifiziert werden. Normative Theorien müssen hingegen in sich objektiv begründbar sein, widerspruchsfrei sein und noch weitere Kriterien erfüllen (Spohn 1993).

Logik ist also die normative Theorie, auf die sich psychologische Theorien über den Verlauf menschlichen schlussfolgernden Denkens beziehen müssen. Sie gibt den *Sollwert* an, auf den bei der Beurteilung von Denkleistungen Bezug genommen wird. Das ist ähnlich wie in Wahrnehmungsexperimenten, wenn z. B. zur Beurteilung von Wahrnehmungsleistungen auf die objektiv messbare Anzahl der präsentierten Reize Bezug genommen wird, oder in der Gedächtnispsychologie, in der subjektive Erinnerungen von Probanden mit tatsächlichen Ereignissen verglichen werden. Auch in der Sprachpsychologie wird die gesprochene Sprache mit den Regeln der Linguistik verglichen. So wie in diesen Bereichen empirische Daten mit fest definierten Sollwerten verglichen werden, werden in der Denkpsychologie empirische beobachtete Schlüsse von Menschen mit den normativen Vorgaben formaler Logiken verglichen. Man kann es auch so formulieren, dass formale Logik die *Metawissenschaft* für die Psychologie des logischen Denkens ist. Logik verhält sich zum Denken wie die Linguistik zur Sprache oder die Arithmetik zum Kopfrechnen. Auf alternative Sichtweisen kommen wir am Ende dieses Kapitels zurück.

Das Kapitel ist wie folgt gegliedert. Nach dieser Einleitung, werden in ▶ Abschn. 15.2 zunächst Schlussfolgerungen behandelt, die mit *Sicherheit* wahr sind, wenn die Prämissen wahr sind. Solche Schlüsse werden auch als *deduktive Schlüsse* bezeichnet. Eine ausführlichere Darstellung ist in Knauff (2006) zu finden. Wir beginnen mit den *konditionalen Schlüssen*. Eine besondere Rolle spielen dabei *Wenn-dann-Aussagen*, die auch als *Implikationen* bezeichnet werden. Die Aufgaben sehen z. B. folgendermaßen aus:

Wenn Menschen einen freien Willen haben, dann sind sie für ihr Handeln selbst verantwortlich.
Menschen haben keinen *freien Willen.*

Sind Menschen also für ihr Handeln selbst verantwortlich?

Als zweites Thema im Bereich des sicheren Schließens wird das Denken mit **Quantoren** wie *alle*, *einige* und *keine* behandelt. Solche Schlüsse werden als *kategoriale Syllogismen* bezeichnet. Hier ein Beispiel:

Alle Vögel können fliegen.
Tweety ist ein Vogel.

Kann Tweety also fliegen?

Das dritte Thema im Bereich des sicheren Schließens sind *relationale Schlussfolgerungen* folgender Art:

Piaget wurde früher geboren als Skinner.
Skinner wurde früher geboren als Chomsky.

Also wurde Piaget früher geboren als Chomsky.

Viele konditionale, syllogistische und relationale Schlüsse von Menschen stimmen recht gut mit den Normen der formalen Logik überein. Manchmal weichen Menschen aber auch von diesen Vorgaben ab. Die Übereinstimmungen und Abweichungen werden in diesem Abschnitt dargestellt.

In ▶ Abschn. 15.3 geht es um das *unsichere Schließen*. Bei den deduktiven Schlüssen in ▶ Abschn. 15.2 bleiben gültige Schlussfolgerungen auch dann gültig, wenn man zusätzliche Informationen hinzufügt. Deshalb sind sie *sicher* und werden mit den Normen *klassischer Logiken* verglichen. Im Alltag (und auch in der Wissenschaft) ziehen wir aber oft Schlüsse, die nicht mit Sicherheit, sondern nur wahrscheinlich oder möglicherweise oder nur, wenn nichts dagegen spricht, gültig sind. Oft müssen solche

Schlüsse auch abgeändert oder zurückgenommen werden. In unserem Tweety-Beispiel folgt beispielsweise daraus, dass Vögel fliegen können und Tweety ein Vogel ist, dass Tweety fliegen kann. Aber nehmen wir nun an, Sie erfahren, dass Tweety ein Pinguin ist. Dann sieht der Schluss etwa so aus:

Vögel fliegen.
Aber Pinguine fliegen nicht.
Tweety ist ein Vogel.
Tweety ist ein Pinguin.

Also kann Tweety nicht fliegen.

Solche Schlussfolgerungen sind für die Denkpsychologie wichtig, wenn wir begreifen wollen, wie Menschen denken und entscheiden, wenn Informationen nur unvollständig, vage und ungenau zur Verfügung stehen. In dem Kapitel werden deshalb Modelle und Theorien dargestellt, die sich mit anfechtbaren Schlüssen, der Änderung von Überzeugungen, dem Nachdenken über Mögliches und Notwendiges sowie mit probabilistischen Schlüssen befassen. Als normative Theorien dienen dabei klassische und *nichtklassische Logiken* sowie die Regeln der *Wahrscheinlichkeitsrechnung*.

In ▶ Abschn. 15.4 geht es um die Verbindung von logischem Denken und Gehirn. Zunächst wird dargestellt, welche Hirnstrukturen an logischen Schlussfolgerungen beteiligt sind. Anschließend wird beschrieben, welche Folgen verschiedene Hirnverletzungen für das logische Denken haben können.

In ▶ Abschn. 15.5 werden einige ausgewählte Fragen der aktuellen denkpsychologischen Forschung behandelt. Dabei geht es um die Interaktion von Wissen und Denken, die Rolle von Visualisierungen beim logischen Schließen und die grundsätzliche Frage, ob Abweichungen von logischen Normen tatsächlich als „Fehler" oder „irrational" betrachtet werden sollen.

Wenn Sie dieses Kapitel gelesen haben, werden Sie mehr über die Möglichkeiten und Grenzen logischen und rationalen Denkens wissen. Sie werden erkennen, wie gut Sie sich im Allgemeinen an die Gesetze der Logik halten, wenn Sie in Ihrem Alltag Probleme lösen, Entscheidungen treffen oder zu Urteilen kommen. Sie werden aber auch logische Fehler besser begreifen und verstehen, welche Schlussfolgerungen für Menschen besonders schwierig sind. Sollte Ihnen das Kapitel zudem dabei helfen, bestimmte systematische Denkfehler zukünftig zu vermeiden, hätte es sein Ziel mehr als erreicht.

15.2 Sicheres logisches Schließen

Keine Art des logischen Denkens wurde in der Psychologie so gut untersucht, wie das sichere bzw. **deduktive Schließen**. Als *sicher* oder *deduktiv* bezeichnet man eine Schlussfolgerung – auch Inferenz genannt – immer dann, wenn wir aus gegebenen Prämissen einen eindeutigen Schluss ziehen können, der mit Sicherheit wahr ist, sofern die Prämissen wahr sind. Es kann also keine gültige Konklusion durch eine weitere Prämisse wieder ungültig werden. Das liegt daran, dass klassische Logiken wie die *Aussagen-* und die *Prädikatenlogik* diese Eigenschaft besitzen. Man nennt die Eigenschaft auch **Monotonie** und die entsprechenden klassischen Logiken *monotone Logiken*. Außerdem kann ein deduktiver Schluss immer nur zu genau einem von zwei **Wahrheitswerten** führen. Er kann nur „wahr" oder „falsch" sein. Diese Eigenschaft wird als *Zweiwertigkeit* bezeichnet. Technisch gesprochen werden also im Folgenden die wichtigsten Formen des zweiwertigen, monotonen, logischen Schlussfolgerns behandelt.

15.2.1 Konditionales Schließen

Die vielleicht am besten erforschte Form des sicheren Schließens ist das Denken mit *Wenn-dann-Aussagen*. Die normative Theorie, die definiert, ob eine konditionale Schlussfolgerung logisch gültig ist, ist die **Aussagenlogik**. Als Begründer dieser klassischen Logik gilt der britische Mathematiker, Logiker und Philosoph George Boole (1815–1864). Boole hatte die Unzulänglichkeiten der bereits von Aristoteles entwickelten Logik erkannt – er hat sich mit den Syllogismen befasst, die im nächsten Abschnitt behandelt werden – und eine neue Logik entwickelt, um diese zu überwinden. Für die Psychologie ist bemerkenswert, dass Boole (1854/1953) seine Arbeiten unter dem Titel *An Investigation of the Laws of Thought* veröffentlichte. Dieser Titel verdeutlicht, dass es Boole um die Formalisierung der Gesetze *des menschlichen Denkens* ging. Dieses Ziel macht Boole (1854, S. 1) bereits im ersten Satz deutlich: „The design of the following treatise is to investigate the fundamental laws of those operations of the mind by which reasoning is performed." Im Folgenden lernen Sie einige Grundprinzipien der Boole'schen Aussagenlogik kennen.

■ Aussagenlogik und Gültigkeit konditionaler Schlüsse

Die von Boole entwickelte Aussagenlogik spielt für die Psychologie immer eine Rolle, wenn wir einzelne atomare Aussagen (Prämissen) mit den Wörtern *nicht*, *und*, *oder*, *wenn ... dann*, *nur wenn ... dann* zu neuen Aussagen (Konklusionen) verbinden. Die Rolle der Aussagenlogik können wir uns dann ähnlich vorstellen, wie die der Arithmetik für das Kopfrechnen, wenn wir Operatoren, wie + oder −, dazu verwenden, um Symbole zu verknüpfen, die für Werte stehen, um eine neue Aussage zu generieren (z. B. die Variablen a, b werden durch den Operator + zu $a + b$ verknüpft). So wie die Arithmetik die Gesetze des Rechnens mit Zahlen definiert, ist die Aussagenlogik die normative Theorie für den korrekten Umgang mit *wenn … dann*, *und* und *oder*. Je nachdem mit welchem dieser Operatoren wir Aussagen (Prämissen) verbinden, hat die zusammengesetzte Aussage (Konklusion) dann einen bestimmten, neuen Wert. In der Aussagenlogik stehen Symbole wie P oder Q nicht für Zahlen, sondern für die Aussagen, die durch die Operatoren verbunden werden. Kommen wir auf das Eingangsbeispiel zum Klimawandel zurück. Für jede der beiden Prämissen *Die CO_2-Emission wird reduziert* und *Die Erderwärmung ist zu bremsen* gibt es nur zwei mögliche Wahrheitswerte, eine Prämisse kann entweder wahr (W) oder falsch (F) sein. Wenn man also mit P die Prämisse *Die CO_2-Emission wird reduziert* bezeichnet, kann diese Aussage wahr sein (*Die CO_2-Emission wird wirklich reduziert*, W) oder nicht (*Die CO_2-Emission wird nicht wirklich reduziert*, F). Die Gesetze der Aussagenlogik geben an, welche Wahrheitswerte sich erge-

Tab. 15.1 Wahrheitstabelle für den Operator *nicht* (¬)

P	¬*P*
W	*F*
F	*W*

ben, wenn man logische Operatoren auf Aussagen anwendet. Der einfachste Operator ist die Negation *nicht*, die mit dem Zeichen ¬ symbolisiert wird. Dieser Operator verändert den Wahrheitswert einer einzelnen Aussage wie in Tab. 15.1 dargestellt.

In der ersten Spalte der **Wahrheitstabelle** sind die zwei möglichen Wahrheitswerte für die Aussage *P* angegeben. Die zweite Spalte illustriert den Wahrheitswert der Aussage nach der Anwendung des logischen Operators *nicht* (¬). Wenn also *P* wahr ist, dann ist ¬*P* falsch; wenn *P* falsch ist, dann ist ¬*P* wahr. Die Bedeutung des logischen Operators *nicht* liegt also darin, den Wahrheitswert einer Aussage in ihr Gegenteil zu überführen.

Die anderen vier Operatoren *und*, *oder*, *wenn … dann*, *wenn … genau dann* verknüpfen jeweils *zwei* unterschiedliche Aussagen *P* und *Q* miteinander. Sie werden auch als **Junktoren** bezeichnet und mit den Zeichen ∧ für *und*, ∨ für *oder*, → für die Implikation, also die Wenn-dann-Regel, und ↔ für die Äquivalenzrelation symbolisiert. Für die kombinierten Wahrheitswerte der zwei atomaren Aussagen *P* und *Q* gibt es dann insgesamt vier Möglichkeiten (Tab. 15.2). Demnach können beide Aussagen wahr sein, *P* kann wahr und *Q* kann falsch sein, *Q* kann wahr und *P* kann falsch sein, oder beide Aussagen können falsch sein. Diese vier möglichen Kombinationen von *P* und *Q* sind in den ersten beiden Spalten der Wahrheitstabelle dargestellt (*WW*, *WF*, *FW*, *FF*). Die nächsten vier Spalten geben für jede dieser Möglichkeiten an, welcher Wahrheitswert resultiert, wenn die beiden Aussagen *P* und *Q* mit unterschiedlichen Junktoren verknüpft werden. Die Konjunktion *P* ∧ *Q* ist nur dann wahr, wenn sowohl *P* als auch *Q* wahr sind (*WW*). So ist die Konjunktion *Die CO_2-Emission wird reduziert, und die Erderwärmung ist zu bremsen* nur dann wahr, wenn sowohl die Aussage *Die CO_2-Emission wird reduziert* als auch die Aussage *Die Erderwärmung ist zu bremsen* wahr ist. Die Disjunktion *P* ∨ *Q* ist wahr, wann immer eine der Teilaussagen *P* und *Q* wahr *ist* (*WW*, *WF*, *FW*), und nur falsch, wenn beide Aussagen falsch sind (*FF*). So ist die Disjunktion *Die CO_2-Emission wird reduziert, oder die Erderwärmung ist zu bremsen* nur dann falsch, wenn sowohl die Aussage *Die CO_2-Emission wird reduziert* als auch die Aussage *Die Erderwärmung ist zu bremsen* falsch ist.

Die bisher geschilderten Gesetzmäßigkeiten entsprechend weitgehend der Intuition. Für die Implikation *wenn … dann* (→), die später im Mittelpunkt der Betrachtung stehen wird, ist die Sache jedoch etwas schwieriger. Denken Sie deshalb beim Weiterlesen immer daran, dass es sich bei der Aussagenlogik um ein formales System handelt und dass solche formalen Systeme manchmal nicht der Alltagsbedeutung von Wörtern entsprechen müssen. Betrachten wir nun die verschiedenen Möglichkeiten für die Implikation im Einzelnen. Wenn zwischen *P* und *Q* eine Beziehung besteht und sowohl *P* und *Q* wahr sind, dann ist auch die Implikation *Wenn P, dann Q* wahr. Wenn sowohl wahr ist, dass die CO_2-Emission reduziert wird, als auch, dass die Erderwärmung aufzuhalten ist, dann ist auch die Implikation *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen* wahr. Wenn allerdings die CO_2-Emission reduziert wird (*P* ist wahr) und die Erderwärmung nicht zu bremsen ist (*Q* ist falsch), dann ist die Implikation falsch.

Schwieriger ist der nächste Fall: Stellen Sie sich vor, dass zwar die CO_2-Emission *nicht* reduziert (*P* ist falsch), die Erderwärmung aber trotzdem gebremst wird (*Q* ist wahr). Gemäß den Regeln der Aussagenlogik ist dann trotzdem die Aussage *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen* wahr, obwohl dies unserer Intuition widerspricht. Das liegt daran, dass man mit der Aussage *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird* nichts darüber sagt, was passiert, wenn die CO_2-Emission *nicht* reduziert wird, und man deshalb in diesem Fall nichts Genaues sagen kann. Die Erderwärmung kann ja auch unter anderen Umständen gebremst werden, über die in der Aussage nichts gesagt wird (z. B. durch die Reduzierung der Methanemission, die etwa im gleichen Maße wie CO_2 zum Treibhauseffekt beiträgt). Ähnliches gilt auch, wenn die Erderwärmung gebremst wird (*Q* ist wahr), obwohl die CO_2-Emission *nicht* reduziert wurde (*P* ist falsch). Nach den Regeln der Aussagenlogik ist auch in diesem Falle die Aussage *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen* wahr, obwohl dies wieder nicht gut mit unserer Intuition zusammenpasst. Der letzte Fall ist wieder einfacher: Daraus dass die CO_2-Emission *nicht* reduziert (*P* ist falsch) und die Erderwärmung *nicht* gebremst wird (*Q* ist falsch) folgt sinnvollerweise auch, dass die Implikation wahr ist.

Tab. 15.2 Wahrheitstabelle für die Junktoren der Aussagenlogik

	Prämisse 1	Prämisse 2	Konjunktion	Disjunktion	Implikation	Äquivalenz-relation
Aussage in natürlicher Sprache	*P*	*Q*	*P und Q*	*P oder Q*	*Wenn P, dann Q*	*Nur wenn P, dann Q*
Aussage in symbolischer Form	*P*	*Q*	*P* ∧ *Q*	*P* ∨ *Q*	*P* → *Q*	*P* ↔ *Q*
Wahrheitswerte	*W*	*W*	*W*	*W*	*W*	*W*
	W	*F*	*F*	*W*	*F*	*F*
	F	*W*	*F*	*W*	*W*	*F*
	F	*F*	*F*	*F*	*W*	*W*

Tab. 15.3 Zulässige und unzulässige Schlussschemata beim konditionalen Schließen. P1 und P2 steht für die erste bzw. zweite Prämisse und K für die Konklusion. In der abstrakten Form werden die Schlussschemata mithilfe der Variablen *P* und *Q* dargestellt; im Beispiel werden diese Variablen dann mit konkreten Aussagen belegt

		Abstrakte Form	Beispiel
Konklusion zulässig	Modus ponens (MP)	P1: $P \rightarrow Q$ P2: P K: Q	P1: *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen.* P2: *Die CO_2-Emission wird reduziert.* K: *Die Erderwärmung ist zu bremsen.*
	Modus tollens (MT)	P1: $P \rightarrow Q$ P2: $\neg Q$ K: $\neg P$	P1: *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen.* P2: *Die Erderwärmung ist nicht zu bremsen.* K: *Die CO_2-Emission wurde nicht reduziert.*
Konklusion nicht zulässig	Bejahung des Hinterglieds (AC)	P1: $P \rightarrow Q$ P2: Q K: P	P1: *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen.* P2: *Die Erderwärmung ist zu bremsen.* K: *Die CO_2-Emission wird reduziert.*
	Verneinung des Vorderglieds (DA)	P1: $P \rightarrow Q$ P2: $\neg P$ K: $\neg Q$	P1: *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann ist die Erderwärmung zu bremsen.* P2: *Die CO_2-Emission wird nicht reduziert.* K: *Die Erderwärmung ist nicht zu bremsen.*

Die nächste Spalte zeigt die Äquivalenzrelation, die als *Wenn P, dann und nur dann Q* (↔) gelesen wird. Die Wahrheitstabelle für die Äquivalenzrelation unterscheidet sich nur in der vorletzten Zeile von der Implikation. Die Äquivalenzrelation *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, dann und nur dann ist die Erderwärmung zu bremsen* ist falsch, wenn die Erderwärmung gebremst wird (*Q* ist wahr), obwohl die CO_2-Emission *nicht* reduziert wird (*P* ist falsch). Der Grund ist, dass bei der Äquivalenzrelation ein symmetrisches Verhältnis zwischen *P* und *Q* besteht (eine Menge wird in eineindeutige Äquivalenzklassen zerlegt), also Fälle ausgeschlossen sind, in denen die Erderwärmung zu bremsen ist, ohne dass die CO_2-Emission reduziert wird (was vermutlich der Fall ist).

Nachdem nun beschrieben wurde, welche Auswirkungen logische Junktoren auf die Wahrheitswerte von Aussagen haben, können wir zu den logischen Regeln der Aussagenlogik kommen, die festlegen, welche Schlussfolgerungen man aus gegebenen Aussagen logisch eindeutig ziehen kann. Beim **konditionalen Schließen** gibt es insgesamt vier mögliche *Schlussschemata*, die jeweils aus zwei *Prämissen* und einer *Konklusion* (Schlussfolgerung) bestehen. Tab. 15.3 zeigt die abstrakte Form und ein Beispiel für jedes Schlussschema. Wie man sieht, sind nur bei zwei dieser Schemata logisch gültige Schlussfolgerungen möglich. Diese heißen *Modus ponens* (MP) und *Modus tollens* (MT). Die anderen beiden Schemata erlauben keine eindeutigen Schlussfolgerungen. Sie heißen *Verneinung des Antezedens* und *Bejahung der Konsequenz*. Das *Antezedens* wird auch als Vorderglied und die *Konsequenz* als Hinterglied bezeichnet.

Wie kommt man nun darauf, dass der MP und der MT zulässig sind und die *Bejahung des Hinterglieds* (*affirmation of consequence*, AC) und die *Verneinung des Vorderglieds* (*denial of antecedent*, DA) nicht? Das kann man formal beweisen, aber man kann es sich auch anhand von Tab. 15.2 verdeutlichen. Es gibt nur eine Zeile, in der die Implikation *Wenn P, dann Q* wahr ist und *P* auch wahr ist. In dieser Zeile ist *Q* auch wahr. Deshalb kann man aus den beiden Prämissen eindeutig schließen, dass *Q* ebenfalls wahr ist. Es gibt auch nur eine Zeile, in der die Implikation wahr ist und *Q* falsch. In dieser Zeile ist auch *P* falsch. Deshalb kann man beim MT eindeutig von den Prämissen *Wenn P, dann Q* und ¬*Q* auf ¬*P* schließen. Betrachtet man die Prämissen für die Bejahung des Hinterglieds, dann merkt man, dass es in Tab. 15.2 zwei Zeilen gibt, in denen die Implikation $P \rightarrow Q$ wahr und *Q* wahr ist. In einer davon ist *P* wahr, in der anderen ist *P* falsch. Also ist keine eindeutige Schlussfolgerung möglich. Für die Verneinung des Vorderglieds gilt etwas Ähnliches. Es gibt zwei Zeilen, in denen *P* falsch und die Implikation $P \rightarrow Q$ wahr ist. In einer der Zeilen ist aber *Q* wahr und in der anderen falsch. Es ist also wieder keine eindeutige Schlussfolgerung möglich.

Nun ist auch klar, warum das Eingangsbeispiel zum Klimawandel gemäß der Aussagenlogik keinen gültigen Schluss darstellte. Die Argumentation folgt dem Schema „Verneinung des Vorderglieds" und ist damit nach den Regeln der Aussagenlogik unzulässig. Diesen Fehler machen aber viele Menschen.

Dazu sind noch zwei Anmerkungen erforderlich. Zum einen bezieht sich Tab. 15.3 nur auf die Implikation, die auch *materiale Implikation* genannt wird. Wie bereits dargestellt, ist demnach die Aussage *Wenn P, dann Q* falsch, wenn *P* wahr ist und *Q* falsch, jedoch in allen andern Fällen wahr, also wenn *P* falsch und *Q* wahr ist, wenn *P* und *Q* beide wahr und wenn *P* und *Q* beide falsch sind. Das folgt aus der logischen Interpretation der materialen Implikation, ist aber nicht sehr intuitiv und deckt sich auch nicht mit unserer Alltagssprache. Einige Psychologen haben deshalb kritisiert, dass sich diese aussagenlogische Interpretation der Implikation nur bedingt als Norm für das menschliche Schlussfolgern eignet

(Überblick in Schroyens 2010). Jedoch produzieren Probanden in Experimenten mit dieser Art von Wenn-dann-Aussagen viele interessante Antwortmuster, wie wir gleich sehen werden.

Die zweite Anmerkung bezieht sich auf die *Form* und den *Inhalt* von Aussagen, die logisch überprüft werden sollen. Es ist wichtig zu begreifen, dass die **Gültigkeit** von Aussagen in der Logik *nicht* von den Inhalten abhängt, die man in die Prämissen einsetzt. Kernstück jeder Logik ist nämlich die Trennung von Form und Inhalt einer Aussage (Kneale und Kneale 1962). Die Gültigkeit der Schlussfolgerung

Wenn jemand in München wohnt, wohnt er in Bayern.
Sepp wohnt in München.

Also wohnt Sepp in Bayern.

kann allein aufgrund ihrer logischen Form

Wenn P, dann Q.
P ist wahr.

Also ist Q wahr.

entschieden werden. Als logisch korrekt wird diejenige Beziehung zwischen Prämissen und Konklusionen aufgefasst, bei der wahre Voraussetzungen zu einem wahren Schluss führen. Wenn jedoch eine der Prämissen einer Schlussfolgerung falsch ist, dann kann der Schluss falsch sein, obwohl die Folgerungsbeziehung korrekt ist. So geht z. B. die gültige Folgerung

Wenn jemand in Bayern wohnt, wählt er CSU.
Ali wohnt in Bayern.

Also wählt Ali die CSU.

von der falschen Prämisse aus, dass alle Bayern die CSU wählen (auch wenn das wirklich viele Bayern tun). Die logische Gültigkeit der Schlussfolgerung bleibt davon jedoch unberührt, da sie ausschließlich von der Form der Folgerungsbeziehung abhängt und nicht vom Inhalt der Aussagen. Dass sich Menschen nicht immer an diese Trennung von Form und Inhalt halten, ist Gegenstand von ▶ Abschn. 15.5.1. Zunächst kommen wir aber zu einigen experimentellen Ergebnissen, die zeigen, wie Menschen generell mit konditionalen Schlüssen umgehen.

Empirische Ergebnisse zum konditionalen Schließen

Es liegen umfangreiche experimentelle Ergebnisse zum konditionalen Schließen vor (Evans et al. 1993; Manktelow 1999). In vielen Experimenten zum konditionalen Schließen werden Teilnehmern unterschiedliche Schlussschemata vorgelegt, und sie werden entweder aufgefordert, die Gültigkeit einer bestimmten Schlussfolgerung zu beurteilen, selbst eine gültige Schlussfolgerung zu ziehen oder aus einer Liste möglicher Schlussfolgerungen eine gültige auszuwählen. Bei solchen Untersuchungen ergibt sich ein sehr robustes Muster für die vier Schlussschemata aus ◘ Tab. 15.3. In ◘ Tab. 15.4 sind die Ergebnisse einiger Studien zusammengefasst. Wie zu sehen ist, geben für den MP so gut wie alle Probanden richtig an, dass die Konklusion aus den beiden Prämissen abgeleitet werden kann. Für den MT geben knapp 60 % der Probanden an, dass es sich hierbei um ein gültiges Schlussschema handelt. Die Ablehnung der nicht zulässigen Konklusionen bei der Bejahung des Hinterglieds und Verneinung des Vorderglieds klappt ebenfalls recht gut, aber auch hier treten häufiger Fehler auf als beim MP. Rund ein Viertel der Teilnehmer beurteilte bei diesen Schlussschemata die ungültigen Konklusionen als gültig.

◘ **Tab. 15.4** Häufigkeit (in Prozent) der Akzeptierung des Modus ponens (MP), Modus tollens (MT), der Bejahung des Hinterglieds (AC) und der Verneinung des Vorderglieds (DA) bei der Implikation $P \rightarrow Q$. Logisch valide sind nur MP und MT. DA und AC sind nur bei der Äquivalenz $P \leftrightarrow Q$ valide Schlüsse. (Ergebnisse teilweiseaus Evans et al. 1993)

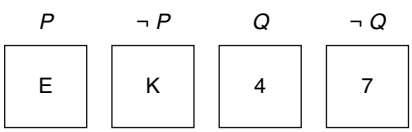
Experiment	N	MP	DA	AC	MT
Taplin (1971)	56	92	52	57	63
Evans (1977)	16	100	69	75	75
Marcus und Rips (1979) *	78	99	37	28	57
Kern et al. (1983)	72	89	28	27	41
Markovits (1988)	76	100	52	42	59

* Mittelwerte aus drei Experimenten. *N* = Anzahl der Probanden

Weitere wichtige empirische Ergebnisse wurden mit der berühmten Wahlaufgabe von Wason (1966) gewonnen. ◘ Abb. 15.1 zeigt die Wason-Aufgabe, die von Johnson-Laird und Wason (1970; Wason und Johnson-Laird 1972) untersucht wurde. Stellen Sie sich vor, dass die Karten nicht nur auf der Vorderseite, sondern jeweils auch auf der Rückseite mit einer Zahl oder einem Buchstaben beschrieben sind. Versuchen Sie nun anzugeben, von welchen Karten man unbedingt die Rückseite anschauen muss, um folgende Regel zu testen: *Wenn sich auf einer Seite der Karte ein Vokal befindet, dann befindet sich auf der anderen Seite eine gerade Zahl.* Bitte überlegen Sie sich die Lösung, bevor Sie weiterlesen.

Um die Gültigkeit der gegebenen Regel zu überprüfen, müssen zwei Karten umgedreht werden: die Karte mit dem E und die Karte mit der 7 auf der Vorderseite. In einem Experiment von Johnson-Laird und Wason fanden nur 4 % (!) der Teilnehmer die korrekte Lösung für diese Aufgabe.

Aber wie kommt man zu der richtigen Lösung? Die Regel, die überprüft werden soll, ist eine Implikation der Form *Wenn P, dann Q*. Wenn wir die Vokale mit der logischen Variable *P* bezeichnen und die geraden Zahlen mit *Q*, dann können wir die Konsonanten durch $\neg P$ (kein Vokal) und die ungeraden Zahlen durch $\neg Q$ (keine gerade Zahl) darstellen. Nun können wir uns die



◘ **Abb. 15.1** Wahlaufgabe nach Wason (1966; *Wason selection task*, WST).Die Aufgabe lautet: Wenn sich auf der einen Seite der Karte ein Vokal befindet, befindet sich auf der anderen Seite eine gerade Zahl. Welche Karten müssen umgedreht werden, um die Gültigkeit der Regel zu prüfen?

richtige Lösung anhand von Tab. 15.2 veranschaulichen. Wenn *P* wahr ist und die Implikation wahr ist, dann ist *Q* auch eindeutig wahr. Deshalb muss man die E-Karte(*P*) umdrehen, um sicherzustellen, dass auf der Rückseite eine gerade Zahl (*Q*) steht, weil sonst die Regel nicht gilt. Analoges gilt für die Karte mit der 7 (¬*Q*), die man umdrehen muss, um sicherzustellen, dass die Rückseite auch wirklich keinen Vokal, d. h. einen Konsonanten (¬*P*) enthält. Das Umdrehen der anderen beiden Karten erlaubt keine eindeutigen Schlussfolgerungen. Wenn auf der einen Seite eine gerade Zahl 4 steht (*Q*) und die Implikation wahr ist, dann kann *P* wahr oder falsch sein. Das heißt, ob auf der anderen Seite der Karte ein Konsonant (¬*P*) oder ein Vokal (*P*) steht, ist für die Gültigkeit der Implikation unbedeutend. Analoges gilt für die K-Karte (¬*P*). Die Implikation ist wahr, egal ob *Q* wahr oder falsch ist, also spielt es keine Rolle, ob auf der Rückseite eine gerade (*Q*) oder ungerade Zahl (¬*Q*) steht.

Die meisten Teilnehmer in der Studie von Johnson-Laird und Wason drehten entweder nur die Karte mit dem Vokal E (*P*, 30 %) oder die Karten mit dem E und der geraden Zahl 4 (*Q*, 50 %) um. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist, dass die Teilnehmer vor allem die Karten umdrehten, die in der zu testenden Regel genannt werden (*matching bias*; Evans et al. 1993). Auf das Beispiel bezogen bedeutet dies, dass die E-Karte (*P*) und die 4-Karte (*Q*) häufig umgedreht werden, weil sie in der zu prüfenden Regel explizit vorkommen (*Wenn P, dann Q*). Konsonanten (¬*P*) und ungerade Zahlen (¬*Q*) kommen dagegen nicht explizit vor, deswegen werden die entsprechenden Karten auch nicht umgedreht. Damit kann besonders gut die hohe Anzahl von Lösungen erklärt werden, in der die Karte mit der geraden Zahl 4 (*Q*) ohne Notwendigkeit umgedreht wird. Weitere Ergebnisse und Erklärungsversuche zur Wason-Aufgabe werden im Folgenden noch mehrmals eine Rolle spielen.

Theoretische Ansätze zum konditionalen Schließen

Es wurden zahlreiche psychologische Theorien entwickelt, mit denen die korrekten Antworten und die logischen Fehler beim konditionalen Schließen erklärt werden können. Die meisten dieser Theorien lassen sich gut anhand der Unterscheidung zwischen *sprachbasierten* und *visuell-räumlichen* Ansätzen erklären. Grundsätzlich postulieren sprachbasierte Theorien (z. B. Clark 1969) eine einheitliche Sprache des Geistes, die mit Propositionen operiert, also den kleinsten bedeutungstragenden mentalen Einheiten, denen ein Wahrheitswert „wahr" oder „falsch" zugeordnet werden kann (Anderson 1990). Zwar sind Propositionen nicht mit sprachlichen Ausdrücken identisch, weil sie abstrakter sind, jedoch werden sie oft mit sprachlichen Repräsentationen und Prozessen identifiziert. Logische Schlussfolgerungen werden in dieser Theorie so erklärt, dass zunächst die Prämissen einer logischen Aufgabe in sprachnaher Form als Propositionen im Arbeitsgedächtnis repräsentiert werden. Anschließend werden syntaktische logische Regeln aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen. Ihre Anwendung auf die propositionale Repräsentation führt dann zu einem *mentalen Beweis*, den wir uns wie die Beweisführung in der klassischen Aussagenlogik vorstellen können.

Die zweite Gruppe psychologischer Theorien des (konditionalen) Denkens ist an der *logischen Modelltheorie* orientiert und beruht auf der Annahme, dass mentale Schlussfolgerungen vor allem auf visuell-räumlichen Repräsentationen und Prozessen basieren. In diesen visuell-räumlichen Repräsentationen bleibt die Semantik (Bedeutung) der Prämissen erhalten, da sie nicht in eine rein syntaktische Form übertragen werden. Diese Art der „analogen" Repräsentation wird als *mentales Modell* bezeichnet (Johnson-Laird 1983, 2006; Johnson-Laird und Byrne 1991). Der Unterschied zu den Beweistheorien liegt darin, dass beim Schlussfolgern die *Bedeutung* (und nicht nur die syntaktische Struktur) von Aussagen verwendet wird, um zu überprüfen, ob eine Aussage logisch aus einer oder mehreren anderen Aussagen folgt. Dazu wird eine Beziehung zwischen der syntaktischen und der semantischen Ebene einer Aussage hergestellt, die als *Interpretation* bezeichnet wird. Kann eine solche Interpretation gefunden werden, wird diese Struktur als *Modell* bezeichnet. Einfach ausgedrückt ist eine Aussage dann und nur dann gültig, wenn es *keine* Interpretation der Aussagen gibt, unter der diese Aussage *nicht* gültig ist. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über diese beiden Theorien.

Sprachbasierte Theorien und mentale Beweise

Wie bereits erwähnt müssen sprachbasierte Theorien des Denkens nicht automatisch mit logischen Regeln und Beweisen operieren. Die *Theorie des verbalen Schließens* (*verbal reasoning*) von Polk und Newell (1995) verwendet z. B. sprachliche Repräsentationen, aber keine logischen Inferenzregeln. In der Regel überlappen sprachbasierte und *regelbasierte Theorien* aber sehr stark und werden deshalb oft unter demselben Etikett „mentale Beweise" zusammengefasst. In der Theorie mentaler Beweise (Braine und O'Brien 1991; Braine und O'Brien 1998; Rips 1994) wird wie gesagt davon ausgegangen, dass menschliches Denken grundsätzlich den Gesetzen der klassischen Logik folgt. Die Theorien sind deshalb auch streng an der *logischen Beweistheorie* orientiert und postulieren, dass eine mentale Schlussfolgerung grundsätzlich genauso verläuft wie das Beweisen anhand logischer Inferenzregeln in der formalen Logik. In der mentalen Beweistheorie geht es also darum, die Gültigkeit einer Schlussfolgerung allein anhand formaler Regeln (Axiome) nachzuweisen. Dabei wird alleine die formale Struktur von Aussagen verwendet, um zu überprüfen, ob man eine Folge von logischen Regelanwendungen finden kann, an deren Anfang eine wahre Aussage und an deren Ende die zu beweisende Aussage steht. Ist dies der Fall, wird nicht nur die anfängliche Aussage, sondern auch die daraus logisch ableitbare Aussage als sicher wahr und der Schluss als deduktiv gültig beurteilt.

Allerdings wird zusätzlich angenommen, dass sich durch die Vielfalt der Prozesse, die zum mentalen logischen Schließen notwendig sind, Fehler einschleichen können. Wann dabei Fehler entstehen können, wird in den Kernannahmen der Theorie verdeutlicht. Bevor eine mentale Repräsentation der Prämissen im Arbeitsgedächtnis abgelegt werden kann, müssen der Theorie zufolge die Prämissen zunächst durch Verstehensprozesse encodiert werden. Sobald die Prämissen im Arbeitsgedächtnis verfügbar sind, können *abstrakte Schlussschemata* auf die Prämissen angewandt werden, um gültige Schlüsse abzuleiten, ganz so, wie in der formalen Logik Beweise geführt werden. *Kernschemata* implementieren fundamentale Regeln (z. B. den MP) und können Schlussfolgerungen aus gegebenen Prämissen erzeugen. Zusätzliche *Hilfsschemata* erledigen die notwendigen Zwischen-

Tab. 15.5 Mögliche Fehler beim regelbasierten logischen Schließen

Fehlerart	Beschreibung
Verständnisfehler	Die Prämissen oder Konklusionen werden nicht adäquat encodiert.
Prozessfehler	Durch Ablenkung der Aufmerksamkeit oder andere Gründe kommt es zum Verlust relevanter Information im Arbeitsgedächtnis.
Strategiefehler	Die Koordination unterschiedlicher Schlussschemata zur Ableitung eines Schlusses schlägt fehl.

schritte. *Inkompatibilitätsregeln* überprüfen, ob widersprüchliche Ergebnisse im Arbeitsgedächtnis abgelegt werden (z. B. P und gleichzeitig $\neg P$). Die Anwendung der unterschiedlichen Schemata wird durch ein Produktionssystem kontrolliert (▶ Kap. 12). Dabei können die in Tab. 15.5 dargestellten Arten von Fehlern entstehen:

Wie werden nun die empirischen Ergebnisse erklärt? Die gute Leistung beim MP wird damit erklärt, dass für diesen Schluss ein Kernschema vorhanden ist, dessen Anwendung direkt die gültige Konklusion produziert. Der MT ist dagegen schwierig, weil er nicht direkt abgeleitet werden kann. Stattdessen muss zuerst ein Beweis konstruiert werden, der mehrere Schemata umfasst. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Prozess- und Strategiefehlern, die zur Ablehnung eigentlich gültiger Schlussfolgerungen führen. Das Akzeptieren ungültiger Schlussfolgerungen bei der Verneinung des Vorderglieds und der Bejahung des Hinterglieds wird auf Probleme bei der Encodierung zurückgeführt. Braine und O'Brien (1991) postulieren, dass die beteiligten Verstehensprozesse häufig zu einer falschen Interpretation der Prämissen führen, weil pragmatische Aspekte der Kommunikation berücksichtigt werden. Dabei weisen sie auf das kooperative Prinzip von Grice (1975) hin, das besagt, dass ein Sprecher dem Hörer nur mitteilt, was für das Verständnis relevant ist – nicht mehr und nicht weniger. So wird ein Hörer den Satz *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, ist die Erderwärmung zu bremsen* so verstehen, dass alle anderen Möglichkeiten, die Erderwärmung zu bremsen, im Moment keine Rolle spielen. Durch eine solche Interpretation wird aber die Prämisse nicht als Implikation, sondern als Äquivalenzrelation interpretiert, was zum Akzeptieren ungültiger Schlussfolgerungen wie im nachfolgenden Beispiel führt:

Ursprüngliche Prämisse1: *Wenn die CO_2-Emission reduziert wird, ist die Erderwärmung zu bremsen.*
Reinterpretierte Prämisse 1: *Dann und nur genau dann, wenn die CO_2-Emission reduziert wird, ist die Erderwärmung zu bremsen.*
Prämisse 2: *Die Erderwärmung wurde gebremst.*

Konklusion: *Die CO_2-Emission wurde reduziert.*

Für Vertreter der mentalen Beweistheorie kommen solche Fehler beim logischen Schließen also zustande, weil bei der Encodierung der Prämissen *unzulässige Uminterpretationen* vorgenommen werden, die dazu führen, dass eigentlich korrekte Schlussschemata auf die falsche Interpretation der Prämissen angewandt werden. Zudem wird angenommen, dass einige Aufgaben gar kein logisches Schließen im „eigentlichen" Sinne erfordern und deshalb die postulierten regelbasierten Mechanismen nicht zur Anwendung kommen. So kann die Wason-Aufgabe auch gut als Hypothesentesten verstanden werden. Demnach versuchen Probanden zu testen, ob die konditionale Aussage gilt, indem sie die Karten umdrehen, die ihnen möglichst viel neue Information bieten (▶ Abschn. 15.3.8 und 15.3.9).

Die Theorie der mentalen Beweise kann einige Befunde gut erklären und zahlreiche Vorhersagen, die aus der Theorie abgeleitet wurden, haben sich empirisch absichern lassen (Braine und O'Brien 1998). Eine oft geäußerte Kritik dieses Ansatzes ist jedoch, dass die Verstehensprozesse, die für viele der auftretenden Fehler verantwortlich gemacht werden, nicht klar genug spezifiziert sind. Außerdem haben Vertreter der nachfolgend behandelten *Theorie mentaler Modelle* viele Befunde veröffentlicht, die mithilfe der Theorie mentaler Beweise nur schwer erklärbar sind (Johnson-Laird und Byrne 1991; Evans et al. 1993).

Visuell-räumliche Theorien und mentale Modelle Ähnlich wie bei den sprachbasierten Theorien werden auch in diesem Absatz mehrere theoretische Ansätze unter einem Oberbegriff zusammengefasst. Gemeinsam ist diesen Ansätzen die Annahme, dass logisches Denken auf der *mentalen Simulation* des *Inhalts* der Prämissen beruht. Wir machen uns also eine Vorstellung von dem, was der Fall wäre, wenn die Prämissen wahr wären. Diese Simulation kann als bildhafte Vorstellung erlebt werden (Johnson-Laird 1998) oder auf abstrakten räumlichen Repräsentationen beruhen, die nur die für die Aufgabe relevanten Informationen der Prämissen auf analoge Weise abbilden (Knauff 1999; 2013a; ▶ Abschn. 15.5.2). Die Grundidee geht auf klassische Arbeiten von Craik (1943) zurück, wurde aber erst in der *Theorie mentaler Modelle* weiter ausgearbeitet. Wie die Beweistheorie geht auch die *Theorie mentaler Modelle* (Johnson-Laird 1983, 1999, 2006, 2010; Johnson-Laird und Byrne 1991) davon aus, dass Menschen im Kern gemäß der klassischen Logik denken können. Jedoch führen unterschiedliche kognitive Beschränkungen zu logischen Fehlern, insbesondere die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses.

Es gibt aber wichtige Unterschiede zwischen der Theorie mentaler Beweise und der Theorie mentaler Modelle. So basiert die Beweistheorie vor allem auf *syntaktischen Methoden*, wie die inhaltsunabhängige Ableitung von Beweisen. Dagegen beruht die Theorie mentaler Modelle auf der *semantischen* Interpretation der Prämissen. Dabei wird angenommen, dass logisches Schließen in drei Schritten verläuft: Verstehen, Kombinieren und Validieren. Das *Verstehen* der Prämissen wird von semantischen Prozeduren geleistet, die unter Einbeziehung von Vorwissen mentale Modelle der in den Prämissen gegebenen Informationen generieren. Diese Modelle stellen analoge Repräsentationen dar, in denen die Relationen zwischen den Elementen in der Repräsentation den zu repräsentierenden Relationen in der Welt entsprechen. Die aus einzelnen Prämissen geformten Modelle werden in einem nächsten Schritt zu einem möglichst sparsamen *integrierten Modell* kombiniert, um eine bestimmte Schlussfolgerung zu überprüfen bzw. aus dem Modell abzulesen. Im dritten

Schritt wird diese Schlussfolgerung dann *validiert*, indem nach weiteren Modellen gesucht wird, in denen zwar die Prämissen wahr sind, die zunächst abgeleitete Schlussfolgerung aber falsch ist. Falls ein solches Modell gefunden wird, wird die Schlussfolgerung abgelehnt; falls kein solches Modell gefunden wird, wird sie akzeptiert. Die einzelnen Prozesse können am besten anhand des relationalen Schließens verdeutlicht werden, das in ▶ Abschn. 15.2.3 behandelt wird.

Weitere Annahmen der Modelltheorie werden aus der Kapazitätsbeschränkung des Arbeitsgedächtnisses abgeleitet. Erstens wird angenommen, dass ein Schluss dann schwieriger ist, wenn mehrere Modelle aus den Prämissen generiert werden müssen. Außerdem braucht es Zeit, Inkonsistenzen zwischen Elementen in einem Modell zu entdecken. Fehler können auftreten, wenn mögliche alternative Modelle nicht generiert oder Inkonsistenzen übersehen werden. Am wichtigsten für das konditionale Schließen ist die Annahme, dass Schlüsse, die sich direkt aus anfangs gebildeten *expliziten Modellen* ableiten lassen, einfacher sind als Schlüsse, die erst durch Ausarbeitung weiterer *impliziter Modelle* abgeleitet werden können. Die Unterscheidung zwischen impliziten und expliziten Modellen kann am besten anhand der guten Leistungen beim MP und der Fehler beim MT veranschaulicht werden.

In der Modelltheorie wird davon ausgegangen, dass anfangs so wenige Informationen wie möglich explizit repräsentiert werden, um das Arbeitsgedächtnis minimal zu belasten. Wir beginnen mit dem MP. Beim Verstehen der ersten Prämisse *Wenn es einen Laden gibt, dann gibt es Gemüse* wird zunächst das folgende Modell gebildet:

Laden *Gemüse*
...

Die erste Zeile steht hier für das explizite Modell, das die konkrete Situation repräsentiert, in der es einen Laden gibt und auch Gemüse. Die zweite Zeile (die drei Punkte) zeigt an, dass es aber weitere mögliche Modelle gibt. Diese Modelle sind jedoch noch nicht ausgearbeitet, d. h. nur implizit repräsentiert. Nach den Regeln der Aussagenlogik wären dies:

¬*Laden* *Gemüse*
¬*Laden* ¬*Gemüse*

Bei der Encodierung der zweiten Prämisse *Es gibt einen Laden* wird jedoch ein weiteres Modell gebildet, in dem es nur einen Laden gibt:

Laden

Wenn dieses Modell mit dem ersten Modell kombiniert wird, können die impliziten Modelle weggelassen werden, weil keines dieser Modelle einen Laden enthält. Als Resultat ergibt sich also folgendes Modell:

Laden *Gemüse*

Aus diesem Modell kann direkt abgelesen werden, dass es Gemüse gibt. Beim MP ist es also nicht nötig, implizite Modelle weiter zu explizieren. Der Modelltheorie zufolge ist das der Grund, warum dieses Schlussschema für die meisten Menschen sehr einfach ist. Anders beim MT. Die zweite Prämisse lautet hier *Es gibt kein Gemüse*. Dafür wird nun folgendes Modell gebildet:

¬*Gemüse*

Die Kombination dieses Modells mit dem Modell für die erste Prämisse ist aufwendig, weil nun auch die anderen möglichen Modelle berücksichtigt werden müssen. Die impliziten Modelle von oben werden nun zu expliziten Modellen:

¬*Laden* *Gemüse*
¬*Laden* ¬*Gemüse*

Diese Modelle beschreiben weitere mögliche Situationen, die mit der Implikation vereinbar sind, nämlich, dass es keinen Laden, aber Gemüse gibt oder dass es keinen Laden und kein Gemüse gibt. Im nächsten Schritt muss dann das Modell

¬*Laden* ¬*Gemüse*

berücksichtigt werden, da es das einzige Modell ist, in dem es kein Gemüse gibt. Daraus lässt sich ablesen, dass es keinen Laden gibt. Der Modelltheorie zufolge ist der MT also schwieriger, weil implizite Modelle expliziert und mehrere explizite Modelle gleichzeitig berücksichtigt werden müssen.

Das Akzeptieren invalider Schlussfolgerungen wie bei der Bejahung der Konsequenz und der Verneinung des Antezedens erklärt die Modelltheorie damit, dass die Implikation *wenn … dann* als Äquivalenzrelation *nur wenn … dann* interpretiert wird. Das gebildete Modell für die Äquivalenzrelation ist:

Laden *Gemüse*

Es gibt also keine anderen Modelle, die einen Laden enthalten, und keine anderen Modelle, die Gemüse enthalten. Wenn nun die zweite Prämisse *Es gibt Gemüse* verarbeitet wird, dann wird das Modell, in dem es nur Gemüse gibt, nicht berücksichtigt, und der Schluss wird fälschlicherweise akzeptiert.

Die Modelltheorie kann viele Befunde besser erklären als die Beweistheorie (Evans et al. 1993; Manktelow 1999). Insbesondere für die Wason-Aufgabe bietet die Modelltheorie eine recht plausible Erklärung. Demzufolge werden nur für die Karten explizite Modelle gebildet, die in der zu testenden Regel erwähnt werden.

Trotz der breiten Anwendbarkeit wurde auch Kritik an der Modelltheorie geübt. So wird beanstandet, dass es unterschiedliche Angaben zur Anzahl der konstruierten Modelle gibt (Bonatti 1994; Ragni und Knauff 2013), dass die Verstehensprozesse beim Encodieren von Prämissen schlecht spezifiziert sind und dass nicht genau klar ist, wie die postulierten Validierungsprozesse ablaufen (Polk und Newell 1995). Diese Probleme wurden jedoch in der *Theorie präferierter mentaler Modelle* teilweise behoben, die in ▶ Abschn. 15.3.5 beschrieben wird.

15.2.2 Syllogistisches Schließen

Bisher haben wir uns mit Schlussfolgerungen befasst, bei denen Aussagen über die Eigenschaften von Objekten oder Ereignissen durch logische Operatoren verbunden werden. In diesem Abschnitt geht es nun um *Verallgemeinerungen von Eigenschaften*, die wir sprachlich mit *alle, einige, manche* und *keine* ausdrücken. Solche Verallgemeinerungen sind im Alltag sehr wichtig und spielen auch für die Wissenschaft eine große Rolle.

Der Vater der sogenannten *kategorialen Syllogismen* ist der antike Philosoph Aristoteles, der sie, wie bereits oben erwähnt, vor mehr als 2000 Jahren entwickelte, vor allem um die Überzeugungskraft von Argumenten zu analysieren. Bis heute spielt der Syllogismus als logisches Schlussfolgerungsschema in vielen wissenschaftlichen Gebieten eine Rolle und wurde auch in der kognitiven Psychologie intensiv untersucht. Wie oben wird auch in diesem Abschnitt zuerst die normative Theorie eingeführt. Anschließend werden die experimentellen Befunde und theoretischen Ansätze zur Erklärung von richtigen und falschen Schlüssen dargestellt.

▪ Prädikatenlogik und Gültigkeit syllogistischer Schlüsse

Die normative Theorie für syllogistische Schlüsse ist die **Prädikatenlogik**. Ein von Probanden durchgeführter syllogistischer Schluss ist also nur gültig, wenn er mit den Gesetzen der Prädikatenlogik übereinstimmt. Das logische System wird auch als *Quantorenlogik* bezeichnet und wurde vom deutschen Logiker, Mathematiker und Philosoph Gottlob Frege (1848–1925) in seiner berühmten *Begriffsschrift* entwickelt (Frege 1879/1993). Von Aristoteles war die Syllogistik noch kaum formal ausgearbeitet worden, doch Frege hat sie mehr als 2000 Jahre später formalisiert und in eine axiomatische Form gebracht. Damit war Frege zusammen mit George Boole der zweite Logiker des 19. Jahrhunderts, der den Grundstein der modernen Logik gelegt hat. Allerdings war Frege, im Gegensatz zu Boole, nicht an menschlichen Denkleistungen interessiert. Im Gegenteil, in seinem Werk wandte er sich ausdrücklich gegen einen *Psychologismus* in der Logik, in dem er den subjektiven *Vollzug* des Denkens vom objektiven *Gehalt* des Gedankens unterschied. Damit war er einer der härtesten Verfechter des *Logizismus*, der, einfach gesagt, eine Abkehr der Logik von der Psychologie verlangte (Wundt 1910).

Frege und seine Prädikatenlogik sind trotzdem bis heute für die Psychologie des deduktiven Denkens sehr wichtig. Die aristotelischen Syllogismen sind nämlich Spezialfälle von Schlüssen, die im System der Prädikatenlogik beweisbar sind. Das Besondere an der Prädikatenlogik ist, dass in ihren Aussagen unterschieden wird zwischen dem, über das etwas gesagt wird, und dem, was darüber gesagt wird. Betrachtet werden also Eigenschaften von Objekten und Geltungsbereiche von Aussagen. Die wichtigste Idee der Prädikatenlogik ist, dass Aussagen wie *Der Klimawandel ist zu stoppen*, die in der Aussagenlogik atomar sind, in der Prädikatenlogik in Terme (*Klimawandel*) und Prädikate (*ist zu stoppen*) aufgelöst werden. Die zweite Erweiterung ist, dass in der Prädikatenlogik mithilfe von *Quantoren* Aussagen über Mengen von Objekten, für die ein Prädikat gilt, gemacht werden können. Im System der Prädikatenlogik sind die aristotelischen Syllogismen ein Spezialfall, weil sie immer aus nur zwei Prämissen und einer Konklusion bestehen. Hier ein Beispiel:

Alle Menschen sind Tiere.
Alle Psychologen sind Menschen.

Also sind alle Psychologen Tiere.

Dieser Schluss ist logisch mit Sicherheit gültig, selbst wenn dies nicht auf den ersten Blick erkennbar ist. Ein Grund für diese Schwierigkeit ist, dass ein Syllogismus, wie weiter unten dargestellt, in unterschiedlichen Figuren auftreten kann und diese Figuren unterschiedlich schwer sein können. Der Schluss oben hat z. B. folgende Form:

Alle B sind A
Alle C sind B

Also sind alle C auch A

Wie man sieht, sind die Terme *A*, *B*, *C* hier in einer recht komplizierten Reihenfolge (auch *Figur* genannt) angeordnet, was den Schluss für die meisten Probanden schwieriger macht, wie wir gleich sehen werden. Zunächst ist aber wichtig, dass in der Syllogistik vier Quantoren unterschieden werden. Die Quantoren sind die vier kategorialen Aussagen *Alle A sind B*, *Einige A sind B*, *Keine A sind B* und *Einige A sind nicht B*.

Die Quantoren werden oft mit den Vokalen A, I, E und O symbolisiert. Zudem werden die Aussagen als *affirmativ* oder *negativ* bezeichnet, je nachdem, ob sie einen bestätigenden oder verneinenden Quantor enthalten. Außerdem werden sie als *universell* oder *partikulär* bezeichnet, je nachdem ob sie sich auf alle quantifizierten Objekte der Menge oder nur auf eine Teilmenge beziehen. Diese Unterscheidungen sind in ◘ Tab. 15.6 zusammenfassend dargestellt. Es hilft sich zu merken, dass die Vokale A, I, E, und O auf den lateinischen Wörtern *affirmo* („ich bejahe“) und *nego* („ich verneine“) basieren, wobei jeweils der erste Vokal für eine allgemeine und der zweite für eine partikuläre Aussage steht. In der Prädikatenlogik lassen sich diese vier Quantoren auf zwei Quantoren reduzieren: den *Allquantor* (für alle gilt) und den *Existenzquantor* (es gibt mindestens ein).

◘ **Tab. 15.6** Die vier kategorialen Aussagen (Quantoren) der aristotelischen Syllogismen

A	*Alle A sind B.*	Bejahend	Universell
I	*Einige A sind B.*	Bejahend	Partikulär
E	*Keine A sind B.*	Verneinend	Universell
O	*Einige A sind nicht B.*	Verneinend	Partikulär

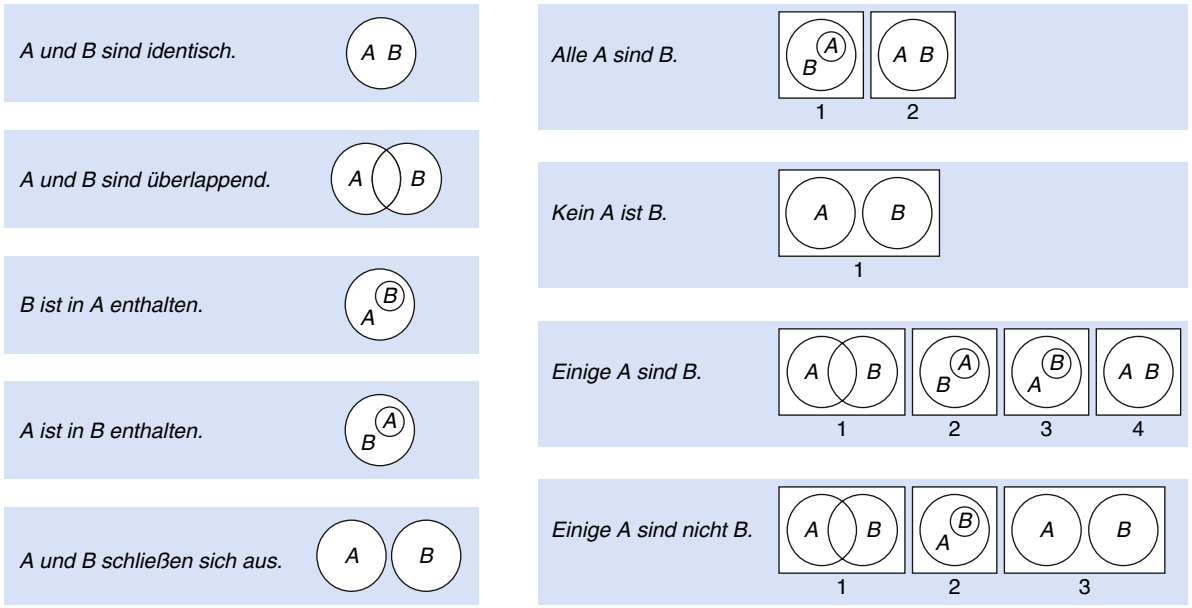


Abb. 15.2 **A** Logisch mögliche Beziehungen zwischen zwei Kategorien *A* und *B*. **B** Jeder einzelne Quantor lässt eine oder mehrere mögliche Interpretationen zu

Die Quantoren in Tab. 15.6 drücken die unterschiedlichen Beziehungen zwischen zwei Termen, bzw. Kategorien *A* und *B* aus. Zum besseren Verständnis sind diese in Abb. 15.2 mithilfe von Euler-Diagrammen dargestellt (Bagusche 2013). Wie zu sehen ist, können sich die Kategorien entweder ausschließen (*disjunkt* sein), *A* kann in *B* enthalten sein, *B* kann in *A* enthalten sein, *A* und *B* können überlappen, oder *A* und *B* können identisch sein. Prämissen mit unterschiedlichen Quantoren lassen eine oder mehrere dieser Möglichkeiten zu.

Ein **kategorischer Syllogismus** besteht normalerweise aus drei *Termen* (*A*, *B* und *C*, z. B. *Tiere*, *Menschen*, *Psychologen*); es kommen also drei unterschiedliche Kategorien in den Prämissen vor. Zwei dieser Terme, die *Randterme*, kommen jeweils nur in einer der beiden Prämissen vor (*A* und *C*, z. B. *Tiere* und *Psychologen*). Der dritte Term, der *Mittelterm*, kommt in beiden Prämissen vor (*B*, z. B. *Menschen*) und stellt deshalb die Verbindung her, die den Schluss erst möglich macht (Johnson-Laird 1972).

Wie bereits erwähnt, treten Syllogismen in verschiedenen Figuren auf. Diese Figuren ergeben sich aus den unterschiedlichen möglichen Anordnungen von *Endtermen* und *Mitteltermen*. Die daraus resultierenden vier klassischen Schlussfiguren für den kategorischen Syllogismus sind in Tab. 15.7 dargestellt, wobei die ersten beiden Zeilen wieder für die Prämissen stehen. Wenn man sich verdeutlicht, dass jede der beiden Prämissen in jeder der vier Figuren vier unterschiedliche Quantoren enthalten kann und die Konklusion, wie in Zeile 3 und 4 dargestellt, in den Reihenfolgen *A*–*C* und *C*–*A* vorkommen kann, dann ergeben sich insgesamt 512 logische mögliche Syllogismen.

Wie kann man nun feststellen, ob sich eine bestimmte Konklusion logisch zwingend aus den Prämissen ergibt? Dazu kann man wie in Abb. 15.3 wieder die Euler-Diagramme verwenden. Im Beispiel muss man sich zuerst überlegen, welche Beziehungen zwischen den Termen die Prämissen jeweils

Tab. 15.7 Figuren beim syllogistischen Schließen

Figur 1	Figur 2	Figur 3	Figur 4
A–*B*	*A*–*B*	*B*–*A*	*B*–*A*
B–*C*	*C*–*B*	*B*–*C*	*C*–*B*
A–*C*	*A*–*C*	*A*–*C*	*A*–*C*
C–*A*	*C*–*A*	*C*–*A*	*C*–*A*

zulassen. *Alle Fahrradfahrer sind Menschen* kann entweder bedeuten, dass nur manche Menschen auch Fahrradfahrer sind oder alle (s. Spalte „Prämisse 1"). *Kein Tier ist ein Fahrradfahrer* lässt nur eine Beziehung zu, nämlich dass sich die beiden Mengen ausschließen (s. Spalte „Prämisse 2"). Dann muss man sich überlegen, welche Beziehungen die Konklusion zulässt. So kann *Alle Menschen sind Tiere* entweder bedeuten, dass nur manche Tiere auch Menschen sind oder dass alle Tiere Menschen sind (s. Spalte „Konklusion"). Eine Konklusion ist logisch nur korrekt, wenn alle Kombinationen von Beziehungen in den Prämissen mit den möglichen Beziehungen in der Konklusion vereinbar sind. Deshalb muss man sich, um die Gültigkeit der Konklusion zu überprüfen, alle Möglichkeiten überlegen, welche die kombinierten Prämissen zulassen. Wenn nur manche Menschen auch Radfahrer sind und keine Tiere Menschen (Zeile 1), dann gibt es drei Möglichkeiten (die drei obersten Diagramme in der dritten Spalte): Entweder sind alle Tiere Menschen, aber nicht alle Menschen Tiere (oben), oder manche Tiere sind Menschen und manche Menschen sind Tiere (Mitte), oder keine Menschen sind Tiere und umgekehrt. Alle drei Möglichkeiten sind mit den beiden Möglichkeiten, welche die Konklusion zulässt, unvereinbar. Analog führt auch die Überprüfung der weiteren Möglichkeit für die erste Prämisse

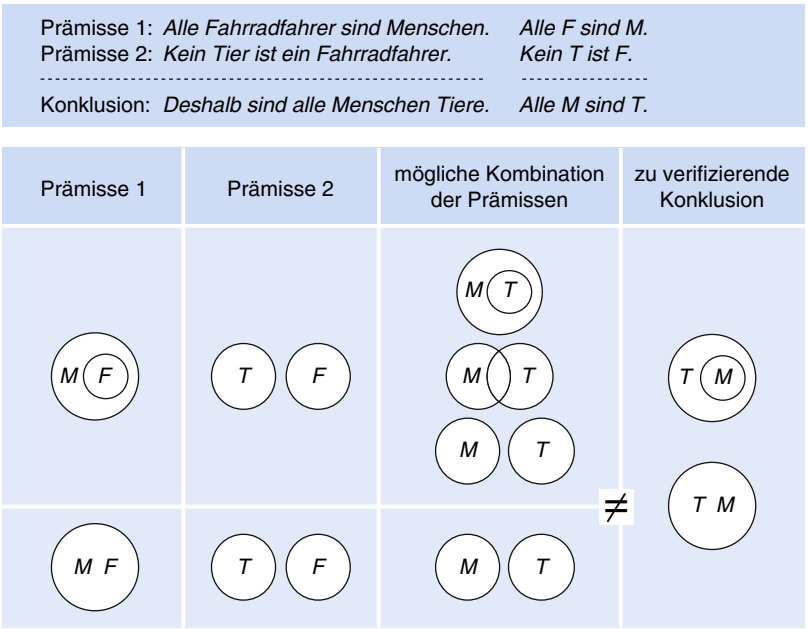


Abb. 15.3 Überprüfung einer Konklusion mithilfe von Euler-Diagrammen. Für Prämisse 1 gibt es zwei mögliche Interpretationen. Für Prämisse 2 gibt es nur eine mögliche Interpretation. Daraus ergeben sich vier mögliche Kombinationen der Prämissen, aus denen der Mittelterm (Fahrradfahrer, *F*) eliminiert werden kann. Die zu verifizierende Konklusion stimmt mit keiner dieser Kombinationsmöglichkeiten überein. Die Schlussfolgerung, dass alle Menschen Tiere sind, ist also logisch falsch (wenn auch inhaltlich korrekt)

(Zeile 2) zu einem Widerspruch mit der Konklusion. Um die Konklusion abzulehnen, genügt ein Widerspruch.

Empirische Ergebnisse zum syllogistischen Schließen

Die Überprüfung von Schlussfolgerungen in kategorischen Syllogismen kann recht aufwendig sein. Häufig resultieren bei der Kombination der Prämissen viele Möglichkeiten, die mit der Konklusion vereinbar sind, und nur wenige, die nicht mit ihr vereinbar sind. Es ist deshalb nicht überraschend, dass Menschen zwar einige syllogistische Schlüsse sehr gut durchführen können, dass es aber auch Schlüsse gibt, bei denen viele Menschen logische Fehler machen oder bestimmte Konklusionen anderen vorgezogen werden. So haben Johnson-Laird und Kollegen (Bara et al. 1995; Johnson-Laird und Steedman 1978) ihren Probanden Prämissen in den verschiedenen Figuren aus Tab. 15.7 vorgelegt und berichtet, dass diese Variation einen Einfluss auf die Konklusionen hat, wenn diese von den Probanden selbst generiert werden. Bei der Figur I (*A*–*B*, *B*–*C*) wurden am häufigsten Konklusion in der Figur *A*–*C* generiert, während bei der Figur 4 (*B*–*A*, *C*–*B*) am häufigsten Konklusion in der Figur *C*–*A* generiert wurden. Dieser Befund wird als *Figuraleffekt* bezeichnet.

In einer Metaanalyse verglichen Chater und Oaksford (1999) die Befunde mehrerer Veröffentlichungen, in denen Fehlerraten für alle möglichen Syllogismen erhoben wurden. In den Studien wurden den Probanden alle möglichen Prämissenkombinationen in allen Figuren vorgelegt, und sie sollten für jede der resultierenden Aufgaben eine der vier möglichen Konklusionen (A, E, I, O) angeben. Sie konnten auch angeben, dass kein logischer Schluss möglich ist. In Tab. 15.8 sind in der ersten Spalte die Syllogismen und die Figuren angegeben, wobei der erste Buchstabe für den Quantor in Prämisse 1 und der zweite Buchstabe für den Quantor in Prämisse 2 steht. Die Zahlen 1 bis 4 stehen für die vier Figuren aus Tab. 15.7. Die zweite Spalte gibt die logisch gültige Konklusion an. Die Spalten 3 bis 6 geben an, welche Konklusion von den Probanden gewählt wurde. Graue Felder markieren die am häufigsten gewählten Konklusionen. Die Werte in den Zeilen addieren sich nicht zu 100 % auf, da in einigen Studien weitere irrelevante Antworten gegeben wurden.

Wie zu erkennen ist, stimmen die Ergebnisse von Johnson-Laird und Bara (1984), Dickstein (1978) und Johnson-Laird und Steedman (1978) gut überein. Bemerkenswert ist, dass der sogenannte perfekte Syllogismus AA und der Syllogismus AE in der ersten Figur zu 90 % korrekt gelöst wurde. Hingegen wurden nur etwa 27 % der Aufgaben zum Syllogismus EI der vierten Figur korrekt gelöst. Die Fehler sind also nicht zufällig, sondern folgen einer Systematik: Manche Syllogismen sind offensichtlich schwieriger zu lösen. Wie lässt sich dieser Befund erklären? Diese Frage versuchen verschiedene theoretische Ansätze zu beantworten.

Theoretische Ansätze zum syllogistischen Schließen

Eine mögliche Erklärung für falsche syllogistische Schlüsse ist, dass Fehler gar nicht auf Schlussfolgerungsprozesse selbst zurückzuführen sind, sondern auf ein falsches Verständnis der Quantoren in den Prämissen. Dieser Ansatz geht auf den schon erwähnten Linguisten und Philosophen Paul Grice (1975) zurück, der davon ausging, dass sich Fehler beim syllogistischen Schließen durch eine Analyse menschlicher Konversation verstehen lassen. Besonders wichtig in diesem Zusammenhang ist die Grice'sche Maxime der Quantität: „Mache deinen Gesprächsbeitrag so informativ wie nötig" (nicht weniger und nicht mehr). Demnach sollte ein Sprecher niemals *einige* verwenden, wenn die Aussage auf *alle* Objekte des Diskursbereichs zutrifft, obwohl dies logisch zulässig wäre. Fehler könnten also entstehen, weil Menschen die Prämissen eines Syllogismus unter Berücksichtigung von Konversationsregeln verstehen, obwohl diese nicht mit der logischen Bedeutung der Quantoren übereinstimmen. Der Quantor *einige* bedeutet logisch gesehen „mindestens ein und möglicherweise alle". Die Aussage *Einige Psychologen sind Psychotherapeuten* wäre demnach auch wahr, wenn alle Psychologen auch Psychotherapeuten wären (was bekanntlich nicht der Fall ist). Folgt man jedoch den Grice'schen Prinzipien bedeutet *einige*,

Tab. 15.8 Prozentsatz der von Probanden gewählten Konklusion für die Syllogismen nach der Metaanalyse in Chater und Oaksford (1999)

Syllogismus/Figur	Gültig	Gewählte Konklusion				Syllogismus/Figur	Gültig	Gewählte Konklusion			
		A	I	E	O			A	I	E	O
AA1	A(I)	90	5	0	0	IE1	N	1	1	22	16
AA2	N	58	8	1	1	IE2	N	0	0	39	30
AA3	I	57	29	0	0	IE3	N	0	1	30	33
AA4	I	75	16	1	1	IE4	N	0	1	28	44
AI1	I	0	92	3	3	EI1	O	0	5	15	66
AI2	N	0	57	3	11	EI2	O	1	1	21	52
AI3	I	1	89	1	3	EI3	O	0	6	15	48
AI4	N	0	71	0	1	EI4	O	0	2	32	27
IA1	N	0	72	0	6	IO1	N	3	4	1	30
IA2	N	13	49	3	12	IO2	N	1	5	4	37
IA3	I	2	85	1	4	IO3	N	0	9	1	29
IA4	I	0	91	1	1	IO4	N	0	5	1	44
AE1	N	0	3	59	6	OI1	N	4	6	0	35
AE2	E(O)	0	0	88	1	OI2	N	0	8	3	35
AE3	N	0	1	61	13	OI3	N	1	9	1	31
AE4	E(O)	0	3	87	2	OI4	N	3	8	2	29
EA1	E(O)	0	1	87	3	EE1	N	0	1	34	1
EA2	E(O)	0	0	89	3	EE2	N	3	3	14	3
EA3	O	0	0	64	22	EE3	N	0	0	18	3
EA4	O	1	3	61	8	EE4	N	0	3	31	1
AO1	N	1	6	1	57	EO1	N	1	8	8	23
AO2	O	0	6	3	67	EO2	N	0	13	7	11
AO3	N	0	10	0	66	EO3	N	0	0	9	28
AO4	N	0	5	3	72	EO4	N	0	5	8	12
OA1	N	0	3	3	68	OE1	N	1	0	14	5
OA2	N	0	11	5	56	OE2	N	0	8	11	16
OA3	O	0	15	3	69	OE3	O	0	5	12	18
OA4	N	1	3	6	27	OE4	N	0	19	9	14
II1	N	0	41	3	4	OO1	N	1	8	1	22
II2	N	1	42	3	3	OO2	N	0	16	5	10
II3	N	0	24	3	1	OO3	N	1	6	0	15
II4	N	0	42	0	1	OO4	N	1	4	1	25

A = alle, I = einige, E = kein, O = einige … nicht; N = kein gültiger Schluss

dass zwar manche, aber nicht alle Psychologen auch Psychotherapeuten sind. Ergebnisse von Begg und Harris (1989) stützen diese Annahme. Die Autoren legten ihren Versuchsteilnehmern Sätze wie

Einige A sind B.

vor und berichten, dass diese meistens mit

Einige A sind keine B.

gleichgesetzt werden. Begg (1987) fand sogar, dass *einige* von den meisten Teilnehmern im Sinne von „weniger als die Hälfte" verstanden wird. Dieses Ergebnis kann mithilfe der Grice'schen Maxime der Quantität gut erklärt werden. Die Probanden erwarten vom Versuchsleiter anscheinend, den Satz *Einige A sind B* nur zu verwenden, wenn die stärkere Aussage *Alle A sind B* nicht zutrifft.

Eine weitere Theorie zur Erklärung von Fehlern beim syllogistischen Schließen ist die schon recht alte *Atmosphärentheorie* von Woodworth und Sells (1935). Demnach treten Fehler auf, weil die in den beiden Prämissen enthaltenen Quantoren eine bestimmte Atmosphäre schaffen, die sich auf die Akzeptanz von Konklusionen auswirkt. So schaffen zwei universal bejahende Prämissen eine Atmosphäre, die Probanden eher universell bejahende Konklusionen akzeptieren lässt. Zwei partikulär verneinende Prämissen schaffen dagegen eine Atmosphäre, die Probanden eher eine partikulär verneinende Konklusion akzeptieren lässt. Außerdem schafft jede einzelne universell verneinende Prämisse eine Atmosphäre, in der eher Verneinungen akzeptiert werden, und jede einzelne partikuläre Prämisse eine Atmosphäre, in der eher partikuläre Konklusionen akzeptiert werden. Mit diesen Annahmen lassen sich viele der empirisch gefundenen Fehler beim Schließen mit kategorialen Syllogismen gut erklären. Allerdings sind die Atmosphäreneffekte für gültige Konklusionen stärker als für ungültige Konklusionen, was dafür spricht, dass nicht nur die von der Atmosphärentheorie postulierten Faustregeln verwendet werden. Außerdem kann die Atmosphärenhypothese die Ergebnisse von Johnson-Laird und Steedman (1978) nicht erklären, wonach die Figur des Syllogismus (Tab. 15.7) sich auf die Anzahl der gemachten Fehler auswirkt. Folgt man der Atmosphärenhypothese, so sollte dies keine Rolle spielen.

Eine recht gute Erklärung der empirischen Befunde bietet auch die *Konversionshypothese* (*Umkehrungshypothese*) von Chapman und Chapman (1959). Sie vermuten, dass invalide Konklusionen akzeptiert werden, weil die Prämissen uminterpretiert werden. Insbesondere nehmen sie an, dass Menschen oft davon ausgehen, dass eine universell bejahende Prämisse bedeutet, dass auch ihre Umkehrung wahr ist (*Alle A sind B* wird so verstanden, als würde es auch *Alle B sind A* bedeuten), was gegen die Gesetze der Prädikatenlogik verstößt. Ähnliches wird für partikulär verneinende Prämissen angenommen (*Einige A sind nicht B* wird so verstanden, als würde es auch *Einige B sind nicht A* bedeuten), was nicht korrekt ist. Wichtige empirische Evidenz für diese Annahmen stammt von Ceraso und Profitera (1971). Sie konnten nachweisen, dass wesentlich weniger Fehler gemacht wurden, wenn die Prämissen so formuliert werden, dass die von der Konversionshypothese angenommenen Fehlinterpretationen nicht möglich waren (z. B. wurde *Alle A sind B* als *Alle A sind B, aber manche B sind keine A* formuliert). Revlis (1975) entwickelte zwei Informationsverarbeitungsmodelle für die Annahmen der Atmosphärenhypothese und der Konversionshypothese.

Die vermutlich überzeugendste Erklärung für die kognitiven Prozesse beim syllogistischen Schließen bietet wieder die mentale Modelltheorie (Khemlani und Johnson-Laird 2012; Johnson-Laird 2006; Johnson-Laird und Byrne 1991), die in ▶ Abschn. 15.2.1 schon für das konditionale Schließen beschrieben wurde. Der Modelltheorie zufolge werden auch beim syllogistischen Schließen die Prämissen in ein möglichst sparsames mentales Modell umgewandelt. So werden beim Verstehen der partikulär bejahenden Prämisse *Einige Wissenschaftler sind Psychologen* (*Einige A sind B*) zunächst die folgenden Modelle gebildet:

Wissenschaftler *Psychologe*
Wissenschaftler *Psychologe*
...

Diese beiden expliziten Modelle stehen jeweils für einen Menschen, der Wissenschaftler und auch Psychologe ist. Die Punkte zeigen wieder an, dass noch weitere Möglichkeiten bestehen. Das Ausarbeiten dieser Modelle könnte ein weiteres explizites Modell erzeugen, in dem ein Individuum nur ein Wissenschaftler ist, nicht aber Psychologe:

Wissenschaftler

Diese Repräsentationen umfassen die logisch korrekte Interpretation von *einige*, also einige und möglicherweise alle. Für universell bejahende Prämissen wie *Alle Psychologen sind Akademiker* (*Alle B sind C*) werden folgende initiale Modelle konstruiert:

Psychologe *Akademiker*
Psychologe *Akademiker*
...

Es gibt also keine Psychologen, die nicht Akademiker sind. Im zweiten Schritt können dann die anfänglich aus den Prämissen gebildeten Modelle kombiniert werden. Für unsere zwei Prämissen *Einige Wissenschaftler sind Psychologen* und *Alle Psychologen sind Akademiker* würde folgendes kombinierte Modell resultieren:

Wissenschaftler *Psychologe* *Akademiker*
Wissenschaftler *Psychologe* *Akademiker*
...

Das kombinierte Modell steht für zwei Individuen, die Wissenschaftler, Psychologen und Akademiker sind. Daraus lässt sich ablesen, dass die Konklusion *Einige Wissenschaftler sind Akademiker* (*Einige A sind C*) gültig sein muss, selbst wenn es implizite Modelle geben kann, in denen Wissenschaftler keine Akademiker sind.

Dass ein konstruiertes Modell der Prämissen mit der Konklusion vereinbar ist, bedeutet noch nicht unbedingt, dass die

Konklusion tatsächlich gültig ist. Um die Gültigkeit der Konklusion zu überprüfen, muss noch nach anderen Modellen der Prämissen gesucht werden, die der Konklusion möglicherweise widersprechen. Falls kein solches Modell existiert (wie im obigen Beispiel), ist die Konklusion tatsächlich gültig. Oft existieren aber alternative Modelle, die der Konklusion widersprechen. Demzufolge unterlaufen die meisten Fehler beim syllogistischen Schließen in der Validierungsphase (obwohl angenommen wird, dass auch Fehler beim Verstehen der Prämissen oder beim Ausarbeiten impliziter Modelle unterlaufen können). Je mehr Modelle expliziert werden müssen, um die Gültigkeit einer Konklusion zu überprüfen, desto eher wird die große Menge an Information die Grenzen der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses überschreiten und zu fehlerhaften Antworten führen.

Aus dieser Annahme lassen sich detaillierte Vorhersagen über die Schwierigkeit von Aufgaben machen, die in zahlreichen Untersuchungen bestätigt wurden (Johnson-Laird und Byrne 1991). So lässt sich beispielsweise der Figuraleffekt darauf zurückführen, dass die Konstruktion eines Modells einfacher ist, wenn die Prämissen über den Mittelterm direkt verbunden sind, ohne dass weitere Umformungen erforderlich sind. Ist dies wie bei den Prämissen *A–B* und *B–C* der Fall, ergibt sich daraus die Präferenz für die Konklusion mit der sich daraus ergebenden Termreihenfolge *A–C*. Die anderen Präferenzen sind schwieriger zu erklären, aber stehen auch in Einklang mit der Theorie mentaler Modelle (Johnson-Laird und Byrne 1991). Noch überzeugender ist das Ergebnis, dass viele der Fehler, die von den Probanden begangen werden, Konklusionen darstellten, die man erwartet, falls die Teilnehmer zuerst ein möglichst einfaches kombiniertes Modell bilden und in der Validierungsphase nicht intensiv genug nach alternativen Interpretationen der Prämissen – also alternativen Modellen – suchen (Johnson-Laird 2006; Ragni und Knauff 2013; ▶ Abschn. 15.3.5).

15

15.2.3 Relationales Schließen

Eine wichtige Form des deduktiven Denkens beruht auf **Relationen**, also Beziehungen, die zwischen verschiedenen Dingen bestehen. Sie sind allgegenwärtig und unverzichtbar für unseren Alltag und in der Wissenschaft. So sagen wir beispielsweise „Ich finde den Bundesliga-Verein A *besser* als Verein B“, „Ich liebe Bach *mehr* als Mozart“, „Das Automobil wurde *früher als* der Computer erfunden“, „Russland *ist größer als* die USA“, „Das Auto *steht vor* dem Haus“, „Psychologie ist *spannender* als Philosophie“, „An lauten Arbeitsplätzen *können sich Mitarbeiter weniger gut konzentrieren* als in ruhiger Umgebung“. Es gibt zahllose solche Beispiele und viele Philosophen und Wissenschaftler nehmen an, dass Relationen zu den wichtigsten Grundbausteinen unseres Denkens gehören (Peirce 1931–1958). Alltäglich stellen wir Beziehungen zwischen Objekten, Personen und Ergebnisse her und vergleichen Dinge miteinander bezüglich bestimmter Eigenschaften. Solche Vergleiche sind eine Art Gegenstück zu den Verallgemeinerungen beim syllogistischen Schließen und werden in der Psychologie seit über 100 Jahren untersucht (Störring 1908).

Relationen können auch kombiniert werden, um Schlüsse zu ziehen:

Sport hilft mehr gegen Depressionen als Psychotherapie.
Psychotherapie hilft mehr gegen Depressionen als Psychopharmaka.

Sport hilft mehr gegen Depressionen als Psychopharmaka.

Die Relation *hilft mehr gegen Depressionen als* ist eine zweistellige Relation, und wir dürfen vernünftigerweise annehmen, dass sie transitiv ist, also aus *A hilft mehr gegen Depressionen als B* und *B hilft mehr gegen Depression als C* auch *A hilft mehr gegen Depression als C* folgt.

Inferenzen dieser Art beruhen auf der Kombination relationaler Ausdrücke, wobei aus gegebenen Relationen neue, nicht gegebene Relationen abgeleitet werden. Die Einfachheit, mit der wir solche sicheren relationalen Inferenzen häufig durchführen, bedeutet aber nicht, dass auch die Erklärung der zugrunde liegenden kognitiven Prozesse einfach ist. Außerdem können Aufgaben mit relationalen Ausdrücken durch geringe Veränderungen deutlich schwieriger werden. Hier ein Beispiel:

Süßigkeiten helfen weniger gegen Depressionen als Psychopharmaka.
Sport hilft mehr gegen Depressionen als Psychotherapie.
Psychotherapie hilft mehr gegen Depressionen als Psychopharmaka.

Was hilft am besten gegen Depressionen?

Diese Aufgabe ist schwieriger zu lösen, weil die Reihenfolge der Prämissen und der Terme in den Prämissen vertauscht wurde und es nun komplizierter ist, eine mentale Repräsentation des beschriebenen Sachverhalts zu konstruieren, die für die Schlussfolgerung verwendet werden kann. Kommen wir jedoch zunächst wieder zum formalen Hintergrund solcher Schlussfolgerungen und lernen anschließend wieder einige experimentelle Ergebnisse und theoretische Ansätze kennen.

▪ Formale Eigenschaften von Relationen

Wie die bereits behandelten konditionalen und syllogistischen Schlüsse lassen sich auch relationale Schlüsse im Rahmen der formalen Logik beweisen (Jeffrey 1981). Der US-amerikanische Philosoph und Logiker Charles Sanders Peirce (1839–1914) entwickelte sogar eine Logik speziell für Relationen, die er als „Logik der Relative“ bezeichnete (Peirce 1931–1958). Für die Fragestellungen der Psychologie sind formale Beweise aber nicht nötig. Es reicht aus, einige der wichtigsten Eigenschaften von Relationen kennenzulernen.

Der deklarative Satz *Das Fahrrad steht vor der Bibliothek* besteht aus der Relation *steht vor* und den zwei Termen *Fahrrad* und *Bibliothek*. In der Sprache der Logik sind dies *Prädikate* und *Argumente*. Der Satz ist eine Proposition und kann nur wahr oder falsch sein. Außerdem kann die Relation auch mehr als zwei Terme verbinden. Beispielsweise kann man *A liegt zwischen B und C* oder *A und B haben denselben Abstand wie C und D* sagen. Die Relation *liegt zwischen* ist dreistellig, da sie drei Terme *A*, *B*, *C* erfordert; die Relation *haben denselben Abstand wie* ist vierstellig,

Tab. 15.9 Einige Eigenschaften von Relationen

Konvexität	$x\,R\,y \vee y\,R\,x$
Reflexivität	$x\,R\,x$
Irreflexivität	$\neg(x\,R\,x)$
Symmetrie	$x\,R\,y \rightarrow y\,R\,x$
Antisymmetrie	$(x\,R\,y) \wedge (y\,R\,x) \rightarrow (x = y)$
Asymmetrie	$x\,R\,y \rightarrow \neg(y\,R\,x)$
Transitivität	$x\,R\,y \wedge y\,R\,z \rightarrow x\,R\,z$
Intransitivität	$x\,R\,y \wedge y\,R\,z \rightarrow \neg(x\,R\,z)$

weil sie vier Argumente erfordert. Grundsätzlich kann eine Relation beliebig viele, aber nur endlich viele Argumente haben. Die Anzahl der Argumente gibt die Stelligkeit der Relation an; es gibt also zwei-, drei-, vier- bis *n*-stellige Relationen.

Relationen werden in der Regel nach den Merkmalen der Symmetrie und Transitivität sowie Reflexivität, Antisymmetrie und Asymmetrie eingeteilt. So ist z. B. die Relation *ist Mutter von* nicht symmetrisch, die Relation *ist verwandt mit* jedoch schon. Die Relation *liegt links von* ist transitiv, aber die Relation *liegt direkt neben* nicht. Generell ist eine Relation *R* transitiv, wenn aus *x R y und y R z* folgt, dass *x R z*. Eine Relation ist symmetrisch, wenn aus *x R y* folgt, dass *y R x*. Diese und weitere Eigenschaften von Relationen sind in Tab. 15.9 zusammengefasst.

Beim relationalen Schließen werden Relationen mit gleichen oder unterschiedlichen Eigenschaften miteinander kombiniert. Diese Kombination von Relationen nennt man *Komposition*. Gegeben eine Relation zwischen *X* und *Y* und eine weitere Relation zwischen *Y* und *Z*, dann ist die *Komposition* die Relation zwischen *X* und *Z*. So kann man beispielweise daraus, dass Anna größer ist als Berta und Berta größer ist als Claudia direkt schließen, dass Anna auch größer ist als Claudia, selbst wenn diese Information nicht ausdrücklich gegeben ist. Die zweistellige Relation *ist größer als* ist nämlich transitiv ($A > B$, $B > C$, also $A > C$). Man kann auch daraus, dass Arno und Bert Geschwister sind und Christoph Berts Vater, schließen, dass auch Arno Christophs Sohn ist. Die Relation *sind Geschwister* ist symmetrisch und transitiv, und die Relation *ist Vater von* ist intransitiv und asymmetrisch. Transitive Inferenzen sind ein Spezialfall solcher Kompositionen. Sie beruhen allein auf transitiven Relationen. Der allgemeinere Fall des relationalen Schließens lässt auch andere Typen von Relationen zu.

Empirische Ergebnisse zum relationalen Schließen

Bereits William James, einer der Väter der Psychologie, hat sich mit relationalen Schlüssen befasst. Er betrachtete transitive Inferenzen als „fundamentales Inferenzprinzip". Für jede lineare Anordnung $a < b < c < \ldots < z$ schreibt er: „… any number of intermediarities may be expunged without obliging us to alter anything in what remains written" (James 1890, S. 64). Diese einfache Idee findet sich in vielen Arbeiten zu transitiven Inferenzen wieder. Hunter (1957) erklärte transitive Inferenzen anhand von nur zwei elementaren mentalen Operationen. Prämissen wie *Y ist kleiner als X* werden demnach in *X ist größer als Y* konvertiert, und die Reihenfolge der Prämissen kann vertauscht werden. So werden z. B. die Prämissen

Y ist größer als Z.
Y ist kleiner als X.

mental in folgende Prämissen umgewandelt:

X ist größer als Y.
Y ist größer als Z.

Aus dieser Umstellung kann nun der Mittelterm *Y* eliminiert werden, ohne dabei die Beziehung zwischen den beiden Endtermen *X* und *Z* zu verändern. Die Schlussfolgerung ist dann *X ist größer als Z*.

Hängt also die Schwierigkeit einer Inferenzaufgabe vom kognitiven Aufwand ab, der erforderlich ist, um die Terme in die Reihenfolge *X*, *Y*, *Z* zu bringen?

Betrachten wir zunächst die Reihenfolge der Terme in den Prämissen. Grundsätzlich kann die Anordnung

X Y Z

auf vier unterschiedliche Weisen beschrieben werden. Diese sind in Tab. 15.10 anhand der Relationen *links von* und *rechts von* dargestellt.

Erinnern wir uns nun an den Figuraleffekt beim syllogistischen Schließen (▶ Abschn. 15.2.2). Knauff et al. (1998) konnten einen ähnlichen Effekt der Termreihenfolge beim Schließen mit transitiven (und nichttransitiven) räumlichen Relationen nachweisen. In dem Experiment wurden die Terme in den in Tab. 15.10 genannten Reihenfolgen präsentiert und die Probanden aufgefordert, die Konklusion entweder in der Form *x R z* oder *z R x* zu generieren (*R* steht dabei für die verwendete Relation). Zwar wurde dabei die Reihenfolge *z R x* generell etwas häufiger gewählt, allerdings war diese Bevorzugung stark von der Termreihenfolge abhängig: *x R z* wurde häufiger für Prämissen in der ersten Figur *x R y*, *y R z* gewählt als für die drei anderen Reihenfolgen (*y R x*, *y R z*; *x R y*, *z R y*; *y R x*, *z R y*). Dieser Effekt kann so erklärt werden: Bei der Prämissenverarbeitung wird eine mentale Repräsentation schrittweise aufgebaut, indem jede Prämisse so früh wie möglich in die Repräsentation integriert wird. Aus diesem Grund legt die Reihenfolge der Terme in den Prämissen auch die Reihenfolge fest, in der die Terme in die Repräsentation integriert werden. Da der Aufbau der Repräsentation bei den Prämissen *x R y* oder *y R z* mit dem *z* abschließt, wird anschließend auch direkt an dieser Stelle mit dem „Absuchen" der Repräsentation begonnen. Man sieht, dass hier wieder die Theorie mentaler Modelle im Hintergrund steht, die weiter unten nochmal für das relationale Schließen beschrieben wird.

Kommen wir aber zuvor zu Effekten der *Reihenfolge von Prämissen* auf das relationale Schließen. In einer einflussreichen Arbeit wurde von Ehrlich und Johnson-Laird (1982) zwischen *kontinuierlicher* ($w\,R_1\,x$, $x\,R_2\,y$, $y\,R_3\,z$), *semikontinuierlicher* ($x\,R_2\,y$, $y\,R_3\,z$, $w\,R_1\,x$) und *diskontinuierlicher* Prämissenreihenfolge ($y\,R_3\,z$, $w\,R_1\,x$, $x\,R_2\,y$) von drei Prämissen, also vier Termen, unterschieden. In ihren Experimenten fanden die Autoren dann, dass die kontinuierliche und die semikontinuierliche Reihenfolge zu weniger falschen Schlussfolgerungen führen als die diskontinuierliche Prämissenreihenfolge. Knauff et al. (1998) führten

Tab. 15.10 Die vier möglichen Figuren beim relationalen Schließen mit zwei Prämissen

	Figur 1	Figur 2	Figur 3	Figur 4
Prämisse 1	*X links von Y*	*Y rechts von X*	*X links von Y*	*Y rechts von X*
Prämisse 2	*Y links von Z*	*Y links von Z*	*Z rechts von Y*	*Z rechts von Y*

Tab. 15.11 Durchschnittliche Prämissenlesezeiten in Sekunden als Funktion der Prämissenreihenfolge. (Knauff et al. 1998)

Prämissenreihenfolge		Prämisse 1	Prämisse 2	Prämisse 3
Kontinuierlich	$w\,R_1\,x, x\,R_2\,y, y\,R_3\,z$	13,0	11,2	10,9
Semikontinuierlich	$x\,R_2\,y, y\,R_3\,z, w\,R_1\,x$	13,6	11,0	14,4
Diskontinuierlich	$y\,R_3\,z, w\,R_1\,x, x\,R_2\,y$	12,4	13,9	19,5

daraufhin ein ähnliches Experiment durch, protokollierten aber zusätzlich die Prämissenlesezeiten. Wie in Tab. 15.11 dargestellt, waren die Verarbeitungszeiten für die dritte Prämisse in diskontinuierlicher Reihenfolge im Vergleich zu den anderen Bedingungen signifikant länger. Genau an dieser Stelle des Inferenzprozesses ist der zusätzliche Verarbeitungsaufwand erforderlich, um die Prämissen in eine kontinuierliche Reihenfolge zu bringen. Der Effekt wird als auch als *Prämissenreihenfolgeeffekt* oder *Kontinuitätseffekt* bezeichnet (vgl. Knauff 2006). In Folgeuntersuchungen konnten Nejasmic et al. (2015) zeigen, dass Probanden für diskontinuierliche Prämissen nicht zunächst zwei separate mentale Repräsentationen aufbauen, die dann erst nach der dritten Prämisse integriert werden. Vielmehr ist es so, dass direkt mit der Konstruktion einer Repräsentation begonnen und das Modell ggf. revidiert wird, wenn die dritte Prämisse verarbeitet wird.

Was passiert, wenn die Prämissen *mehrere mögliche Anordnungen*, also mehrere Interpretationen, zulassen? Diese Frage wurde besonders ausführlich untersucht. Byrne und Johnson-Laird (1989) nehmen an, dass eine Denkaufgabe schwieriger wird, je mehr Anordnungen aus den Prämissen mental konstruiert werden können. Dies wird in den folgenden drei Beispielaufgaben deutlich. Dabei wird eine zweidimensionale Anordnung der Objekte (Terme) *A, B, C, D* und *E* auf einer horizontalen Achse (links, rechts) und einer vertikalen Achse (vor, hinter) beschrieben. Welche Beziehung besteht zwischen *D* und *E*? Versuchen Sie, diese Aufgaben nur im Kopf ohne Hilfsmittel zu lösen:

Aufgabe 1
A liegt rechts von B.
C liegt links von B.
D liegt vor C.
E liegt vor B.

Aufgabe 2
B liegt rechts von A.
C liegt links von B.
D liegt vor C.
E liegt vor B.

Aufgabe 3
B liegt rechts von A.
C liegt links von B.
D liegt vor C.
E liegt vor A.

Fällt Ihnen eine Aufgabe schwerer als die anderen? Vermutlich! Hier ist die Erklärung: Für die erste Aufgabe gibt es eine eindeutige Anordnung:

C B A
D E

Aus dieser Anordnung ist die gültige Konklusion *D liegt links von E* abzulesen. Für die zweite Aufgabe gibt es zwei Anordnungen:

C A B | *A C B*
D E | *D E*

Die Schlussfolgerung *D liegt links von E* ist wieder gültig, da sie in allen Anordnungen gilt, es also keine Anordnung gibt, die dieser Konklusion widerspricht. Für das dritte Problem sind ebenfalls zwei Anordnungen möglich:

C A B | *A C B*
D E | *E D*

Wie Sie sehen, gibt es nun jedoch keine Beziehung zwischen *D* und *E*, die in allen Anordnungen gilt. Die einzige logisch gültige Konklusion lautet deshalb: *Nichts folgt aus den Prämissen*. Byrne und Johnson-Laird (1989) konnten zeigen, dass zwar über 70 % des ersten Aufgabentyps, aber nur knapp die Hälfte aller Aufgaben des zweiten Typs korrekt gelöst wurden. Sogar noch größere Schwierigkeiten hatten die Probanden mit dem dritten Aufgabentyp. Nur etwa 30 % dieser Aufgaben wurden korrekt gelöst. Dieser *Unbestimmtheitseffekt* spielt in der Theorie mentaler Modelle eine wichtige Rolle.

Theoretische Ansätze zum relationalen Schließen

Wir haben die Theorie mentaler Modelle beim konditionalen und syllogistischen Schließen bereits kennengelernt, und Ihnen ist bestimmt aufgefallen, dass diese Theorie gerade die Forschung zum relationalen Schließen stark beeinflusst hat. Tatsächlich gibt es – im Unterschied zu anderen Bereichen der Denkpsychologie – relativ wenig Dissens darüber, dass sich die berichteten experimentellen Ergebnisse beim relationalen Schließen am besten anhand mentaler Modelle erklären lassen. Nur wenige Forscher vertreten noch die Auffassung, dass beim relationalen Schließen mentale Beweise durchgeführt werden, indem z. B. eine logische Regel für die Transitivität auf die Prämissen angewandt wird (Van der Henst 2002).

Gemäß der Modelltheorie verwenden Probanden beim relationalen Schließen ihr *Wissen über die Bedeutung* von Relationen. So wissen wir z. B., wo ein Objekt *X* ungefähr liegen sollte, wenn

es *rechts von Y* liegt. Dabei wird *X* als *zu lokalisierendes Objekt* (LO) und *Y* als *Referenzobjekt* (RO) bezeichnet. Man spricht auch von *Figur* und *Grund* oder *Relatum* und *Lokatum* (Miller und Johnson-Laird 1976; Landau und Jackendoff 1993). Relationale Schlüsse werden dann durchgeführt, indem die in den Prämissen gegebenen relationalen Informationen „mental modelliert" werden. Viele Autoren nehmen an, dass es sich bei diesen Modellen entweder um *visuelle Vorstellungen* oder um *räumliche Layoutmodelle* handelt (Knauff 2013a). Die Grundidee wurde bereits in ▶ Abschn. 15.2.1 skizziert, wird aber in ▶ Abschn. 15.5.2 noch genauer diskutiert. Unabhängig von dieser Diskussion wird dann angenommen, dass das Modell *abgesucht* wird, um neue Information aus diesem mentalen Modell abzulesen. Wieder ist der Ausgangspunkt das modelltheoretische Verfahren der Logik. Eine Konklusion ist nur wahr, wenn sie unter allen möglichen Interpretationen der Prämissen wahr ist. Damit steht die *Semantik* der Prämissen im Mittelpunkt der Modelltheorie des relationalen Schließens. Für das konditionale und syllogistische Schließen hatten z. B. Johnson-Laird und Byrne (1991) die bereits erwähnten drei Phasen einer Inferenz vorgeschlagen: Verstehen, Kombinieren und Validieren. Für das relationale Schließen können die Phasen besser als *Modellkonstruktion, Modellinspektion und Modellvariation* bezeichnet werden (Knauff et al. 1995; Knauff 2006, 2013a). In der *Modellkonstruktionsphase* wird eine integrierte Repräsentation, das mentale Modell, des beschriebenen Sachverhalts erzeugt. Dieses Modell repräsentiert, was der Fall ist, wenn die gegebenen Prämissen wahr sind. In der *Modellinspektionsphase* wird dieses Modell mental inspiziert, um neue Informationen zu identifizieren, die nicht schon in den Prämissen gegeben sind. Damit wird eine vorläufige Schlussfolgerung möglich. In der *Modellvariationsphase* wird dann geprüft, ob diese Schlussfolgerung unter allen möglichen Interpretationen, also in allen möglichen Modellen, der Prämissen gültig ist. In diesem Fall wird die Schlussfolgerung als logisch gültig akzeptiert. Das Problem ist gelöst. Viele Befunde haben gezeigt, dass auf diese Weise auch relationale Schlüsse mit anderen Arten von Relationen – die hier nicht beschrieben wurden – gut erklärt werden können. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass auch Schlussfolgerungen mit Relationen, die an sich nicht räumlich sind, gelöst werden, als wären die Relationen räumlich. Nichträumliche Relationen werden dann in räumliche Relationen übertragen (Knauff 2013a).

Ein Sonderfall von mentalen Modellen sind **präferierte mentale Modelle**. Das sind Modelle, die von Personen bevorzugt konstruiert werden, wenn mehrere logisch mögliche Modelle existieren. Dabei wird jedoch oft nicht nach alternativen Modellen gesucht, um die vorläufige Konklusion zu verifizieren. Da sich die Theorie präferierter mentaler Modelle besonders mit unsicheren nichtdeduktiven Schlussfolgerungen beschäftigt, wird sie in ▶ Abschn. 15.3 dargestellt.

15.3 Unsicheres logisches Schließen

Tweety ist ein Vogel, aber er kann nicht fliegen. Er ist ein Pinguin. In ▶ Abschn. 15.1 wurde dieses Beispiel dargestellt, um zu zeigen, dass nicht alle Schlussfolgerungen im Rahmen der klassischen Logik möglich sind. Trotzdem werden im psychologischen Labor die Aufgaben meist so konstruiert, dass die Antworten der Probanden mit den Regeln der Aussagen- und Prädikatenlogik verglichen werden können. Probanden wird dann die klassische Bedeutung von „logischer Gültigkeit" erklärt. In aller Regel werden nur zwei Antwortalternativen angeboten, und die Rücknahme von Antworten ist in der Regel nicht zugelassen. Mit diesem Paradigma konnte die Psychologie sehr viel über die deduktiven Fähigkeiten von Menschen und die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse erfahren. Aber hat dies viel mit dem Tweety-Beispiel und Ihrem Denken im Alltag zu tun? Einerseits ja, weil wir auch im Alltag häufig deduktive Schlüsse vornehmen und uns dann *sicher* sein müssen, keine falschen Schlüsse gezogen zu haben. Anderseits denken Sie in Ihrem Alltag (hoffentlich) nicht so in Schwarz und Weiß, wie in der klassischen Logik unterstellt. Neben „wahr" und „falsch" schließen Sie im Alltag oft auch, dass etwas mehr oder weniger wahr ist, vielleicht wahr ist oder nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit wahr ist. Außerdem sind Sie im Alltag (hoffentlich) auch bereit, eine Schlussfolgerung zu revidieren (wie beim Tweety-Beispiel), wenn gute Argumente oder empirische Evidenz gegen Ihre bisherigen Schlussfolgerungen sprechen. In den bisher dargestellten Studien war das aber normalerweise nicht möglich.

In einigen Experimenten wurde aber auch die Frage behandelt, wie das nachträgliche Hinzufügen zusätzlicher oder widersprüchlicher Information die Schlussfolgerungen von Probanden beeinflusst. So zeigten Rumain et al. (1983), dass das Hinzufügen alternativer Vorderglieder beim konditionalen Schließen Menschen davon abhalten kann, ungültige Schlussfolgerungen zu akzeptieren. Folgendes Beispiel enthält ein alternatives Vorderglied (nämlich *R*):

Wenn Karin vor der Haustür steht, dann freut sich Hans. (Wenn P, dann Q)
Wenn Herbert vor der Haustür steht, dann freut sich Hans. (Wenn R, dann Q)
Hans freut sich. (Q)

Karin steht vor der Haustür. (P)

Rumain et al. (1983) zeigten, dass die Versuchsteilnehmer seltener unzulässige Schlussfolgerungen aus der Bejahung des Hinterglieds (*Q: Hans freut sich*, wie im Beispiel) und der Verneinung des Vorderglieds produzieren, wenn ein alternatives Vorderglied hinzugefügt wird, hier z. B. *Wenn Herbert vor der Haustür steht* (*R*). Diese Ergebnisse legen nahe, dass Menschen Information über zusätzliche Alternativen, die dieselben Konsequenzen herbeiführen, nutzen, um unzulässige Fehlschlüsse zu unterdrücken. Aus diesem Grund wird der von Rumain und Kollegen berichtete Effekt meist als *Unterdrückungseffekt* (*Suppressionseffekt*) bezeichnet.

Überraschende Ergebnisse erbrachte auch eine Studie von Byrne (1989), in der sie fand, dass Suppressionseffekte unter bestimmten Bedingungen auch für zulässige Schlussfolgerungen wie beim MP und beim MT auftreten können. Sie legte Versuchsteilnehmern Sätze wie folgende vor:

Wenn Anna einen Aufsatz schreiben muss, dann wird sie bis spät in der Bibliothek arbeiten. (Wenn P, dann Q)
Wenn die Bibliothek lange geöffnet hat, dann wird sie bis spät in der Bibliothek arbeiten. (Wenn R, dann Q)
Anna muss einen Aufsatz schreiben. (P)

Was folgt daraus?

Gemäß der Aussagenlogik ist die richtige Antwort, dass Anna bis spät in der Bibliothek arbeiten wird, weil es zulässig ist, aus *Wenn P, dann Q und P gegeben Q* zu folgern (MP). Obwohl die Versuchsteilnehmer beim einfachen MP ohne zusätzliche Vorderglieder immer richtig antworteten, lehnten sie die korrekte Schlussfolgerung in 60 % der Fälle ab, wenn ein zusätzliches Vorderglied wie im obigen Beispiel (*Wenn die Bibliothek lange geöffnet hat*) eingefügt wurde. Auch die korrekte Schlussfolgerung beim MT wurde unter dieser Bedingung häufiger abgelehnt. Byrne zufolge tritt der Suppressionseffekt für zulässige Schlussfolgerungen auf, weil zusätzliche Prämissen weitere Anforderungen *suggerieren*. So muss z. B. die Bibliothek auch geöffnet sein, damit man lange darin arbeiten kann. In nachfolgenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Höhe des Suppressionseffekts für zulässige Schlussfolgerungen zunimmt, wenn die zusätzlichen Anforderungen stärker werden (Chan und Chua 1994) oder viele zusätzliche Anforderungen von den Probanden selbst generiert werden können (Cummins 1995; Cummins et al. 1991). Andererseits nimmt die Stärke des Suppressionseffekts ab, wenn die zusätzlichen Anforderungen unsicherer werden (Stevenson und Over 1995).

Die klassische deduktive Logik reicht oft nicht aus, um solche Phänomene beim menschlichen Denken im Alltag zu erklären. Das hat zu einem „neuen Paradigma der Denkpsychologie" geführt, das sich von den engen Vorgaben der klassischen Logik löst (Over 2009; Evans 2012; Elqayam und Evans 2011). Psychologen suchen inzwischen nach alternativen normativen Theorien des rationalen Denkens und führen viele Experimente durch, um menschliches Denken mit diesen neuen Normen zu vergleichen. In der Regel schwächen diese Rationalitätsnormen die Forderungen der klassischen Logik ab oder verändern diese. Menschliches Schließen ist demnach nicht an die Einhaltung der Regeln der Aussagen- und Prädikatenlogik gebunden. Es wird auch als rational beurteilt, wenn es anderen Regelsystemen folgt. Zwei große Rahmentheorien stehen dabei im Mittelpunkt. In einer theoretischen Konzeption werden *nichtklassische Logiken* anstelle der klassischen Logik verwendet, um zu definieren, was als rational gelten soll. Der Vorteil solcher Logiken ist, dass sie die Gesetze der klassischen Logik abändern oder erweitern und sich deshalb besser als Norm für das Denken im Alltag eignen. Der andere Ansatz verlässt den normativen Rahmen der Logik und ersetzt diesen durch die Regeln der *Wahrscheinlichkeitstheorie* und *Statistik*. Im Folgenden werden die wichtigsten Ansätze der beiden Grundpositionen dargestellt.

15.3.1 Anfechtbares Schließen

In unserem alltäglichen Denken kommt es häufig vor, dass wir einen Schluss ziehen, aber bereits wissen, dass dies vielleicht nicht unsere endgültige Schlussfolgerung ist. Wir gehen bereits davon aus, dass wir möglicherweise noch etwas Neues erfahren, sodass wir unseren ursprünglichen Schluss noch einmal überdenken müssen. Solche Schlüsse werden unter dem Begriff *anfechtbares Schließen* (*defeasible reasoning*) zusammengefasst. Ein Hauptbefund in diesem Bereich ist, dass die Bereitschaft, einen deduktiv gültigen Schluss zurückzunehmen, davon abhängt, ob den Versuchsteilnehmern *Ausnahmen*, *Gegenbeispiele* oder *Unmöglichkeitsbedingungen* (*defeaters*) zu einer Wenn-dann-Regel der klassischen Logik einfallen, sie also Fälle kennen, in denen die Prämissen eines konditionalen Schlusses gültig sind, aber die Konklusion nicht gültig ist. Nehmen sie z. B. an, Sie bekommen die folgende logische Schlussfolgerung präsentiert:

Wenn jemand viele Süßigkeiten isst, dann bekommt die Person Karies.
Anna isst viele Süßigkeiten.

Also bekommt Anna Karies.

Die meisten Probanden akzeptieren diesen Schluss zunächst zu Recht als logisch gültig. Legt man ihnen aber anschließend eine weitere Aussage vor, z. B.

Anna putzt sich immer gründlich die Zähne nach dem sie Süßigkeiten gegessen hat.

dann nehmen die meisten Probanden oft ihre ursprüngliche Schlussfolgerung zurück. Dies stimmt aber nicht mit den Regeln der klassischen Logik überein, weil in diesem System das Hinzufügen weiterer Prämissen niemals zu weniger Folgerungen führen kann. Es gibt inzwischen zahlreiche Studien, die zeigen, dass Versuchspersonen die auf *Ausnahmen* oder *Gegenbeispiele* hingewiesen werden, diese selbst generieren oder aus dem Gedächtnis abrufen, Regeln der klassischen Logik verletzen, indem sie bereits vorgenommene logische Schlüsse wieder zurücknehmen (z. B. Cummins et al. 1991; Demeure et al. 2009; De Neys et al. 2003a, b; Markovits und Potvin 2001; ▶ Zur Vertiefung 15.1).

15.3.2 Überzeugungsänderung

Manchmal sind Menschen nicht darauf vorbereitet, dass sie ihre Meinung noch einmal ändern müssen. Dann erhalten sie jedoch neue Informationen, die nicht mit dem bisher für richtig Gehaltenen übereinstimmen. Es kommt also zu einem Konflikt zwischen einer Überzeugung, die Ergebnis einer Schlussfolgerung ist, und einer weiteren Information, die z. B. empirisch gegeben ist. Ist diese neue Information unbezweifelbar wahr, muss also die Schlussfolgerung falsch sein und die Überzeugung revidiert werden. Solche Prozesse sind für die Sozialpsychologie (man denke an Meinungsänderung und Vorurteile) sowie das Argumentieren und Überzeugen sehr wichtig (Gawronski und Strack 2012). Sie werden aber auch in der Denkpsychologie, der Philosophie und besonders in der Künstlichen-Intelligenz-Forschung unter dem Stichwort **Überzeugungsänderung** (*belief revision*) ausführlich behandelt. Streng genommen bleiben diese Ansätze im Rahmen

Zur Vertiefung 15.1

Anfechtbarkeit im juristischen Schließen

Anfechtbares Schließen spielt auch in der Rechtsprechung eine große Rolle (Bäcker 2010). Verträge und Rechtsgeschäfte sind unter bestimmten Bedingungen anfechtbar, und es kommt nicht selten vor, dass die Entscheidung eines Gerichts durch ein höheres Gericht aufgehoben wird. Manchmal erhalten Gerichtsurteile auch viel öffentliche Aufmerksamkeit, weil eine Tat als moralisch besonders verwerflich oder abscheulich empfunden wird. Oft spielt dabei auch die Art der Berichterstattung in den Medien eine wichtige Rolle.

Gazzo Castaneda und Knauff (2016a) erforschten, wie juristische Laien und Experten mit rechtlichen Wenn-dann-Regeln umgehen, wenn diese unter bestimmten Umständen nicht mehr angewandt werden. So ist die Regel *Wenn eine Person einen Menschen tötet, dann soll die Person wegen Totschlags bestraft werden* nur dann gültig, wenn es sich nicht um Notwehr oder Schuldunfähigkeit handelt. Gazzo Castaneda und Knauff (2016a) untersuchten, wie solche Ausnahmen im Sinne von strafausschließenden Umständen von juristischen Experten und Laien berücksichtigt werden. Dabei wurde auch untersucht, welchen Einfluss die moralische Verwerflichkeit der Tat auf die Entscheidungen der Probanden hat (z. B. illegaler Musik-Download vs. Hehlerei vs. sexueller Missbrauch von Kindern). Die Experimente zeigten, dass Schließen mit rechtlichen Konditionalen bei juristischen Laien oft nicht den Regeln der klassischen Logik folgt, sondern vom subjektiven Gerechtigkeitsempfinden der Probanden beeinflusst wird. Während Juristen unter Anwesenheit strafausschließender Gründe eine rechtliche konditionale Regel nicht mehr anwenden, hängt die Akzeptanz solcher Ausnahmen bei Laien von der empfundenen moralischen Verwerflichkeit der Tat ab. Je verwerflicher die Tat von den Probanden beurteilt wurde, desto seltener revidieren sie eine Schlussfolgerung (ein Urteil) „schuldig" in „nicht schuldig", selbst wenn die zusätzliche Prämisse einen juristisch strafausschließenden Umstand beschreibt (z. B. Schuldunfähigkeit).

In weiteren Experimenten verwendeten Gazzo Castaneda und Knauff (2016b) deontische Modalverben (die sich auf Erlaubnisse, Verbote und Verpflichtungen beziehen) und konnten nachweisen, dass der Effekt der moralischen Verwerflichkeit sogar stärker ausfällt, wenn die rechtliche Wenn-dann-Regel nicht als „wird bestraft" formuliert wird, sondern mithilfe von „soll bestraft werden". Im Rahmen der klassischen Logik sind solche Auswirkungen auf logische Schlüsse nicht zulässig, aber offensichtlich spielen sie bei menschlichen Inferenzprozessen eine Rolle. Logisch betrachtet, können solche Schlüsse als nichtmonotone Inferenzen betrachtet werden, die in ► Abschn. 15.3.4 dargestellt werden. Sie sind auch als probabilistische Schlüsse zu betrachten, wenn man davon ausgeht, dass die Probanden ohnehin davon ausgegangen sind, dass die Konklusion nicht mit Sicherheit, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wahr ist. Diese Ansätze werden in ► Abschn. 15.3.7 und 15.3.8 dargestellt. Die berichteten Befunde passen auch zu der Beobachtung, dass in der Öffentlichkeit der Ruf nach „harten Strafen" gerade dann laut wird, wenn eine Tat als besonders abscheulich oder abstoßend empfunden wird.

der klassischen Logik, weil eine Überzeugung letztlich nur wahr oder falsch sein kann. Jedoch geht es bei der Überzeugungsänderung auch um Unsicherheiten, weil nicht klar ist, wie *Inkonsistenzen* in dem System von Überzeugungen vermieden werden (Antoniou 1997; Beierle und Kern-Isberner 2008).

Man kann verschiedene Prinzipien der Überzeugungsrevision unterscheiden (Harman 1986; Rott 2001). So besagt das *Prinzip des Konservatismus* (*principle of conservatism*), dass eine Überzeugung beibehalten wird, solange kein spezieller Grund dagegen spricht. Dies ist besonders bei Überzeugungen der Fall, die man irgendwann angenommen hat und seitdem für begründet hält, von denen man aber nicht mehr sagen kann, wie sie zustande gekommen sind. Eine andere Möglichkeit ist das *Prinzip der minimalen Veränderung* (*principle of minimal change*). Hierbei wird versucht, nur möglichst geringfügige Veränderungen innerhalb eines Überzeugungssystems vorzunehmen. Wenn man eine Überzeugung aufgibt, hat das in der Regel Nebeneffekte auf andere Überzeugungen, und man wählt diejenige Revision aus, die zu einer minimalen Anzahl von Nebeneffekten führt (Harman 1986). Ein drittes Prinzip heißt *epistemische Verwurzelung* (*epistemic entrenchment*) und besagt, dass bei der Revision nur Wissen (epistemisch = das Wissen betreffend) aufgegeben werden soll, das so wenig grundlegend wie möglich ist (Gärdenfors und Makinson 1988). Damit ist gemeint, dass Teile unseres Wissens und unserer Überzeugungen, fester verankert und besser begründet sind als andere. Bei widersprüchlichen Informationen sollten diese besser verankerten Überzeugungen also weniger leicht aufgegeben werden. Beispiele dafür sind z. B. Naturgesetze, wie die Schwerkraft, oder Wissenshierarchien, wie die Tatsache, dass Pinguine Vögel sind und Vögel zu den Lebewesen gehören. Das Merkmal „fliegen können" ist in diesem Fall epistemisch weniger verwurzelt.

Das bekannteste formale System zu Überzeugungsrevision wird nach den Autoren Alchourrón, Gärdenfors und Makinson als AGM-Theorie bezeichnet (Alchourrón et al. 1985). Es definiert eine Reihe von Rationalitätskriterien und Postulaten, die den Rahmen für die rationalen Operationen bei der Überzeugungsrevision angeben. So sollen beispielsweise bei der erforderlichen Revision nicht alle Überzeugungen gelöscht werden. Außerdem soll nach Gärdenfors und Rott (1995) die „Wissensbasis" konsistent bleiben. Jede ableitbare Überzeugung sollte ebenfalls in die Wissensbasis aufgenommen werden, bei der Veränderung der Wissensbasis sollte der Verlust von Information möglichst gering sein, und stärker akzeptierte Überzeugungen sollten gegenüber schwächeren bevorzugt beibehalten werden. Bei der Überzeugungsrevision spielen dann drei Prozesse eine Rolle: Bei der *Expansion* wird ein Satz dem Überzeugungssystem (Wissensbasis) hinzugefügt; das kann zu (ungewollten) Inkonsistenzen führen. Bei der eigentlichen *Revision* werden dann Operationen durchgeführt, die ein konsistentes System von Sätzen zur Folge haben. Diese Operationen sollen zu einer logisch abgeschlossenen und widerspruchsfreien Menge von Sätzen führen. Bei der *Kontraktion* werden dann redundante Sätze eliminiert (weitere Erläuterungen in Alchourrón et al. 1985; Rott 2001).

In der Denkpsychologie wurden einige Experimente durchgeführt, um herauszufinden, ob Probanden logische Inkonsistenzen in einer Menge von Aussagen *entdecken* und, wenn ja, wie diese *behoben* werden. Zur ersten Frage ist festzustellen, dass Probanden in der Regel gut in der Lage sind, logische Inkonsistenzen in Schlussfolgerungsaufgaben zu erfassen (Johnson-Laird et al. 2004). Dies spricht dafür, dass sie sich an den normativen Vorgaben der Logik orientieren. Johnson-Laird et al. (2000) führten Experimente durch, um die Vorhersagen der Theorie

mentaler Modelle bei der Entdeckung von Inkonsistenzen zu überprüfen. In einer Versuchsbedingung wurden den Probanden zunächst zwei Sätze präsentiert. Anschließend sollten sie entscheiden, ob aus diesen Sätzen ein dritter Satz folgt. Hier ein Beispiel:

Wenn es keinen Apfel gibt, dann gibt es eine Banane.
Wenn es eine Banane gibt, dann gibt es eine Kirsche.
Es gibt keinen Apfel und es gibt eine Banane.

Laut Modelltheorie konstruieren Probanden aus dem ersten Satz folgendes Modell:

¬Apfel Banane

Der zweite Satz führt dann zu folgendem Modell:

¬Apfel Banane Kirsche

In diesem Modell ist der dritte Satz wahr, und die Versuchspersonen sollten dies erkennen. In der zweiten Versuchsbedingung wurden den Probanden z. B. folgende Sätze präsentiert:

Es gibt einen Apfel, oder es gibt eine Banane.
Es gibt keine Banane, oder es gibt eine Kirsche.
Es gibt keinen Apfel, und es gibt eine Kirsche.

Ein mögliches Modell des ersten Satzes ist nun:

Apfel ¬Banane

Wenn die Probanden nun versuchen das Modell, weiter zu konstruieren, werden sie feststellen, dass dies nicht funktioniert. Also versuchen sie es mit der zweiten möglichen Interpretation des ersten Satzes. Das führt zu folgenden Modell:

¬Apfel Banane

In dieses Modell kann der dritte Satz problemlos integriert werden:

¬Apfel Banane Kirsche

Johnson-Laird et al. (2004) konnten zeigen, dass in dieser Aufgabe die Probanden die Inkonsistenz zwischen dem ersten Modell und dem zweiten Satz erkannten. Entsprechend wurden die Prämissen seltener als konsistent beurteilt, wenn das erste Modell durch das zweite Modell ersetzt werden musste.

Probanden können also logische Inkonsistenzen in Prämissen entdecken. Aber wie werden diese behoben? Eine der ersten Arbeiten dazu wurden von Revlis et al. (1971) durchgeführt. In diesen Experimenten wurden den Probanden Aussagen mit Quantoren vorgelegt:

Alle Wirbeltiere haben eine Wirbelsäule.
Diese Amöbe hat keine Wirbelsäule.

Anschließend wurden Aussagen präsentiert, die mit den beiden vorhergehenden Sätzen unvereinbar waren und als „unbezweifelbar" wahr bezeichnet wurden:

Diese Amöbe ist ein Wirbeltier.

Revlis et al. (1971) zeigten, dass Versuchspersonen häufiger die spezielle Aussage *Diese Amöbe hat keine Wirbelsäule* verwerfen als die generelle Aussage *Alle Wirbeltiere haben eine Wirbelsäule*. Zudem fanden die Autoren Evidenz für das Prinzip der epistemischen Verwurzelung: Die Probanden verwarfen diejenigen der ersten beiden Aussagen seltener, die mit ihrem Weltwissen übereinstimmten und fundamentale Tatsachen dieses Wissens beschrieben. Ähnliche Befunde wurden von anderen Autoren berichtet. Einige Autoren (Dieussaert et al. 2000; Elio und Pelletier 1997; Politzer und Carles 2001) zeigten, dass konditionale Prämissen häufiger beibehalten werden als kategoriale Prämissen. Während diese Befunde für das Prinzip der epistemischen Verwurzelung sprechen, wird das Prinzip der minimalen Veränderung von vielen Philosophen und Informatikern verteidigt (Harman 1986; Gärdenfors 1992). Aus psychologischer Sicht hat Minimalität aber das Problem, dass es viele verschiedene Möglichkeiten der minimalen Veränderung gibt, die für Personen nur schwer zu beurteilen sind (Walsh und Johnson-Laird 2009).

Eine weitere Schwierigkeit der Minimalität ist, dass Menschen sich im Alltag oft nicht mit minimalen Veränderungen und auch nicht mit der Beibehaltung tief verankerter Überzeugungen zufrieden geben. In der Regel wollen wir uns Inkonsistenzen, denen wir begegnen, auch *erklären*. Dafür sprechen Befunde aus dem Bereich der Entscheidungsforschung (Shafir et al. 1993). Dieser Idee folgend konnten Walsh und Johnson-Laird (2009) sowie Khemlani und Johnson-Laird (2011) zeigen, dass Probanden versuchen, *Erklärungen* für Inkonsistenzen zu finden, und dass diese Erklärungen den Prozess der Überzeugungsänderung beeinflussen. So legten Khemlani und Johnson-Laird (2011) ihren Versuchsteilnehmern z. B. folgende Prämissen vor:

Wenn eine Person regelmäßig Sport treibt, stärkt sie damit ihr Herz.
Eine Person treibt regelmäßig Sport, hat dabei aber nicht ihr Herz gestärkt.

Anschließend wurden folgende Möglichkeiten angeboten, den Widerspruch aufzulösen:

- Zusätzliche Erklärung, die zur Verwerfung der konditionalen Verallgemeinerung führt: Die Person hat einen angeborenen Herzfehler (58 %).
- Zusätzliche Erklärung, die zur Verwerfung der kategorialen Aussage führt: Die Person war beruflich zu beschäftigt, um regelmäßig Sport zu treiben (6 %).
- Direkte Verwerfung der konditionalen Verallgemeinerung: Regelmäßiger Sport stärkt nicht immer das Herz (7 %).
- Direkte Verwerfung der kategorialen Aussage: Die Person hat nicht regelmäßig Sport getrieben (29 %).

Die Prozentwerte in den Klammern geben an, wie viele der Probanden die jeweilige Option zur Auflösung des Widerspruchs

wählten. Wie man sieht, entschieden sich 64 % (Option 1 und 2) der Probanden dafür, zusätzliche Informationen zu akzeptieren, um das Problem zu lösen. Nur 26 % (Option 3 und 4) entschieden sich direkt, eine der Prämissen zu verwerfen. Außerdem entschieden sich die meisten Personen für eine Erklärung der Inkonsistenz, die zur Verwerfung der konditionalen Verallgemeinerung führte.

Wenn keine guten Erklärungen vorliegen, kann aber ein weiteres Prinzip zur Revision von Überzeugungen wirksam werden. Im Rahmen der Modelltheorie wird es als *Mismatch-Prinzip* bezeichnet und besagt, dass diejenige Aussage verworfen wird, die nicht mit dem mentalen Modell übereinstimmt. Werden beispielweise die Aussagen

Wenn der Präsident eine Villa besitzt, dann besitzt er auch eine Jacht. ($p \rightarrow q$)
Der Präsident besitzt eine Villa. (p)

präsentiert, wird daraus gemäß der Modelltheorie das Modell

Villa Jacht
…

konstruiert. Die Punkte stehen wieder für weitere mögliche Modelle. Nehmen wir aber nun an, wir erfahren, dass der Präsident mit Sicherheit keine Jacht besitzt ($\neg q$). In diesem Fall stimmt der Fakt nicht mit dem initialen Modell des Konditionals überein, und Probanden verwerfen häufiger diese konditionale Aussage ($p \rightarrow q$). Natürlich sind die Aussagen nicht wirklich inkonsistent, weil sich hinter den Punkten weitere mögliche Modelle verbergen. So kann gemäß MT der Präsident keine Jacht ($\neg q$) und keine Villa ($\neg p$) besitzen. Diese Möglichkeit ist aber nicht explizit repräsentiert und wird deshalb übersehen. Lauten jedoch die Aussagen

Wenn der Präsident eine Villa besitzt, dann besitzt er auch eine Jacht. ($p \rightarrow q$)
Der Präsident besitzt keine Jacht. ($\neg q$)

wird zunächst dasselbe Modell wie oben konstruiert. Erfahren wir nun aber, dass der Präsident mit Sicherheit eine Villa (p) besitzt, stimmt dies mit diesem Modell des Konditionals ($p \rightarrow q$) überein. Dann stimmt aber die kategoriale Aussage ($\neg q$) nicht, und entsprechend wird die Aussage, dass der Präsident keine Jacht besitzt, verworfen. In mehreren Veröffentlichungen konnte dieses *Mismatch-Prinzip* nachgewiesen werden (Hasson und Johnson-Laird 2003; Johnson-Laird 2006).

Das Mismatch-Prinzip wirkt allerdings nur, wenn nicht andere inhaltliche Gründe dagegen sprechen. So kann z. B. auch die Quelle der verschiedenen Informationen auf deren Glaubwürdigkeit hinweisen. Wolf et al. (2012) zeigten z. B., dass das Mismatch-Prinzip nicht mehr wirksam ist, wenn die Aussagen von unterschiedlichen Sprechern geäußert werden und die Probanden diese Sprecher für mehr oder weniger glaubwürdig halten. In den Experimenten wurden die Aussagen von Personen verschiedener Berufsgruppen geäußert, die von den Probanden

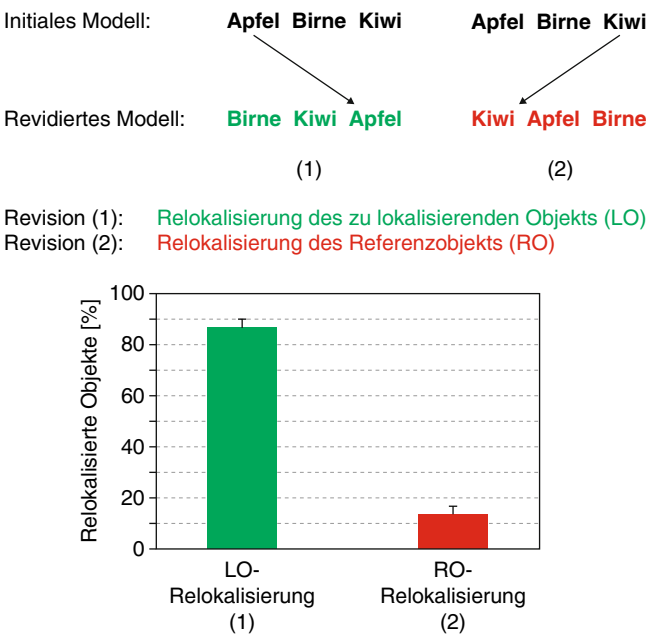


Abb. 15.4 Bevorzugung der LO-Relokalisierung bei der Revision räumlicher mentaler Modelle. (Aus: Knauff et al. 2013)

als mehr oder weniger vertrauenswürdig beurteilt wurden. In diesen Fall spielt das Mismatch-Prinzip keine Rolle mehr. Die Probanden verwerfen die Aussagen von wenig glaubwürdigen Personen wie Gebrauchtwagenhändlern, Immobilienmaklern und Zuhältern sehr häufig. Hingegen wurden die Aussagen von Richtern, Pfarrern und Professoren meist beibehalten. Der Effekt kann als *Quelleneffekt* bezeichnet werden. Weitere Inhaltseffekte werden in ▶ Abschn. 15.5.1 behandelt.

Überzeugungsänderungen wurden auch beim relationalen Schließen untersucht (Knauff et al. 2013). Dabei wurden Probanden relationale Aussagen wie *Der Apfel liegt links von der Birne* und *Die Birne liegt links von der Kiwi* präsentiert. Ihnen wurde gesagt, alle Früchte seien auf einer horizontalen Achse von links nach rechts angeordnet. Die Relationen *links von* und *rechts von* sind zweistellig und transitiv, und es ist nur ein Modell möglich, in dem der Apfel links von der Kiwi liegt. Nachdem die Probanden zu diesem Schluss gekommen waren, wurde ein weiterer Fakt präsentiert, z. B. *Der Apfel liegt rechts von der Kiwi*. Dieser Fakt ist nicht mit dem mentalen Modell der Prämissen zu vereinbaren. Es gibt genau zwei Möglichkeiten, dieses Modell zu revidieren. Die Kiwi kann ganz nach links oder der Apfel ganz nach rechts verschoben werden (Abb. 15.4). Fast alle Probanden wählten aber das revidierte Modell (1), in dem das zu lokalisierende Objekt (LO), also der Apfel, neu positioniert wird. Das Referenzobjekt (RO), die Kiwi, wird kaum neu positioniert (▶ Abschn. 15.2.3). Die Probanden bewerten also die Position des RO als relativ festgelegt, während die Position des LO als variabler betrachtet wird. Die linguistische Asymmetrie zwischen RO und LO macht

Tab. 15.12 Prinzipien der Überzeugungsänderung

Revisionsprinzip	Welche Überzeugungen (Annahmen) werden beibehalten oder revidiert?
Konservatismus	Überzeugungen werden beibehalten, solange kein spezieller Grund gegen sie spricht.
Minimale Veränderung	Es wird diejenige Überzeugung revidiert, die zu einer minimalen Anzahl von Nebeneffekten auf andere Überzeugungen führt.
Epistemische Verwurzelung	Bei der Revision werden nur die Überzeugungen aufgegeben, die so wenig grundlegend wie möglich sind.
Suche nach Erklärung	Es werden zunächst Erklärungen für vorhandene Widersprüche gesucht und erst dann die Annahmen aufgegeben, die sich nicht erklären lassen.
AGM-Postulate	Nicht alle Überzeugungen sollen gelöscht werden. Nach der Revision soll das System von Überzeugungen möglichst konsistent sein. Jede ableitbare Überzeugung sollte ebenfalls in das System von Überzeugungen aufgenommen werden können. Bei der Veränderung des Glaubenssystems soll der Verlust von Information möglichst gering sein. Stärker akzeptierte Überzeugungen sollen gegenüber schwächeren Überzeugungen bevorzugt beibehalten werden.
Mismatch-Prinzip	Es werden diejenigen Annahmen beibehalten, die mit dem initialen mentalen Modell übereinstimmen. Annahmen, die nicht mit diesem initialen Modell konsistent sind, werden eher verworfen oder revidiert.
Quellenprinzip	Annahmen, die aus glaubwürdigen Quellen stammen, werden bevorzugt beibehalten. Annahmen, die aus Quellen stammen, an deren Zuverlässigkeit ein begründeter Zweifel besteht, werden eher aufgegeben oder revidiert.
LO-Relokalisierung	Revisionsprinzip speziell für den Bereich des relationalen Schließens: Das Referenzobjekt (RO) einer relationalen Aussage wird als räumlich relativ festgelegt betrachtet und deshalb selten neu positioniert. Das zu lokalisierende Objekt (LO) einer relationalen Aussage wird als räumlich flexibler betrachtet und deshalb häufiger neu positioniert.

sich also auch bei der Konstruktion und Revision räumlicher mentaler Modelle bemerkbar. Die wichtigen Prinzipien bei der Überzeugungsänderung sind in Tab. 15.12 zusammengefasst.

15.3.3 Denken mit mehr als zwei Wahrheitswerten

Im Alltag gibt es viele Entscheidungen und Schlussfolgerungsprozesse, bei denen wir mit den beiden Alternativen „wahr“ oder „falsch“ nicht auskommen. Für solche Fälle wurden die *mehrwertigen Logiken* entwickelt. Diese nichtklassischen *Logiken* berücksichtigen neben den in der Aussagen- und Prädikatenlogik verwendeten Wahrheitswerten „wahr“ und „falsch“ weitere Wahrheitswerte. Sie geben also das Prinzip *tertium non datur* (Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten) auf, da mit zusätzlichen Wahrheitswerten manche Schlussfolgerungen besser beschrieben werden können als mit der klassischen Logik. Während in der klassischen Logik alle Aussagen in die beiden disjunkten Klassen „wahr“ oder „falsch“ zerfallen, stehen in den mehrwertigen Logiken mehrere Klassen zur Verfügung. Ein Extremfall ist die Fuzzy-Logik, in der die Wahrheitswerte von Aussagen jeden numerischen Wert im reell-wertigen Intervall [0,1] einnehmen können (Zadeh 1965).

Für die Psychologie wichtiger ist der Ansatz des polnischen Philosophen und Logikers Jan Łukasiewicz. Die von Łukasiewicz entwickelte mehrwertige Logik ist eine *dreiwertige Logik*, die außer „wahr“ und „falsch“ einen dritten Wahrheitswert für Aussagen enthält, die nicht bewiesen, aber auch nicht widerlegt sind. Dieser Wahrheitswert lässt sich am besten mit „möglich“ (*M*) ausdrücken. In Tab. 15.13 sind die Wahrheitswerte der Ł3-Logik dargestellt.

Eine Alternative zu Ł3 ist die von Kleene entwickelte Logik K3 (Kleene 1952). Die Logiken Ł3 und K3 unterscheiden sich jedoch nur in der Definition der Implikation und der Äquivalenzrelation. Wenn das Vorderglied und Hinterglied beide den Wert „möglich“ haben, haben die Implikation und die Äquivalenzrelation in Ł3 den Wahrheitswert „wahr“, in K3 ist der Wahrheitswert jedoch „möglich“. Den Unterschied zwischen Ł3 und K3 kann man sich anhand der folgenden konditionalen Aussage verdeutlichen: *Wenn es Außerirdische gibt, dann können wir auch mit ihnen kommunizieren* ($P \rightarrow Q$). Nun können wir annehmen, dass es *möglicherweise* Außerirdische gibt, es ist nicht sicher, aber auch nicht ausgeschlossen. Der Wahrheitswert des Vorderglieds *P* ist also „möglich“ (*M*). Außerdem können wir annehmen, dass wir dann *möglicherweise* eine Form der Kommunikation finden, auch das ist aber weder sicher noch ausgeschlossen. Der Wahrheitswert des Hinterglieds *Q* ist also ebenfalls „möglich“ (*M*). Nach der Logik K3 folgt daraus, dass die gesamte konditionale Aussage nur möglicherweise gilt, aber möglicherweise auch nicht gilt (Wahrheitswert: *M*). Wir können also möglicherweise mit Außerirdischen kommunizieren, möglicherweise aber auch nicht (Wahrheitswert: *M*). In der Logik Ł3 folgt hingegen, dass die konditionale Aussage sicher gilt (Wahrheitswert: *W*).

Genau genommen sind die Unterschiede zwischen den Logiken Ł3 und K3 komplizierter, aber für unsere Zwecke reicht diese Darstellung aus. Uns interessiert ja primär, wie solche Logiken in der Denkpsychologie zur Modellierung unsicherer logischer Schlüsse verwendet werden können. Eine psychologische The-

Tab. 15.13 Die Wahrheitswerte der von Łukasiewicz entwickelten dreiwertigen Logik

P	*Q*	∧	∨	→	↔
W	*W*	*W*	*W*	*W*	*W*
W	*F*	*F*	*W*	*W*	*F*
W	*M*	*M*	*W*	*W*	*M*
F	*W*	*F*	*W*	*F*	*F*
F	*F*	*F*	*F*	*W*	*W*
F	*M*	*F*	*M*	*M*	*M*
M	*W*	*M*	*W*	*M*	*M*
M	*F*	*F*	*M*	*W*	*M*
M	*M*	*M*	*M*	*W*	*W*

W = wahr, *F* = falsch, *M* = möglich, ∧ = *und*, ∨ = *oder*, → = Implikation, ↔ = Äquivalenzrelation

orie, die auf System K3 beruht, wurde von Stenning und van Lambalgen (2008) vorgeschlagen. In ihrem an der *logischen Programmierung* orientierten Ansatz unterscheiden sie zwei Schritte:

1. Die „Welt" wird mithilfe logischer Regeln mental repräsentiert. Dabei werden auch *Abnormitäten* (z. B. Ausnahmen) repräsentiert, beispielsweise dass es Vögel gibt, die nicht fliegen können, weil sie Pinguine sind.
2. Inferenzen werden gezogen, indem möglichst einfache neue Interpretationen der Regeln berechnet werden.

Ein wichtiges Merkmal des Ansatzes wird als *closed-world assumption* bezeichnet. Demnach wird angenommen, dass das gesamte relevante Wissen über die „Welt" zur Verfügung steht. Dabei ist mit „Welt" natürlich nur der jeweilige Diskursbereich gemeint, also der Ausschnitt der „Welt", der für die logische Schlussfolgerung als Bezugssystem dient. Das heißt, wenn etwas keine logische Konsequenz der Prämissen ist, sollte es falsch sein, es sei denn, es hat den Wahrheitswert „möglich". Das führt dann zu Schlussfolgerungen, die im Sinne der klassischen Logik im Allgemeinen nicht korrekt sind.

Stenning und van Lambalgen (2008) befassten sich auch mit der Suppressionsaufgabe aus ▶ Abschn. 15.3 und interpretieren die konditionalen Regeln folgendermaßen:

Wenn Anna einen Aufsatz schreiben muss und nichts Abnormales bekannt ist, *dann wird sie bis spät in der Bibliothek arbeiten.* (Regel 1: Wenn *P* und nichts Abnormales, dann *Q*)
Wenn die Bibliothek lange geöffnet hat und nichts Abnormales bekannt ist, *dann wird sie bis spät in der Bibliothek arbeiten.* (Regel 2: Wenn *R* und nichts Abnormales, dann *Q*)

Offensichtlich gibt es eine Abhängigkeit zwischen diesen beiden Regeln, und zwar:

Wenn die Bibliothek nicht geöffnet ist, dann ist etwas abnormal *bezüglich Regel 1.*
Wenn sie keinen Aufsatz zu schreiben hat, dann ist etwas abnormal *bezüglich Regel 2.*

Von Stenning und van Lambalgen (2008) wurde ein Logikprogramm entwickelt, das diese Abhängigkeiten in der Suppressionsaufgabe formal repräsentiert und zusätzlich als Fakt annimmt, dass Anna einen Aufsatz zu schreiben hat. Mit dieser Strategie können sie die Suppressionsaufgabe adäquat rekonstruieren und argumentieren deshalb, in klassischen Ansätzen mit zweiwertigen Rationalitätsnormen würden nicht die Probanden Fehler machen, sondern die Psychologen, die falsche Sollwerte (die klassische Logik) zugrunde legen. Von Hölldobler und Ramli (2009) wurde dieser Ansatz formal genauer ausgearbeitet. Sie schlagen allerdings vor, anstelle der Logik K3 die Logik Ł3 zu verwenden. Mit dieser geänderten Herangehensweise können Suppressionseffekte und auch die Wason-Aufgabe modelliert sowie einige formale Schwierigkeiten des Ansatzes von Stenning und van Lambalgen gelöst werden (Dietz et al. 2012, 2013).

In der Psychologie wurden dreiwertige Logiken bisher kaum verwendet (vgl. aber Kowalski 2011); einige Autoren betrachten die Ansätze sogar als psychologisch unplausibel (z. B. Oaksford und Chater 2014). Andererseits könnten sich dreiwertige Logiken für die Psychologie als nützliche normative Richtlinie für Schlussfolgerungen herausstellen, die nicht nur auf wahre oder falsche Aussagen hinauslaufen, sondern auch zulassen, dass etwas *möglicherweise* oder *vielleicht* der Fall ist. Auch in unserem Alltag können oder wollen wir uns nicht immer eindeutig auf ja oder nein festlegen, z. B. weil wir noch unsicher sind oder uns noch wichtige Informationen fehlen. Die Psychologie kann also etwas aus dreiwertigen Logiken lernen, weil diese angeben können, was wir als rationale Schlussfolgerung betrachten können, wenn unsere Entscheidung komplizierter ist als nur „wahr" oder „falsch".

15.3.4 Nichtmonotones Schließen

Sie würden sich wundern, wie berühmt *Tweety* in der Philosophie, Mathematik und Informatik geworden ist (Pearl 1988; 2000; Reiter 1987; Brewka 1991). Psychologisch betrachtet handelt es sich beim Tweety-Beispiel um das in ▶ Abschn. 15.3.1 beschriebene anfechtbare Schließen. Das Tweety-Problem sieht nämlich so aus: Wir erfahren, dass Tweety ein Vogel ist; dies aktiviert in unserem semantischen Gedächtnis die Regel, dass Vögel fliegen können. Wir wenden diese Regel auf Tweety an, was uns zu dem Schluss führt, dass Tweety fliegen kann. Dieser Schluss ist in der

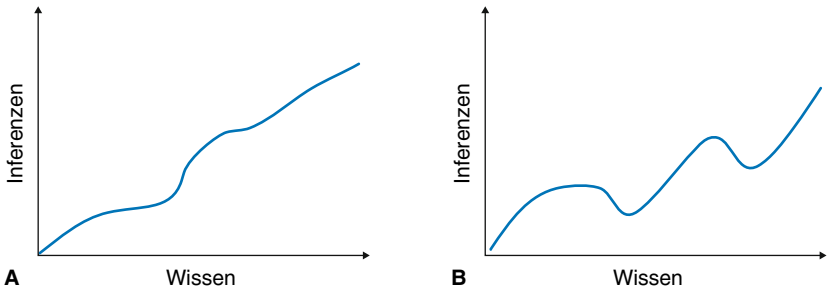


Abb. 15.5 **A** Monotones Schließen: Weiteres Wissen erhält alle bisherigen Inferenzen. **B** Nichtmonotones Schließen: Weiteres Wissen kann bisherige Inferenzen aufheben

klassischen Logik auch korrekt. Nun erfahren wir jedoch, dass Tweety ein Pinguin oder ein Kiwi oder ein Emu ist. Aus dem semantischen Gedächtnis wird nun abgerufen, dass diese Vögel nicht fliegen können. Die nun korrekte Schlussfolgerung kann nur lauten, dass auch Tweety nicht fliegen kann. Der erste Schluss – obwohl klassisch logisch korrekt – war wohl doch zu voreilig: Durch die neue Information gilt die frühere Schlussfolgerung plötzlich nicht mehr.

Wenn die Gefahr besteht, dass neue Informationen frühere Schlüsse aufheben, ist es gut, *vorsichtig* zu schließen; dies haben wir bereits beim anfechtbaren Schließen gesehen. Formal betrachtet ist genau diese Vorsicht bei *nichtmonotonen* Logiken der Fall, weil hierbei auf das Prinzip der *Monotonie* verzichtet wird. Das Hinzufügen weiterer Prämissen kann also zu weniger Folgerungen führen. Diese Zusammenhänge sind in Abb. 15.5 dargestellt.

Die nichtmonotonen Logiken wurden vor allem in der Künstlichen-Intelligenz-Forschung entwickelt (Görz et al. 2013). Da es in diesem Bereich eine ganze Reihe von nichtmonotonen Logiken gibt, kann man jedoch nicht von der einen normativen Theorie des nichtmonotonen Schließens sprechen. Gemeinsam ist diesen Systemen allerdings, dass in allen die klassische Monotonieregel durch weniger strenge Arten der Monotonie ersetzt wird. Im Folgenden sind die drei wichtigsten Formen der Monotonie beschrieben. Das Symbol $\vdash$ hat dabei eine ähnliche Bedeutung wie die Implikation *Wenn A, dann B* ($A \rightarrow B$) in den klassischen Logiken, nur dass $\vdash$ für Ausdrücke wie „folgt plausiblerweise", „folgt normalerweise", „folgt typischerweise" usw. steht. In den Formeln steht also $A \vdash C$ z. B. für *Wenn A, dann plausiblerweise C.*

Ein logisches System ist dann *monoton*, wenn gilt:

$$\frac{A \vdash C}{A \wedge B \vdash C}$$

Ein logisches System ist *vorsichtig monoton*, wenn gilt:

$$\frac{A \vdash B,\ A \vdash C}{A \wedge B \vdash C}$$

Ein logisches System ist *rational monoton*, wenn gilt:

$$\frac{A \vdash C,\ \neg(A \vdash \neg B)}{A \wedge B \vdash C}$$

Die Formel für die „*normale*" *Monotonie* ist trivial. Gilt die Regel *Wenn A, dann plausiblerweise C*, dann muss aus A und einer weiteren Aussagen B gemeinsam plausiblerweise auch C folgen. Die Bedeutung der beiden anderen Formeln können wir uns wie folgt verdeutlichen. Die Formel für *vorsichtige Monotonie* besagt: Gelten die Regel *Wenn A, dann plausiblerweise B* und die Regel *Wenn A, dann plausiblerweise C*, dann muss aus A und B gemeinsam plausiblerweise auch C folgen. Die Formel für *rationale Monotonie* besagt: Gilt die Regel *Wenn A, dann plausiblerweise C* und nicht die Regel *Wenn A, dann plausiblerweise nicht B*, dann muss aus A und B gemeinsam plausiblerweise auch C folgen. Die bereits in ▶ Abschn. 15.3.1 berichteten Befunde zum anfechtbaren Schließen sind gute Beispiele für derartige Inferenzen und sprechen für die Nichtmonotonie vieler Schlüsse, die Menschen durchführen.

In einigen experimentellen Arbeiten wurde auch die Vereinbarkeit der Schlüsse von Probanden mit den Rationalitätskriterien eines nichtmonotonen Systems überprüft, das als *System P* bezeichnet wird. Es wurde von Kraus et al. (1990) vorgeschlagen und gibt die minimale Menge von rationalen Forderungen an, die ein *nichtmonotones* Inferenzsystem erfüllen muss, um zu rationalen Schlussfolgerungen zu gelangen. Neben einigen weiteren Eigenschaften (die hier nicht dargestellt werden) gehört zu diesen Anforderungen auch die vorsichtige Monotonie. Neves et al. (2002) legten ihren Versuchsteilnehmern deshalb Sätze wie die folgenden vor:

Wenn jemand ein Anwalt ist, hat er normalerweise kein rot gefärbtes Haar.
Wenn jemand ein Anwalt ist, hat er normalerweise ein gutes Einkommen.

Die Probanden mussten anschließend beurteilen, ob weitere Aussagen möglich sind, z. B.

Wenn jemand ein Anwalt ist und ein gutes Einkommen hat, dann hat er normalerweise kein rot gefärbtes Haar.

Dieser Satz entspricht der vorsichtigen Monotonie. Man muss dafür allerdings annehmen, dass wir zwar im Prinzip wissen könnten, dass es möglicherweise auch eine sehr geringe Zahl von Anwälten gibt, die gut verdienen und ihr Haar rot färben. Jedoch werden diese Ausnahmefälle bei der vorsichtigen Monotonie nicht berücksichtigt. Zur Beurteilung der Sätze wurde in dem Experiment eine Skala von „sehr unplausibel" bis „sehr plausibel" verwendet. Zudem wurden die Sätze auf viele verschiedene Weisen kombiniert, sodass alle Forderungen für das *System P*

abgefragt werden konnten. Interessanterweise waren die Antworten der Probanden gut mit den Rationalitätsforderungen aus System *P* vereinbar. Wenn eine der Forderungen erfüllt war, beurteilten die Probanden die Aussage auch als sehr wahrscheinlich richtig. Ähnliche Befunde zur psychologischen Plausibilität von System *P* wurden von Pfeifer und Kleiter (2005) berichtet. Man beachte jedoch, dass sich hier bereits eine wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation von Konditionalen (Pearl 1988, 2000) eingeschlichen hat, die wir erst in ▶ Abschn. 15.3.7 und 15.3.8 betrachten werden. Hinzu kommt, dass es wegen der großen Zahl unterschiedlicher nichtmonotoner Systeme schwierig ist, die für die Psychologie wirklich nützlichen Ansätze auszuwählen. Zum Teil sind die in den Systemen postulierten Rationalitätsforderungen rein informatisch motiviert und erfüllen vor allem formale Kriterien (Kuhnmünch und Ragni 2014). Einige Autoren betrachten nichtmonotone Logiken dennoch auch für den kognitiven Umgang mit Unsicherheit als psychologisch und evolutionär plausibel (z. B. Ford und Billington 2000; Schurz 2005).

15.3.5 Defaults und präferierte mentale Modelle

In vielen kognitiven Prozessen orientieren wir uns an dem, was *sehr häufig* der Fall ist. Schemata und Kategorisierungen in der Gedächtnispsychologie sind dafür ein Beispiel (▶ Kap. 11). In der Informatik spielen solche Annahmen ebenfalls eine Rolle und werden besonders im Rahmen sogenannter *Default-Logiken* behandelt (z. B. Reiter 1980). In der Default-Logik wird als *Default* diejenige Annahme bezeichnet, die im *Standardfall* gilt. Es wird also angenommen, dass eine Annahme im Einzelfall immer gültig ist, solange sie nicht durch eine speziellere Festlegung revidiert werden muss (Reiter 1980). Das Prinzip wird auch als *Schließen bis zum Beweis des Gegenteils* bezeichnet, weil die Rücknahme von Schlussfolgerungen erst erfolgt, wenn weitere Aussagen neue Informationen über Gegenbeispiele liefern. Einige experimentelle Befunde weisen auf die Rolle von Defaults auch beim menschlichen Schließen hin (Bonnefon und Hilton 2001).

In der *Theorie präferierter mentaler Modelle* werden Standardannahmen zur Erklärung des *unsicheren relationalen Schließens* verwendet. Der Ansatz beruht allerdings nicht auf logischen Default-Regeln, sondern auf der psychologisch plausibleren Konstruktion und Inspektion mentaler Modelle. Dabei wird davon ausgegangen, dass neue Informationen in das Modell integriert werden, sobald sie zur Verfügung stehen (Nejasmic et al. 2015). Gegeben seien die folgenden Prämissen mit den zweistelligen transitiven Relationen *links von* und *rechts von*:

Das Pik-Ass liegt links vom Herz-Ass.
Das Herz-Ass liegt links vom Karo-Ass.
Das Karo-Ass liegt links vom Kreuz-Ass.
Die Sieben liegt rechts vom Pik-Ass.

Die Frage lautet z. B.: „In welcher Relation liegen die 7 und das Karo-Ass?“ Es gibt keine eindeutige Lösung für diese Aufgabe, die in der klassischen Logik richtig wäre, es sei denn, es wird die Antwortoption „nichts folgt“ angeboten.

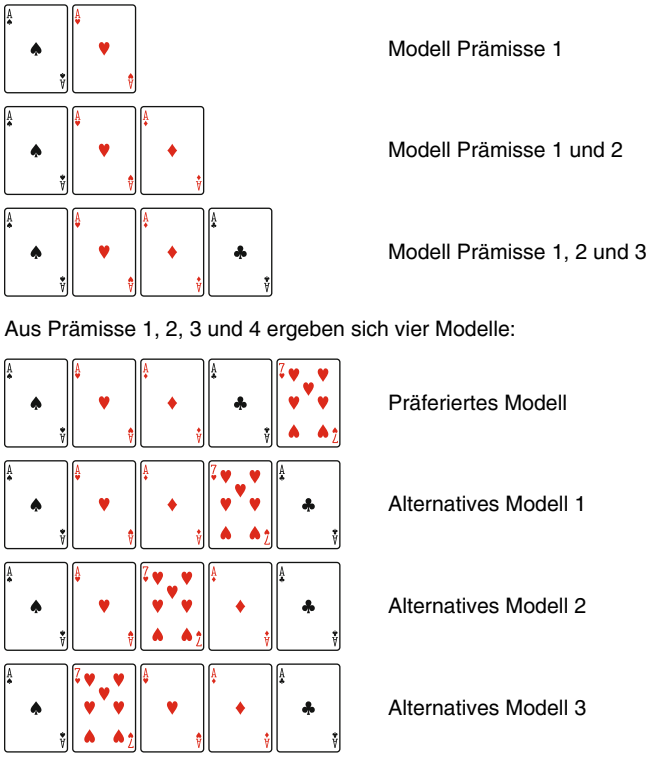


Abb. 15.6 Bei indeterminierten Prämissen sind logisch betrachtet mehrere Modelle möglich. Menschen konstruieren aber in der Regel nur ein Modell, das präferierte mentale Modell. Die alternativen Modelle werden oft übersehen

Die Modellkonstruktion läuft ab, wie in Abb. 15.6 dargestellt. Wie man sieht, gibt es mehrere mögliche Modelle und keine Relation zwischen der 7 und dem Karo-Ass, die in allen Modellen gilt. Die Theorie präferierter mentaler Modelle sagt jedoch vorher, dass Probanden „Die 7 liegt rechts vom Karo-Ass“ antworten, weil diese Relation aus dem ersten Modell (und dem zweiten) abzulesen ist. Was macht das erste Modell besonders? Es ist das einzige Modell, bei dem während der Modellkonstruktion kein bereits konstruiertes Teilmodell nochmals revidiert werden muss. Nur in diesem Modell lässt sich die 7 ohne zusätzlichen kognitiven Aufwand in das bereits vorhandene Modell integrieren, in dem sie ganz rechts „angehängt“ wird. Wegen des geringeren kognitiven Aufwands wird dieses Modell bevorzugt konstruiert. Es heißt deshalb *präferiertes mentales Modell* (*preferred mental model*). Man kann nun entgegnen, dass dies nicht der typischen Semantik des relationalen Ausdrucks *rechts von* entspricht. Linguistisch betrachtet wäre möglicherweise – wie im vierten Modell – die 7 direkt neben dem Pik-Ass besser platziert (Tenbrink und Ragni 2012). Dagegen sprechen allerdings die schon erwähnten Grice'schen Kommunikationsmaximen, denn für diese Position wäre das *direkt neben* auch erwähnt worden, sollte man annehmen. Zudem spielen zwar in der Theorie präferierter mentaler Modelle linguistische Prozesse, wie die Asymmetrie zwischen Referenzobjekt und zu lokalisierendem Objekt, eine Rolle, sprachliche Regeln können jedoch außer Kraft gesetzt werden, weil die Modellkonstruktion und -inspektion auf nichtsprachlichen räumlichen Vorstellungsprozessen beruhen.

Die Theorie präferierter mentaler Modelle macht einige Annahmen, die sie von der Standardversion der Modelltheorie nach Johnson-Laird unterscheidet. So wird nicht angenommen, dass Menschen prinzipiell alle möglichen Modelle berücksichtigen können. In der Modelltheorie nach Johnson-Laird ist diese Annahme enthalten, da die Theorie streng an der klassischen Logik als Norm orientiert ist. Deshalb ist eine Konklusion nur gültig, wenn sie in allen möglichen Modellen der Prämissen gilt. Der Theorie präferierter mentaler Modelle liegt hingegen die Annahme zugrunde, dass Menschen mit dieser formalen Definition logischer Gültigkeit nicht vertraut sind und diese beim Schussfolgern im Allgemeinen auch nicht verwenden. Stattdessen wird angenommen, dass normalerweise nur *ein* präferiertes Modell konstruiert wird. Man kann dieses präferierte Modell auch als eine *Default-Annahme* betrachten, weil es immer konstruiert wird, wenn nichts anderes dagegen spricht. Die alternativen Modelle werden dadurch übersehen. Sie werden *ignorierte* oder *vernachlässigte mentale Modelle* (*neglected mental models*) genannt. Dies führt zu Schlüssen, die nach der klassischen Logik falsch sind, weil eine Konklusion für wahr gehalten wird, die in einem der ignorierten Modelle nicht gilt. Dieser Grund für *illusorische Inferenzen* ist bereits in der klassischen Modelltheorie vorhanden (Johnson-Laird und Savary 1999), und auch die präferierten Modelle sind in neueren Veröffentlichungen zur Modelltheorie berücksichtigt (Goodwin und Johnson-Laird 2005).

Ein zweiter Unterschied zur klassischen Modelltheorie besteht im Prinzip *der Modellnachbarschaften.* Auch wenn in der Theorie präferierter mentaler Modelle meistens nur die präferierten Modelle berücksichtigt werden, gibt es einige Fälle, in denen auch die alternativen Modelle konstruiert werden müssen. Für diese Fälle gibt die Theorie präferierter mentaler Modelle genau an, in welcher Reihenfolge die alternativen Modelle konstruiert werden. Der Prozess beginnt mit dem präferierten Modell. Alternative Modelle werden anschließend entlang eines *Nachbarschaftsgraphen* konstruiert, der auf dem Prinzip der minimalen Veränderungen basiert. Beim relationalen Schließen ist dieses Prinzip sinnvoller als in anderen Bereichen des Denkens, weil die Minimalität genau definierbar ist. Eine minimale Veränderung ist diejenige, in der ein Objekt im Modell immer nur schrittweise verschoben wird. So ist z. B. in ◘ Abb. 15.6 das Modell in der zweiten Zeile der direkte Nachbar des präferierten Modells, das Modell in der dritten Zeile wird als Nächstes generiert, dann das Modell in der vierten Zeile usw. Das Konzept der Nachbarschaften ist aus dem Bereich des qualitativen räumlichen Schließens entlehnt, in dem algorithmische Verfahren zum Umgang mit unsicherem, vagem und unvollständigem Wissen entwickelt werden (Freksa 1992; Ragni und Wölfl 2005).

Die Theorie präferierter mentaler Modelle ist vollständig im Computerprogramm PRISM (*preferred inferences in reasoning with spatial models*) implementiert (Ragni und Knauff 2013; Knauff 2013a). Aus der Theorie und der kognitiven Modellierung wurden empirische Hypothesen abgeleitet, die sich in zahlreichen Experimenten untermauern ließen. So konnte in mehreren Experimenten die Verwendung der von der Computersimulation vorhergesagten präferierten Modelle nachgewiesen werden (Knauff et al. 1995, Rauh et al. 2005). Es konnte auch gezeigt werden, dass die präferierten Modelle schneller und häufiger als mögliches Modell der Prämissen erkannt werden als alternative Modelle, die ebenfalls mit den Prämissen kompatibel waren (Jahn et al. 2007). Alternative Modelle werden nur konstruiert, wenn nötig, und die Reihenfolge der Modelle folgte dem Prinzip der minimalen Veränderung (Rauh et al. 2005). Zudem konnte ein empirisches Maß für die Schwierigkeit von Inferenzen entwickelt werden, mit dem der *Termreihenfolgeeffekt*, der *Prämissenreihenfolgeeffekt* und der *Unbestimmtheitseffekt* aus ▶ Abschn. 15.2.3 erklärt werden können (Überblick über diese Arbeiten in Knauff 2013a; Ragni und Knauff 2013).

15.3.6 Nachdenken über Mögliches und Notwendiges

Wir denken oft auch über etwas nach, was zwar nicht der Fall ist, aber der Fall sein könnte. Für solche Schlussfolgerungen wurden die sogenannten *Modallogiken* entwickelt (z. B. Kripke 1963), die sich vor allem mit den Ausdrücken „möglich" und „notwendig" befassen. Diese Begriffe werden in der Modallogik verwendet, um auszudrücken, dass falsche Aussagen doch möglich sein können, während manche wahre Aussagen darüber hinaus auch notwendig sind. Wir können uns dazu vorstellen, dass es viele *mögliche Welten* gibt, die anders sein können als das, was tatsächlich der Fall ist. David Lewis (1986) hat dafür den Ausdruck *Parallelwelten* geprägt. Eine solche Welt kann nur in der Vorstellung existieren. Wichtig ist jedoch, dass alle Teile dieser Vorstellungen gemeinsamen eine konsistente Gesamtheit ergeben. So können wir uns eine Welt vorstellen, in der die Aussage *Manche Menschen haben drei Augen* wahr ist. Die Aussage ist daher möglich. Wir können uns jedoch nicht vorstellen, dass es eine Welt gibt, in der Lebewesen keinen Stoffwechsel haben. Die Aussage *Es gibt Lebewesen ohne Stoffwechsel* ist daher nicht möglich. Zudem gibt es Aussagen, die in jeder vorstellbaren Welt wahr sein müssen. Beispielweise ist in allen möglichen Welten die Aussage *Kreise sind rund* notwendig, d. h. immer wahr, während die Aussage *Kreise habe Ecken* immer falsch, also *unmöglich*, ist (Kripke 1963). Die logische Gültigkeit einer Aussage hängt also oft von der möglichen Welt ab, in der man sich befindet. Die Welt von Menschen mit Wahnvorstellungen und anderen psychischen Erkrankungen kann demnach durchaus logisch konsistent sein (Johnson-Laird et al. 2006), siehe auch ▶ im Blickfang.

Die erste psychologische Theorie des modalen Schließens wurde von Osherson (1976) entwickelt. Johnson-Laird und Kollegen entwickelten eine Theorie modalen Schlussfolgerns mit mentalen Modellen (Bell und Johnson-Laird 1998). Sehen wir uns den Stadtplan in ◘ Abb. 15.7 genau an. Stellen wir uns nun die Frage: „Ist es *möglich*, an der Bibliothek vorbeizukommen, wenn man von der Kirche zur Bank geht?" Um diese Möglichkeitsfrage zu beantworten, können wir die *möglichen* Routen von der Kirche zur Bank überprüfen. Sobald wir *eine* Route gefunden haben, die an der Bibliothek vorbeiführt, können wir die Suche beenden und die Möglichkeitsfrage *bejahen*. Um die Möglichkeitsfrage zu *verneinen*, müssen wir jedoch *alle* möglichen Wege untersuchen. Lautet die Frage „Ist es *notwendig*, an der Bibliothek vorbeizukommen, wenn man von der Kirche zur Bank geht?", dann müssen wir alle Routen von der Kirche zur Bank überprü-

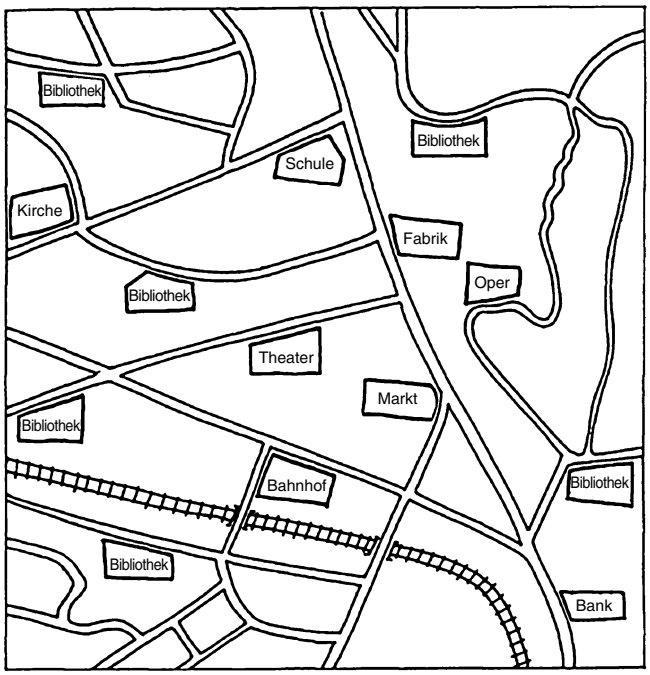


Abb. 15.7 Ist es *möglich*, *unmöglich*, *notwendig* oder *nicht notwendig*, an einer Bibliothek vorbeizukommen, wenn man von der Kirche zur Bank geht? (Aus Bell und Johnson-Laird 1998)

fen, um diese Notwendigkeitsfrage zu *bejahen*. Zur *Verneinung* der Notwendigkeitsfrage können wir jedoch die Suche beenden, sobald wir *eine* Route gefunden haben, die *nicht* an der Bibliothek vorbeiführt. In Bell und Johnson-Laird (1998) reagierten die Versuchsteilnehmer auf Möglichkeitsfragen schneller mit „Ja" (5,1 s) als mit „Nein" (10,2 s), aber auf Notwendigkeitsfragen schneller mit „Nein" (8,3 s) als mit „Ja" (9,3 s).

Bei der Stadtplan-Aufgabe in Abb. 15.7 sind diese Befunde auch naheliegend. Die Theorie mentaler Modelle macht jedoch exakt dieselben Vorhersagen auch für konditionale modale Schlussfolgerungen, in denen Personen über Mögliches und Notwendiges nachdenken. Tab. 15.14 gibt einen Überblick über die Vorhersagen. Bell und Johnson-Laird (1998) berichten mehrere Experimente, in denen die Probanden genau diese vorhergesagten Antwortmuster produzierten. Die Autoren schließen daraus, dass die Theorie mentaler Modelle auch modale Schlussfolgerungen erklären kann. Eine neuere Arbeit von Hinterecker et al. (2016) unterstützt diese Annahme.

15.3.7 Ramsey-Test

In diesem und dem nächsten Abschnitt werden *probabilistische Theorien* des schlussfolgernden Denkens behandelt. Wie wir sehen werden, liegen diese Theorien zwar außerhalb des normativen Rahmens der Logik, jedoch versuchen sie dieselben empirischen Befunde zu erklären und werden von einigen Autoren als eine Alternative zur bisher erfolgreichsten Theorie mentaler Modelle betrachtet (Over 2009; Elqayam und Over 2012).

Der Ausgangspunkt der probabilistischen Ansätze liegt wieder in der Philosophie. So schlug Adams (1975, 1998) vor, konditionale Aussagen als bedingte subjektive Wahrscheinlichkeiten

Tab. 15.14 Vorhersagen der Modelltheorie beim modalen Schließen

Möglich	Positiv	Aussage ist wahr, wenn sie in *mindestens einem* möglichen Modell *wahr* ist.
	Negativ	Aussage ist wahr, wenn sie in *allen* möglichen Modellen *falsch* ist.
Notwendig	Positiv	Aussage ist wahr, wenn sie in *allen* möglichen Modellen *wahr* ist.
	Negativ	Aussage ist wahr, wenn sie in *mindestens einem* möglichen Modell *falsch* ist.

zu interpretieren. Dieser Theorie zufolge drücken Sätze wie *Wenn das Wetter schön ist, fahre ich mit dem Fahrrad zur Uni* eine hohe Wahrscheinlichkeit des Hinterglieds aus (*mit dem Fahrrad zur Uni fahren*), gegeben, die Aussage im Vorderglied (*schönes Wetter*) tritt ein. Für die Psychologie bedeutet dies, dass nicht die formale Logik, sondern die *Wahrscheinlichkeitstheorie* die adäquate normative Theorie für menschliches unsicheres Schließen sein soll.

Die *Suppositionstheorie* des konditionalen Schließens besagt, dass Menschen eine konditionale Aussage als gerechtfertigt ansehen, wenn die Wahrscheinlichkeit des Hinterglieds q hoch ist, gegeben, die Wahrscheinlichkeit p des Vorderglieds ist hoch. Um diese bedingte Wahrscheinlichkeit $P(q|p)$ abzuschätzen, wird laut der Theorie ein mentaler *Ramsey-Test* durchgeführt (Ramsey 1929/1990; Evans und Over 2004). Bei diesem Test stellen sich Menschen zunächst Situationen vor, in denen p wahr ist, also z. B. das Wetter schön ist. Anschließend überlegen sie, wie wahrscheinlich es in dieser Situation ist, dass q wahr ist, sie also mit dem Fahrrad zur Uni fahren. Das Fahrrad könnte ja einen Platten haben, sie könnten von einer Kommilitonin mit dem Auto abgeholt werden usw. Situationen, in denen p nicht wahr ist, also z. B. schlechtes Wetter, werden nicht berücksichtigt.

Evans und Over (2004) beschreiben detailliert, wie Menschen den Ramsey-Test benutzen könnten, um konditionale Aussagen zu beurteilen. Gegeben sei die konditionale Aussage *Wenn es regnet, ist die Straße nass* ($p \rightarrow q$). Dann wird angenommen, p sei wahr (es regnet). Nun werden alle hypothetischen Fälle gezählt, in denen p und q wahr sind (es regnet, und die Straße ist nass). Nun werden alle hypothetischen Fälle gezählt, in denen p wahr, aber q nicht wahr ist (es regnet, aber die Straße ist nicht nass, z. B. weil sie überdacht ist, es nur für einen kurzen Moment geregnet hat usw.). Diese Fälle werden dann in Beziehung zu den Fällen gesetzt, in denen p und q wahr sind. Ist diese subjektive bedingte Wahrscheinlichkeit von $(q|p)$ größer als die von $(\neg q|p)$, also $(q|p) > 0.5$, sind Menschen bereit, die konditionale Aussage zu akzeptieren und die entsprechende Schlussfolgerung zu ziehen. Empirische Befunde zur Unterstützung der Theorie berichten Evans und Over (2004) und Evans et al. (2003).

15.3.8 Bayesianisches Denken

Eine andere Richtung innerhalb der probabilistischen Theorien des Schließens ist nach dem englischen Mathematiker Thomas Bayes (1701–1761) benannt. Diese Theorie beruht ebenfalls auf

dem Konzept der bedingten Wahrscheinlichkeiten, also der Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Ereignis eintritt, gegeben, ein anderes Ereignis ist eingetreten. Die angenommenen mentalen Berechnungen sind aber deutlich komplizierter als beim Ramsey-Test. Nach dem berühmten *Satz von Bayes* (den man auch in fast jedem Statistiklehrbuch für Psychologen findet) lässt sich für zwei Ereignisse X und Y die Wahrscheinlichkeit p von X unter der Bedingung, dass Y eingetreten ist, durch die Wahrscheinlichkeit von Y unter der Bedingung, dass X eingetreten ist, nach der folgenden Formel errechnen:

$$p(X|Y) = \frac{p(Y|X) \cdot p(X)}{p(Y)}$$

Hierbei ist $p(X \mid Y)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit des Ereignisses X unter der Bedingung, dass Y eingetreten ist, $p(Y \mid X)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit des Ereignisses Y unter der Bedingung, dass X eingetreten ist, $p(X)$ die A-priori-Wahrscheinlichkeit des Ereignisses X und $p(Y)$ die A-priori-Wahrscheinlichkeit des Ereignisses Y.

Oaksford und Chater (2007), die Hauptvertreter des bayesianischen Ansatzes, schlagen nun vor, dass Menschen sich rational verhalten und entscheiden, wenn sie sich an die Regeln der Bayes-Statistik halten. Die Zweiwertigkeit der Aussagenlogik wird hier ersetzt durch Wahrscheinlichkeiten, die im Intervall zwischen 0 und 1 liegen können. Ein gutes Beispiel bietet die Wason-Aufgabe aus ▶ Abschn. 15.2.1. Oaksford und Chater (1994, 2007) argumentieren, dass diese Aufgabe von den Versuchsteilnehmern nicht als eine Aufgabe der deduktiven Logik verstanden wird, sondern als ein statistisches Entscheidungsproblem. Demnach versuchen Probanden, Unsicherheit zu reduzieren, indem sie nach Evidenz für die Gültigkeit der konditionalen Aussage suchen, dass q von p stochastisch abhängig ist. Wenn dies der Fall ist, darf „p und $\neg q$“ nicht oder zumindest nur sehr selten auftreten. Anderseits wäre die konditionale Aussage verletzt, wenn kein statistischer Zusammenhang zwischen p und q besteht, d. h. die bedingte Wahrscheinlichkeit von q der unbedingten Wahrscheinlichkeit von q entspricht. Bei der Wason-Aufgabe prüfen Probanden also nach dieser Theorie die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit der konditionalen Aussage, indem sie die Karten umdrehen, die ihnen möglichst viel neue Information bieten. Oaksford und Chater haben ein statistisches Maß entwickelt, mit dem sich berechnen lässt, welche Karten umgedreht werden sollten, um möglichst aussagekräftige Daten zu erhalten. Dabei macht die Theorie auch Aussagen über die subjektiven Annahmen der Probanden über die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse p und q sowie die statistische Abhängigkeit von p und q. Legt man dieses Modell zugrunde, das dem Hypothesentesten sehr ähnlich ist, wird in der Wason-Aufgabe die größte Reduzierung von Unsicherheit durch Umdrehen der E-Karte (p) und 4-Karte (q) erreicht. Diese Vorhersage deckt sich genau mit den üblichen Ergebnissen zur Wason-Aufgabe.

Die bayesianische Theorie der Konditionale kann auch die Befunde zum Suppressionseffekt bei Byrne (1989) erklären, weil die zusätzliche Prämisse weitere Bedingungen suggeriert, die erfüllt sein müssen (die Bibliothek muss geöffnet sein) und damit die subjektive Wahrscheinlichkeit der Gültigkeit der konditionalen Aussage reduzieren. Entsprechend häufiger wird die logisch korrekte Schlussfolgerung verworfen.

Die bayesianische Theorie des Denkens kann mehrere empirische Ergebnisse gut erklären, hat jedoch auch Probleme. Zum einen ist aus der psychologischen Literatur bekannt, dass Menschen nur schlecht mit Bayes'schen Wahrscheinlichkeiten umgehen können (Kahneman und Tversky 1974; Kahneman et al. 1982). Zudem stehen uns in der realen Welt die Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen in der Regel nicht direkt zur Verfügung. Eines der größten Probleme der probabilistischen Theorie besteht jedoch darin, dass es bisher kaum detaillierte Aussagen über die kognitiven Repräsentationen und Prozesse beim Denken gibt. Zwar wird von der Theorie angegeben, was verarbeitet wird, nämlich die subjektiven Wahrscheinlichkeiten. Jedoch bleibt offen, wie diese verarbeitet werden. Zudem können die probabilistischen Theorien zwar die laut Wahrscheinlichkeitstheorie richtigen Antworten von Probanden reproduzieren. Systematische Fehler können jedoch nicht gut erklärt werden.

15.3.9 Induktives Denken

In den meisten Einführungen in das logische Denken findet man spätestens an dieser Stelle die Unterscheidung zwischen *deduktivem* und *induktivem* Schließen. Was *deduktives Schließen* heißt, wurde in ▶ Abschn. 15.2 bereits ausführlich beschrieben, und wir kommen in ▶ Abschn. 15.5.1 nochmals darauf zurück. Manchmal wird Deduktion auch als das Schließen vom Allgemeinen auf das Besondere bezeichnet, z. B. *Alle Vogel können fliegen, also können Spatzen fliegen*. Als **induktives Schließen** wird dann der Schluss vom Besonderen auf das Allgemeine bezeichnet, z. B. *Tweety kann nicht fliegen, also können alle Pinguine nicht fliegen*. Wir wissen, dass deduktive Schlüsse wahrheitserhaltend sind, induktive Schlüsse aber nicht. Wir können uns ja im Prinzip vorstellen, dass es einen Pinguin gibt, der fliegen kann. Das ist nicht sehr wahrscheinlich, aber nicht unmöglich. Beim induktiven Schließen kann also nicht sichergestellt werden, dass falsche Schlüsse vermieden werden.

Aus der kurzen Beschreibung wird deutlich, dass die Unterscheidung in deduktives und induktives Schließen durch die neuen Entwicklungen in der Denkpsychologie eigentlich obsolet geworden ist. Wenn auch für das deduktive Schließen Wahrscheinlichkeiten herangezogen werden und deduktive Schlüsse auch von „Möglichkeiten“ handeln, ist es nach der Meinung vieler Autoren nicht mehr sinnvoll, an der klassischen deduktiv-induktiv Dichotomie festzuhalten (Oaksford und Hahn 2007). Im Folgenden wird das Thema „induktives Denken“ wenigstens angeschnitten, da es für viele Bereiche der Psychologie noch eine wichtige Rolle spielt. Beispiele dafür sind der Konzepterwerb und die Kategorisierung (▶ Kap. 11), verschiedene Formen des Lernens (▶ Kap. 10) und das analoge Schließen (▶ Kap. 16).

Die Wahrheit von verallgemeinernden Hypothesen kann niemals eindeutig festgestellt werden, weil es immer möglich ist, dass irgendeine neue Beobachtung nicht mit der bisher abgeleiteten Schlussfolgerung konform ist. Wenn man z. B. ein Jahr lang

Tag für Tag erlebt, dass das Auto morgens immer anspringt, dann kann es durchaus vorkommen, dass die bis dahin sehr stabile Regel *Das Auto springt morgens immer an* eines Tages plötzlich widerlegt wird. Ein Ergebnis der Forschung zum induktiven Schließen ist, dass Menschen, die eine bestimmte Hypothese gebildet haben, vor allem nach Evidenz suchen, welche die Hypothese bestätigt, nicht aber nach Evidenz, welche die Hypothese widerlegt (Evans et al. 1993). Dabei ist Letzteres besonders wichtig. Falls nämlich die Suche nach gegenteiliger Evidenz fehlschlägt, ist es viel wahrscheinlicher, dass eine Hypothese gilt, als wenn zusätzliche bestätigende Evidenz für die Hypothese gefunden wird. Zumindest in den empirischen Wissenschaften gehört daher das Falsifikationsprinzip von Popper (1968) zum Standardinventar. Es besagt, dass Wissenschaftler ihre Hypothesen so formulieren sollen, dass sie durch Experimente widerlegt werden können. Dazu gehört natürlich auch, Experimente durchzuführen, welche potenziell die eigenen Hypothesen widerlegen können.

Der berühmte englische Denkpsychologe Peter Wason (1960, 1977), von dem auch die Wahlaufgabe stammt, hat zur Untersuchung des Hypothesentestens die 2-4-6-Aufgabe erfunden. Bei dieser Aufgabe werden die Versuchsteilnehmer dazu aufgefordert, eine Regel in einer Zahlenfolge zu entdecken, die nur dem Versuchsleiter bekannt war. Die Regel war: *Alle Folgen aufsteigender Zahlen*. Den Teilnehmern wurde zu Beginn ein Beispiel vorgelegt, das der Regel entsprach, nämlich die konkrete Zahlenfolge 2, 4, 6. Danach wurden sie aufgefordert, selbst Folgen mit jeweils drei Zahlen zu generieren und anzugeben, wieso sie gerade diese Folge überprüften. Danach gab der Versuchsleiter an, ob eine Folge der Regel entsprach oder nicht. Nach einiger Zeit wurden die Teilnehmer gefragt, welche Regel sie vermuteten. Wenn die angegebene Regel nicht der des Versuchsleiters entsprach, wurden die Teilnehmer aufgefordert, neue Folgen zu generieren, bis sie die Regel des Versuchsleiters gefunden hatten. Dabei stellte sich heraus, dass fast ausschließlich Folgen generiert wurden, die der einmal gefassten Hypothese entsprachen. Wenn eine Person z. B. annahm, dass die Regel lautete: *Alle aufsteigenden Folgen, die sich durch Addition von 2 ergeben*, wie in der Folge 6, 8, 10 oder 13, 15, 17, dann generierte sie weiterhin nur Folgen, die dieser Regel entsprachen. Es wurde also kaum versucht, einmal gefasste Hypothesen über die Regel zu widerlegen, obwohl dies viel schneller zur Lösung der Aufgabe geführt hätte. Eine andere – sogar einfachere Regel – wäre ja *Alle aufsteigenden Folgen* gewesen. Auf diese Regel kommen diese Probanden aber meist nicht. Wason nannte dieses Phänomen *Bestätigungsfehler* (*confirmation bias*).

Obwohl man annehmen sollte, dass Wissenschaftler weniger Probleme als Laien damit haben sollten, einmal gefasste Hypothesen zu verändern und nach gegenteiliger Evidenz zu suchen, stellt sich in einer Studie von Mahony (1976) zur 2-4-6-Aufgabe heraus, dass Wissenschaftler eher noch länger an ihren Hypothesen festhielten als Laien. In späteren Studien wurde deutlich, dass es sich beim Bestätigungsfehler um ein allgemeines Phänomen handelt, das nicht nur bei der Induktion von Regeln in Zahlenfolgen auftritt, sondern z. B. auch in simulierten Mikrowelten, in denen Hypothesen über bestimmte Partikel überprüft werden sollten (Mynatt et al. 1978). Außerdem stellte sich heraus, dass explizite Aufforderungen an die Teilnehmer, nach gegenteiliger Evidenz zu suchen, das Ausmaß des Bestätigungsfehlers nicht verringerten (Tweney et al. 1980).

Tweney und Kollegen fanden aber auch eine experimentelle Manipulation in der 2-4-6-Aufgabe, die zu einer deutlichen Verbesserung führt, nämlich das Einführen einer zweiten Regel. Den Teilnehmern wurde gesagt, dass zwei Regeln existierten, die sie finden sollten. Eine korrekte Dreierfolge für die erste Regel sei 2-4-6. Danach generierten die Teilnehmer wiederum Dreierfolgen. Für jede dieser Folgen wurde ihnen mitgeteilt, ob sie der ersten oder der zweiten Regel entsprachen. Die zu entdeckende Regel war wiederum *Alle Folgen aufsteigender Zahlen*, für alle anderen Fälle wurde angegeben, dass sie der zweiten Regel entsprachen. Obwohl die Teilnehmer weiterhin fast ausschließlich konfirmatorisch vorgingen, entdeckten sie unter diesen Bedingungen die korrekte Regel oft beim ersten Versuch. Nachfolgeuntersuchungen von Wharton et al. (1993) replizierten diesen Befund. Die beste Erklärung für das Befundmuster ist, dass die Teilnehmer viel weniger Probleme damit haben, bestätigende Evidenz für zwei alternative Hypothesen zu suchen als gegenteilige Evidenz für eine einzige Hypothese. Eine Untersuchung von Krems und Zierer (1994) zeigt, dass der Bestätigungsfehler manchmal reduziert ist, wenn man Experte in der Domäne ist, in der Hypothesen überprüft werden sollen (vgl. auch Krems und Bachmaier 1991). Mit diesem ermutigenden Befund soll das Thema „Induktion" hier abgeschlossen werden, um zum deduktiven Schließen zurückzukehren. Es muss sich noch herausstellen, ob zukünftig die Deduktion-Induktion-Trennung tatsächlich nicht mehr verwendet wird oder doch gute Gründe dafür sprechen, deduktives und induktives Schließen als unterschiedliche kognitive Prozesse zu betrachten.

15.4 Neuronale Korrelate des logischen Denkens

Was wissen wir zurzeit über die neuronalen Grundlagen des logischen Denkens? Vieles ist noch völlig unklar. Jedoch gibt es inzwischen zumindest Befunde, die andeuten, welche Hirnregionen an der Lösung logischer Probleme beteiligt sein könnten. Die Ergebnisse stammen teilweise aus neuropsychologischen Untersuchungen mit hirngeschädigten Patienten, überwiegend aber aus Untersuchungen des intakten Gehirns mithilfe bildgebender Verfahren. Bei dieser Technik können, wie inzwischen jeder weiß, Korrelationen zwischen kognitiven Verarbeitungsprozessen und aktiven Bereichen des Gehirns identifiziert werden. Zwar sind in der Theorie und Praxis die Zusammenhänge sehr komplex und ein – zu häufig vorgenommener – naiver Rückschluss von einer aktiven Hirnregion auf eine psychische Funktion kaum möglich (Uttal 2001). Die Denkpsychologie hat jedoch einen guten Weg gefunden, bildgebende Verfahren, Patientenstudien und kognitionspsychologische Experimente zu kombinieren, um zu arglosen Vorstellungen über den Zusammenhang zwischen psychischen und physischen Prozessen einigermaßen zu widerstehen. Mit den kognitionspsychologischen Arbeiten haben wir uns bereits ausführlich befasst. Im Folgenden werden die neurowissenschaftlichen Befunde entlang dieser kognitiven Ergebnisse und Theorien dargestellt und interpretiert.

15.4.1 Logisches Denken im intakten Gehirn

Mit bildgebenden Verfahren können *korrelative* Zusammenhänge zwischen kognitiven und neuronalen Prozessen aufgedeckt werden. Die ersten bildgebenden Studien zum Denken beschäftigen sich mit konditionalen und relationalen Schlussfolgerungen im Rahmen der klassische Logik (Goel et al. 1998; Knauff et al. 2000). So untersuchten Knauff et al. (2002), was im Gehirn passiert, wenn Probanden konditionale Aufgaben wie *Wenn der Lehrer verliebt ist, isst er gern Pizza. Der Lehrer ist verliebt. Isst der Lehrer gerne Pizza?* lösen müssen. Der zweite Aufgabentyp waren relationale Inferenzen wie *Das Dreieck liegt links vom Quadrat. Das Quadrat liegt links vom Kreis. Liegt das Dreieck links vom Kreis?* Wie oft in Bildgebungsstudien, wurde beim Bearbeiten der Schlussfolgerungsaufgaben ein komplexes neuronales Netzwerk mit vielen unterschiedlichen Hirnregionen aktiviert. Das Netzwerk erstreckte sich von frontalen über temporale Hirnregionen bis hin zu Regionen im Parietal- und Okzipitalcortex, also praktisch über weite Teile der gesamten Großhirnrinde. Beim relationalen Schließen waren die Bereiche im Parietalcortex stärker aktiviert als beim konditionalen Schließen. Ähnlich komplexe Aktivierungsmuster wurden auch für das syllogistische Schließen berichtet (Goel 2007; Prado et al. 2011).

Zwar wirken diese und weitere Ergebnisse nicht besonders aussagekräftig. Vergleicht man aber die Ergebnisse der großen Zahl inzwischen vorliegender Studien miteinander, so lässt sich doch ein etwas differenzierteres Muster erkennen. Es ist sinnvoll, diese Befunde entlang der unterschiedlichen *kognitiven Theorien* des logischen Denkens zu analysieren. In dieser Analyse spielten probabilistische Ansätze bisher kaum eine Rolle (vgl. aber Pouget et al. 2013). Die Ergebnisse leisten jedoch einen Beitrag zur Diskussion um den *sprachlichen* oder *visuell-räumlichen* Charakter logischer Denkprozesse, die in ▶ Abschn. 15.2.1 beschrieben wurde. Die sprachnahen und die visuell-räumlichen Theorien des Denkens unterscheiden sich nämlich in ihren Annahmen, welche neuronalen Strukturen mit logischen Denkprozessen in Beziehung stehen sollten. So bringen die sprachnahen Theorien – die, wie wir gesehen haben, meist auf syntaktischen Beweisen anhand mentaler logischer Regeln beruhen – das logische Schließen mit Hirnregionen in Verbindung, die auch mit der Sprache in Beziehung stehen. Dazu zählen insbesondere Bereiche im linken Temporallappen. Die visuell-räumlichen Theorien – in der Regel die Theorien mentaler Modelle – postulieren kognitive Prozesse, bei denen visuell-räumlich organisierte mentale Repräsentationen (Modelle) konstruiert und manipuliert werden (Johnson-Laird 1995). Areale, von denen man vermutet, dass sie bei derartigen Prozessen eine Rolle spielen, liegen eher in einem rechtshemisphärischen neuronalen parietookzipitalen Netzwerk (Goel 2007; Knauff 2007, 2009).

In einer Metaanalyse von Prado et al. (2011) wurden 28 Bildgebungsstudien mit 382 Versuchsteilnehmern analysiert. Ein Ergebnis dieser Metaanalyse war, dass einige Hirnregionen durch konditionale, syllogistische sowie relationale Schlüsse in ähnlicher Weise aktiviert werden (Brodmann-Areale [BA] 6, 7, 8, 9, 40, 44, 45, 46). Die getrennte Betrachtung konditionaler, syllogistischer sowie relationaler Schlüsse ergab jedoch, dass konditionale Schlüsse vor allem zu Aktivierung im linken posterioren Parietalcortex (BA 7, 40), im linken präzentralen Gyrus (BA 6) und im linken medialen frontalen Gyrus (BA 6) führen, syllogistische Schlüsse hingegen zu Aktivierung des inferioren frontalen Gyrus (BA 9/44), im präzentralen Gyrus (BA 4) sowie in den linken Basalganglien (Nucleus caudatus und Putamen). Am eindeutigsten war das Bild beim relationalen Schließen. Bei diesen Schlüssen kam es in den meisten Studien übereinstimmend zu Aktivierung im rechten mediofrontalen Gyrus (BA 6) und bilateral im Parietalcortex (BA 7, 40). Prado und Kollegen interpretieren dieses Ergebnismuster als Unterstützung der Theorie mentaler Modelle, da sie auf die Beteiligung visuell-räumlicher corticaler Repräsentationen und Prozesse hinweisen. Bei konditionalen und syllogistischen Schlüssen sind die Befunde uneinheitlicher, scheinen aber auf die Beteiligung von Hirnregionen hinzuweisen, die sowohl bei sprachbezogenen als auch bei visuell-räumlichen neuronalen Prozessen eine Rolle spielen.

Einige Jahre zuvor zeigte sich Goel (2007) in einem anderen Übersichtartikel zwar recht enttäuscht angesichts der Heterogenität der Bildgebungsstudien zum logischen Denken. Er schlug jedoch ein Rahmenmodell vor, das sich recht gut eignet, um die zurzeit verfügbaren Befunde besser einzuordnen. In seinem Modell legt er besonderen Wert auf die Unterscheidung zwischen *abstrakten* Schlussfolgerungen, zu deren Inhalt die Probanden über kein besonderes Wissen verfügen, und *konkreten* Schlussfolgerungen, bei denen die Probanden über ein solches Wissen verfügen. Für diese beiden Formen des Schließens werden zwei Systeme postuliert. Das *wissensneutrale System* soll vor allem im Parietalcortex lokalisiert sein, während das *wissensbezogene System* mit Bereichen im linken Frontal- und Temporallappen in Verbindung gebracht wird. Goel nennt dieses System auch das *heuristische System*. Darüber hinaus sind für uns zwei weitere Systeme von Interesse: Zum einen postuliert Goel ein System, das für die Erkennung von *Konflikten* in logischen Aufgaben zuständig ist, und bringt dieses mit Regionen im rechten dorsolateralen präfrontalen Cortex in Verbindung. Ein weiteres System ist für den Umgang mit *Unsicherheit* zuständig und wird mit Regionen im rechten ventrolateralen präfrontalen Cortex in Beziehung gebracht. Beide Systeme, vor allem aber das „Unsicherheitssystem", können wir vermutlich mit den Prozessen beim unsicheren logischen Schließen in Verbindung bringen. Dazu liegen aber bisher kaum genauere Ergebnisse vor. In ◘ Abb. 15.8 ist das Modell nach Goel (2007) schematisch dargestellt.

Man muss zugeben, dass die Befundmuster noch viele Fragen offen lassen. Zudem wissen wir bisher kaum etwas über die neuronalen Grundlagen logischer Fehler. Falsche Schlüsse werden meistens aus der Analyse von Daten aus Bildgebungsstudien ausgeschlossen (vgl. jedoch De Neys et al. 2008). Außerdem haben viele Autoren Hirndaten durch die Brille der von ihnen jeweils bevorzugten Theorie betrachtet. Das ist aber in anderen Bereichen der kognitiven Neurowissenschaft nicht anders. Bisher können wir aber immerhin festhalten, dass sich die kognitive Neurowissenschaft inzwischen nicht nur für sichere Schlussfolgerungen interessiert, sondern auf für unsichere logische Schlüsse und Inferenzen mit konfligierenden Informationen. Außerdem scheinen abstrakte logische Schlussfolgerungen häufiger zu Aktivierung im rechten Parietalcortex zu führen. Abstrakte Schlüsse sind aber, wie wir gesehen haben, der Kern

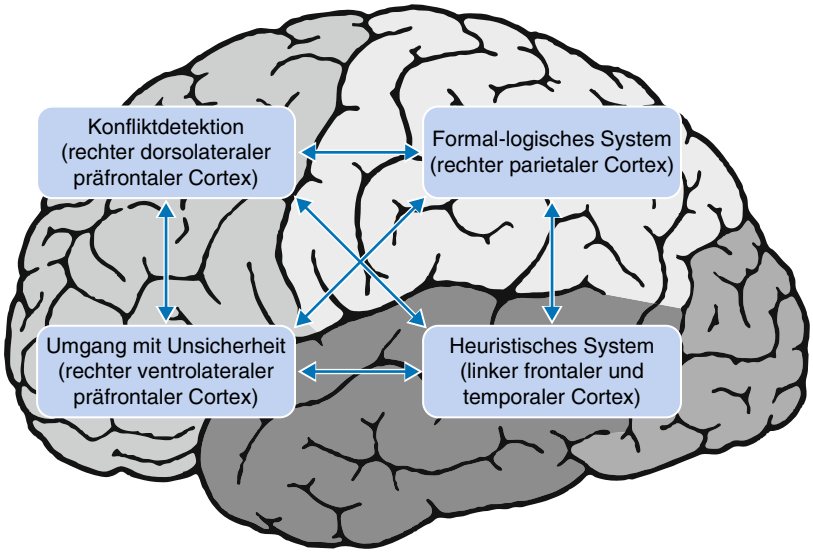


Abb. 15.8 Vier corticale Systeme sind nach Goel (2007) am logischen Schließen beteiligt. Das formal-logische System im rechten parietalen Cortex wird auch als „wissensneutrales System" betrachtet und steht damit mit der *Form* eines logischen Schlusses in Beziehung. Das heuristische System im linken frontalen und temporalen Cortex wird auch als „wissensbezogenes System" bezeichnet und steht vor allem mit dem *Inhalt* einer Denkaufgabe in Beziehung

des logischen Denkens, weil es dabei allein um die Struktur der Schlussfolgerung geht und nicht um deren Inhalt. Die Theorie mentaler Modelle scheint also für diese logischen kognitiven Prozesse mit ihren neuronalen Vorhersagen nicht falsch gelegen zu haben. Dass hingegen logische Aufgaben, die vor allem mithilfe von Vorwissen und Heuristiken gelöst werden, zu Aktivierung in sprachnahen Regionen in linken temporalen und frontalen Cortices führen, ist auch nicht verwunderlich, zumal diese Aufgaben im Allgemeinen als Sätze der natürlichen Sprache dargeboten werden. Neuere Studien zeigen allerdings, dass auch die bisherigen Vorstellungen zu den neuronalen Grundlagen der Sprache wesentlich komplexer sind als bisher angenommen (Friederici 2012; Skipper 2015).

15.4.2 Logisches Denken nach Hirnschädigungen

Mit Patientenstudien können *kausale* Zusammenhänge zwischen kognitiven und neuronalen Prozessen analysiert werden, insbesondere wenn ein Zusammenhang zwischen spezifischen (fokalen) Hirnläsionen und dem Ausfall spezifischer kognitiver Funktionen hergestellt werden kann. Außerdem sind diese Arbeiten für den klinischen Alltag und die Diagnose, Therapie und Rehabilitation von Patienten mit Hirnschädigungen durch Tumore, Schlaganfälle oder Schädel-Hirn-Traumata bedeutsam.

Viele Befunde aus Patientenstudien passen gut mit den Ergebnissen aus Bildgebungsstudien zusammen. Insbesondere zeigen auch diese Arbeiten, dass abstrakte logische Schlüsse mehr von der rechten Hemisphäre und wissensbezogene Inferenzen mehr von der linken Hemisphäre unterstützt werden. Eine frühe Studie mit hirngeschädigten Patienten wurde von Caramazza et al. (1976) durchgeführt. In der Studie wurden Patienten nach einer links temporalen Lobektomie mit Patienten mit einer Läsion in anterioren Teilen der rechten Hirnhälfte verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass die erste Gruppe (Läsion links) nicht mehr in der Lage war, *relationale Aufgaben* der folgenden Art zu lösen:

A ist größer als B.

Wer ist der Größte?

Hingegen konnte die zweite Gruppe (Läsion rechts) folgende Aufgabe nicht lösen:

A ist größer als B.

Wer ist der Kleinste?

Im ersten Aufgabentyp stimmen die Relationen im ersten und zweiten Satz überein, im zweiten Aufgabentyp wurde die inverse Relation verwendet. Die Patienten mit der Schädigung in der rechten Hirnhälfte hatten also mehr Schwierigkeiten, die abstrakte Umformung der Relation vorzunehmen, die auch Schlussfolgerungen erfordert. Die Patienten mit der Schädigung in der linken Hirnhälfte hatten hingegen mehr Schwierigkeiten zu verstehen, was *größer als* bedeutet. Eine Arbeit von Read (1981), in der Patienten mit linkstemporaler und Patienten mit rechtstemporaler Lobektomie „richtige" relationale Schlüsse vornehmen mussten, unterstützt diese Sicht. Die erste Aufgabe sah wie folgt aus:

Mary ist größer als Georg.
Georg ist größer als Carol.

Wer ist der Größte?

Der zweite Aufgabentyp lautete:

Mary ist größer als Georg.
Georg ist größer als Carol.

Wer ist der Kleinste?

Beide Gruppen zeigten Beeinträchtigungen, jedoch waren diese bei linkshemisphärischen Patienten bei der ersten Art von Auf-

gaben und bei Läsionen in der rechten Hirnhälfte bei der zweiten Art von Aufgaben ausgeprägter.

Whitaker et al. (1991) untersuchten das *konditionale Denken* von Patienten nach Lobektomien im linken oder rechten anterioren temporalen Cortex. Mit den Lappenresektionen sollten Epilepsieherde chirurgisch entfernt werden. Nach der Operation wurden den Patienten z. B. folgende Aufgaben vorgelegt:

Wenn es regnet, dann ist die Straße trocken.
Es regnet.

Die rechtshemisphärischen Patienten schlossen daraus: *Die Straße ist trocken.* Dies ist der laut klassischer Logik gültige Schluss, obwohl er nicht mit dem Alltagswissen übereinstimmt. Linkshemisphärische Patienten hatten hingegen Schwierigkeiten bei Schlüssen wie

Wenn der Akku geladen ist, dann funktioniert der Walkman.
Der Akku ist geladen.

Also funktioniert der Walkman.

und

Wenn der Akku geladen ist, dann funktioniert der Walkman.
Der Walkman funktioniert nicht.

Der Akku ist nicht geladen.

Diese MP- und MT-Schlüsse sind nicht schwierig, wenn man sein Alltagswissen zurate zieht. Die linksseitigen Patienten konnten davon jedoch nicht profitieren. Ähnliche Ergebnisse werden auch mit der Wason-Aufgabe berichtet (Golding 1981). Auch *syllogistische Schlüsse* wurden in Patientenstudien untersucht. Diese neuen Arbeiten gehen über die recht grobe Rechts-links-Asymmetrie für „abstrakte" und „konkrete" Inferenzen hinaus und werden in ▶ Abschn. 15.5.1 berichtet.

Ragni et al. (2016) führten eine Studie mit gesunden Probanden durch. Dabei wurde die Methode der transkranialen Magnetstimulation (TMS) verwendet, mit der durch ein starkes (aber ungefährliches) Magnetfeld für kurze Zeit die neuronale Aktivität in den stimulierten Hirnregionen reduziert werden kann, was einer kurzfristigen Läsion entspricht, die räumlich genauer eingegrenzt werden kann als die Schädigungen in Patientenstudien. Mit der Studie sollten die neuronalen Grundlagen von *unsicheren relationalen Schlüssen* untersucht werden. Dazu wurden indeterminierte Probleme präsentiert, d. h. Probleme, in denen die Prämissen auf mehrere Weisen interpretiert werden konnten. Um zu überprüfen, ob solche Probleme mithilfe von präferierten Modellen (▶ Abschn. 15.3.5) gelöst werden, überprüften Probanden drei verschiedene Typen von Konklusionen:

- Konklusionen, die im präferierten Model galten.
- Konklusionen, die in nichtpräferierten alternativen Modellen galten.
- Konklusionen, die in keinem der Modellen galten, also falsch waren.

Während der Lösung der Aufgaben wurde die neuronale Verarbeitung im rechten Parietalcortex durch TMS behindert. Der Vergleich mit einer neutralen Kontrollstimulation ergab, dass bei der Hemmung des rechten Parietalcortex die Probanden alle Aufgabentypen schlechter lösten. Das spricht erneut für die Rolle des Parietalcortex beim relationalen Schließen. Zusätzlich konnte aber gezeigt werden, dass die Beeinträchtigung bei Konklusionen aus dem präferierten Modell am stärksten ausfiel, während Konklusionen aus alternativen Modellen weniger beeinträchtigt wurden. Die Zurückweisung inkorrekter Konklusionen wurde kaum beeinflusst. Unsichere relationale Schlüsse mithilfe präferierter Modelle scheinen also auf neuronale Informationsverarbeitungsprozesse im rechten Parietalcortex angewiesen zu sein. Die anderen Konklusionen wurden weniger beeinflusst, weil sie auch auf corticale Strukturen angewiesen sind, die in der Studie nicht behindert wurden.

15.5 Drei wichtige Fragen der Psychologie des logischen Denkens

Die Denkpsychologie ist ein sehr aktives Forschungsgebiet, in dem stets viel in Bewegung ist. Ein wichtiges Beispiel für aktuelle Forschungstrends sind die Arbeiten zum Umgang mit Unsicherheit und konfligierenden Informationen, die in ▶ Abschn. 15.3 dargestellt wurden. Darüber hinaus gibt es aber einige weitere interessante Fragestellungen, die in einem Lehrbuch nicht fehlen sollten. Diese Fragen beschäftigen sich mit der Interaktion von Wissen und logischem Denken, der Rolle von Visualisierungen für das logische Denken und schließlich mit der vielleicht grundsätzlichsten Frage überhaupt: Ist logisches Denken rationales Denken? Einige Antworten und Grundpositionen werden in diesem Abschnitt skizziert.

15.5.1 Welche Rolle spielt Wissen für das logische Denken?

Jeder kennt die Erfahrung, dass wir manchmal nicht lange über ein Problem nachdenken und komplizierte Schlüsse ziehen müssen, da wir die Lösung des Problems ohnehin schon wissen. Wir müssen dann die Lösung lediglich aus dem Gedächtnis abrufen. Anderseits kann uns unser Wissen, oder was wir glauben zu wissen, auch das Denken erschweren, zumal wenn es zu einem Widerspruch kommt zwischen dem, was wir glauben, und dem, was sich logisch korrekt aus den verfügbaren Informationen ableiten lässt. Aus logischer Sicht ist dieser Effekt nicht nachvollziehbar, denn wie wir inzwischen wissen, sind formalen Logiken geradezu durch die Trennung von Form und Inhalt einer Aussage charakterisiert. Menschen halten sich aber oft nicht an dieses Grundprinzip der formalen Logik, und bei vielen unsicheren Schlüssen spielt, wie wir gesehen haben, gerade der Inhalt der Prämissen eine wichtige Rolle.

Die folgenden Ausführungen gehen jedoch der Frage nach, wie der Aufgabeninhalt und was wir darüber zu wissen glauben einen *sicheren deduktiven Schluss* leichter oder schwieriger machen. Zu beiden Phänomenen – Wissen hilft, und Wissen schadet – liegen zahlreiche Befunde vor.

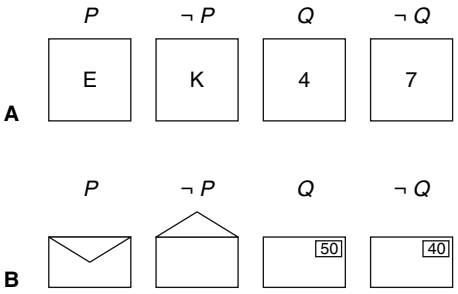


Abb. 15.9 Eine abstrakte (**A**) und eine konkrete (**B**) Version der Wahlaufgabe von Wason

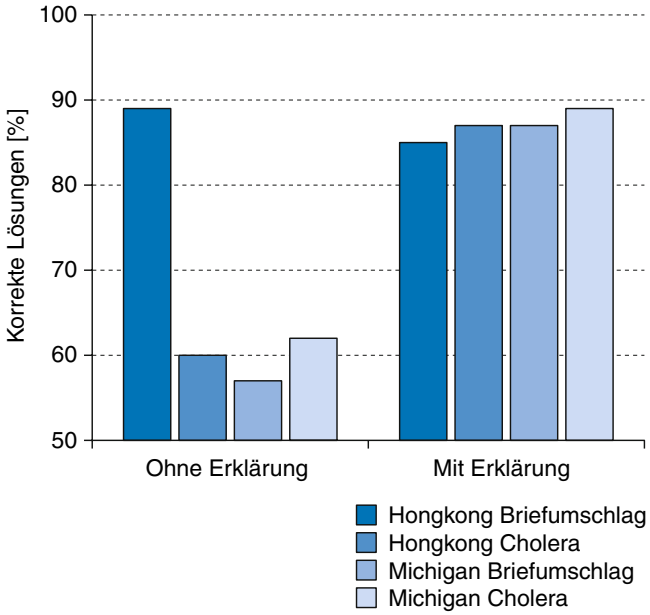


Abb. 15.10 Ergebnisse der Studie von Cheng und Holyoak (1985) zu Inhaltseffekten in der Wason-Aufgabe

Wissen hilft beim deduktiven Denken

Berühmt sind die klassischen Arbeiten zum *Inhaltseffekt* (*belief bias*) bei der Wason-Aufgabe, die ja in ihrer abstrakten Form den meisten Menschen Schwierigkeiten bereitet. In einer inhaltlich eingebetteten Variante der Aufgabe forderten Johnson-Laird et al. (1972) ihre (italienischen) Versuchsteilnehmer auf, sich vorzustellen, dass sie auf einem Postamt arbeiteten und Verletzungen der folgenden Regel kontrollieren sollten: *Wenn ein Umschlag zugeklebt ist, dann ist er mit 50 Lira frankiert*. Abb. 15.9 illustriert die Aufgabe. Die Lösung ist, den zugeklebten Briefumschlag und den Briefumschlag mit der 40-Lira-Marke umzudrehen. Die Konkretisierung der Aufgabe hatte einen dramatischen Effekt auf die Lösungsrate. In dieser Version der Aufgabe fanden 92 % der Teilnehmer die richtige Lösung. Da die zu überprüfende Regel zu dieser Zeit wirklich galt, wurde zunächst vermutet, dass konkrete Alltagserfahrung zur Verbesserung der Leistung führten (Griggs und Cox 1982). In späteren Studien stellte sich dann heraus, dass Inhaltseffekte bei der Wason-Aufgabe auch anders erklärt werden können. Cheng und Holyoak (1985) legten Studenten aus Michigan in den USA und Hongkong das Briefproblem (Abb. 15.9) und folgendes weiteres Problem vor: *Stellen Sie sich vor Sie sind ein Zollbeamter am Flughafen. Sie sollen folgende Regel überprüfen: Wenn auf der einen Seite des Formulars „Einreisen" steht, dann steht „Cholera" in der Liste der Krankheiten auf der anderen Seite*. Unterschiedlichen Teilnehmern wurden nun wiederum die entsprechenden Karten mit den Fällen *P* (Einreisen), ¬*P* (nicht Einreisen), *Q* (Cholera) und ¬*Q* (keine Cholera) vorgelegt. Beide Studentengruppen waren mit der Flughafenaufgabe nicht vertraut. Dagegen waren die Studenten in Hongkong mit der postalischen Regel aus ihrem Alltag vertraut, die amerikanischen Studenten nicht.

Eine weitere experimentelle Manipulation bestand darin, den Gruppen entweder den Sinn der Regel zusätzlich zu erklären oder nicht. Für die postalische Regel wurde einer Experimentalgruppe mitgeteilt, dass das Zukleben des Umschlags signalisiert, dass es sich um einen Eilbrief handelt. Für die Zollregel wurde einer Gruppe mitgeteilt, dass zur Einwanderung eine Choleraimpfung benötigt wird. Die anderen Gruppen erhielten keinen solchen Hinweis. Abb. 15.10 zeigt die Ergebnisse. Offensichtlich machte es für Studenten aus Hongkong bei der postalischen Aufgabe keinen Unterschied, ob der Sinn der Regel zusätzlich erklärt wurde oder nicht. In beiden Gruppen wurde die Aufgabe meistens korrekt gelöst. In allen anderen Fällen (postalisches Problem bei amerikanischen Studenten, Flughafenproblem bei Studenten aus Amerika und Hongkong) hatte das zusätzliche Erklären der Regel einen enormen Effekt (30 % mehr korrekte Lösungen, wenn die Regeln zusätzlich erklärt wurden). Wenn amerikanischen Studenten die postalische Regel erläutert wurde, erreichten sie also dieselbe Lösungsrate wie die Gruppe von Studenten aus Hongkong. Auf Grundlage dieser Befunde entwickelten Cheng und Holyoak (1985) die *Theorie der pragmatischen Schemata*. Während die bisher behandelten Theorien davon ausgehen, dass beim logischen Schließen in allen *Wissensbereichen* (*Domänen*) dieselben Wissensstrukturen und Prozesse beteiligt sind, postulieren die Autoren, dass es *domänenspezifische Schemata* gibt, über die Menschen miteinander kommunizieren. Die Theorie pragmatischer Schemata postuliert insbesondere zwei Schemata: *Erlaubnisschema* und *Verpflichtungsschema*. So hat das Erlaubnisschema z. B. die Form „Wenn eine Handlung durchgeführt werden soll, dann muss eine bestimmte Bedingung erfüllt sein". Sobald eine Erlaubnissituation vorliegt, kommt das Schema zur Anwendung, und man kann die korrekten Regeln abrufen. Ähnliches gilt für das Verpflichtungsschema. Fehler treten auf, wenn eine gegebene Situation nicht auf solche *pragmatischen Schemata* abgebildet werden kann (z. B. in der abstrakten Form der Wason-Aufgabe) oder wenn die mit dem Schema abgespeicherten Regeln nicht den Regeln der Logik entsprechen.

Der Theorie pragmatischer Schemata zufolge erleichtern also nicht spezifische Alltagserfahrungen die Lösung der Wason-Aufgabe, sondern allgemeine Erlaubnisschemata, die auf Situationen spezialisiert sind, in denen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein müssen, bevor eine weitere Handlung ausgeführt werden darf. Das zusätzliche Erklären der Regel aktiviert dieses Schema. Cheng und Holyoak (1985) konnten zeigen, dass auch das Einbetten der abstrakten Wason-Aufgabe in eine Erlaubnissituation (durch Implikationen wie „Wenn man die Handlung H ausführen will, dann muss Voraussetzung V gegeben sein") zu erheblichen Leistungsverbesserungen führt (61 % richtige Lösungen). Ob-

Zur Vertiefung 15.2

Belief bias im Alltag

Der *belief bias* ist auch für viele falsche Schlussfolgerungen in unserem Alltag verantwortlich (Evans 1989). Außerdem ist er für die Sozialpsychologie bedeutsam, da *beliefs* auch als Vorurteile in Erscheinung treten und so das Denken über soziale Gruppen beeinflussen können. Dazu gibt es einige interessante Arbeiten (z. B. Gordon 1953; Feather 1964). Knauff et al. (2010) untersuchten, wie der *belief bias* die Finanzmarktkrise von 2007 und 2008 beeinflusste (◘ Abb. 15.11). Mitten in der Finanzkrise wurde das Experiment mit sehr erfahrenen Börsenmaklern an der Frankfurter Börse durchgeführt. Den Probanden, die alle seit vielen Jahren an der Börse arbeiteten, wurden konditionale Aussagen präsentiert, die sich auf den Kauf oder Verkauf von Aktien bezogen. Die Probleme waren so konstruiert, dass einige Schlussfolgerungen zwar logisch korrekt waren, diese Schlussfolgerungen aber im Widerspruch zu dem standen, was die Börsenmakler aufgrund ihrer Erfahrungen für richtig hielten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Aktienhändler sehr viele falsche Schlüsse zogen, wenn die logische Gültigkeit nicht mit ihren Überzeugungen übereinstimmte. Wenn es zu diesem Konflikt kam, entschieden sie sich fast immer für ihre Überzeugung und gegen den logisch korrekten Schluss. Außerdem dauerte es in diesen Konfliktproblemen länger, bis sie ihre Entscheidung getroffen hatten. In diesen Konfliktaufgaben waren die Aktienhändler sogar schlechter als eine Vergleichsgruppe von Versuchspersonen, die über keinerlei Erfahrung an der Börse verfügten.

◘ **Abb. 15.11** Mitten in der Finanzkrise von 2007 und 2008 wurde an der Frankfurter Börse ein Experiment zum logischen Denken mit erfahrenen Börsenmaklern durchgeführt (Knauff, et al. 2010). In vielen Medien wurden die Ergebnisse unter Überschriften wie „Die Unlogik der Börsianer" oder „Börsenhändler: Logik als große Schwäche" berichtet.

wohl die Ergebnisse der Studie zunächst angezweifelt wurden, konnten sie in weiteren Studien repliziert werden (Griggs und Cox 1993).

Mit der Theorie der pragmatischen Schemata lassen sich die Befunde zur Wahlaufgabe von Wason gut erklären. Vertreter der mentalen Logiktheorie und der Theorie pragmatischer Schemata haben darauf hingewiesen, dass die beiden Theorien sich gut ergänzen. Eine weitere evolutionspsychologisch motivierte Theorie, in der davon ausgegangen wird, dass logische Regeln bereichsspezifisch angewandt werden, ist die *soziale Kontrakttheorie* von Cosmides (1989) und Gigerenzer und Hug (1992).

▪ Wissen schadet beim deduktiven Denken

Wir haben inzwischen gelernt, dass beim unsicheren Schließen oft nicht so einfach zwischen gültigen und ungültigen Schlüssen unterschieden werden kann, weil entgegen der klassischen Logik der Inhalt der Argumente oft mit berücksichtigt wird. Wir können deshalb auch nicht so leicht von falschen Schlüssen aufgrund von Wissen sprechen. Beim deduktiven Schließen gibt es aber solche eindeutigen Fehler, und viele empirische Befunde zeigen, dass der Inhalt der Prämissen für solche deduktiven Schlüsse auch schädlich sein kann. Genaugenommen ist der Begriff „Wissen" in diesem Zusammenhang jedoch schlecht gewählt. Besser spricht man von Überzeugungen, Meinungen oder Glauben, weil „Wissen" traditionell als wahre und gerechtfertigte Meinung definiert ist und es deshalb kein „falsches Wissen" geben kann, wohl aber falsche Meinungen und Überzeugungen. (Eine genauere Definition von Wissen findet sich in ▶ Kap. 11.)

Eine Studie von Oakhill et al. (1989) zeigt, dass logisch ungültige Schlüsse häufiger akzeptiert werden, wenn sie inhaltlich glaubwürdig sind. Den Probanden wurde z. B. der folgende Syllogismus vorgelegt:

Alle Franzosen sind Weintrinker.
Einige Weintrinker sind Gourmets.

Einige Franzosen sind Gourmets.

Der Schluss ist glaubhaft, aber gemäß der klassischen deduktiven Logiken falsch. Die meisten Probanden halten den Schluss aber für gültig, obwohl sie nach deduktiver Gültigkeit gefragt werden (Evans et al. 1983; ▶ Zur Vertiefung 15.2).

Er gibt mehrere Erklärungsansätze für diesen *belief bias*: In der Theorie mentaler Beweise sind syntaktische Regeln un-

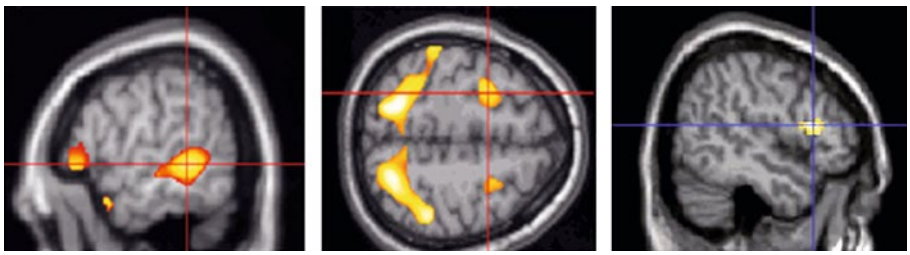


Abb. 15.12 Neuronale Korrelate von Inhaltseffekten. **A** Beim logischen Denken mit inhaltlich vertrautem Aufgabenmaterial kommt es zu Aktivierung in einem linkshemisphärischen frontotemporalen System (BA 47, 21/22). **B** Beim logischen Denken mit inhaltlich unvertrautem, abstraktem Aufgabenmaterial kommt es zu Aktivierung in einem bilateralen System, das Teile des Parietalcortex (BA 7, 40) und des dorsalen präfrontalen Cortex umfasst (BA 6). **C** Kommt es zu Konflikten zwischen dem Inhalt und der logischen Gültigkeit eines Schlusses, wird die Aktivierung im lateralen bzw. dorsolateralen präfrontalen Cortex gemessen. (Modifiziert aus Goel 2007)

abhängig vom Inhalt, die Fehler müssen also bereits bei der Interpretation der Prämissen entstehen (Rips 1994). In der Theorie mentaler Modelle wird angenommen, dass Probanden eine vorläufige Konklusion (Phase 2) weniger streng überprüfen (Phase 3), wenn sie glaubwürdiger ist. Es wird also nach mehr oder weniger Gegenbeispielen gesucht, je nachdem ob die Schlussfolgerung glaubwürdig oder unglaubwürdig ist (Oakhill et al. 1989). Eine interessante Erweiterung der Modelltheorie wurde von Klauer und Kollegen vorgeschlagen (Beller und Spada 2003; Klauer et al. 2000; Klauer et al. 2010). Demnach konkurrieren beim *belief bias* zwei Informationsquellen: die logische Form des Arguments und dessen Inhalt. Denker versuchen zunächst, aus Prämisse und Konklusion ein gemeinsames Modell zu konstruieren. Dabei werden verschiedene Testverfahren angewandt: Bei glaubwürdigen Prämissen wird geprüft, ob die Konklusion in das Modell integrierbar ist. Wenn dieser „positive Test" gelingt, wird die Konklusion akzeptiert. Bei unglaubwürdigen Prämissen wird ein „negativer Test" durchgeführt, in dem geprüft wird, ob das Gegenteil der Konklusion in das Modell integrierbar ist. Wenn ja, muss die ursprüngliche Konklusion falsch sein und wird verworfen. Glaubwürdige gültige und unglaubwürdige ungültige Konklusionen werden so sofort entdeckt; deshalb gibt es kaum Fehler. Hingegen liefern die Tests kein sicheres Ergebnis für unglaubwürdige gültige und glaubwürdige ungültige Konklusionen; deshalb gibt es mehr Fehler. Mit dieser Theorie lassen sich viele Befunde gut erklären. Eine andere einflussreiche Theorie zu den Ursachen des *belief bias* wurde von Evans (z. B. 1989, 1993b) entwickelt. Demnach gibt es zwei Denksysteme: ein heuristisches System 1, das nicht fehlerfrei arbeitet und vom Inhalt des Problems aktiviert wird und ein System 2 für abstrakte Schlüsse. Wir kommen darauf im folgenden Abschnitt und in ▶ Abschn. 15.5.3 zurück.

Neuronale Grundlagen von Inhaltseffekten

Gibt es auf neuronaler Ebene Unterschiede zwischen der Verarbeitung glaubwürdiger und unglaubwürdiger Inferenzen? Was passiert im Gehirn beim *belief bias*? Mit diesen Fragen haben sich insbesondere Goel und Kollegen (z. B. Goel 2007; Goel und Dolan 2003) befasst und sich dabei auf die Zwei-System-Theorie von Evans (1989, 1993b) bezogen. Goel (2007) fasst die Ergebnisse mehrerer Bildgebungsstudien zusammen, in denen Probanden abstrakte logische Aufgaben sowie Aufgaben mit inhaltlich vertrautem Material lösten. Die Konklusionen der Aufgaben mit vertrautem Inhalt waren entweder glaubwürdig oder unglaubwürdig (die Glaubwürdigkeit der Prämissen wurde nicht untersucht). Die Aufgaben sahen z. B. so aus:

Abstrakt	**Inhaltlich glaubwürdig**	**Inhaltlich unglaubwürdig**
Alle A sind B	*Alle Äpfel sind rote Früchte*	*Alle Äpfel sind rote Früchte*
Alle B sind C	*Alle roten Früchte sind nahrhaft*	*Alle roten Früchte sind giftig*
Alle A sind C	*Alle Äpfel sind nahrhaft*	*Alle Äpfel sind giftig*

Beim Lösen abstrakter Aufgaben fanden sich Aktivierungen bilateral in parietalen Arealen (BA 7, 40) und im dorsolateralen präfrontalen Cortex (BA 6), während bei inhaltlich vertrauten Aufgaben linkshemisphärische Aktivierung in frontalen (BA 47) und temporalen (BA 21/22) Regionen gemessen wurde. Zudem führten inhaltlich unglaubwürdige, aber logisch valide Konklusionen zu Aktivierungen im rechten lateralen bzw. dorsolateralen präfrontalen Cortex (BA 45/46). Nach Goel (2007) spricht dies für die Beteiligung kognitiver Kontrollprozesse, die zur Lösung des Konflikts zwischen abstrakter logischer Form und dem Inhalt der Inferenz nötig sind (vgl. auch Goel und Dolan 2003). Abb. 15.12 zeigt die unterschiedlichen Aktivierungen bei der Lösung von Problemen mit inhaltlich vertrautem Inhalt und mit abstraktem (nicht vertrautem) Inhalt sowie bei Konflikten zwischen Logik und Inhalt der Aufgabe. Goel (2007) hat aus diesen und vielen weiten ähnlichen Befunden sein neuronales Modell des deduktiven Schließens entwickelt, das bereits in ▶ Abschn. 15.4.1 berichtet wurde.

In einer interessanten Bildgebungsstudie konnten De Neys et al. (2008) zeigen, dass Menschen gar nicht so „unlogisch" denken, selbst wenn sie sich aufgrund von Inhaltseffekten für normativ falsche Schlüsse entscheiden. In ihren Arbeiten untersuchten die Autoren, ob Probanden gar nicht „merken", dass sie einen Fehler begehen oder ob sie es zwar „wissen", aber die Inhaltseffekte so stark sind, dass sie sich gegen den formal gültigen Schluss durchsetzen. Letzteres ist der Fall! Die Aufgaben waren nicht logisch formuliert, sondern es ging um Wahrscheinlichkeiten. De Neys et al. (2008) fanden, dass beim Ziehen einer falschen,

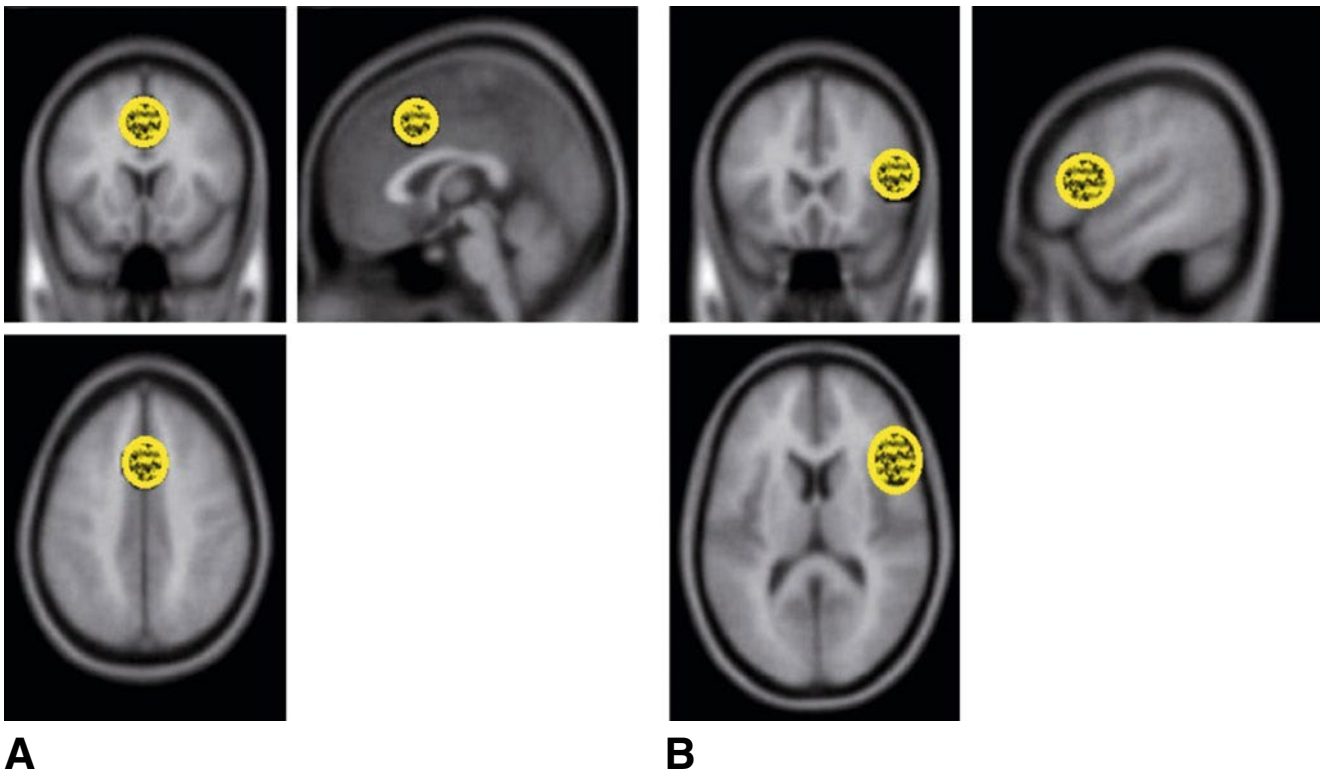


Abb. 15.13 Selbst wenn Menschen falsche Schlüsse ziehen, weil die falsche Schlussfolgerung inhaltlich glaubwürdig ist, „merken" sie anscheinend, dass sie gerade einen Fehler begehen. Werden logisch inkorrekte Antworten gegeben, sind Bereiche im anterioren Cingulum (**A**) und im lateralen präfrontalen Cortex (**B**) aktiv. Diese Regionen werden mit Fehler- und Konflikterkennung und der Unterdrückung von Handlungstendenzen in Beziehung gebracht. Menschen könnten also über eine „logische Intuition" verfügen, selbst wenn sie sich letztlich für eine inhaltlich plausible Antwort entscheiden. (Modifiziert nach De Neys et al. 2008)

aber inhaltlich glaubwürdigen Schlussfolgerung zwei Hirnregionen besonders aktiv waren: anteriore Teile des Cingulum und laterale Regionen des präfrontalen Cortex. Das anteriore Cingulum wird mit Fehler- und Konflikterkennung in Verbindung gebracht. Die Probanden scheinen den normativen Fehler also festzustellen. Regionen im lateralen präfrontalen Cortex werden mit der Unterdrückung von Handlungstendenzen in Beziehung gebracht. Diese Regionen waren auch aktiv, selbst wenn die Probanden letztlich eine Antwort gaben, in der sich eine inhaltlich glaubwürdige Konklusion gegen die normativ gültige durchsetzte (Abb. 15.13). Diese Ergebnisse erregten Aufsehen, da sie zeigen, dass Menschen durchaus über eine „logische Intuition" verfügen, also zwischen normativ gültigen und ungültigen Inferenzen unterscheiden können, selbst wenn sie sich letztlich für eine inhaltlich plausiblere Antwort entscheiden. De Neys (2014) konnte dies inzwischen in vielen weiteren Arbeiten untermauern und gegen Kritik verteidigen.

15.5.2 Hilft Visualisierung beim logischen Denken?

Die Bedeutung von Visualisierungen beim logischen Denken wurde in zahlreichen empirischen Arbeiten untersucht. Dabei muss zwischen visueller Präsentation und visueller Repräsentation unterschieden werden. Beim Thema *visuelle Präsentation* geht es um den Einfluss *externer visueller Darbietungen* in Form von Bildern, Diagrammen, Grafiken usw. auf die Leistung von Probanden beim logischen Denken. Ist eine logische Schlussfolgerung einfacher zu ziehen, wenn das Problem nicht (nur) als Text oder in symbolischer Form dargeboten wird, sondern (zusätzlich) in visueller Form als Bild, Grafik oder Diagramm? Beim Thema *visuelle Repräsentation* geht es um die Rolle mentaler bildhafter Vorstellungen beim logischen Denken. Hilft es uns beim Schließen, wenn wir uns den Inhalt einer Schlussfolgerungsaufgabe mental visuell vorstellen?

Visuelle Präsentation kann logische Aufgaben erleichtern

Logiker haben von jeher eine zwiespältige Beziehung zu Diagrammen und der Visualisierung logischer Zusammenhänge. Auf der einen Seite ist für sie logische Beweisführung untrennbar an Sprache gebunden. Logisches Schließen basiert, so das Dogma, auf den Sätzen einer Sprache, aus denen weitere logisch gültige Sätze dieser Sprache abgeleitet werden. Die Sprache ist in der Regel keine natürliche Sprache, sondern eine formale Sprache wie die Aussagen- oder Prädikatenlogik. Diagramme und Visualisierungen können in dieser Grundposition prinzipiell keine eigenständige Beweismethode darstellen. Von dieser Auffassung gibt es nur wenige Ausnahmen (Allwein und Barwise 1996; Shin 1994).

Auf der anderen Seite werden Diagramme und Visualisierungen in der Logik häufig als Werkzeuge zur Illustration oder Erklärung logischer Schlüsse verwendet. Diagramme können dem-

Julia ist in Atlanta oder Raphael ist in Tacoma, oder beides.
Julia ist in Seattle oder Paul ist in Philadelphia, oder beides.

Was folgt, wenn überhaupt etwas, daraus?

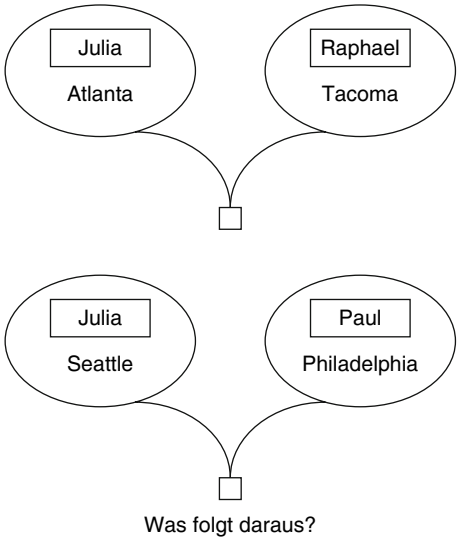


Abb. 15.14 Probanden können konditionale Aufgaben besser lösen, wenn ihnen die logischen Zusammenhänge zusätzlich mithilfe von Diagrammen verdeutlicht werden. (Aus Bauer und Johnson-Laird 1993)

nach zumindest helfen, die Bedeutung logischer Konnektoren und deren Kombination besser zu begreifen. Venn-Diagramme und Euler-Kreise sind dafür ein gutes Beispiel. In dieser erläuternden Funktion wurden diese Visualisierungen auch in diesem Kapitel verwendet.

Tatsächlich zeigen psychologische Experimente, dass Diagramme (manchmal) beim logischen Denken helfen können. Bauer und Johnson-Laird (1993) legten ihren Probanden konditionale Aufgaben als Sätze vor und verdeutlichten die logischen Zusammenhänge zusätzlich mithilfe der in Abb. 15.14 dargestellten Diagramme. In einer anderen Versuchsbedingung gab es keine Diagramme; die Aufgaben wurden nur als Sätze präsentiert. Die Probanden lösten die Aufgaben mit Diagrammen besser als ohne.

Stenning (2002) hat sich ausführlich mit der logischen Rolle von Diagrammen im Rahmen des Systems *Hyperproof* befasst. Hyperproof ist ein tutorielles System, das von den Logikern Barwise und Etchemendy (1994) entwickelt wurde, um ihren Studierenden an der Stanford University die formale Logik anhand von Sprache *und* Diagrammen beizubringen. In Hyperproof werden die für logische Schlüsse notwenigen Informationen nicht nur mittels Text und Formeln präsentiert, sondern zusätzlich in einer Art „Blockwelt" durch die räumliche Anordnung geometrischer Objekte erklärt. Durch diese Visualisierung soll die kognitive Verarbeitung logischer Schlussbeziehungen erleichtert werden. Stenning (2002) konnte aber zeigen, dass gerade Studierende mit schlechteren logischen Fähigkeiten die Diagramme nutzen, während Studierende mit besseren Logikfähigkeiten keine Diagramme, sondern abstrakte Strategien verwenden. Interessanterweise konnten aber besonders die starken „Visualisierer" am meisten davon profitieren, wenn sie lernten, abstrakte Strategien

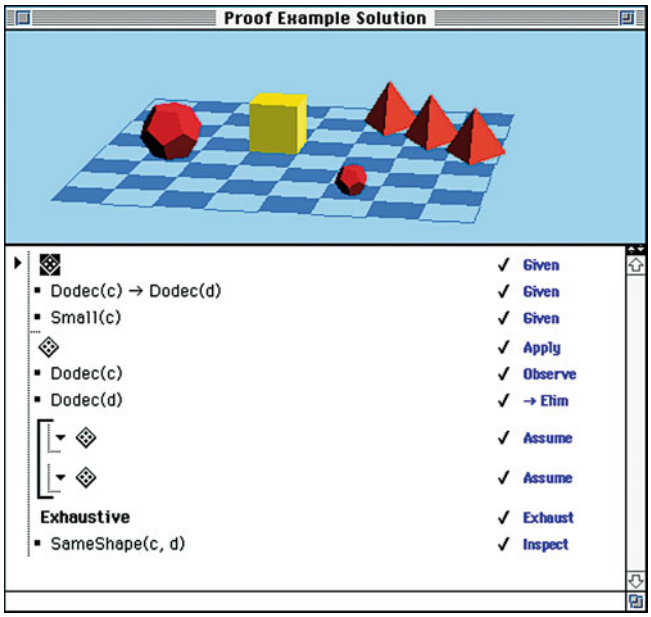


Abb. 15.15 Im System *Hyperproof* von Barwise und Etchemendy (1994) werden logische Beziehungen zusätzlich mithilfe von Diagrammen dargestellt. Das kann einigen Lernenden beim Führen logischer Beweise helfen. Ein Beweis beginnt in Hyperproof mit einer Anfangsinformation. Diese wird als „Situation" bezeichnet und sowohl als Diagramm als auch in Textform zur Verfügung gestellt. Das Diagramm stellt die Anordnung geometrischer Objekte in einer „Blockwelt" dar. Im Beispiel steht z. B. *Dodec* für die beiden Dodekaeder, also *Dodec (c)* und *Dodec (d)*. Die Textform besteht aus Sätzen der Prädikatenlogik. Das Ziel des Beweises besteht darin zu zeigen, dass eine oder mehrere Aussagen in dieser Situation gelten. Zum Beispiel können wir zeigen wollen, dass sich ein bestimmter Satz logisch aus der gegebenen Information ergibt oder dass die gegebene Information nicht ausreicht, um beispielsweise die Größe oder Form eines bestimmten Blocks zu ermitteln. Im dargestellten Beispiel soll z. B. der Satz *SameShape (c, d)*, also *Block c hat die gleiche Form wie Block d*, bewiesen werden. Der recht komplizierte Beweis wird hier nicht dargestellt, er zeigt jedoch, dass dieser Satz tatsächlich eine logische Konsequenz (Konklusion) der dargestellten Situation ist, weil *c* und *d* beides Dodekaeder sind, also die gleiche Form haben, selbst wenn sie unterschiedlich groß sind. (Openproof Research 2015)

anstelle von Diagrammen zu verwenden. In Abb. 15.15 ist dargestellt, wie in Hyperproof logische Beziehungen mit Diagrammen veranschaulicht werden.

Visuelle Repräsentation kann das logische Denken beinträchtigen

Diagramme und Visualisierungen können also manchmal beim logischen Denken helfen. Als eigenständige Beweismethode gelten sie den meisten Logikern jedoch nicht. Das ist in der Psychologie ganz anders. Insbesondere in der erfolgreichen Theorie mentaler Modelle spielen nichtsprachliche kognitive Repräsentationen und Prozesse eine zentrale Rolle. Die Kernidee wurde bereits in ▶ Abschn. 15.2.1 erläutert. Mentale Modelle kann man geradezu als Paradebeispiel für *anschauliche Vorstellung* betrachten. Die Modelltheorie ist dabei stark von einer der wenigen Theorien der Logik beeinflusst, in der Diagramme zum Führen logischer Beweise verwendet werden, und nicht nur zu deren Illustration (Johnson-Laird 2002; Goodwin und Johnson-Laird 2005). Die Theorie geht auf die Arbeiten des US-amerikanischen Logikers und Philosophen Charles Sanders Peirce (1839–1914)

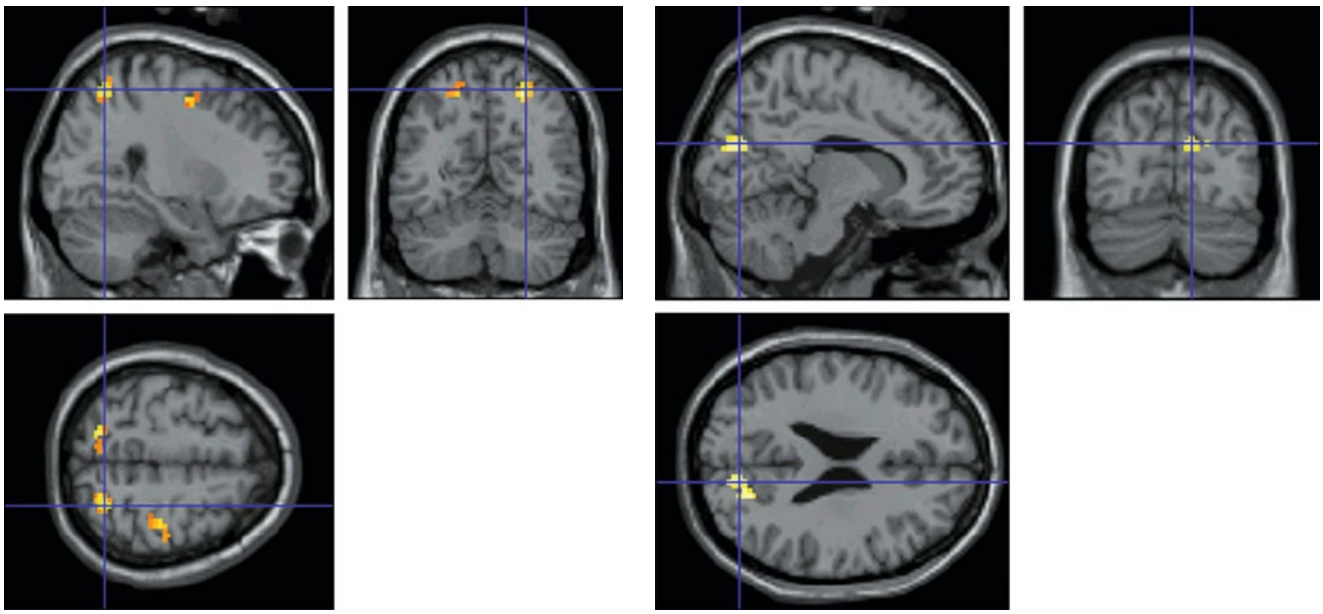


Abb. 15.16 **A** Bilaterale Aktivierung im Parietalcortex beim Lösen logischer Aufgaben, unabhängig von ihrer visuellen Vorstellbarkeit. **B** Aktivierung im visuellen Cortex beim logischen Denken mit leicht visuell vorstellbaren Aufgaben. (Aus Knauff et al. 2003)

zurück, der in seiner nichtsprachlichen Logik den Begriff der *Ikonizität* einführte. Ein *Ikon* ist in der von Peirce entwickelten Zeichentheorie (Semiotik) ein Zeichen, das mit dem Gegenstand, den es repräsentiert, eine wahrnehmbare Ähnlichkeit aufweist. Ein Porträtgemälde oder ein Passfoto einer Person sind dafür gute Beispiele.

In der Psychologie hat die Wahrnehmungsähnlichkeit zwischen Repräsentation (Zeichen, Symbol) und Bezeichnetem (repräsentiertem Gegenstand) zu einigen Verwirrungen geführt, da man mentale Modelle vorschnell auch als bildhafte Vorstellungen betrachten könnte. Menschen berichten ja oft, dass sie sich etwas „vor dem inneren Auge" vorstellen, wenn sie sich an etwas erinnern oder logische Probleme lösen. Diese bildhafte Vorstellung erscheint dann fast so lebendig wie eine tatsächliche visuelle Wahrnehmung (▶ Kap. 21; Kosslyn 1994). Beim logischen Denken, so nehmen einige Forscher an, werden solche bildhaften Vorstellungen verwendet, indem sich der Denker mental „ausmalt", was in den Prämissen beschrieben ist.

Sind mentale Modelle also einfach visuelle Vorstellungen? Die empirische Evidenz dazu war lange Zeit widersprüchlich. Wenn die Hypothese über den visuellen Charakter mentaler Modelle stimmen würde, dann müssten logische Aufgaben, deren Inhalt leicht visualisiert werden kann, einfacher zu lösen sein als Aufgaben, die nur schwer bildhaft vorzustellen sind. Einige Experimente fanden einen solchen Effekt (z. B. Shaver et al. 1975; Clement und Falmagne 1986), andere jedoch nicht (z. B. Sternberg 1980; Richardson 1987). Knauff und Johnson-Laird (2002) konnten zeigen, dass die Uneinheitlichkeit dieser Befunde durch eine Konfundierung visueller und räumlicher Repräsentation und Prozessen verursacht wurde. *Visuelle Repräsentationen* sind *modalitätsspezifische Repräsentationen*, die an das visuelle System gekoppelt sind. Sie erfassen deshalb auch visuelle Merkmale wie Farben, Formen Texturen, Distanzen usw. und werden im Allgemeinen als „Bilder vor dem inneren Auge" subjektiv wahrgenommen. *Räumliche Repräsentationen* sind hingegen abstraktere und *modalitätsunspezifische Repräsentationen*, die nicht an das visuelle System geknüpft und dem bewussten Erleben in der Regel nicht zugänglich sind. Gleichwohl sind sie anschaulicher und konkreter als die rein sprachbasierten Repräsentationen, die in ▶ Abschn. 15.2.1 beschrieben wurden. Räumliche mentale Modelle erfassen jedoch nur die für eine Schlussfolgerung relevanten Beziehungen. Andere visuelle Merkmale sind nicht repräsentiert.

Knauff und Johnson-Laird (2002) konnten die visuelle und räumliche Vorstellbarkeit von konditionalen und relationalen Aufgaben systematisch variieren. Dabei stellte sich heraus, dass leichte *räumliche* Vorstellbarkeit die logischen Aufgaben einfacher macht. Im Gegensatz zu den Erwartungen der visuellen Theorie waren jedoch leicht *visuell* vorstellbare Aufgaben sogar schwieriger zu lösen. Die Probanden benötigten dann mehr Zeit und machten mehr Fehler als bei nichtvisuellen Problemen. Visuelle Vorstellungen helfen also nicht nur nicht beim logischen Denken. Sie können allzu konkret sein und dann das logische Denken sogar behindern. Dieser Effekt wird als **visueller Beeinträchtigungseffekt** (*visual impedance effect*) bezeichnet (Knauff und Johnson-Laird 2002; Knauff und May 2006; Knauff 2013a).

In Bildgebungsstudien konnte auch geklärt werden, warum Menschen ihr Denken trotzdem oft als Sehen vor dem inneren Auge erleben (Knauff et al. 2003). In Abb. 15.16 sind die neuronalen Aktivierungen dargestellt, die beim logischen Denken mit unterschiedlich gut visuell und räumlich vorstellbaren Aufgaben gemessen wurden. Relevant sind hier vor allem die Aktivierungen im Parietal- und Okzipitalcortex. Wie in Abb. 15.16A zu sehen ist, zeigte sich bei allen Arten von Aufgaben erhöhte Aktivität rechtshemisphärisch im superioren Parietallappen, was für abstrakte räumliche Verarbeitungsprozesse spricht (z. B. Andersen 1997). Hingegen zeigte sich, wie in Abb. 15.16B dargestellt,

neuronale Aktivierung im visuellen Cortex nur bei leicht visuell vorstellbaren Aufgaben. Aktivität in diesem Bereich wird meist mit visuellen Vorstellungen in Verbindung gebracht (Kosslyn 1994). In weiteren Untersuchungen wurde dann gezeigt, dass diese Aktivität in visuellen Hirnregionen nur bei der Verarbeitung der Prämissen messbar ist, jedoch nicht in der Phase, in der eine aktive Schlussfolgerung erforderlich ist, weil nun die logische Gültigkeit einer Konklusion geprüft werden muss. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass mentale Modelle vor allem auf räumlichen Repräsentationen im Parietalcortex beruhen. Diese Modelle erfassen nur die Informationen, die für die Inferenz notwendig sind. Visuelle Vorstellungen im Okzipitalcortex sind für die Inferenz nicht erforderlich, sondern ein Nebenprodukt des Prämissenverstehens. Sie können aber allzu konkret sein und damit das abstraktere logische Denken sogar behindern (Knauff 2013a).

15.5.3 Ist logisches Denken rationales Denken?

Auf diese Frage gibt es keine eindeutige Antwort. Philosophen haben sich seit Jahrtausenden mit der Frage befasst und sind zu keiner einheitlichen Auffassung gelangt (Spohn 2001). Aber selbst die Psychologie ist meilenweit von einem Konsens entfernt. So würden einige Psychologen die Frage in der Überschrift mit Ja beantworten, während andere die formale Logik als normative Theorie des rationalen Denkens ablehnen. Die wichtigsten theoretischen Standpunkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Logik definiert, was als rational gelten soll Es gibt eine ganze Reihe von Theorien, in denen diese Position vertreten wird. Diesen Theorien zufolge sind Menschen grundsätzlich in der Lage, so zu denken, wie es die Regeln der Logik vorschreiben. Allerdings kann es aus vielen kognitiven Gründen zu Abweichungen von den normativen Vorgaben der Logik kommen. So kann beispielsweise die beschränkte Kapazität des kognitiven Systems zu logischen Fehlern führen, es können nicht alle erforderlichen Informationen zur Verfügung stehen, oder die Zeit reicht nicht aus, um eine logisch korrekte Schlussfolgerung vorzunehmen. Auch für die grundsätzliche logische Kompetenz von Menschen kann es unterschiedliche Ursachen geben. Ausgehend von Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung wird in einigen Theorien von einer angeborenen logischen Kompetenz ausgegangen, die sich im Verlauf der Entwickelung allerdings herausbilden und ausdifferenzieren muss (Piaget und Inhelder 1958). Andere Theorien gehen davon aus, dass sich unsere logischen Fähigkeiten evolutionär entwickelt haben, weil bei Tauschgeschäften und beim Handeln die Einhaltung von Verträgen überprüft und Betrüger überführt werden müssen (Cosmides 1989). Wieder andere Theorien basieren auf der engen Verbindung von Denken und Argumentieren und gehen davon aus, dass sich die logischen Fähigkeiten entwickelt haben, weil wir beim Argumentieren versuchen, andere von unserer Meinung zu überzeugen, und uns dabei die Logik hilft, eine stichhaltige und widerspruchsfreie Argumentation zu entwickeln (Mercier und Sperber 2011). Gemäß der Theorie mentaler Modelle beruht unsere Fähigkeit des logisch korrekten Schlussfolgerns auf unserer Fähigkeit, mentale Simulationen vorzunehmen. Wir stellen uns also vor, was der Fall ist oder der Fall sein könnte, und können aus dieser mentalen Simulation weitere logisch gültige Konsequenzen auslesen (z. B. Johnson-Laird 2006). Die Vielfalt und die zahlreichen Verästelungen der Theorien sind nicht ganz einfach zu überblicken. Oft liegen die Positionen auch im Detail recht weit auseinander. Gemeinsam ist ihnen aber, dass sie die formale Logik als normative Theorie des Denkens betrachten und grundsätzlich davon ausgehen, dass Menschen zumindest in der Theorie logisch denken können, auch wenn dies in der Praxis durch viele kognitive Faktoren und Umweltbedingungen erschwert wird.

Menschliches Denken und Entscheiden ist von Grund auf irrational Nach dieser vollkommen anderen Position hat menschliches Denken mit Logik nicht viel zu tun. Vielmehr verfügen wir über sogenannte *Heuristiken*, also mentale Faustregeln, die wir auf logische Probleme anwenden, die jedoch systematisch von den Regeln der formalen Logik und Wahrscheinlichkeitsrechnung abweichen. Außerdem gibt es eine Vielzahl von *kognitiven Täuschungen* (*biases*), die den Regeln der Logik widersprechen. So versuchen Menschen z. B. in der Wason-Aufgabe im Allgemeinen, die konditionale Regel zu verifizieren und nicht zu falsifizieren, was als Bestätigungsfehler (*confirmation bias*) bezeichnet wird. Die Hauptvertreter des Ansatzes, Kahneman und Tversky (1974), hatten ihre Position ursprünglich vor allem für das statistische Denken entwickelt. Die Grundposition ist jedoch ebenso auf das logische Schließen anwendbar und hat auch in diesen Zusammenhang viele Interpretationen und Weiterentwicklungen erfahren (Garnham und Oakhill 1994).

Zwei Denksysteme Eine dritte Ansicht können wir als eine Art Mittelweg zwischen den beiden bisher genannten Positionen betrachten. Bei dieser theoretischen Auffassung gibt es zwei Denksysteme: Das eine System arbeitet schnell, ist intuitiv und in der Regel unbewusst; es beruht auf der Anwendung von Heuristiken und weicht deshalb manchmal von den logischen Normen ab. Das zweite System arbeitet langsam, ist oft bewusst und führt zu logisch korrekten Antworten. Ob wir Schlüsse ziehen, die logischen Regeln genügen, hängt davon ab, welches Denksystem die Schlussfolgerung bearbeitet. Es gibt viele Varianten dieser Konzeption. Am bekanntesten ist die in ▶ Abschn. 15.5.1 beschriebene Unterscheidung von „System 1“ und „System 2“ nach Evans (2003) geworden. Von Kahneman (2012) wurde eine ähnliche Theorie unter dem Titel „schnelles Denken, langsames Denkens“ entwickelt.

Die Frage nach der Rationalität oder Irrationalität von Menschen kann grundsätzlich überhaupt nicht beantwortet werden Diese radikal andere Position wurde von Cohen (1981) vertreten. Ausgangspunkt dieser Auffassung ist die Unterscheidung von *Kompetenz* und *Performanz*, die von Chomsky (1965) im Bereich der Linguistik eingeführt wurde. Demnach verfügen Menschen über mentale Regeln zur Bildung grammatisch korrekter Sätze. Die kognitiven Systeme für diese grammatische *Kompetenz* interagieren jedoch mit anderen Systemen, z. B. für Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Gedächtnis und Motivation. Diese Systeme kön-

nen die Arbeitsweise des linguistischen Kompetenzsystems beeinträchtigen und so zu grammatisch fehlerhaften Äußerungen führen. Diese beobachtbare Verwendung von Sprache wird dann als *Performanz* bezeichnet. Cohen (1981) überträgt nun diese Unterscheidung auf den Bereich des Denkens und argumentiert, dass psychologische Experimente prinzipiell nur etwas über die Performanz beim Denken aussagen, jedoch nichts über die logische Kompetenz der Probanden verraten. Pollock (1987) nahm diese Idee auf und entwickelte eine Rationalitätsarchitektur für das anfechtbare Schließen. In diesem Kompetenzsystem werden zunächst Schlüsse generiert, die logisch richtig sind und angeben, wie Menschen logisch korrekt schließen „sollten". Diese Schlüsse werden dann aber durch andere Systeme überschrieben. Von Cohen (1981) wurde aber noch ein zweites Argument vorgebracht: Ob ein Schluss von Probanden als rational bezeichnet wird, hängt immer von der Norm ab, die der Experimentator zugrunde legt. So kann z. B. ein Schluss gemäß der klassischen Logik irrational sein. Er kann aber durchaus rational sein, wenn der Experimentator eine andere Norm zugrunde legt. Dieser Ansatz gewinnt in der jüngeren Denkpsychologie wieder an Bedeutung.

Rationalität als Umgang mit Wahrscheinlichkeiten Die Theorien der probabilistischen Rationalität versuchen, eine neue normative Theorie für das menschliche Denken zu etablieren (z. B. Oaksford und Chater 2007; Evans 2002; Elqayam und Evans 2011). Laut Vertretern dieser Theorie ist die formale Logik nicht der geeignete Bezugsrahmen für die Psychologie des Denkens. Vielmehr verarbeitet das kognitive System fortwährend statistische Informationen. Daher sollten auch die Denkleistungen von Probanden an den Normen der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie gemessen werden. Der Ansatz hat also einerseits große Ähnlichkeit mit an der Logik orientierten Theorien. Beide legen eine formale Theorie als normativen Bewertungsmaßstab zugrunde: die Logik oder die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Anderseits sind die beiden Ansätze sehr weit voneinander entfernt. Während in logikbasierten Ansätzen eine Regel $A \rightarrow B$ gilt, wenn nicht ein Fakt C dagegenspricht, wird in probabilistischen Theorien von vornherein angenommen, dass die Regel $A \rightarrow B$ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit P zwischen 0 und 1 gilt. Rationalität und Irrationalität werden also in logikbasierten Ansätzen *symbolisch*, in probabilistischen Ansätzen jedoch *numerisch* modelliert.

Theorien begrenzter Rationalität Eine wieder andere Denkweise stellt diese Theorie der *beschränkten Rationalität* (*bounded rationality*) dar, die von Herbert Simon (1916–2001) in die Entscheidungspsychologie eingeführt wurde, aber auch für andere denkpsychologische Debatten eine Rolle spielt. Gemäß der Theorie sind kognitive Beschränkungen dafür verantwortlich, dass Menschen nicht rational denken können, selbst wenn sie wollten (Simon 1959). Außerdem stellt die Umwelt in der Regel nicht alle notwendigen Informationen zur Verfügung, und die Suche nach Informationen ist oft aufwendig. Stattdessen wägen Menschen zwischen den Kosten für die Entscheidungsfindung und dem vermutlich zu erwartenden Nutzen ab. Dabei spielt primär die Anpassung an die Umwelt eine Rolle. Begrenzte Rationalität reicht im Allgemeinen aus, um in der Welt zurechtzukommen, so die Annahme.

Tab. 15.15 Die fünf Hauptschritte in der rationalen Analyse nach Anderson (1991)

Schritt	Aktion
I	Genaue Spezifikation des Ziels, das vom kognitiven System erreicht werden soll
II	Entwicklung einer formalen Theorie der Umgebung, für die das kognitive System optimiert sein soll
III	Genaue Angaben über die kognitiven Kosten und Beschränkungen, unter denen die Optimierung des Systems erreicht werden muss
IV	Anwendung der Schritte I bis III, um zu entscheiden, welches Verhalten optimal wäre
V	Vergleichen des beobachtbaren Verhaltens mit dem optimalen Verhalten

Eine Variante dieses Ansatzes sind die die *schnellen und sparsamen Heuristiken* (*fast and frugal heuristics*) von Gigerenzer und Kollegen (Chase et al. 1998; Gigerenzer und Selten 2002; Gigerenzer und Brighton 2009; Gigerenzer et al. 2011). Demnach verfügen Menschen über eine adaptive Werkzeugkiste (*adaptive toolbox*), die mit „Faustregeln" gefüllt ist, die auf Informationen angewandt werden, die leicht zu erhalten sind, jedoch bei geringem kognitivem Aufwand zu hinreichend genauen Entscheidungen führen. Bei der *Rekognitionsheuristik* wählen wir z. B. von mehreren Alternativen diejenige aus, die uns bereits bekannt vorkommt. Bei der *Take-the-Best-Heuristik* vergleichen wir die Eigenschaften von Objekten nacheinander, bis eine Eigenschaft gefunden ist, die zwischen den Objekten differenziert. Dieser Unterschied führt dann zur Entscheidung. Ein bekanntes Beispiel ist, dass wir die Größe von Städten vergleichen könnten, indem wir überlegen, ob die zur Wahl stehenden Städte über einen Fußballclub in der Bundeliga verfügen. Bei großen Städten ist das wahrscheinlicher. Laut dieser Theorie gibt es keinen Sollwert und keine normative Theorie, auf die bei der Beurteilung menschlicher Rationalität Bezug genommen wird. Entscheidend sind nur die geringen kognitiven Kosten und die Nützlichkeit von Entscheidungen für die Anpassung an die Umwelt.

Rationale Analyse (*rational analysis*) Diese nochmals andere Herangehensweise stammt von Anderson (1990, 1991). Die meisten anderen Theorien hatten ja bereits die Limitierungen des kognitiven Systems betont. Das steht aber in Widerspruch zu der Tatsache, dass Menschen ziemlich gut mit ihrer Umwelt zurechtkommen, und zwar bei einem hohen Maß an Komplexität und Unsicherheit. Anderson (1991) rückt deshalb die *externen* Bedingungen der Umwelt in den Mittelpunkt und unterscheidet zwischen verschiedenen Typen der „Rationalität". Einerseits kann das Verhalten eines Menschen *normativ rational* sein, wenn es mit bestimmten normativen Vorgaben übereinstimmt, und andererseits *adaptiv rational*, wenn es der Situation angepasst ist und zur Erreichung eines Zieles als vernünftig gelten kann. Er schlägt ein genaues Verfahren vor, mit dem die Probleme der Umwelt und die zur deren Lösung optimalen kognitiven Prozesse spezifiziert werden können. Die dazu erforderlichen Schritte sind

in Tab. 15.15 zusammengefasst. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass wir so nachvollziehen können, warum Menschen auf der einen Seite über eine hohe Kompetenz für angepasstes und zielgerichtetes Verhalten verfügen, andererseits aber auch Schlüsse ziehen können, die mit den Regeln der Logik (oder anderen Normen) übereinstimmen.

15.6 Anwendungsbeispiele

Die Psychologie des logischen Denkens befasst sich mit einer der wichtigsten Fähigkeiten des Menschen als vielleicht einzigen vernunftbegabten Wesens. Nicht umsonst werden wir in der biologischen Systematik als *Homo sapiens* bezeichnet, also als vernünftiger, kluger, weiser Mensch. Das allein macht das Thema so bedeutsam und weckt seit Langem das Erkenntnisinteresse vieler Psychologen. In fast allen Wissenschaften stellt sich meist nach intensiver Grundlagenforschung heraus, dass die Ergebnisse dieser Forschung auch für ganz praktische Fragestellungen wichtig sind. Diese Phase hat die Psychologie des logischen Denkens längst erreicht, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Willkürliche und ungerechtfertigte Schlussfolgerungen bei psychischen Erkrankungen

Bei vielen psychischen Erkrankungen spielen logische Fehler und ungerechtfertigte Schlussfolgerungen eine wichtige Rolle. So haben wir bereits zu Beginn des Kapitels die willkürlichen Schlussfolgerungen einer Patientin mit Angststörung kennengelernt. Für die Patientin ist es „logisch", dass sie sich an einem Foto von Rock Hudson mit dem HI-Virus infizieren kann. Die Psychotherapeutin Fine (2011) berichtet ein anderes Beispiel für Schlussfolgerungen von Frauen, die von ihrem Vater missbraucht wurden: „Mein Vater ist schlecht. Mein Vater ist ein Mann. Also sind alle Männer schlecht." In Lehrbüchern zur Klinischen Psychologie wird solchen ungerechtfertigten Inferenzen eine zentrale Rolle in der Entstehungsgeschichte und Symptomatik affektiver Störungen zugewiesen (z. B. Butcher et al. 2009). Auch in der einflussreichen kognitiven Therapie nach Beck (z. B. 1967; Clark et al. 1999) spielen „negative Denkstile" und „willkürliche Schlussfolgerungen" eine wichtige Rolle. Obwohl die kognitive Therapie inzwischen vielfach weiterentwickelt wurde, ist der Kerngedanke doch erhalten geblieben: *Kognitive Symptome* psychischer Erkrankungen gehen den *affektiven Symptomen* oft voraus und verursachen diese (Butcher et al. 2009).

Die Psychologie des logischen Denkens kann helfen, fehlgeleitete und willkürliche Schlussfolgerungen besser zu begreifen. De Jong et al. (1997) untersuchten z. B. die Wason-Aufgabe mit Phobikern und verwendeten dabei zwei Arten von Regeln: Gefahrenregeln und Sicherheitsregeln. Bei Gefahrenregeln (*Wenn p, dann Gefahr q*) droht eine potenzielle Gefahr, und es ist nützlich, die Regel anzuwenden, um mögliche Schäden oder Verletzungen zu vermeiden. Bei einer Regel wie *Wenn die Alarmglocke läutet (p), dann brennt es (q)* ist es beispielsweise sinnvoll zu prüfen, ob *p* zu *q* führt, aber auch, ob *q* zu *p* führt. Im ersten Fall wird geprüft, ob kein falscher Alarm vorliegt. Das ist aussagenlogisch korrekt, aber für das Überleben weniger relevant. Im zweiten Fall wird geprüft, ob bei Feuer (*q*) auch wirklich Alarm ausgelöst wird (*p*). Das ist aussagenlogisch zwar nicht korrekt, aber für das Überleben wichtig. De Jong et al. (1997) nehmen deshalb an, dass Gefahrenregeln eher verifiziert (Prüfen der *p*- und *q*-Karten) als falsifiziert werden (Prüfen der *p*- und ¬*q*-Karten). Bei Sicherheitsregeln (*Wenn p, dann Sicherheit q*) wie *Wenn ein Hund bellt, dann beißt er nicht* ist es zur Gefahrenvermeidung sinnvoll und auch aussagenlogisch korrekt zu prüfen, ob möglicherweise bellende Hunde (*p*) doch beißen (¬*q*), also die Regel zu falsifizieren. Nach de Jong et al. (1997) stellt also das Verifizieren von Gefahrenregeln und das Falsifizieren von Sicherheitsregeln eine zur Vermeidung von Gefahren adaptive Vorgehensweise dar. De Jong et al. (1997) untersuchten nun, wie Personen mit Spinnenphobie und Kontrollpersonen auf Gefahren- und Sicherheitsregeln reagieren, die entweder objektive Bedrohungen (z. B. *Wenn Pilze einen braunen Stiel haben, dann sind sie giftig*) oder nur für Spinnenphobiker bedrohliche Situationen beschrieben (z. B. *Wenn es ein altes Haus ist, dann sind darin viele Spinnen*). Die Ergebnisse zeigten, dass alle Probanden versuchten, objektive Gefahrenregeln zu verifizieren. Die Spinnenphobiker versuchten jedoch, auch die spinnenbezogenen Gefahrenregeln zu verifizieren, was bei den Kotrollpersonen nicht der Fall war. Die Autoren schließen daraus, dass die bloße subjektive Wahrnehmung einer Gefahr spezifische Denkmuster aktiviert, die dann zu logisch ungültigen Schlüssen führen und dazu beitragen, eine vorhandene Phobie zu erhalten.

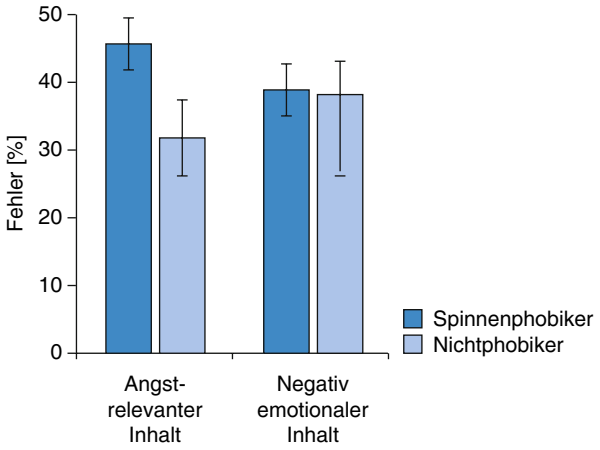


Abb. 15.17 Fehlerraten für Spinnenphobiker und Nichtphobiker in Abhängigkeit vom Inhalt der konditionalen Inferenzaufgabe (Abb. modifiziert aus Jung et al. 2014)

Jung et al. (2014) führten ebenfalls Experimente mit Spinnenphobikern und Kontrollpersonen durch. In einem der Experimente mussten die Probanden mit einer ausgeprägten Spinnenphobie konditionale Aufgaben im MP und MT (korrekte Antwort „gültig") und mit Bejahung des Vorderglieds und Verneinung des Hinterglieds (korrekte Antwort „ungültig") durchführen. Die Inhalte bezogen sich entweder auf Spinnen (*Wenn eine Person in einen alten Haus wohnt, dann gibt es im Keller viele Spinnen*) oder auf andere unangenehme Themen (*Wenn eine Person ein Raucherbein hat, dann wird dieser Person das Bein amputiert*). In Abb. 15.17 sind die Fehlerraten für die drei Aufgabentypen dargestellt. Wie man sieht, machten die Spinnenphobiker signifikant mehr Fehler bei den spinnenbezogenen Inferenzen als die Kotrollpersonen.

Die Befunde lassen sich im Rahmen der Theorie über die Verifikation von Gefahrenregeln nach de Jong et al. (1997) erklären. Es gibt aber eine Reihe weiterer kognitionspsychologischer Erklärungen, die auch für die Klinische Psychologie wichtig sind. Drei mögliche Erklärungen lauten:

- Phobiker vermeiden es, über angstauslösende Themen genauer nachzudenken. Sie suchen deshalb nicht nach Gegenbeispielen für Regeln, die einer Schlussfolgerung über mögliche Gefahren widersprechen würden. Damit wir die Angststörung aufrechterhalten (▶ Abschn. 15.3.1).
- Die ausgelösten Gefühle und Gedanken von Phobikern beanspruchen Teile des Arbeitsgedächtnisses, die der Inferenz somit nicht zur Verfügung stehen. Deshalb können weniger mentale Modelle konstruiert werden, oder es werden nur präferierte mentale Modelle konstruiert, die mit dem befürchteten Risiko zusammenpassen (▶ Abschn. 15.2.1 und 15.3.5).
- Die Unterdrückung angstauslösender Gedanken und negativer Gefühle erfordert exekutive Kotrollprozesse, die damit dem Denken nicht zur Verfügung stehen und somit das Schlussfolgern beinträchtigen (▶ Kap. 12).

Zu diesen Erklärungen passen auch experimentelle Befunde, die zeigen, dass Angst zur Reduzierung der freien Ressourcen des Arbeitsgedächtnisse (MacLeod und Donnellan 1993) und der zentralen Exekutive führt (Eysenck 1985). Eysenck und Calvo (1992) zeigten, dass Angst mit einem erhöhten Sichsorgen einhergeht und dadurch die Verarbeitungs- und Speicherkapazitäten des Arbeitsgedächtnisses reduziert werden. Ausführliche Darstellungen zur Verbindung von Emotion und logischem Denken findet man in Blanchette (2013). Generell sind jedoch noch viele Fragen, die für die Klinische Psychologie interessant sind, ungeklärt. So zeigen, wie wir gesehen haben, Personen mit Angststörungen im Allgemeinen schlechtere Leistungen in Logikaufgaben, wenn der Inhalt des Schlusses mit ihren Ängsten zu tun hat. Untersuchungen mit depressiven Patienten zeigen hingegen, dass diese Personen mit negativen und deprimierenden Inhalten (z. B. *Wenn mich niemand mag, dann ist mein Leben sinnlos. Niemand mag mich. Also ist mein Leben sinnlos*) besser logische Schlüsse durchführen können als mit positiven und fröhlichen Aufgabeninhalten (Johnson-Laird et al. 2006). Phobiker scheinen also eher angstauslösende Inferenzen zu vermeiden, während depressive Personen geradezu Experten sind, wenn es um negative Schlussfolgerungen und Erwartungen geht (Jung et al. 2013). Auch die experimentellen Befunde zum logischen Schließen bei Missbrauchsopfern zeigen, dass Opfer sexuellen Missbrauchs besser bei Logikaufgaben abschneiden, in denen es um die traumatische Erfahrung geht (Blanchette et al. 2008). Solche *Stimmungs-Kongruenz-Effekte* wurden auch nach Terroranschlägen entdeckt (Blanchette et al. 2007; ▶ Zur Vertiefung 15.3).

Änderung von Überzeugungen

Wie bereit sind wir, einmal vorgenommene Schlussfolgerungen und Überzeugungen zu ändern? Diese Frage hat viel mit logischem Denken zu tun und spielt bei vielen politischen und gesellschaftlichen Debatten eine Rolle. Ein gutes Beispiel sind umweltbezogene Themen. Erinnern wir uns an die Theorie präferierter mentaler Modelle aus ▶ Abschn. 15.3.5. Diese Arbeiten haben gezeigt, dass Menschen bei mehrdeutigen Aussagen oft nur eine mögliche Interpretation berücksichtigen, jedoch andere weitgehend ignorieren. Rauh (2000) untersuchte, wie Menschen mit solchen unsicheren logischen Schlüssen umgehen, die sich auf Umweltprobleme beziehen. In seinem Experiment erhielten zwei Gruppen von Versuchsteilnehmern unterschiedliche Instruktionen. Eine Gruppe wurde instruiert, sich in die Lage eines *Chemiefabrikanten* zu versetzen. Die zweite Gruppe sollte die Perspektive eines *Umweltschützers* einnehmen. Anschließend wurde beiden Gruppen erklärt, dass von einer Chemiefabrik verschiedene Chemikalien in einen Fluss emittiert werden, die der Einfachheit halber als rote, grüne und blaue Substanz bezeichnet wurden. Den Teilnehmern wurde gesagt, dass eine Gefahr für die Umwelt besteht, wenn sich die rote und die blaue Substanz in einem Flussabschnitt überlappen und dadurch vermischt werden. Anschließend mussten die Probanden Schlüsse aus mehrdeutigen Aussagen ziehen, die entweder keine Mischung oder eine gefährliche Durchmischung der roten und blauen Chemikalie nahelegten. Rauh (2000) berichtet, dass alle „Chemiefabrikanten" die Interpretation wählten, aus der keine Gefahr für die Umwelt folgt, weil sich die rote und blaue Substanz nicht überlappen (100 %). Hingegen entscheiden sich fast alle „Umweltschützer" für die Interpretation, bei der eine Gefahr für die Umwelt bestand, weil sich die rote und blaue Substanz überlappen (97 %). Die Schlussfolgerungen hingen also von der jeweiligen Interessenlage der Probanden ab. Zudem benötigten die Probanden signifikant mehr Zeit für die Entscheidung, wenn sie die beschriebene Situation „uminterpretieren" mussten, damit der Schluss ihrer „gewünschten Lösung" entsprach. Schneider (2010) berichtet ähnliche Abhängigkeiten von den eigenen Überzeugungen beim konditionalen Schließen. Dabei machten „Chemiefabrikanten" und „Umweltschützer" jeweils mehr Fehler, wenn der aussagenlogisch korrekte Schluss ihren Überzeugungen widersprach. Knauff (2013b) hat diese Ergebnisse zu der Frage in Beziehung gesetzt, wie Menschen Informationen über die globale Erwärmung interpretieren und wie bestimmte Interessengruppen versuchen, die öffentliche Meinung in ihre Richtung zu beeinflussen. Solche Themen haben eine beträchtliche Relevanz für viele soziale und politische Fragestellungen und werden zunehmend auch von der Kognitions- und Denkpsychologie behandelt (z. B. Lewandowsky 2016; Lewandowsky et al. 2013).

Überzeugen und Argumentieren

Mit dem letzten Anwendungsbeispiel wenden wir uns noch einmal der Einleitung zu diesem Kapitel zu. Dort wurde bereits dargestellt, dass Logik und Argumentieren untrennbar verbunden sind. Das vorliegende Kapitel hat sich mehr auf das logische Denken konzentriert. Eine der wichtigsten praktischen Anwendungen der Logik spielt aber für unser tägliches Zusammenleben eine enorm wichtige Rolle. Bestimmt ist es Ihnen auch schon passiert, dass jemand versuchte, Sie von etwas zu überzeugen, Sie aber den Eindruck nicht loswurden, dass an der Argumentation Ihres Gegenübers etwas nicht stimmte. Daraus, dass etwas der Fall ist, ließ sich doch das andere gar nicht ableiten, wie Ihr Gegenüber behauptete. Oder Sie fanden, dass sich die Argumente Ihres Widersachers doch irgendwie widersprachen. Trotzdem

Zur Vertiefung 15.3

Hochgradig emotionale Ereignisse können zu besseren Denkleistungen führen

Bei den Terroranschlägen am 7. Juli 2005 in London wurden 56 Menschen (einschließlich der vier Attentäter) getötet. Hunderte Menschen wurden bei den Anschlägen verletzt. Während des morgendlichen Berufsverkehrs kam es innerhalb kürzester Zeit zu insgesamt vier Explosionen und damit zu den schwersten islamistischen Terroranschlägen in der Geschichte Großbritanniens (Abb. 15.18 und Abb. 15.19).

Die Kognitionspsychologin Blanchette et al. (2007) baten einige Zeit später Menschen, die den Anschlag aus nächster Nähe mitbekommen hatten und aufgrund dessen starke Emotionen aufwiesen, an einem Experiment zum logischen Denken teilzunehmen. Eine Kontrollgruppe war nicht in direkter Nähe gewesen und dadurch weniger emotional beteiligt. Das erste Experiment fand eine Woche nach den Anschlägen statt. Die Probanden mussten Syllogismen mit unterschiedlichen Inhalten bearbeiten, darunter Aufgaben mit neutralem und emotionalem Inhalt, wobei bei den emotionalen Inhalten entweder generell emotional behaftete Themen oder das Thema „Terror" aufgegriffen wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass Personen, die den Terroranschlag aus nächster Nähe miterlebt hatten, die Syllogismen besser lösten, die um das Thema „Terror" kreisten. Das Experiment wurde ein halbes Jahr nach den Terroranschlägen wiederholt. Dabei wurden Syllogismen, die das Thema „Terror" beinhalteten, wieder besser von denjenigen bearbeitet, die damals direkt an den Anschlagsorten gewesen waren. Warum ist der Effekt so stabil über die Zeit hinweg? Anscheinend sind die schrecklichen Ereignisse nicht nur im Gedächtnis präsenter, wenn jemand sich in direkter Nähe befand. Die direkte Betroffenheit scheint sogar zu grundsätzlichen Änderungen des Denkstils bezüglich des Themas „Terror" geführt zu haben (Blanchette et al. 2007).

Abb. 15.18 Russell Square in London kurz nach den Terroranschlägen vom 7. Juli 2005. (Foto: Francis Tyrus – CC BY-SA 3.0)

Abb. 15.19 Im Londoner Hyde Park erinnern 52 Säulen an die Opfer der Terroranschläge vom 7. Juli 2005. (Foto: Hahnchen – CC BY-SA 3.0)

kamen Sie nicht weiter, weil Sie Widersprüche und Fehler in der Argumentation nicht nachweisen konnten. Schlimmer wird es noch, wenn Ihr Gegenüber laut wird oder versucht, Sie durch seine Machtposition oder verbale Angriffe einzuschüchtern. Wir alle kennen diese Situationen, in denen wir angesichts des unfairen Argumentationsstils eines Widersachers aus der Haut fahren könnten. Viel besser, als sich zu ärgern, wäre es aber, wenn Sie einen kühlen Kopf bewahren und Ihrem Gegenüber ganz cool und unwiderlegbar darlegen könnten, wo sich seine Argumente widersprechen und wo er ungültige, fehlerhafte Schlussfolgerungen vornimmt. In dieser Situation ist die Logik eine mächtige Waffe. Sie hilft Ihnen allein aufgrund der formalen Struktur eines Arguments darzulegen, ob eine Schlussfolgerung gültig ist oder nicht. In diesem Kapitel haben Sie viel darüber gelernt, wie man Logik auch für das Argumentieren verwenden kann. Sie werden sehen, mit etwas Erfahrung hilft Ihnen die Logik auch im Alltag, fair zu argumentieren und schlechte Argumente abzuwehren. Das bedarf nur ein wenig Übung, aber der Grundstein ist gelegt. Eine klassische Einführung in die Argumentationstheorie bietet Toulmin (1996).

15.7 Ausblick

Dieses Kapitel über das logische Denken hat gezeigt, was die wissenschaftliche Psychologie so besonders und spannend macht. Einerseits hat die Psychologie ihre Ursprünge in der Philosophie, und bis heute sind beide Fächer eng miteinander verbunden. Im vorliegenden Kapitel ging es dabei um die grundlegenden Prinzipien, Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen rationalen Denkens und richtigen Schlussfolgerns. Andererseits geht die Psychologie methodisch andere Wege als die Philosophie, denn sie versucht, das Erleben, Denken und Handeln von Menschen sowie die zugrunde liegenden Informationsverarbeitungsprozesse mit experimentellen Methoden zu begreifen. Denkpsychologen interessieren sich dabei besonders für die kognitiven Prozesse, die erklären, wie wir denken, entscheiden, urteilen und Probleme lösen. Für die Zukunft stellen sich dabei vor allem drei Fragen:

- Es muss sich noch herausstellen, welchen Beitrag *neurowissenschaftliche Methoden* tatsächlich zum Verständnis menschlicher Rationalität und Irrationalität leisten können. Nach einer Zeit der Euphorie ist inzwischen eine realistischere Bewertung erkennbar. Zwar muss jedem psychischen Zustand und jeder rationalen oder irrationalen Entscheidung ein neuronaler Informationsverarbeitungsprozess zugrunde liegen. Über diesen wissenschaftlichen Allgemeinplatz hinaus sind aber viele Probleme des Reduktionismus (der Erklärung psychischer Phänomene allein aufgrund physischer Phänomene) noch ungelöst und können vielleicht nie gelöst werden (Habermas 2004; Kim 2007; Übersicht in Metzinger 2007). Die Lokalisierung kognitiver Prozesse im Gehirn bringt die (Denk-)Psychologie jedenfalls nur weiter, wenn sich daraus neue Erkenntnisse über die kognitiven Prozesse beim Schlussfolgern ergeben.
- Die kognitionspsychologische Erforschung menschlicher Rationalität hat sich bisher vor allem auf das Denken und Entscheiden *einzelner Individuen* fokussiert. Viele unserer Entscheidungen im Alltag treffen wir aber nicht allein, sondern zusammen mit anderen Menschen. Die Sozialpsychologie erforscht seit Langem einige dieser Phänomene (Janis und Frick 1943; Gawronski und Strack 2012). Damit wird aber die grundsätzliche Frage nicht beantwortet, welchen ontologischen Status wir der Rationalität beimessen, die auf zwischenmenschlicher Interaktion beruht. Müssen zur Beschreibung dieser sozialen Rationalität andere ontologische Konzepte eingeführt werden, oder lässt sich „geteilte Rationalität" mit den bekannten individualistischen Konzepten beschreiben? In anderen Bereichen der Kognitionswissenschaft werden derartige Fragen inzwischen breit diskutiert (Gallotti und Frith 2013; Tomasello 2009).
- Die größte Frage der Denkpsychologie wird sich vermutlich am Verhältnis von normativen und deskriptiven Theorien der Rationalität festmachen. In der Philosophie und Künstlichen Intelligenz wurden bereits einige Rationalitätskonzepte durch das natürliche Schließen von Menschen inspiriert. Empirisch beobachtbares Verhalten hat also bereits diese formalen Theorien des Schlussfolgerns beeinflusst. Derzeit gibt es in der Philosophie eine neue „kognitive Wende", die auch für die Zusammenarbeit mit der Psychologie sehr nützlich ist (Bishop und Trout 2005; Goldman 2006). Die Psychologie kann viel zu dieser Zusammenarbeit beisteuern. Es zeichnet sich bereits ab, dass unser Fach einen Beitrag dazu leisten kann, was wir als rational oder irrational betrachten wollen. Diese Entwicklung wird sich fortsetzen, und die Trennung von normativen und deskriptiven Theorien wird fließender werden (www.spp1516.de).

Wohin diese Entwicklungen führen, können wir heute noch nicht sagen. Gerade zum dritten Thema, dem Verhältnis von normativen und deskriptiven Theorien der Rationalität, sind noch viele Punkte strittig. So ist insbesondere fraglich, ob es die Psychologie wirklich weiterbringt, wenn jede Art menschlichen Denkens und Entscheidens als rational betrachtet wird, solange es wenig kostet und der Anpassung an die Umwelt dient.

Viele der berichteten Forschungsergebnisse zeigen, dass Menschen oft durchaus in der Lage sind logisch und rational zu denken, auch wenn die Beschränkungen des kognitiven Systems dies manchmal verhindern. So „unlogisch" oder „irrational" sind wir also gar nicht. Zukünftig kommt es deshalb weniger auf die Frage an, *ob* Menschen von Natur aus rational oder irrational sind. Wissenschaftlich interessanter ist die Frage, *was* wir als rational betrachten wollen und welche kognitiven Beschränkungen dabei berücksichtigt werden sollten. Wie wir diese Frage beantworten, hat viel mit unserem Menschenbild zu tun und ist weit über die Psychologie hinaus von großer Bedeutung.

15.8 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Beim logischen Denken werden Beziehungen zwischen wahren Aussagen (Argumenten, Prämissen) hergestellt, sodass daraus weitere wahre Aussagen (Konklusionen) folgen.

- Beim sicheren logischen Schließen ist eine Konklusion mit Sicherheit wahr oder falsch, und eine einmal vorgenommene Inferenz kann nicht zurückgenommen werden.
- Beim unsicheren logischen Schließen kann die Konklusion neben wahr und falsch weitere Wahrheitswerte besitzen, und eine vorgenommene Inferenz kann revidiert werden, wenn ihr neue Argumente widersprechen.
- Menschen halten sich oft an die normativen Vorgaben klassischer Logiken, weichen aber manchmal auch systematisch von diesen Vorgaben ab; wenn Menschen von diesen Normen abweichen, werden sowohl logisch gültige Schlussfolgerungen zurückgewiesen als auch ungültige Schlussfolgerungen akzeptiert.
- In sprachbasierten Theorien des logischen Denkens wird meistens davon ausgegangen, dass Menschen zu Konklusionen kommen, indem sie abstrakte mentale Beweise durchführen, bei denen syntaktische logische Regeln auf die Prämissen angewandt werden.
- In visuell-räumlichen Theorien des logischen Denkens wird davon ausgegangen, dass Menschen die Bedeutung der Prämissen verwenden, um sich mental vorzustellen (zu simulieren), was der Fall ist, wenn die Prämissen wahr sind. Die wichtigste visuell-räumliche Theorie des logischen Denkens ist die Theorie mentaler Modelle.
- Gemäß der Theorie mentaler Modelle konstruieren Menschen beim logischen Schließen zunächst möglichst sparsame mentale Modelle der Prämissen, die dann nach neuen Informationen abgesucht werden, um zu einer vorläufigen Konklusion zu kommen; diese Konklusion wird dann validiert, indem überprüft wird, ob keine anderen Interpretationen der Prämissen möglich sind.
- Logisches Denken wird mit ausgedehnten neuronalen Netzwerken in Verbindung gebracht, die weite Teile des temporalen, frontalen und parietalen Cortex umfassen und sich unterscheiden, je nachdem ob abstrakte logische Schlüsse oder inhaltlich plausible oder unplausible Schlüsse gezogen werden müssen.
- Die Darstellung logischer Zusammenhänge anhand von Diagrammen kann zu besseren Leistungen beim Schließen führen, aber die Konstruktion mentaler bildhafter Vorstellungen kann das Denken beeinträchtigen.
- Die Frage, ob logisches Denken auch rationales Denken ist, wird seit Langem diskutiert, hat aber durch die probabilistischen und heuristischen Alternativkonzepte an Bedeutung gewonnen.

Schlüsselbegriffe

Abstrakte Regeln (*abstract rules*) Inhaltsfreie Regeln in der mentalen Logiktheorie, die mit der formalen Logik übereinstimmen.

Anfechtbares Schließen (*defeasible reasoning*) Unsicheres Schließen, bei dem eine Konklusion gilt, bis sie angefochten wird.

Aussagenlogik (*propositional calculus*) Teilgebiet der formalen Logik, das in der Denkpsychologie verwendet wird, um festzulegen, welche konditionalen Schlüsse logisch gültig sind.

Bestätigungsfehler (*confirmation bias*) Tendenz von Menschen nur Beobachtungen zu erzeugen, die ihren Hypothesen entsprechen.

Deduktives Schließen (*deductive reasoning*) Sicheres Schließen, bei dem von wahren Prämissen auf mit Sicherheit wahre Konklusionen geschlossen wird.

Gültigkeit (*validity*) Die Gültigkeit eines Schlusses hängt allein von dessen logischer Form ab. Gültigkeit ist von Wahrheit zu unterscheiden. Ein logischer Schluss kann gültig sein, aber nicht wahr. Wenn z. B. die Prämissen falsch sind, kann zwar der Schluss gültig, aber die Konklusion falsch sein. Anderseits kommt man von inhaltlich wahren Argumenten mit gültigen Schlüssen zu weiteren wahren Argumenten.

Induktives Schließen (*inductive reasoning*) Unsicherer Schluss, bei dem die Konklusion zwar wahrscheinlich, aber nicht zwingend aus den Prämissen folgt (z. B. Ableitung allgemeiner Gesetze aus Beobachtungen).

Inhaltseffekt (*belief bias*) Inhaltlich glaubhafte Konklusionen werden häufiger (manchmal fälschlich) als logisch gültig akzeptiert als unglaubwürdige Konklusionen; unglaubwürdige Konklusionen werden häufiger (manchmal fälschlich) als logisch ungültig verworfen als glaubwürdige Konklusionen.

Junktor (*junctor*) Operator zur Verbindung von Argumenten in der Aussagenlogik und beim konditionalen Schließen.

Kategorischer Syllogismus (*categorical syllogism*) Schlussfigur für kategorische Aussagen mit Quantoren.

Konditionales Schließen (*conditional reasoning*) Schließen mit Prämissen (Argumenten), die durch *wenn … dann* verbunden sind.

Logik (*logic*) Laut Spock der Anfang aller Weisheit, nicht das Ende (*Star Trek* VI, 1991).

Mentales Modell (*mental model*) Integrierte Repräsentation der Prämissen, aus der eine logisch gültige Konklusion abgelesen werden kann.

Monotonie (*monotonicity*) Eine weitere Information (Prämisse, Argument) kann nie dazu führen, das man weniger weiß als vorher.

Nichtmonotonie (*non-monotonicity*) Eine weitere Information (Prämisse, Argument) kann dazu führen, das man weniger weiß als vorher bzw. eine logisch gültige Schlussfolgerung zurücknimmt.

Prädikatenlogik (*predicate calculus*) Teilgebiet der formalen Logik, das in der Denkpsychologie verwendet wird, um festzulegen, welche syllogistischen Schlüsse logisch gültig sind.

Präferiertes mentales Modell (*preferred mental model*) Modell, das als Erstes aus den Prämissen generiert wird.

Pragmatisches Schema (*pragmatic schema*) Schema, das nur in bestimmten Situationen aktiviert wird und dann richtige Schlussfolgerungen erlaubt.

Quantor (*quantifier*) Operator, der Mengenangaben über die Anzahl von Objekten macht, für die eine Aussage gilt.

Relation (*relation*) Operator, der Beziehungen und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Dingen oder Ereignissen herstellt.

Relationales Schließen (*relational reasoning*) Schließen mit Prämissen (Argumenten), bei denen Dinge verglichen und durch Relationen in Verbindung gebracht werden.

Syllogistisches Schließen (*syllogistic reasoning*) Schließen mit Prämissen (Argumenten), die durch die Quantoren *alle*, *einige*, *kein* verbunden werden.

Überzeugungsänderung (*belief revision*) Art des logischen Schließens, bei dem eine Konklusion zurückgezogen wird, weil ihr neuere Informationen (Prämissen, Argumente) widersprechen.

Visueller Beeinträchtigungseffekt (*visual impedance effect*) Visuelle Vorstellungen können zu mehr Fehlern und längeren Entscheidungszeiten beim logischen Denken führen.

Wahrheitstabelle (*truth table*) Tabellarische Darstellung des Wahrheitswertverlaufs logischer Aussagen in der Aussagenlogik. Die Wahrheitstabelle zeigt den Wahrheitswert einer Gesamtaussage auf der Basis der nicht weiter zerlegbaren Teilaussagen.

Wahrheitswert (*truth value*) Logischer Wert, der in der klassischen Logik ausdrückt, ob eine Aussage „wahr" oder „falsch" ist. Der Wahrheitswert einer Aussage hat mit ihrer Bedeutung zu tun. Der Wahrheitswert einer zusammengesetzten Aussage ergibt sich aus den Wahrheitswerten der Teilaussagen. In nichtklassischen Logiken gibt es mehr als zwei Wahrheitswerte.

Weiterführende Literatur

Braine, M. D. S., & O'Brien, D. P. (1998). *Mental logic*. Mahwah, NJ: Erlbaum. (Standardwerk zur Theorie mentaler Beweise.)

Gigerenzer, G. & Selten, R. (2002). *Bounded rationality: The adaptive toolbox* Cambridge, MA, US: The MIT Press. (Standardwerk zu heuristischem Denken.)

Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press. (Standardwerk zur Theorie mentaler Modelle.)

Johnson-Laird, P. N. (2006). *How we reason*. New York, NY, US: Oxford University Press. (Leicht verständliche Einführung in die mentalen Modelltheorie und ihre Anwendung auf viele Alltagsprobleme.)

Johnson-Laird, P. & Byrne, R. M. J. (1991). *Deduction*. Hove (UK): Erlbaum. (Standardliteratur zum deduktiven Schließen.)

Knauff, M. (2013). *Space to reason: A spatial theory of human thought*. Cambridge, MA: The MIT Press. (Zur Rolle visueller Vorstellungen und präferierter mentaler Modelle beim Denken.)

Manktelow, K. I. (1999). *Reasoning and thinking*. Hove (UK): Psychology Press. (Eine noch immer gute Übersicht der Forschung zum logischen Denken und darüber hinaus.)

Manktelow, K., Over, D., & Elqayam, S. (2011). *The science of reason: A festschrift for Jonathan St B. T. Evans*. New York, NY, US: Psychology Press. (Eine gute Sammlung von Aufsätzen zu vielen Themen der Denkpsychologie.)

Oaksford, M., & Chater, N. (2007). *Bayesian rationality the probabilistic approach to human reasoning*. New York, NY: Oxford University Press. (Standardwerk zu bayesianischem Denken.)

Webseiten

- http://www.cognitivesciencesociety.org/ – Homepage der Cognitive Science Society mit Tagungsankündigungen, Newsletter und Link zur Zeitschrift *Cognitive Science*.
- http://cogprints.soton.ac.uk/ – Umfangreiches Archiv elektronischer Artikel im Bereich der *Cognitive Science*.
- http://www.gk-ev.de/ – Homepage der Deutschen Gesellschaft für Kognitionswissenschaft mit Tagungsankündigungen, Stellenangeboten, Newsletter.
- http://www.spp1516.de – Webseite des Schwerpunktprogramms „New Frameworks of Rationality" der Deutschen Forschungsgemeinschaft.
- http://plato.stanford.edu/index.html –Online-Enzyklopädie der Philosophie und vieler angrenzender Disziplinen.
- http://www.tcd.ie/Psychology/Ruth_Byrne/mental_models/index.html – *Mental Models Website* mit Informationen über die Hauptvertreter und Publikationen der mentalen Modelltheorie.

Danksagung

Wir danken Andreas Reis, Jessica Dehler, Emmanuelle Dietz, Lupita Estefania Gazzo Castaneda, Hilde Haider, Steffen Hölldobler, Klaus Oberauer und Marco Ragni herzlich für die vielen hilfreichen Kommentare und Anregungen zu einer früheren Manuskriptversion dieses Kapitels. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Schwerpunktprograms „New Frameworks of Rationality" von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (SPP1516).

Literatur

Adams, E. W. (1975). *The logic of conditionals*. Dordrecht: Reidel.

Adams, E. W. (1998). *A primer of probability logic*. Stanford: CSLI Publications.

Andersen, R. A. (1997). Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *352*, 1421–1428.

Anderson, J. R. (1990). *The adaptive character of thought*. Hillsdale, N.J: Erlbaum.

Anderson, J. R. (1991). Is human cognition adaptive? *Behavioural and Brain Sciences*, *14*, 471–517.

Alchourrón, C. E., Gärdenfors, P., & Makinson, D. (1985). On the logic of theory change: Partial meet contraction and revision functions. *Journal of Symbolic Logic*, *50*, 510–530.

Allwein, G., & Barwise, J. (1996). *Logical reasoning with diagrams*. New York: Oxford University Press.

Antoniou, G. (1997). *Nonmonotonic reasoning*. Cambridge, MA: MIT Press.

Bäcker, C. (2010). Rules, principles, and defeasibility. In M. Borowski (Hrsg.), *On the Nature of Legal Principles*. Stuttgart: Franz Steiner.

Bagusche, S. (2013). *Einführung in die nicht-sprachliche Logik*. Frankfurt: Ontos.

Bara, B. G., Bucciarelli, M., & Johnson-Laird, P. N. (1995). Development of syllogistic reasoning. *The American Journal of Psychology*, *108*(2), 157–193.

Barwise, & Etchemendy, J. (1994). *Hyperproof*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.

Bauer, M. I., & Johnson-Laird, P. N. (1993). How diagrams can improve reasoning. *Psychological Science*, *4*, 372–378.

Beck, A. T. (1967). *Depression: Causes and treatment. Philadelphia*. Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.

Beierle, C., & Kern-Isberner (2008). *Methoden wissensbasierter Systeme – Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Begg, I. (1987). Some. *Canadian Journal of Psychology*, *41*, 62–73.

Begg, I., & Harris, G. (1989). On the interpretation of syllogisms. *Journal of Verbal Learning and Learning Behaviour*, *21*, 595–620.

Bell, V. A., & Johnson-Laird, P. N. (1998). A model theory of modal reasoning. *Cognitive Science*, *22*(1), 25–51.

Beller, S., & Spada, H. (2003). The logic of content effects in propositional reasoning: The case of conditional reasoning with a point of view. *Thinking and Reasoning*, *9*(4), 335–378.

Bishop, M. A., & Trout, J. D. (2005). *Epistemology and the psychology of human judgment* (S. 148–152). Oxford: Oxford University Press.

Blanchette, I. (2013). *Emotion and reasoning*. UK: Hove: Psychology Press.

Blanchette, I., Richards, A., Melnyk, L., & Lavda, A. (2007). Reasoning about emotional contents following shocking terrorist attacks: A tale of three cities. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *13*, 47–56.

Blanchette, I., Lindsay, P., & Davies, S. (2008). *Conditional reasoning about highly emotional events: Victims of sexual abuse*. 6th International Conference on Thinking, Venice, Italy, August 21 – 23 2008.

Bonatti, L. (1994). Why should we abandon the mental logic hypothesis? *Cognition*, *50*(1), 17–39.

Bonnefon, J.-F., & Hilton, D. J. (2001). *Formalizing human uncertain reasoning with default rules: A psychological conundrum and a pragmatic suggestion. In*. ECSQARU '01 Proceedings of the 6th European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty. (S. 628–634). Berlin: Springer.

Boole (1854). *1953). An investigation of the laws of thought*. New York: Dover Publications.

Braine, M. D., & O'Brien, D. P. (1991). A theory of if: A lexical entry, reasoning program, and pragmatic principles. *Psychological Review*, *98*, 182–203.

Braine, M. D. S., & O'Brien, D. P. (1998). *Mental logic*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Brewka, G. (1991). Cumulative default logic: In defense of non-monotonic inference rules. *Artificial Intelligence*, *50*(2), 183–205.

Butcher, J. N., Mineka, S., & Hooley, J. M. (2009). *Klinische Psychologie*. München: Pearson.

Byrne, R. M. (1989). Suppressing valid inferences with conditionals. *Cognition*, *31*, 61–83.

Byrne, R. M., & Johnson-Laird, P. N. (1989). Spatial reasoning. *Journal of Memory & Language*, *28*, 564–575.

Caramazza, A., Gordon, J., Zurif, E. B., & De Luca, D. (1976). Right hemispheric damage and verbal problem solving behavior. *Brain and Language*, *3*, 41–46.

Ceraso, J., & Profitera, A. (1971). Sources of error in syllogistic reasoning. *Cognitive Psychology*, *2*, 400–410.

Chan, D., & Chua, F. (1994). Suppression of valid inferences: Syntactic views, mental models, and relative salience. *Cognition*, *53*, 217–238.

Chapman, L. J., & Chapman, J. P. (1959). Atmosphere effect re-examined. *Journal of Experimental Psychology*, *58*, 220–226.

Chase, V. M., Hertwig, R., & Gigerenzer, G. (1998). Visions of rationality. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 206–214.

Chater, N., & Oaksford, M. (1999). The probability heuristic model of syllogistic reasoning. *Cognitive Psychology*, *38*(2), 191–258.

Cheng, P. W., & Holyoak, K. J. (1985). Pragmatic reasoning schemas. *Cognitive Psychology*, *17*, 391–416.

Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax*. Cambridge, MA: MIT Press.

Clark, H. H. (1969). Linguistic processes in deductive reasoning. *Psychological Review*, *76*, 387–404.

Clark, D. A., Beck, A. T., & Alford, B. A. (1999). *Scientific foundations of cognitive theory and therapy of depression*. New York: Wiley.

Clement, C. A., & Falmagne, R. J. (1986). Logical reasoning, world knowledge, and mental imagery: Interconnections in cognitive processes. *Memory & Cognition*, *14*, 299–307.

Cohen, L. J. (1981). Can human irrationality be experimentally demonstrated? *Behavioral and Brain Sciences*, *4*(3), 317–331.

Cosmides, L. (1989). The logic of social exchange: Has natural selection shaped how humans reason? Studies with the Wason selection task. *Cognition*, *31*, 187–276.

Craik, K. (1943). *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.

Cummins, D. D. (1995). Naive theories and causal deduction. *Memory & Cognition*, *23*, 646–658.

Cummins, D. D., Lubart, T., Alksnis, O., & Rist, R. (1991). Conditional reasoning and causation. *Memory & Cognition*, *19*, 274–282.

Demeure, V., Bonnefon, J.-F., & Raufaste, E. (2009). Politeness and conditional reasoning: Interpersonal cues to the indirect suppression of deductive inferences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*, 260–266.

De Neys, W. (2014). Conflict detection, dual processes, and logical intuitions: Some clarifications. *Thinking & Reasoning*, *20*, 169–187.

De Neys, W., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2003a). Inference suppression and semantic memory retrieval: Every counterexample counts. *Memory & Cognition*, *31*, 581–595.

De Neys, W., Schaeken, W., & d'Ydewalle, G. (2003b). Causal conditional reasoning and strength of association: The disabling condition case. *European Journal of Cognitive Psychology*, *15*, 161–176.

De Neys, W., Vartanian, O., & Goel, V. (2008). Smarter than we think: When our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, *19*, 483–489.

Dickstein, L. S. (1978). The effect of figure on syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, *6*, 76–83.

Dietz, E.-A., Hölldobler, S., & Ragni, M. (2012). A computational logic approach to the suppression task. In N. Miyake, D. Peebles, & R. P. Cooper (Hrsg.), *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 1500–1505). Austin, TX: Cognitive Science Society.

Dietz, E.-A., Hölldobler, S., & Ragni, M. (2013). *A computational logic approach to the abstract and the social case of the selection task*. Proceedings Eleventh International Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning.

Dieussaert, K., Schaeken, W., De Neys, W., & d'Ydewalle, G. (2000). Initial belief state as a predictor of belief revision. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, *19*(3), 277–288.

Eemeren, F. H. van, & Grootendorst, R. (2004). *A systematic theory of argumentation. The pragma-dialected approach*. Cambridge: Cambridge University Press.

Ehrlich, K., & Johnson-Laird, P. N. (1982). Spatial descriptions and referential continuity. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *21*, 296–306.

Elio, R., & Pelletier, F. J. (1997). Belief change as propositional update. *Cognitive Science*, *21*(4), 419–460.

Elqayam, S., & Evans, J. St. B. T. (2011). Subtracting 'ought' from 'is': Descriptivism versus normativism in the study of human thinking. *Behavioral and Brain Sciences*, *34*, 233–248.

Elqayam, S., & Over, D. (2012). Probabilities, beliefs, and dual processing: The paradigm shift in the psychology of reasoning. *Mind and Society*, *11*(1), 27–40.

Evans, J. S. B. T. (1977). Linguistic factors in reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *29*, 297–306.

Evans, J. S. B. T. (1989). *Bias in human reasoning*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum.

Evans, J. S. B. T. (1993a). The mental model theory of conditional reasoning: Critical appraisal and revision. *Cognition*, *48*(1), 1–20.

Evans, J. S. B. T. (1993b). Bias and rationality. In K. I. Manktelow, & D. E. Over (Hrsg.), *Rationality*. London: Routledge.

Evans, J. S. B. T. (2002). Logic and human reasoning: An assessment of the deduction paradigm. *Psychological Bulletin*, *128*, 978–996.

Evans, J. S. B. T. (2003). In two minds: dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*, 454–459.

Evans, J. S. B. T. (2012). Questions and challenges for the new psychology of reasoning. *Thinking & Reasoning*, *18*, 5–31.

Evans, J. S. B. T., & Over, D. E. (2004). *If*. Oxford: Oxford University Press.

Evans, J. S. B. T., Barston, J. L., & Pollard, P. (1983). On the conflict between logic and belief in syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, *11*, 295–306.
Evans, J. S. B. T., Newstead, S. E., & Byrne, R. M. J. (1993). *Human reasoning. The psychology of deduction*. Hove (UK): Lawrence Erlbaum Associates.
Evans, J. S. B. T., Handley, S. H., & Over, D. E. (2003). Conditionals and conditional probability. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*, 321–355.
Eysenck, M. W. (1985). Anxiety and cognitive-task performance. *Personality and Individual Differences*, *6*, 579–586.
Eysenck, M. W., & Calvo, M. G. (1992). Anxiety and performance: The processing efficiency theory. *Cognition & Emotion*, *6*, 409–434.
Feather, N. T. (1964). Acceptance and Rejection of Arguments in relation to attitude strength, critical ability, and intolerance of inconsistency. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *69*, 127–136.
Fine, C. (2011). Zielorientiertes Integrationsmodell – ein kognitives Therapiemodell für die Behandlung der dissoziativen Identitätsstörung. In L. Reddemann, A. Hofmann, & U. Gast (Hrsg.), *Psychotherapie der dissoziativen Störungen* 3. Aufl. Stuttgart: Thieme.
Forbes, G. (1994). *Modern logic: A text in elementary symbolic logic*. Oxford: Oxford University Press.
Ford, M., & Billington, D. (2000). Strategies in human nonmonotonic reasoning. *Computational Intelligence*, *16*(3), 349–4.
Frege, G. (1879/1993). Begriffsschrift. In Angelelli, I. (Hrsg.), *Begriffsschrift und andere Aufsätze*.Hildesheim: Olms Georg AG.
Freksa, C. (1992). Temporal reasoning based on semi-intervals. *Artificial Intelligence*, *54*, 199–227.
Friederici, A. D. (2012). The cortical language circuit: From auditory perception to sentence comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(5), 262–268.
Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in cognitive sciences*, *17*(4), 160–165.
Gärdenfors, P. (1992). Belief revision: An introduction. In P. Gärdenfors (Hrsg.), *Belief revision* (S. 1–28). Cambridge: Cambridge University Press.
Gärdenfors, P., & Makinson, D. (1988). *Revisions of knowledge systems using epistemic entrenchment*. Proceedings of the 2nd conference on Theoretical aspects of reasoning about knowledge. (S. 83–95). San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc..
Gärdenfors, P., & Rott, H. (1995). Belief revision. In D. M. Gabbay, C. J. Hogger, & J. A. Robinson (Hrsg.), *Handbook of Logic in Artificial Intelligenceand Logic Programming* (Bd. IV, S. 35–132). Oxford: Oxford University Press.
Garnham, A., & Oakhill, J. (1994). *Thinking and reasoning*. Oxford, UK: Blackwell.
Gawronski, B., & Strack, F. (2012). *Cognitive consistency: A fundamental principle in social cognition*. New York, NY: Guilford Press.
Gazzo Castaneda, L. E., & Knauff, K. (2016a). Defeasible reasoning with legal conditionals. *Memory & Cognition*, *44*(3), 499–517.
Gazzo Castaneda, L. E., & Knauff, K. (2016b). When *will* is not the same as *should* the role of modals in reasoning with legal conditionals. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *69*(8), 1480–1497.
Gigerenzer, G., & Brighton, H. (2009). Homo heuristicus: Why biased minds make better inferences. *Topics in Cognitive Science*, *1*(1), 107–143.
Gigerenzer, G., & Hug, K. (1992). Domain-specific reasoning: Social contracts, cheating, and perspective change. *Cognition*, *43*(2), 127–171.
Gigerenzer, G., & Selten, R. (2002). *Bounded Rationality. The adaptive toolbox*. London: The MIT Press.
Gigerenzer, G., Hertwig, R., & Pachur, T. (Hrsg.). (2011). *Heuristics: The foundations of adaptive behavior*. New York: Oxford University Press.
Goel, V. (2007). Anatomy of deductive reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*, 435–441.
Goel, V., & Dolan, R. J. (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, *87*(1), 11–22.
Goel, V., Gold, B., Kapur, S., & Houle, S. (1998). Neuroanatomical correlates of human reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 293–302.
Golding, E. (1981). The effect of unilateral brain lesion on reasoning. *Cortex*, *17*, 31–40.
Goldman, A. (2006). *Simulating minds. The philosophy, psychology, and neuroscience of mindreading*. Oxford: Oxford University Press.
Goodwin, G. P., & Johnson-Laird, P. N. (2005). Reasoning about relations. *Psychological Review*, *112*, 468–493.
Gordon, R. L. (1953). The effect of attitude toward Russia on logical reasoning. *Journal of Social Psychology*, *37*, 103–111.
Görz, G., Schneeberger, J., & Schmid, U. (Hrsg.). (2013). *Handbuch der Künstlichen Intelligenz* (5. Aufl.). München: Oldenbourg.
Grice, H. P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole, & J. L. Morgan (Hrsg.), *Speech acts* Syntax and semantics, (Bd. III, S. 41–58). New York: Seminar Press.
Griggs, R. A., & Cox, J. R. (1982). The elusive thematic-materials effect in Wason's selection task. *British Journal of Psychology*, *73*, 407–420.
Griggs, R. A., & Cox, J. R. (1993). Permission schemas and the selection task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *46A*, 637–651.
Habermas, J. (2004). Freiheit und Determinismus. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, *52*(6), 871–890.
Harman, G. (1986). *Change in View: Principles of Reasoning*. Cambridge, MA: MIT Press, Bradford Book.
Hasson, U., & Johnson-Laird, P. N. (2003). Why believability cannot explain belief revision. In R. Alterman, & D. Kirsh (Hrsg.), *Proceedings of the 25th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
Hinterecker, T., Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2016). Modality, probability, and mental models. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, Advance online publication. doi: 10.1037/xml0000255.
Hölldobler, S., & Ramli, C. D. P. K. (2009). Logics and networks for human reasoning. In *Artificial Neural Networks-ICANN 2009* (S. 85–94). Berlin: Springer.
Hunter, I. M. L. (1957). The solving of three-term series problems. *British Journal of Psychology*, *48*, 286–298.
Jahn, G., Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2007). Preferred mental models in reasoning about spatial relations. *Memory & Cognition*, *35*, 2075–2087.
James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Holt.
Janis, I. L., & Frick, F. (1943). The relationship between attitudes toward conclusions and errors in judging logical validity of syllogisms. *Journal of Experimental Psychology*, *33*, 73–77.
Jeffrey, R. (1981). *Formal logic: Its scope and limits* (2. Aufl.). New York: McGraw-Hill.
Johnson-Laird, P. N. (1972). The three-term series problem. *Cognition*, *1*, 57–82.
Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press.
Johnson-Laird, P. N. (1995). Mental models, deductive reasoning, and the brain. In M. S. Gazzaniga (Hrsg.), *The cognitive neurosciences* (S. 999–1008). Cambridge, MA: MIT Press.
Johnson-Laird, P. N. (1998). Imagery, visualization, and thinking. In J. Hochberg (Hrsg.), *Perception and Cognition at Century's End* (S. 441–467). San Diego, CA: Academic Press.
Johnson-Laird, P. N. (1999). Deductive reasoning. *Annual Review of Psychology*, *50*, 109–135.
Johnson-Laird, P. N. (2002). Peirce, logic diagrams, and the elementary operations of reasoning. *Thinking & Reasoning*, *8*, 69–95.
Johnson-Laird, P. N. (2006). *How we reason*. New York: Oxford University Press.
Johnson-Laird, P. N. (2010). *Mental models and human reasoning*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 10718243–18250
Johnson-Laird, P. N., & Bara, B. G. (1984). Syllogistic inference. *Cognition*, *16*, 1–61.
Johnson-Laird, P. N., & Byrne, R. M. J. (1991). *Deduction*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
Johnson-Laird, P. N., & Savary, F. (1999). Illusory inferences: a novel class of erroneous deductions. *Cognition*, *7*, 191–229.
Johnson-Laird, P. N., & Steedman, M. (1978). The psychology of syllogisms. *Cognitive Psychology*, *10*, 64–99.
Johnson-Laird, P. N., & Wason, P. C. (1970). A theoretical analysis of insight into a reasoning task. *Cognitive Psychology*, *1*, 134–148.
Johnson-Laid, P. N., Legrenzi, P., & Legrenzi, M. S. (1972). Reasoning and a sense of reality. *British journal of Psychology*, *63*(3), 395–400.
Johnson-Laird, P. N., Legrenzi, P., Girotto, V., & Legrenzi, M. S. (2000). Illusions in reasoning about consistency. *Science*, *288*(5465), 531–532.
Johnson-Laird, P. N., Girotto, V., & Legrenzi, P. (2004). Reasoning from inconsistency to consistency. *Psychological Review*, *111*, 640–661.
Johnson-Laird, P. N., Mancini, F., & Gangemi, A. (2006). A hyper-emotion theory of psychological illnesses. *Psychological review*, *113*(4), 822–841.

Jong, P. J. de, Mayer, B., & Hout, M. A. van den (1997). Conditional reasoning and phobic fear: evidence for a fear-confirming reasoning pattern. *Behavioral Research and Therapy*, *35*, 507–516.

Jung, N., Wranke, C., Hamburger, K., & Knauff, M. (2014). How emotions affect logical reasoning: Evidence from experiments with mood-manipulated participants, spider phobics, and people with exam anxiety. *Frontiers in Emotion Science*, *5*, 1–12. doi:10.3389/fpsyg.2014.00570.

Kahneman (2012). *Schnelles Denken, langsames Denken*. München: Siedler.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, *185*(4157), 1124–1131.

Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (Hrsg.). (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kern, L. H., Mirels, H. L., & Hinshaw, V. G. (1983). Scientists' understanding of propositional logic: an experimental investigation. *Social Studies of Science*, *13*, 131–146.

Khemlani, S., & Johnson-Laird, P. N. (2011). The need to explain. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *64*, 2276–2288.

Khemlani, S., & Johnson-Laird, P. N. (2012). Theories of the syllogism: *A meta-analysis*. *Psychological Bulletin*, *138*, 427–457.

Kim, J. (2007). *Physicalism, or something near enough*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Klauer, K. C., Musch, J., & Naumer, B. (2000). On belief bias in syllogistic reasoning. *Psychological Review*, *107*, 852–884.

Klauer, K. C., Beller, S., & Hütter, M. (2010). Conditional reasoning in context: a dual-source model of probabilistic inference. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *36*(2), 298.

Kleene, S. (1952). *Introduction to Metamathematics*. Amsterdam: North-Holland.

Knauff, M. (1999). The cognitive adequacy of Allen's interval calculus for qualitative spatial representation and reasoning. *Spatial Cognition and Computation*, *1*, 261–290.

Knauff, M. (2006). Deduktion und logisches Denken. In J. Funke (Hrsg.), *Denken und Problemlösen* Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, (Bd. 8, S. 167–264). Göttingen: Hogrefe.

Knauff, M. (2007). How our brains reason logically. *Topio*, *26*, 19–36.

Knauff, M. (2009). A neuro-cognitive theory of deductive relational reasoning with mental models and visual images. *Spatial Cognition and Computation*, *9*(2), 109–137.

Knauff, M. (2013a). *Space to reason. A spatial theory of human thought*. Cambridge, MA: MIT Press.

Knauff, M. (2013b). *Uncertain spatial reasoning about environmental hazards. Invited talk. Workshop „Knowledge, beliefs, representations in understanding climate issues" Paris Consortium Climate-Environment-Society and laboratory Paragraphe*. Paris: CNRS. http://www.gisclimat.fr/en/feedback-workshop-knowledge-beliefs-representations-understanding-climate-issues

Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2002). Visual imagery can impede reasoning. *Memory & Cognition*, *30*, 363–371.

Knauff, M., & May, E. (2006). Mental imagery, reasoning, and blindness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*, 161–177.

Knauff, M., Rauh, R., & Schlieder, C. (1995). Preferred mental models in qualitative spatial reasoning: A cognitive assessment of Allen's calculus. In J. F. Lehman, & J. D. Moore (Hrsg.), *Proc. of the 17th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 200–205). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Knauff, M., Rauh, R., Schlieder, C., & Strube, G. (1998). *Continuity effect and figural bias in spatial relational inference*. Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society. (S. 573–578). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Knauff, M., Mulack, T., & Johnson, M. K. (2000). The neural substrates of spatial thinking: Results from an experiment using functional magnetic resonance imaging. Poster presented at *Seventh Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society*, San Francisco, CA.

Knauff, M., Mulack, T., Kassubek, J., Salih, H. R., & Greenlee, M. W. (2002). Spatial imagery in deductive reasoning: A functional MRI study. *Cognitive Brain Research*, *13*, 203–212.

Knauff, M., Fangmeier, T., Ruff, C. C., & Johnson-Laird, P. N. (2003). Reasoning, models, and images: Behavioral measures and cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*, 559–573.

Knauff, M., Budeck, C., Wolf, A. G., & Hamburger, K. (2010). The illogicality of stockbrokers: Psychological experiments on the effects of prior knowledge and belief biases on logical reasoning in stock trading. *PLoS ONE*, *5*(10), e13483. doi:10.1371/journal.pone.0013483.

Knauff, M., Bucher, L., Krumnack, A., & Nejasmic, J. (2013). Spatial belief revision. *Journal of Cognitive Psychology*, *25*(2), 147–156.

Kneale, W., & Kneale, M. (1962). *The development of logic*. Oxford: Oxford University Press.

Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain*. Cambridge, MA: MIT Press.

Kowalski, R. (2011). *Computational logic and human thinking: how to be artificially intelligent*. New York: Cambridge University Press.

Kraus, S., Lehmann, D., & Magidor, M. (1990). Nonmonotonic reasoning, preferential models and cumulative logics. *Artifcial Intelligence*, *44*, 167–207.

Krems, J., & Bachmaier, M. (1991). Hypothesenbildung und Strategieauswahl in Abhängigkeit vom Expertisegrad. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, *38*(3), 394–410.

Krems, J. F., & Zierer, C. (1994). Sind Experten gegen kognitive Täuschungen gefeit? Zur Abhängigkeit des confirmation bias von Fachwissen. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, *41*(1), 98–115.

Kripke, S. (1963). Semantical considerations on modal logic. *Acta Philosophica Fennica*, *16*, 83–94.

Kuhnmünch, G., & Ragni, M. (2014). Can formal non-monotonic systems properly describe human reasoning? In P. Bello, M. Guarini, M. McShane, & B. Scassellati (Hrsg.), *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 1222–1228). Austin, TX: Cognitive Science Society.

Landau, B., & Jackendoff, R. (1993). "What" and "where" in spatial language and spatial cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, *16*, 217–265.

Lewandowsky, S. (2016). Future global change and cognition. *Topics in Cognitive Science*, *8*(1), 7–18.

Lewandowsky, S., Oberauer, K., & Gignac, G. E. (2013). NASA faked the moon landing therefore (climate) science is a hoax: An anatomy of the motivated rejection of science. *Psychological Science*, *24*, 622–633.

Lewis, D. (1986). *On the Plurality of Worlds*. Oxford, UK: Blackwell.

MacLeod, C., & Donnellan, A. M. (1993). Individual differences in anxiety and the restriction of working memory capacity. *Personality and Individual Differences*, *15*, 163–173.

Mahony, M. J. (1976). *Scientist as subject: The psychological imperative*. Cambridge: Ballinger.

Manktelow, K. (1999). *Reasoning and thinking*. Hove, UK: Psychology Press.

Marcus, S. L., & Rips, L. J. (1979). Conditional reasoning. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *18*, 199–223.

Markovits, H. (1988). Conditional reasoning, representation, and empirical evidence on a concrete task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *40*(3), 483–495.

Markovits, H., & Potvin, F. (2001). Suppression of valid inferences and knowledge structures: The curious effect of producing alternative antecedents on reasoning with causal conditionals. *Memory & Cognition*, *29*, 736–744.

Mercier, H., & Sperber, D. (2011). Why do humans reason? Arguments for an argumentative theory. *Behavioral and Brain sciences*, *34*, 57–74.

Metzinger, T. (2007). *Das Leib-Seele-Problem*. Grundkurs Philosophie des Geistes, Bd. 2. Paderborn: mentis.

Miller, G. A., & Johnson-Laird, P. N. (1976). *Language and perception*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Mynatt, C. R., Doherty, M. E., & Tweney, R. D. (1978). Consequences of confirmation and disconfirmation in a simulated research environment. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *30*(3), 395–406.

Nejasmic, J., Bucher, L., & Knauff, M. (2015). The construction of spatial mental models – A new view on the continuity effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *68*(9), 1794–1812. doi:10.1080/17470218.2014.991335.

Neves, R. D. S., Bonnefon, J. F., & Raufaste, E. (2002). An empirical test of patterns for nonmonotonic inference. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, *34*(1–3), 107–130.

Oakhill, J., Johnson-Laird, P. N., & Garnham, A. (1989). Believability and Syllogistic Reasoning. *Cognition*, *31*(2), 117–140.

Oaksford, M., & Chater, N. (1994). A rational analysis of the selection task as optimal data selection. *Psychological Review*, *101*, 608–631.

Oaksford, M., & Chater, N. (2007). *Bayesian rationality the probabilistic approach to human reasoning*. New York, NY, US: Oxford University Press.

Oaksford, M., & Chater, N. (2014). Probabilistic single function dual process theory and logic programming as approaches to non-monotonicity in human vs. artificial reasoning. *Thinking & Reasoning*, *20*, 269–295.
Oaksford, M., & Hahn, U. (2007). Induction, deduction and argument strength in human reasoning and argumentation. In A. Feeney, & E. Heit (Hrsg.), *Inductive reasoning: Experimental, developmental and computational approaches* (S. 269–301). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
Openproof Research (2015).. https://ggweb.gradegrinder.net/openproof/HetReasoninghptour3. Zugegriffen: 16.Oktober 2015
Osherson, D. N. (1976). *Reasoning and concepts*. Logical abilities in children, Bd. 4. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
Over, D. E. (2009). New paradigm psychology of reasoning. *Thinking & Reasoning*, *15*, 431–438.
Over, D. E., & Evans, J. S. B. T. (2003). The probability of conditionals: The psychological evidence. *Mind and Language*, *18*, 340–358.
Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. San Mateo, Calif: Morgan Kaufmann.
Pearl, J. (2000). *Causality: Models, reasoning, and inference*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
Peirce, C. S. (1931–1958). Collected papers of Charles Sanders Peirce. In: C. Hartshorne, P. Weiss, & A. Burks (Eds.). Cambridge, MA: Harvard University Press.
Pfeifer, N., & Kleiter, G. D. (2005). Coherence and nonmonotonicity in human reasoning. *Synthese*, *146*(1–2), 93–109.
Piaget, J., & Inhelder, B. (1958). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence*. New York: Basil Books, Inc.
Polk, T. A., & Newell, A. (1995). Deduction as verbal reasoning. *Psychological Review*, *102*, 533–566.
Pollock, J. L. (1987). How to build a person: the physical basis for mentality. *Philosophical Perspectives*, *1*(Metaphysics), 109–154.
Politzer, G., & Carles, L. (2001). Belief revision and uncertain reasoning. *Thinking & Reasoning*, *7*(3), 217–234.
Popper, K. R. (1968). *The logic of scientific discovery*. London: Hutchison.
Pouget, A., Beck, J. M., Ma, W. J., & Latham, P. E. (2013). Probabilistic brains: knowns and unknowns. *Nature Neuroscience*, *16*(9), 1170–1178.
Prado, J., Chadha, A., & Booth, J. R. (2011). The brain network for deductive reasoning: a quantitative meta-analysis of 28 neuroimaging studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 3483–3497.
Ragni, & Knauff, M. (2013). A theory and a computational model of spatial reasoning with preferred models. *Psychological Review*, *120*, 561–588.
Ragni, M., & Wölfl, S. (2005). Temporalizing spatial calculi: On generalized neighborhood graphs. In U. Furbach (Hrsg.), *KI 2005: Advances in Artificial Intelligence* Proceedings of the 28th Annual German Conference on AI. (S. 64–78). Berlin: Springer.
Ragni, M., Franzmeier, I., Maier, S., & Knauff, M. (2016). Uncertain relational reasoning in parietal cortex. *Brain & Cognition*, *4*, 72–81. Im Druck
Ramsey, F. P. (1990). General propositions and causality. In D. H. Mellor (Hrsg.), *Philosophical Papers* (S. 145–163). Cambridge, UK: Cambridge University Press.. Original Publikation, 1929
Rauh, R. (2000). Strategies of constructing preferred mental models in spatial relational inference. In W. Schaeken, G. De Vooght, A. Vandierendonck, & G. d'Ydewalle (Hrsg.), *Deductive reasoning and strategies* (S. 177–190). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
Rauh, R., Hagen, C., Knauff, M., Kuß, T., Schlieder, C., & Strube, G. (2005). From preferred to alternative mental models in spatial reasoning. *Spatial Cognition and Computation*, *5*(2&3), 239–269.
Read, D. E. (1981). Solving deductive-reasoning problems after unilateral temporal lobectomy. *Brain and Language*, *12*, 116–127.
Reiter, R. (1980). A logic for default reasoning. *Artificial intelligence*, *13*(1), 81–132.
Reiter, R. (1987). Nonmonotonic reasoning. *Annual review of computer science*, *2*(1), 147–186.
Revlis, R. (1975). Two models of syllogistic inference: Feature selection and conversion. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *14*, 180–195.
Revlis, R., Lipkin, S. G., & Hayes, J. R. (1971). The importance of universal quantifiers in a hypothetical reasoning task. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *10*, 86–91.
Richardson, J. T. E. (1987). The role of mental imagery in models of transitive inference. *British Journal of Psychology*, *78*, 189–203.
Rips, L. J. (1994). *The psychology of proof: Deductive reasoning in human thinking*. Cambridge, MA: MIT Press.
Rott, H. (2001). *Change, Choice and Inference: A Study of Belief Revision and Nonmonotonic Reasoning*. Oxford: Oxford University Press.
Rumain, B., Connell, J., & Braine, M. D. (1983). Conversational comprehension processes are responsible for reasoning fallacies in children as well as adults: If is not the biconditional. *Developmental Psychology*, *19*, 471–481.
Schneider, P. (2010). *Logik vs. Interesse: Der Einfluss des domänenspezifischen Interesses auf das konditionale Schließen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Gießen: Universität Gießen.
Schöning, U. (2000). *Logik für Informatiker*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
Schroyens, W. (2010). Logic and/in Psychology: The paradoxes of material implication and psychologism in the cognitive science of human reasoning. In M. Oaksford, & N. Chater (Hrsg.), *Cognition and Conditionals: Probability and logic in human thought* (S. 69–84). Oxford, U.K.: Oxford University Press.
Schurz, G. (2005). Non-monotonic reasoning from an evolutionary viewpoint. *Synthese*, *146*(1–2), 37–51.
Shafir, E., Simonson, I., & Tversky, A. (1993). Reason-based choice. *Cognition*, *49*(1), 11–36.
Skipper, J. I. (2015). The NOLB model: a model of the natural organization of language and the brain. In R. M. Willems (Hrsg.), *Cognitive Neuroscience of Natural Language Use* (S. 101–134). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
Spohn, W. (1993). Wie kann die Theorie der Rationalität normativ und empirisch zugleich sein? In L. Eckensberger, & U. Gähde (Hrsg.), *Ethik und Empirie. Zum Zusammenspiel von begrifflicher Analyse und erfahrungswissenschaftlicher Forschung in der Ethik* (S. 151–196). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
Spohn, W. (2001). Die vielen Facetten der Rationalitätstheorie. In U. Arnswald, & H.-P. Schütt (Hrsg.), *Rationalität und Irrationalität in den Wissenschaften* (S. 138–159). Wiesbaden: VS.
Shaver, P., Pierson, L., & Lang, S. (1975). Converging evidence for the functional significance of imagery in problem solving. *Cognition*, *3*, 359–375.
Shin, S. (1994). *The logical status of diagrams*. Cambridge: Cambridge University Press.
Simon, H. (1959). Theories of decision making in economics and behavioural science. *American Economic Review*, *49*, 253–283.
Stenning, K. (2002). *Seeing reason*. Oxford: Oxford University Press.
Stenning, K., & Lambalgen, M. van (2008). *Human reasoning and cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.
Sternberg, R. J. (1980). Representation and process in linear syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 119–159.
Stevenson, R. J., & Over, D. E. (1995). Deduction from uncertain premises. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *48A*, 613–643.
Störring, G. (1908). Experimentelle Untersuchungen über einfache Schlussprozesse. *Archiv für die gesamte Psychologie*, 11, 1–27.
Taplin, J. E. (1971). Reasoning with conditional sentences. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, *10*, 219–225.
Tenbrink, T., & Ragni, M. (2012). Linguistic principles for spatial relational reasoning. In C. Stachniss, K. Schill, & D. H. Uttal (Hrsg.), *Spatial Cognition VIII: Proceedings of International Conference, Spatial Cognition 2012* Lecture Notes in Computer Science, (Bd. 7463, S. 279–298). Berlin: Springer.
Tomasello, M. (2009). *The cultural origins of human cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
Toulmin, S. E. (1996). *Der Gebrauch von Argumenten* (2. Aufl.). Weinheim: Beltz.
Tweney, R. D., et al. (1980). Strategies of rule discovery in an inference task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*, 109–123.
Uttal, W. R. (2001). *The new phrenology*. Cambridge, MA: MIT Press.
Van der Henst, J.-B. (2002). Mental model theory versus the inference rule approach in relational reasoning. *Thinking & Reasoning*, *8*(3), 193–203.
Walsh, C. R., & Johnson-Laird, P. N. (2009). Changing your mind. *Memory & Cognition*, *37*(5), 624–631.
Wason, P. C. (1960). On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *12*, 129–140.
Wason, P. C. (1966). Reasoning. In B. M. Foss (Hrsg.), *New horizons in psychology*. Harmondsworth: Penguin.

Wason, P. C. (1977). On the failure to eliminate hypotheses ... A second look. In P. N. Johnson-Laird, & P. C. Wason (Hrsg.), *Thinking: Readings in Cognitive Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wason, P. C., & Johnson-Laird, P. N. (1972). *Psychology of reasoning: Structure and content*. Cambridge, MA.: Harvard University Press.

Wharton, C. M., Cheng, P. W., & Wickens, T. D. (1993). Hypothesis-testing strategies: Why two goals are better than one. *Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, *46A*, 743–758.

Whitaker, H. A., Markovits, H., Savary, F., Grou, C., & Braun, C. (1991). Inference deficits after brain damage. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, *13*, 38.

Wolf, A. G., Rieger, S., & Knauff, M. (2012). The effects of source trustworthiness and inference type on human belief revision. *Thinking & Reasoning*, *18*(4), 417–440.

Woodworth, R. S., & Sells, S. B. (1935). An atmosphere effect in formal syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology*, *18*, 451–460.

Wundt, W. (1910). *Psychologismus und Logizismus*. Kleine Schriften, Bd. 1, S. 511–634). Leipzig: Engelmann.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8*, 338–353.

Problemlösen

Michael Öllinger

16.1 Einleitung – 588

16.2 Definitorische Grundlagen – 589
16.2.1 Problemtypen – 589
16.2.2 Einfache und komplexe Probleme – 590

16.3 Komplexe Probleme – 590
16.3.1 Kriterien komplexer Probleme – 590
16.3.2 Klassische Untersuchungen zum komplexen Problemlösen – 591
16.3.3 Weitere Aspekte komplexen Problemlösens – 591

16.4 Das Lösen einfacher Probleme – 592
16.4.1 Historische Grundlagen der Problemlöseforschung – Sultan der Problemlöser – 592
16.4.2 Computer lösen Probleme – die Problemraumtheorie – 593

16.5 Erweiterung der Problemraumtheorie – 596
16.5.1 Umstrukturierung aus gestaltpsychologischer Sicht – 596
16.5.2 Weitere Aspekte von Umstrukturierung beim Problemlösen – 598
16.5.3 Kognitive Theorien einsichtsvollen Problemlösens – 601

16.6 Methoden der Problemlöseforschung – 605
16.6.1 Blickbewegungsstudien – 605
16.6.2 Neuropsychologische Untersuchungen – 605
16.6.3 Neuronale Korrelate beim Lösen von Problemen – 606

16.7 Expertise beim Problemlösen – 607
16.7.1 Schachexpertise – 607
16.7.2 Voraussetzungen des Expertentums – 608

16.8 Problemlösen durch analogen Transfer – 609
16.8.1 Grundlegende Überlegungen zum analogen Transfer – 609
16.8.2 Klassische Untersuchungen zum analogen Transfer – 610
16.8.3 Neuronale Korrelate zum analogen Transfer – 611

16.9 Anwendungsbeispiele – 611

16.10 Ausblick – 613

16.11 Weiterführende Informationen – 613

Literatur – 615

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_16

Im Blickfang

Denken – Geistesblitz oder systematische Suche?

Die Skulptur eines Denkers des berühmten französischen Künstlers Auguste Rodin (Abb. 16.1) vermittelt den Eindruck, dass dieser tief versunken über etwas nachdenkt. Es ist von außen völlig unklar, was der Inhalt seines Denkens ist. Löst er gerade ein schwieriges Problem, träumt er, grübelt er? Eine Deutung ist, dass er über die Sinnlosigkeit des Tötens nach einer Schlacht nachdenkt. Möglicherweise versucht er, das Problem, warum Menschen sich immer wieder in kriegerische Handlungen mit furchtbaren Konsequenzen verstricken, zu lösen. Die offene Frage ist nun, wird der Denker irgendwann wie vom Donner gerührt aufschrecken, weil seine ungeordneten Überlegungen und Träumereien in einen plötzlichen Geistesblitz münden und er plötzlich die Lösung des Problems vor Augen sieht? Oder sucht der Denker Schritt für Schritt eine Lösung aus seinem bestehenden Vorwissen?

Geistesblitze und Intuitionen schmücken zahlreiche Anekdoten aus der Wissenschaftsgeschichte über berühmte Entdeckungen, die oft darin bestehen, dass ein extrem schwieriges oder immens wichtiges Problem plötzlich gelöst wird. Nehmen wir folgenden, wie wir jetzt wissen, nicht ganz ernst zu nehmenden Bericht des deutschen Chemikers Kekulé über die Vorgänge, die ihn zur Entdeckung des Benzolringes führten:

Ich drehte meinen Stuhl zum Feuer und war gerade am Einschlafen. Wieder tanzten Atome vor meinen Augen, oft lange, miteinander verbundene Ketten, die alle in Bewegung waren. Sie waren ineinander verschlungen wie Schlangen. Aber was war das? Eine der Schlangen hatte ihren Schwanz ergriffen, und diese Form tanzte spöttisch vor meinen Augen. Wie vom Blitz getroffen wachte ich auf. (Zit. n. Gruber 1995, S. 407 f.)

Der Halbtraum von der Schlange, die sich in den Schwanz beißt, brachte Kekulé also scheinbar auf den Gedanken, dass man Atome auch in ringförmigen Strukturen anordnen kann. Solche Berichte unterstützen die Vermutung, dass Geistesblitzen beim kreativen Problemlösen eine wichtige Rolle zukommt. Doch auch die systematische Suche nach einem Problem und strategisches Vorgehen bei der Problemlösung spielen eine wichtige Rolle. Inzwischen geht man davon aus, dass erfolgreiches Denken in vielen Fällen strategisches Vorgehen, eine gut organisierte Wissensbasis und einen klaren Kopf erfordert. Oder würden Sie einen Arzt aufsuchen, der sich bei ihrer Behandlung auf Geistesblitze beim Einschlafen am Kamin verlässt?

Das folgende Kapitel behandelt die vielfältigen Prozesse, die am *Problemlösen* beteiligt sind. Dabei wird sich herausstellen, dass es Menschen oft erstaunlich gut gelingt, mit einfachen Daumenregeln und gut organisiertem Wissen schwierige und neue Probleme zu lösen.

Abb. 16.1 Denker von Rodin

16

16.1 Einleitung

Problemlösen bezeichnet eine Fertigkeit, die eine wichtige Rolle in unserem Alltag, im beruflichen Leben, in Beziehungen oder im klinischen Bereich spielt. Die Psychologie des Problemlösens beschäftigt sich mit den kognitiven Prozessen, die notwendig sind, um ein Ziel zu erreichen, für das in der Regel noch keine bekannte Lösungsstrategie vorhanden ist. Das deutet darauf hin, dass Problemlösen stark von **Vorwissen** und Expertise abhängig ist. So kann das Ziel, eine Fahrkarte von Berlin nach Hamburg zu lösen, für einen Novizen durchaus ein Problem sein, für die viel reisende Managerin handelt es sich dagegen nur um eine wohl vertraute Routine.

Besondere Faszination üben außergewöhnliche Problemlöseleistungen auf uns aus. Das kann der aus der Literatur bekannte Detektiv Sherlock Holmes sein, der die kniffligsten Kriminalfälle löst, indem er ungewöhnliche Schlüsse zieht. In der Wissenschaft beeindrucken uns Denker wie Albert Einstein, der zentrale Probleme innerhalb der Physik gelöst hat und dem es gelang, ein völlig neues Verständnis von Raum und Zeit zu etablieren. Aber auch ein Zauberer, der vor unseren Augen ein Kaninchen verwinden lässt, fasziniert uns – er löst irgendwie das Problem,

eine Sequenz von Handlungen zu präsentieren, die die Illusion erzeugt, Materie könne sich in Luft auflösen, obwohl wir wissen, dass das nicht möglich ist. Aber auch bisher ungelöste Probleme aus der Mathematik oder der Frage, wie es die alten Ägypter geschafft haben, die imposanten Pyramiden zu bauen, beschäftigen uns und wollen gelöst werden.

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über kognitive Theorien des Problemlösens. Diese Theorien versuchen, allgemeine Gesetzmäßigkeiten aus empirischen Beobachtungen abzuleiten und so auf die inneren und daher nicht beobachtbaren Denkprozesse rückzuschließen. Das heißt, auch die Problemlöseforschung versucht, ständig Probleme zu lösen. Das Kapitel spannt den Bogen von definitorischen Grundlagen über Untersuchungen zu Problemlösestrategien bis hin zu Geistesblitzen und der Lösung von eher ungewöhnlichen Problemen.

Zunächst wird die Frage behandelt, was Problemlösen ist und wie Probleme definitorisch beschrieben und unterschieden werden können bzw. welche Klassen von Problemen sich unterscheiden lassen. In der Folge wird eine Übersicht über klassische Untersuchungen und Befunde zu komplexen und einfachen Problemen gegeben. Hier sollen Grundkonzepte und Annahmen vertieft und illustriert werden. In ▶ Abschn. 16.4.2 wird die Frage behandelt, inwieweit Maschinen bzw. Computer Probleme lösen können und was aus diesen Modellierungsansätzen für das menschliche Denken folgt. ▶ Abschn. 16.5 über Einsichtsprobleme soll historischen Aspekten der Problemlöseforschung Rechnung tragen, aber auch eine besondere Klasse von Problemen einführen, die bisher nicht mit den traditionellen Ansätzen der Problemlöseforschung gelöst werden konnten und somit eine Erweiterung der klassischen Problemraumtheorie erfordern. In ▶ Abschn. 16.6 wird ein kurzer Überblick über methodische Aspekte der Problemlöseforschung gegeben. ▶ Abschn. 16.7 soll der wichtigen Rolle von Vorwissen beim Problemlösen Rechnung tragen. ▶ Abschn. 16.8 zeigt, wie bereits bestehendes Wissen gewinnbringend auf neue, noch unbekannte, Probleme übertragen werden kann. In ▶ Abschn. 16.9 illustrieren drei Anwendungsbeispiele, wie sich ein systematischer Problemlöseprozess auf Diagnosen, Behandlungen und automatisierte Problemlösung auswirken kann. Im Verlauf der Ausführungen wird eine Reihe von mittlerweile klassischen Problemen diskutiert. Der Leser ist zunächst immer eingeladen, sich selbst an den Lösungen der Probleme zu versuchen, um eigene Strategien und Vorgehensweisen zu erleben und so besser die empirischen und theoretischen Befunde zu verstehen.

16.2 Definitorische Grundlagen

Die Schwierigkeit, aber auch der Reiz der Problemlöseforschung liegt darin begründet, dass eine Vielzahl von Teilprozessen berücksichtigt werden müssen, um den gesamten Vorgang zu verstehen. Das Wahrnehmen der Aufgabenstellung, das Verständnis des Problems, die Aktivierung von Vorwissen, die Manipulation von gegebenen Informationen, die Zerlegung des Problems in Teilziele, die Entwicklung eines Planes, das Finden von Ergebnissen, die verwendeten Strategien, das Auftreten von Fehlern und die Validierung des Ergebnisses stehen dabei grob für einzelne

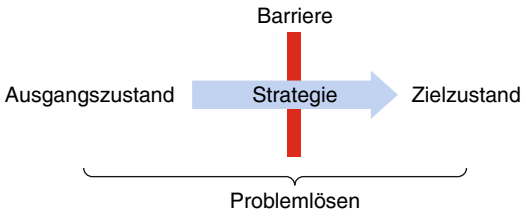


Abb. 16.2 Unterschiedliche Aspekte des Problemlöseprozesses

Teilprozesse. Diese können auch für sich alleine Untersuchungsgegenstand sein. Generell kann Problemlösen als jedwede zielgerichtete Sequenz von kognitiven Operationen verstanden werden (Frensch und Funke 2014).

16.2.1 Problemtypen

In Bezug auf die Frage, was eigentlich ein Problem ist, lassen sich verschiedene Unterscheidungen finden. Mayer (1992) nennt drei Aspekte, die ein Problem ausmachen:

1. *Situation:* Hiermit ist der *Anfangs- oder Ausgangszustand* gemeint. Es wird das betrachtet, was über das Problem bekannt ist, was gegeben ist. Das kann die Aufgabenstellung sein, also ein bestimmter Zustand, der bestimmte Bedingungen, Dinge, Objekte oder Informationen spezifiziert.
2. *Ziel:* Ein besonderer Zustand, der eine Lösung für das Problem darstellt, wird als *Zielzustand* bezeichnet.
3. *Hindernisse oder Barrieren:* Ein Problem zeichnet sich dadurch aus, dass auf dem Weg vom Anfangszustand zum Zielzustand Barrieren oder Hindernisse auftreten.

Problemlösen wird hier als der Versuch verstanden, den gegebenen **Anfangszustand** in den **Zielzustand** zu überführen (Abb. 16.2). Von Problemlösen spricht man dabei allerdings nur dann, wenn eine Barriere verhindert, dass man den Anfangszustand direkt in den Zielzustand überführt (Bischof 1985). Die Schritte, die notwendig sind, um vom Anfangszustand zum Zielzustand zu kommen, werden auch *Lösungsweg* genannt (Pretz et al. 2003). Einem Lösungsweg zu folgen, nennt man Strategie, d. h. die Entscheidung, welche Mittel verwendet werden, um mit der Barriere umzugehen, um ein Ziel zu erreichen.

Wenn man dieser Definition folgt, dann ist z. B. das Einschalten einer Lampe, um einen Raum zu beleuchten, kein Problem, solange das Betätigen des Lichtschalters tatsächlich den gewünschten Effekt erzielt. Wenn der gewünschte Effekt nicht eintritt, weil die Glühbirne defekt ist, dann liegt ein Problem vor, weil jetzt eine Barriere (Glühbirne defekt) überwunden werden muss, um den gegebenen Anfangszustand (Raum dunkel) in den gewünschten Zielzustand (Raum hell) zu überführen. An diesem Beispiel lässt sich auch der Einfluss von Vorwissen demonstrieren. Für jemanden, der schon Erfahrung mit defekten Lampen hat, ist das Problem trivial (neue Glühbirne einschrauben). Für jemanden, der diese Erfahrung nicht hat, kann das Problem extrem schwierig sein. Funktioniert die Lampe nach dem Wechsel der Glühbirne allerdings immer noch nicht, haben wir es wahrscheinlich für fast jeden mit einem Problem zu tun, das wir dann von einem erfahrenen Techniker lösen lassen müssen.

Um Probleme definitorisch präziser zu fassen, wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Einteilungen entwickelt (Dörner 1976; Greeno 1978; Klix 1971; Krause 1982; Pretz et al. 2003; Reitman 1965; Spies und Hesse 1987), die mögliche Probleme nach bestimmten Kriterien unterschiedlichen Problemtypen zuweisen. Diese Einteilungsprinzipien unterscheiden sich teilweise sehr stark voneinander (Frensch und Funke 2014). Eine weitverbreitete Unterscheidung ist die zwischen *klar definierten* (geschlossenen) und *unklar definierten* (offenen) Problemen (Reitman 1965). Bei klar definierten Problemen sind sowohl der Anfangszustand als auch der Zielzustand eindeutig anzugeben, woraus sich ein festgelegter Lösungsweg ergibt. Bei unklar definierten Problemen können entweder der Anfangszustand, Zielzustand oder beide uneindeutig sein. Betrachtet man z. B. das Problem des Klimawandels, so könnte ein generelles Ziel sein, die Erderwärmung zu verringern, doch wie (Strategie) und ob (realistisches Ziel?) das zu bewerkstelligen ist, bleiben offene Fragen. Zudem ist auch unklar, nach welchen Kriterien der Ausgangszustand zu bestimmen ist und wie ein möglicher Zielzustand sinnvollerweise festgelegt werden soll. Probleme mit unklar definiertem Anfangs- und Zielzustand werden bisweilen auch als *dialektische Probleme* bezeichnet (Dörner 1976).

16.2.2 Einfache und komplexe Probleme

Eine weitere Unterscheidung, die sich hier direkt anschließen lässt, ist die Unterscheidung zwischen *einfachen* und *komplexen* Problemen. Einfache Probleme zeichnen sich dadurch aus, dass es einen klaren Ausgangs- und Zielzustand gibt und dass alle Zwischenzustände und mögliche Lösungswege im Prinzip bekannt sind. Diese Probleme eignen sich besonders gut, um die Anwendung von Heuristiken, Suchprozessen und systematischen Fehlern beim Problemlösen zu untersuchen. Sie werden besonders oft dazu eingesetzt, die Annahmen der **Problemraumtheorie** zu untersuchen (▶ Abschn. 16.4.2). Obwohl der Begriff „einfach" suggerieren könnte, dass diese Probleme auch einfach zu lösen sind, erweisen sich eine Reihe von einfachen Problemen als extrem schwierig, z. B. das Neun-Punkte-Problem (▶ Abschn. 16.5.2). Der große Vorteil von einfachen Problemen besteht darin, dass sie sich im Labor gut untersuchen lassen, da sie sehr gut kontrollierbar sind. Als Folge dieser guten Kontrollierbarkeit haben diese Probleme meist wenig mit Problemlösen, wie es uns im Alltag begegnet, zu tun (Funke 2006, S. 376).

Zusammenfassend zeigt der Versuch, über unterschiedliche definitorische Kriterien Ordnung in die Vielzahl unterschiedlicher Probleme zu bringen, dass es schwer ist, Probleme eindeutig einzelnen Kategorien zuzuordnen und die Kategorien teilweise recht willkürlich ausgewählt sind. Generell stellen diese Einteilungsversuche aber ein nützliches Hilfsmittel in der Problemlöseforschung dar, das bestimmt, welche Untersuchungsmethoden und Referenzen für die experimentellen Untersuchungen herangezogen werden können. So stellen einfache Probleme andere Anforderungen an den Experimentator als die Untersuchung von komplexen Szenarien. Letztere erfordern z. B. die Entwicklung von komplexen Computersimulationen und die Auswertung von dynamischen Systemen und Zeitreihenanalysen. Die Einordnung eines Problems auf den unterschiedlichen Dimensionen bietet auch wichtige Hinweise für eine ausführliche *Problemanalyse*, mit der die Struktur eines Problems festgestellt wird, und damit auch die verschiedenen Wege und Möglichkeiten, es zu lösen. Das Verständnis der Struktur eines Problems ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Erforschung der kognitiven Prozesse, die beim Problemlösen ablaufen.

16.3 Komplexe Probleme

In der Folge soll kurz auf komplexe Probleme eingegangen werden. Sie stellen eine besondere Klasse dar, die darauf abzielt, eine höhere Alltagsrelevanz bei der Untersuchung von individuellen Problemlösekompetenzen zu erzielen (Funke 2003). Komplexe Probleme zeichnen sich zunächst dadurch aus, dass sie eine *komplexe Eigendynamik* entwickeln (Dörner et al. 1983). Denken Sie z. B. an eine Situation, in der bei einem Flugzeug eine wichtige Funktion ausfällt, sodass dieses rapide an Höhe verliert. Der Pilot kann sich nicht in Ruhe das Problem ansehen und sich eine möglichst günstige Strategie überlegen. Der aktuelle Zustand verändert sich ständig. Der Pilot steht unter *Zeitdruck*, einer starken *emotionalen Belastung*, und sein Denken ist in den größeren *Handlungskontext* eingebettet. Diese drei Merkmale sind Dörner et al. (1999) zufolge oft vernachlässigt worden, obwohl sie für das komplexe Problemlösen in alltagsnahen Situationen sehr bedeutsam sind. Die Erforschung **komplexen Problemlösens** stand in den letzten Jahren im Mittelpunkt der deutschen Problemlöseforschung (Überblick in Dörner 1989; Frensch und Funke 2014; Funke 1999).

Untersuchungen zum komplexen Problemlösen beschäftigen sich mit der Frage, welche kognitiven Prozesse bei der Lösung von schwierigen Problemen (Klimawandel, Finanzkrise, Entwicklungshilfe, Steuerung von Unternehmen usw.) identifiziert werden können und wie Personen mit solchen Anforderungen umgehen. Untersuchungen zum komplexen Problemlösen zeichnen sich dadurch aus, dass sie computersimulierte Szenarien verwenden. Diese erlauben, die Systemfunktionen genau festzulegen und die Interventionen der Versuchsperson und die dadurch resultierenden Systemzustände präzise zu registrieren.

16.3.1 Kriterien komplexer Probleme

Für komplexe Probleme lassen sich folgende Definitionskriterien finden (Funke 2003; Frensch und Funke 2014):

1. *Komplexität:* Sie wird bestimmt durch die Anzahl der beteiligten Variable. Die Raumtemperatur mithilfe einer Klimaanlage zu verändern, ist weniger komplex. Das globale Klima zu verändern, darf anhand der beteiligten Variable als komplex angesehen werden.
2. *Vernetztheit:* Sie wird bestimmt durch die Anzahl der Verbindungen der einzelnen Variable. Auch hier besteht zwischen den Elementen des Klimageräts eine geringe Vernetztheit. Im einfachsten Fall regelt ein Raumthermostat direkt das Ein- und Ausschalten des Geräts. Das globale Klima stellt dagegen ein hochgradig vernetztes System dar.

3. *Dynamik:* Bei komplexen Systemen spielen zeitliche Veränderungen eine wichtige Rolle. Solche zeitlichen Veränderungen können stark verzögert oder sehr langsam vonstattengehen, wie z. B. die Veränderungen durch den Klimawandel zeigen. Darüber hinaus haben komplexe Systeme oft eine Eigendynamik, d. h., es ergeben sich ständig veränderte Systemzustände, selbst wenn von außen keine Veränderungen vorgenommen werden.
4. *Intransparenz:* Es stehen dem Problemlöser in der Regel nicht alle Informationen zur Verfügung. Bei der Lösung des Problems des Klimawandels müssen Maßnahmen ergriffen werden, obwohl die genauen Zusammenhänge unklar bleiben.
5. *Polytelie (Vielzieligkeit):* Hierbei geht es um die Tatsache, dass gleichzeitig verschiedene, teilweise konkurrierende Ziele realisiert werden müssen. Beispielsweise könnte das Ziel, die Klimaerwärmung zu reduzieren, in Konkurrenz mit dem Ziel treten, den hohen Lebensstandard in den westlichen Ländern zu erhalten.

Der Problemlöser muss zunächst ein *Modell* des gegebenen Systems repräsentieren und über Beobachtungen versuchen, mögliche Gesetzmäßigkeiten im Hinblick auf zeitliche Veränderungen und gegenseitige Wechselwirkungen abzuleiten (Funke 2006).

16.3.2 Klassische Untersuchungen zum komplexen Problemlösen

Berry und Broadbent (1984) verwendeten ein einfaches Szenario, das eine virtuelle Zuckerfabrik simulierte. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, sich vorzustellen, Leiter einer Zuckerfabrik zu sein und ein vorgegebenes Produktionsergebnis von z. B. 12.000 t Zucker pro Monat zu erreichen. Steuern konnten die Teilnehmer der Studie die Anzahl der Arbeiter pro Monat. Es wurde ihnen jeweils das monatliche Ergebnis der Zuckerproduktion rückgemeldet. Die Versuchspersonen waren nicht über die zugrunde liegende Dynamik des Systems informiert. Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen nach einigen Versuchen sehr gut darin wurden, das System erwartungsgemäß zu steuern. Interessant dabei war aber, dass sie nicht angeben konnten, nach welchen Regeln sie das Ziel erreicht hatten, auch nicht, als man sie danach fragte. Die Autoren dissoziierten so implizites (Kontingenzwissen) von explizitem und verbalisierbarem Wissen (▶ Kap. 10).

Diesen sehr einfachen Systemen, die gut experimentell untersuchbar sind, stehen wesentlich komplexere Szenarien gegenüber, mit deren Hilfe insbesondere individuelle Unterschiede bei der Steuerung eines komplexen Szenarios untersucht wurden. So sollten die Versuchsteilnehmer z. B. als allmächtiger Bürgermeister einer Kleinstadt fungieren und für optimale Lebensqualität sorgen (Dörner et al. 1983), als Entwicklungshelfer die Lebensbedingungen eines afrikanischen Stammes verbessern (Dörner 1989) oder die Geschäftsleitung einer Hemdenfabrik übernehmen (Putz-Osterloh und Lüer 1981).

Besondere Bekanntheit hat das in der Problemlöseforschung einmalige Vorhaben des realitätsnahen, etwa 2000 Variable umfassenden Bürgermeisterszenario Lohausen erlangt. Die Probanden sollten als Bürgermeister zehn Computerjahre lang die Verantwortung für eine Kleinstadt tragen. Es ist leicht einzusehen, dass dieses Szenario alle Kriterien eines komplexen Systems beinhaltet. Die Versuchspersonen können z. B. immer nur eine begrenzte Anzahl von Informationen berücksichtigen. Obwohl das Lohhausen-Experiment aufgrund technischer Beschränkungen und deutlicher Veränderungen an der Variablenstruktur während der Durchführung an einigen methodischen Schwächen litt, zeigte sich eine Reihe von interessanten Befunden, die die Hypothesenbildung und Weiterentwicklung des komplexen Problemlösens maßgebend beeinflussten (Dörner et al. 1983). Gute Problemlöser beim Lohhausen-Szenario stellen dabei Fragen, die mehr und stärker auf die zugrunde liegende Struktur der beteiligten Variablen abzielen. Es gelang ihnen besser, relevante von irrelevanten Informationen zu unterscheiden, und sie neigen weder zu vorschnellen noch zu vereinfachenden Hypothesen (Funke 2003).

16.3.3 Weitere Aspekte komplexen Problemlösens

Bei den meisten Untersuchungen stellte sich heraus, dass Problemlöser große Schwierigkeiten mit der Bewältigung komplexer dynamischer Probleme hatten. Dörner und Schölkopf (1991) zufolge sind u. a. folgende Komponenten für das kompetente Lösen komplexer Probleme notwendig:

- Adäquate Formulierung von Zielen,
- Adäquates Modell der Systemstruktur,
- Aäquate Prognose der zukünftigen Systementwicklung,
- Adäquates Treffen von Entscheidungen,
- Adäquate Kontrolle von Hypothesen,
- Strategien zur Systemsteuerung.

Erfolgreiche Problemlöser zeichnen sich Dörner und Schölkopf zufolge dadurch aus, dass sie

- gezielt Systemwissen zu gewinnen versuchen, um eine gute Grundlage für Zukunftsprognosen zu haben,
- die Auswirkung früherer Eingriffe beobachten, bevor sie neue Eingriffe in das System vornehmen,
- bisher getroffene Entscheidungen und Strategien immer wieder kritisch reflektieren.

Untersuchungen zum komplexen Problemlösen wurden häufig in methodischer Hinsicht kritisiert (Buchner 1999; Funke 1984). Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, kann anders als bei einfachen Problemen der Problemraum (▶ Abschn. 16.4.2) zumindest bei Simulationen, die keine linearen Veränderungen der Variablenwerte enthalten, nicht eindeutig beschrieben werden. Deshalb ist es nicht möglich, den Problemlöseerfolg (oder -misserfolg) eindeutig zu charakterisieren und den gewählten Lösungspfad mit einer optimalen Lösung zu vergleichen. Auch die behauptete Realitätsnähe der Simulationen wurde hinterfragt. So wurde in vielen Simulationen der Zeitdruck künstlich geschaffen, indem Entwicklungen, die normalerweise Tage, Wochen oder Jahre dauern (z. B. Austrocknen eines Brunnens im Entwicklungsland, betriebswirtschaftliche Schwankungen in der

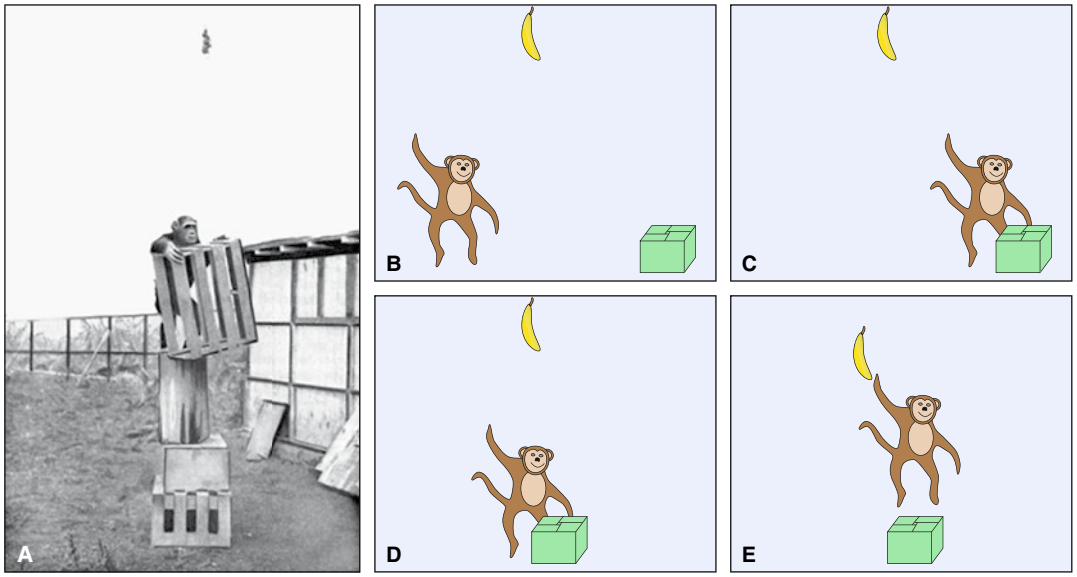


Abb. 16.3 **A** Köhlers Affe Sultan bei der Lösung des Kistenproblems (aus Köhler 1921). **B–E** Die notwendigen Schritte, um die Banane an der Decke zu erreichen

simulierten Stadt Lohhausen oder der Schneiderwerkstatt), auf einen Zeitraum von Minuten oder Stunden verkürzt wurden. Deswegen wurden in der Folge oft einfachere Systeme (Funke 1995; Reichert und Dörner 1988) oder realitätsnahe Simulationen komplexer technischer Systeme entwickelt (Wallach 1998). Dabei wurde oft auf nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Systemvariablen verzichtet, wodurch das Verhalten des Systems leichter verstehbar war.

Nach diesem kurzen Ausflug in die Welt der komplexen Problemlöseszenarien werden wir uns im Folgenden hauptsächlich mit Untersuchungen zu einfachen Problemen beschäftigen.

16.4 Das Lösen einfacher Probleme

16.4.1 Historische Grundlagen der Problemlöseforschung – Sultan der Problemlöser

Wesentliche Grundlagen des Problemlösens fußen auf Erkenntnissen, die aus Verhaltensbeobachtungen an Tieren gewonnen wurden. Vor allem die Behavioristen (Mandler und Mandler 1964; Skinner 1938; Thorndike 1898, 1911) nutzten Tiere (Katzen, Tauben, Ratten), um zu untersuchen, wie diese Aufgaben lösen und welches Lernverhalten sie zeigen. So verwendete Thorndike eine Kiste mit Tür, in der sich ein einfacher Mechanismus befand, um die Tür zu öffnen. Thorndike war daran interessiert, ob Tiere diesen Verschluss entdeckten und wie sich diese Erfahrung auf weitere Versuche, in denen das Tier wieder in den Käfig gesetzt wurde, auswirkte. Er fand, dass Katzen dieses Problem nicht durch **Einsicht** lösten, d. h. nach der Entdeckung des Türmechanismus diesen in der Folge immer erfolgreich weiter verwenden, sondern dass sie dieses graduell durch Versuch und Irrtum (*trial and error*) lernten. Für die Behavioristen war dies der Beleg, dass Tiere generell durch Versuch und Irrtum Probleme lösen.

Wolfgang Köhler (1921) ging dieser Behauptung weiter nach und entwickelte faszinierende neue Ideen bei der Untersuchung problemlösender Tiere und für das Verständnis des Denkens generell. Von 1914 bis 1920 leitete Köhler die Anthropoidenstation auf Teneriffa. In dieser Zeit führte er zahlreiche Untersuchungen an Schimpansen durch, denen er unterschiedliche Problemlöseaufgaben stellte. Eine Aufgabe bestand z. B. darin, dass eine Banane außerhalb des Käfigs lag und die Affen diese nicht mit ihren Armen erreichen konnten. Im Käfig befanden sich zwei Stöcke, die ineinander gesteckt werden konnten. Gelang dies, konnte die Distanz zur Banane überwunden werden. Nach der oben festgelegten Definition haben wir es mit einer klassischen Problemlösesituation zu tun. Die Fragen lauteten nun: Sind Schimpansen in der Lage, dieses Problem zu lösen und, wenn ja, auf welche Weise bewerkstelligen sie dies? Primus der Schimpansengruppe war Sultan, ein Schimpansenaffenmännchen. Dieser löste das Problem wie folgt: Er versuchte zunächst erwartungsgemäß, die Banane mit den ausgestreckten Armen zu erreichen, und scheiterte. Auch die Verwendung eines einzelnen Stockes löste das Problem nicht. Nun suchte er Köhler (1921) zufolge aber nicht blind nach einer Lösung, sondern steckte zielgerichtet die Stöcke richtig ineinander und fischte damit erfolgreich nach der Banane. Für Köhler war dies der Beleg, dass auch Menschenaffen einsichtsvoll Probleme lösen können und nicht blind nach Versuch und Irrtum vorgehen. Was das genau bedeutet, werden wir in ► Abschn. 16.5.3 genauer beleuchten.

Eine weitere wichtige Beobachtung, die schon Hinweise auf die späteren Annahmen der Problemraumtheorie gibt, lieferte folgende Beobachtung eindrucksvoll. Köhler befestigte eine Banane hoch oben an der Decke, und wiederum war es für Sultan unmöglich, diese durch Strecken und Springen zu erreichen. Im Raum befanden sich allerdings noch einige Kisten, die übereinandergestellt die Distanz zur Decke überbrücken konnten. Es zeigte sich, dass insbesondere Sultan in der Lage war, die Kisten als mögliches Podest zu erkennen und richtig mit dem bestehenden Problem in Verbindung zu bringen. Darüber hinaus gelang es Sultan, das Problem in Teilziele zu zerlegen (Abb. 16.3A und 16.3B), d. h., es wurden die Kisten aus dem Raum zunächst unter der Banane platziert, dann aufeinandergestellt, und im letzten Schritt kletterte er die Konstruktion hoch und schnappte sich die Banane.

Zur Vertiefung 16.1

Labyrinthbeispiel

Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich am Eingang eines Labyrinths. Sie wissen, dass dieses Labyrinth einen Ausgang hat und dass sich hinter diesem Ausgang ein Koffer mit 1 Mio. Euro befindet. Sie betreten das Labyrinth und gehen zur ersten Kreuzung, von der drei weitere Gänge in unterschiedliche Richtungen abgehen. Sie wählen einen der Gänge und stoßen auf die nächste Kreuzung, von der wiederum drei weitere Gänge abgehen usw. Diese Situation illustriert, wie sich Newell und Simon (1972) die *Suche im Problemraum* vorstellen. Der Problemlöser beginnt mit einem bestimmten *Ausgangszustand* (Eingang des Labyrinths) und möchte einen bestimmten *Zielzustand* (Ausgang des Labyrinths) erreichen. Durch bestimmte Handlungen (in Gang 1, 2, 3 oder zurück gehen) kann der Ausgangszustand in einen neuen Zustand transformiert werden (Erreichen der nächsten Kreuzung) und dieser wiederum in einen neuen (Erreichen einer weiteren Kreuzung) usw. Je nach Problem gibt es dabei eine Vielzahl möglicher Zustände. Die Gesamtheit aller möglichen Zustände wird **Problemraum** genannt (die Gesamtheit aller Kreuzungen und Ausgänge des Labyrinths). Oft führt der Problemlöser keine tatsächliche Handlungen aus, um einen Zustand in den nächsten zu transformieren, sondern „mentale Handlungen", die in der Problemraumtheorie als mentale **Operatoren** bezeichnet werden. Solche mentalen Operatoren werden meist in Form von Wenn-dann-Regeln ausgedrückt, die spezifizieren, auf welche Zustände eine bestimmte Transformation angewandt werden kann (z. B. *Wenn* ein Gang nach links abzweigt, *dann* gehe nach links).

Natürlich genügen Köhlers Beobachtungen nicht den heute geltenden strengen methodischen Kriterien, dennoch haben die Art der Fragestellung, die gefundenen Beobachtungen und die Interpretation der Ergebnisse einen hohen Einfluss auf die Psychologie des Problemlösens. Wir werden dies in ▶ Abschn. 16.5 noch ausführlicher sehen.

Wie die Ideen der frühen Arbeiten der Gestaltpsychologen die weiteren Entwicklungen der Problemlöseforschung beeinflusst haben, zeigt insbesondere die derzeit wichtigste Theorie zum Problemlösen innerhalb der Kognitionspsychologie – die Problemraumtheorie.

16.4.2 Computer lösen Probleme – die Problemraumtheorie

Schon gegen Ende der 1950er Jahre begannen Wissenschaftler, Computermodelle kognitiver Prozesse zu entwickeln. Damit ging eine zunehmende Abkehr von den bis dato vorherrschenden behavioristischen Annahmen über beobachtbare Reiz-Reaktions-Zusammenhänge und eine Hinwendung zur Untersuchung kognitiver, also nicht beobachtbarer mentaler Prozesse einher. Besondere Bedeutung haben dabei die Arbeiten von Newell und Simon (1972), die Problemlösen als Suchprozess innerhalb eines Problemraumes verstanden haben. Ihre Analyse des Problemlösens im Rahmen des *Informationsverarbeitungsansatzes* ist immer noch das wichtigste Paradigma für die aktuelle Problemlöseforschung. Es sollen nun die zentralen Merkmale der Theorie eingeführt und dann anhand einer Reihe von Beispielen die Kernpunkte der Theorie illustriert werden (▶ Zur Vertiefung 16.1).

Zentral für Newell und Simons (1972) Theorie ist der Begriff des *Problemraumes*. Der Problemraum umfasst die Gesamtheit aller Zustände, die sich aus der Anwendung der verfügbaren Operatoren auf jeden denkbaren Zustand ergeben. Der Problemraum ist also ein formaler Möglichkeitsraum, der alle denkbaren Zustände umfasst, die bei der Lösung eines Problems auftreten können, egal ob diese zielführend sind oder nicht. Der Problemraum für ein bestimmtes Problem wird durch eine formale *Aufgabenanalyse* oder *Problemanalyse* festgestellt. Sobald man eine Aufgabenanalyse durchgeführt hat, kann man also jede denkbare Problemlösung als Pfad im Problemraum darstellen. Wichtig ist dabei die Annahme, dass Menschen nicht alle Möglichkeiten zufällig oder nacheinander ausprobieren, sondern *allgemeine Heuristiken* (Daumenregeln) benutzen, um die Zahl möglicher Lösungspfade einzuschränken. Mithilfe von Heuristiken lassen sich Zustände vermeiden, die wahrscheinlich nicht zur Lösung führen werden. Deswegen wird Problemlösen oft auch als heuristische Suche im Problemraum bezeichnet. Unter einer Heuristik versteht man eine Strategie, Methode oder Entscheidungshilfe, um die Anzahl von Zuständen im Suchraum einzuschränken. Solche Strategien können eine Menge Suchaufwand ersparen und führen häufig, aber nicht immer, zum Ziel.

▪ Heuristiken

Drei typische **Heuristiken** werden nachfolgend etwas genauer beschrieben, und zwar die Vermeidung von Schleifen, die Unterschiedsreduktion und die Mittel-Ziel-Analyse. Die *Schleifenvermeidungsheuristik* besteht darin, sich Zustände zu merken, die man bereits vorher durchlaufen hat, und somit eine Wiederholung zu vermeiden. Eine zweite Heuristik, die **Methode der Unterschiedsreduktion** (*hill climbing*) besteht darin, immer den mentalen Operator anzuwenden, der den aktuellen Zustand in einen Zustand überführt, der dem Ziel möglichst ähnlich ist. Um diese Methode nutzen zu können, braucht man ein Maß der Ähnlichkeit zwischen beliebigen Zuständen im Problemraum und dem Zielzustand.

Die wichtigste Vorgehensweise beim Problemlösen besteht in der Bildung von *Teilzielen*. Diese Strategie hilft dem Problemlöser, das Problem zu strukturieren, nicht zielführende Zustände schnell zu identifizieren und dadurch die Lösung deutlich zu vereinfachen, falls adäquate Teilziele gebildet werden. Die bekannteste Heuristik, die Teilzielbildung verwendet, ist die von Newell und Simon (1972) vorgeschlagene **Mittel-Ziel-Analyse** (*means-end analysis*). Sie besteht aus drei aufeinanderfolgenden Schritten: Im ersten Schritt wird die Differenz zwischen aktuellem Zustand und Zielzustand festgestellt. Im zweiten Schritt wird ein Teilziel gebildet, dessen Erreichen die Differenz zwischen aktuellem Zustand und Zielzustand reduziert. Im dritten Schritt wird der mentale Operator angewendet, der zum Erreichen des Teilzieles führt. Zunächst werden so lange Teilziele erstellt, bis eines erreicht wird, das direkt über die Anwendung eines Ope-

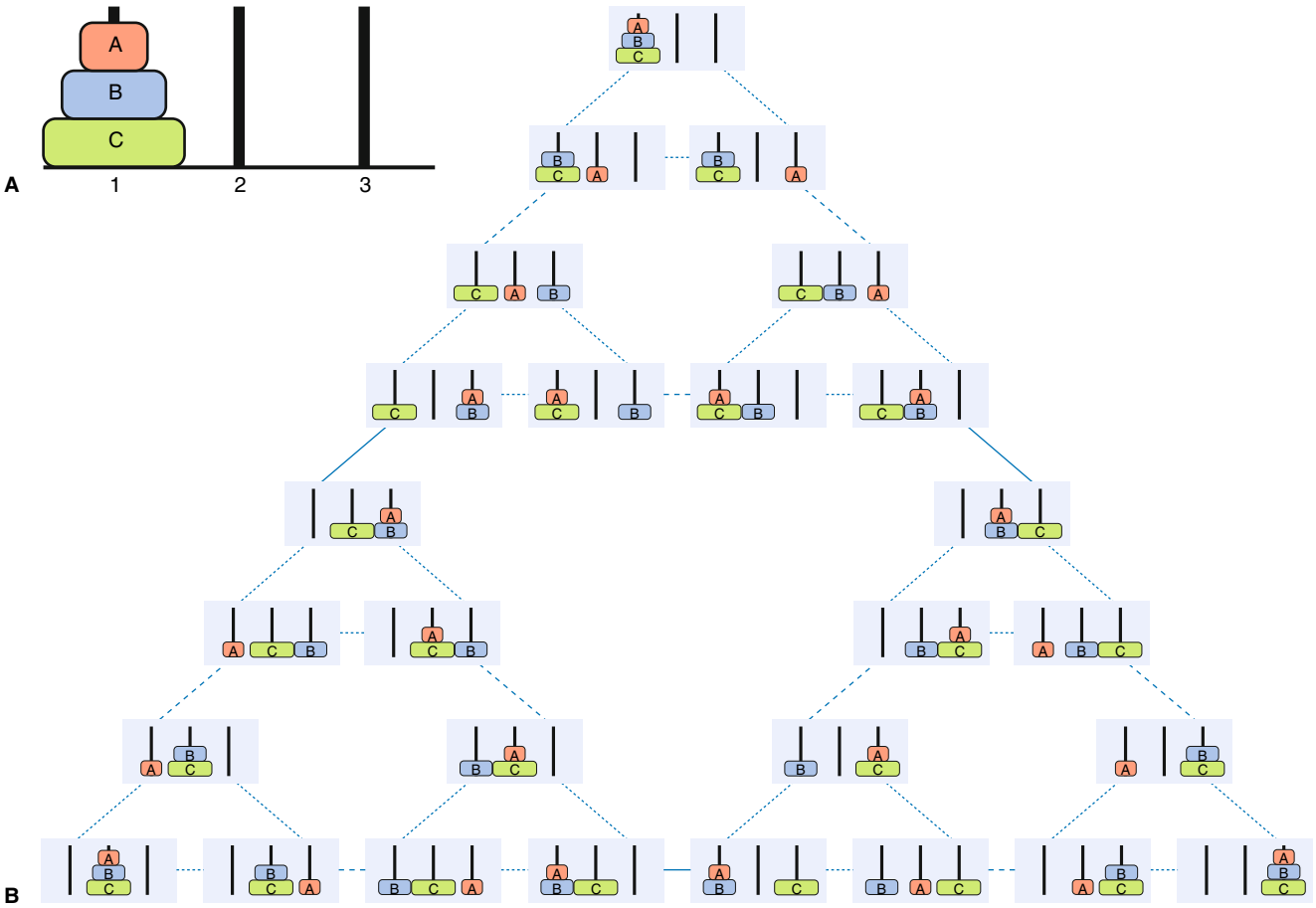


Abb. 16.4 Turm von Hanoi. Ausgangszustand der Problemstellung (**A**) und vollständiger Problemraum (**B**). Die optimale Lösung ergibt sich, wenn man dem ganz rechten Pfad des Problemraumes folgt

rators erreicht werden kann. Diese Vorgehensweise haben wir bereits bei den Kisten stapelnden Schimpansen kennengelernt.

Wiederholen wir kurz die notwendigen Schritte (Abb. 16.3B–E). Der Affe erkennt, dass er die Banane (das Ziel) nicht erreichen kann. Er bildet daraufhin ein Teilziel (Distanz verringern), das darin besteht, auf eine Kiste zu steigen und die Distanz zum Ziel zu reduzieren. Allerdings steht noch keine Kiste unter der Banane, d. h., weitere Teilziele müssen zunächst realisiert werden. So muss der Affe zur Kiste gehen und dann die Kiste unter die Banane bewegen. Ein falscher Lösungspfad wäre z. B., wenn der Affe zur Kiste ginge und sich dann dort auf die Kiste stellen würde. Folglich muss er sich an frühere Teilziele erinnern und die Kiste unter die Banane bewegen, um dann auf die Kiste zu steigen und die Banane zu ergreifen.

Ganz schön kompliziert, oder? Wie Sie sehen, erfordert selbst ein so einfach wirkendes Problem eine Reihe von kognitiven Schritten und bestimmten kognitiven Funktionen, wie z. B. einem Arbeitsgedächtnis, in dem die Teilziele abgelegt werden können (▶ Kap. 12). Sie haben wahrscheinlich aber auch bemerkt, dass die Teilzielbildung ein sehr eleganter Ansatz ist, um ein Problem zu lösen, der sich leicht formalisieren lässt, also in eine allgemeingültige Vorgehensweise übersetzen lässt. So sind kognitive Architekturen entwickelt worden, die den Problemlöseprozess über genau dieses Vorgehen auf Computern nachbilden können (z. B. das ACT-R-Modell von Anderson 1993).

Der große methodische Wert für die Problemlöseforschung besteht dabei darin, dass sie einen normativen und allgemeingültigen Ansatz darstellt, der es erlaubt, Problemstrukturen in idealisierter Weise zu spezifizieren und die bestmögliche Lösung eines Problems festzustellen. Dadurch erlaubt sie das Ableiten von psychologischen Gesetzmäßigkeiten zum allgemeinen Problemlöseverhalten. Systematische Abweichungen von der optimalen Strategie, Verzerrungen in der Problemrepräsentation und Fehler können analysiert werden, um festzustellen, welche Aspekte von Problemen für Problemlöser schwierig sind und welche der möglichen Strategien zur Problemlösung eingesetzt werden. Allerdings sind die große Allgemeingültigkeit und Formalisierbarkeit, was die tatsächlichen praktischen Problemlösekompetenzen von Menschen angeht, auch arbiträr und wahrscheinlich durch komplexe Probleme alltagstauglicher abgebildet (▶ Abschn. 16.3).

Ausgewählte empirische Untersuchungen zur Problemraumtheorie

Die zentralen Ideen der Problemraumtheorie sollen nun anhand von Beispielen illustriert werden. Wir beginnen mit dem bekannten Turm von Hanoi. Als *Ausgangszustand* sind drei unterschiedliche Scheiben (A = kleinste Scheibe, B = mittlere Scheibe, C = größte Scheibe; Abb. 16.4A) und drei Stäbe gegeben. Die Scheiben stecken zunächst auf dem linken Stab. Die Aufgabe be-

steht darin, die drei Scheiben vom linken zum rechten Stab zu bewegen. Dabei sind folgende Regeln zu beachten:

- Es darf immer nur eine Scheibe bewegt werden.
- Es darf keine größere Scheibe auf einer kleineren Scheibe zu liegen kommen.

Bevor Sie die Lösung betrachten, wäre es schön, wenn Sie versuchen würden, das Problem selbst anzugehen. Papier und Bleistift reichen aus. Achten Sie darauf, wie Sie vorgehen und an welchen Stellen Sie gegebenenfalls Probleme haben. Versuchen Sie danach, die Schwierigkeit zu erhöhen, indem Sie mit einer Version mit fünf Scheiben starten.

Aus diesen Angaben lässt sich ein eindeutiger *Problemraum* konstruieren (Abb. 16.4B). Der Problemraum umfasst alle möglichen zulässigen Zustände des Problems. Die Zustände ergeben sich aus dem Ausgangszustand und den Regeln oder *Operationen*, die für die Lösung des Problems erlaubt sind. So kann z. B. die kleinste Scheibe zunächst auf den mittleren oder den rechten Stab gelegt werden, und als Folge daraus ergibt sich, wo die mittlere Scheibe hingelegt werden kann usw. Eine Sequenz von solchen Operationen kann auch *Lösungspfad* oder *Lösungsweg* genannt werden. Der kürzeste Pfad zur Lösung ist der optimale Lösungsweg.

Wie würde man nun das Problem mit der Hill-Climbing-Methode lösen? Man würde einen Zug auswählen, der die Differenz zwischen Ausgangs- und Zielzustand maximal reduziert. In diesem Falle würde die kleinste Scheibe auf den ganz rechten Stab gelegt werden. Die nächsten Schritte sind bei dieser Methode schon komplizierter. Der nächst ähnlichere Zustand wäre ja, dass die mittlere Scheibe, die jetzt bewegt werden kann, und die kleine Scheibe auf dem rechten Stab liegen würden. Dies wäre dann dem Zielzustand schon sehr ähnlich – es fehlt ja nur noch die große Scheibe ganz unten. Allerdings müsste dazu erst die kleine Scheibe weggelegt werden. Es müssten also Teilziele gebildet werden, die vom Zielzustand wieder weiter entfernt sind. Es zeigt sich hier sehr schön, dass die sture Anwendung der Hill-Climbing-Strategie zu lokalen Maxima führen kann, die im weiteren Verlauf eher hinderlich sein können.

Das Beispiel illustriert auch, dass es kaum möglich ist, das Problem zu lösen, ohne es in Teilziele zu zerlegen (Mittel-Ziel-Analyse). So könnte ein Teilziel sein, zunächst die größte Scheibe vom linken auf den rechten Stab zu bewegen. Das ist mit vier Zügen möglich. Das nächste Teilziel kann darin bestehen, die mittlere Scheibe auf den rechten Stab zu bewegen, wozu zwei Züge nötig sind; und das letzte Teilziel, das dem Ziel entspricht, resultiert in dem Zug, der die kleinste Scheibe auf den rechten Stab bewegt. Natürlich kann der ganze Prozess noch in weitere Teilziele zerlegt werden. Der aufmerksame Leser hat wahrscheinlich auch realisiert, dass bei dieser Vorgehensweise gleichzeitig Hill Climbing eine Rolle spielt. So werden die Teilziele nicht willkürlich konstruiert, sondern so, dass sie dem Zielzustand immer stärker ähneln. Allerdings wird die Hill-Climbing-Methode nun immer in Bezug auf ein kleineres Teilziel und nicht mehr auf das gesamte Problem angewandt.

Ein weiteres Problem, das die Anwendung der Hill-Climbing-Methode und daraus resultierende Probleme gut illustriert, ist das *Hobbits-und-Orks-Problem* (das Problem wird manchmal auch Missionare-und-Kannibalen-Problem oder Wölfe-und-Schafe Problem genannt). Die Aufgabe besteht darin, mit einem Boot drei Hobbits und drei Orks von einem Ufer eines Flusses zum gegenüberliegenden Ufer zu transportieren. Dabei sind folgende Regeln zu beachten:

- Das Boot fasst nur zwei Individuen, und es muss sich auf jeder Überquerung mindestens ein Individuum im Boot befinden.
- Zu keinem Zeitpunkt dürfen sich an den Ufern mehr Orks als Hobbits befinden. Die Orks würden die Hobbits in diesem Falle auffressen, was zu vermeiden ist.

Versuchen Sie sich bitte wieder zunächst an dem Problem mit Papier und Bleistift, und achten Sie darauf, an welchen Stellen Sie Schwierigkeiten haben, wo Sie neu starten oder nicht mehr weiter wissen. In der optimalen Lösung muss das Boot genau elfmal über den Fluss bewegt werden (Abb. 16.5A).

In einer Untersuchung führte Thomas (1974) das Hobbits-und-Orks-Problem durch. Er zeichnete dabei jeden Zug, den die Teilnehmer ausführten, auf. In der Analyse stellte er fest, wie häufig nichtoptimale Züge durchgeführt wurden. Das sind zum einen Züge, die dazu führten, dass Hobbits von Orks aufgefressen werden, und zum anderen Züge, die zwar zulässig sind, aber nicht zum Ziel führen. Abb. 16.5B zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Dabei fällt auf, dass bei Zustand 3 und Zustand 6 weit häufiger nichtoptimale Züge ausgeführt wurden als bei den übrigen Zuständen. Außerdem verstrich bei diesen Zuständen signifikant mehr Zeit, bevor die Problemlöser den nächsten Zug auswählten. Überlegen Sie bitte kurz, wie sich dieses Datenmuster durch die Annahmen der Problemraumtheorie erklären lässt.

Das Muster lässt sich folgendermaßen interpretieren: Bei Zustand 3 stehen mehr unterschiedliche Züge, die ausgeführt werden können, zur Auswahl als bei den anderen Zuständen (drei zugelassene, von denen nur einer wirklich weiterhilft, und zwei illegale, die dazu führen, dass Hobbits aufgefressen werden), d. h., an dieser Stelle muss der Problemlöser eine Reihe von möglichen Zuständen durchsuchen. Die hohe Schwierigkeit bei Zustand 6 hat dagegen andere Ursachen. In diesem Zustand befinden sich schon zwei Hobbits und zwei Orks auf dem Zielufer, und man muss nun im nächsten Zug jeweils einen Hobbit und einen Ork zurück ans Zielufer befördern. Man muss sich also zunächst vom Zielzustand entfernen, um das Ziel letztendlich zu erreichen. Dies widerspricht, wie wir oben schon gesehen haben, der Hill-Climbing-Heuristik, und deutet darauf hin, dass die Problemlöser tatsächlich die Hill-Climbing-Strategie anwandten.

Die Untersuchungen von Atwood und Polson (1976) liefern weitere empirische Evidenz für die Annahmen der Problemraumtheorie, insbesondere für die Verwendung der Hill-Climbing-Methode (▶ Zur Vertiefung 16.2). Anders als in den bisher geschilderten Studien formulierten Atwood und Polson explizite Annahmen über *Kapazitätsbeschränkungen*. So gingen sie davon aus, dass Problemlöser nur jeweils den nächsten Zug vorausplanen und dass nur eine bestimmte Zahl alternativer Züge im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden kann. Experimentell verwendeten sie Aufgaben, die auf zweierlei Art gelöst werden konnten, entweder im Sinne einer Verwendung der Hill-Climbing-Methode oder eben nicht. Ihre Untersuchungen lieferten überzeugende Belege dafür, dass Problemlöser Heuristiken ver-

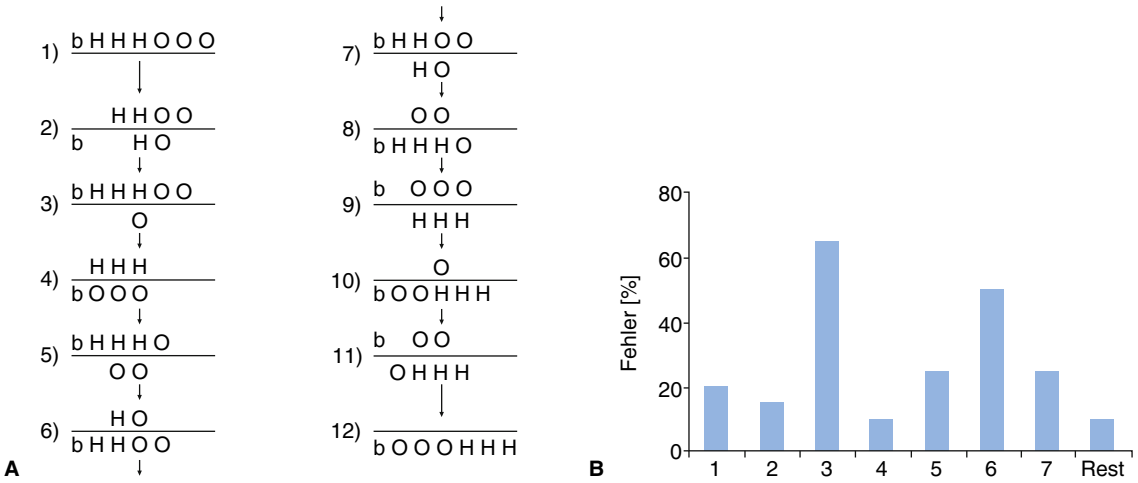


Abb. 16.5 Das Hobbits-und-Orks-Problem: kürzester Lösungsweg. (A) H steht für Hobbit, O für Ork. Der Buchstabe b steht für das Boot und markiert durch seine Position (oben oder unten) auf welcher Seite des Flusses sich das Boot gerade befindet. (B) Häufigkeit nichtoptimaler Züge für jeden Zustand in der Studie von Thomas (1974)

wenden, weil diese häufiger den Lösungsweg wählten, der die Distanz zum Ziel reduzierte (Abb. 16.6).

In weiteren Experimenten stellten sie zudem fest, dass Problemlöser weniger Schwierigkeiten mit Aufgaben hatten, die durch Anwendung der Mittel-Ziel-Analyse strukturierbar waren als bei Problemen gleicher Komplexität, bei denen die Anwendung der Mittel-Ziel-Analyse in die Irre führte. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass Problemlöser tatsächlich versuchten, die Aufgabe durch die Bildung von Teilzielen zu strukturieren.

Anwendbarkeit der Problemraumtheorie

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass wohl definierte Transformationsprobleme lange Zeit im Zentrum der Forschung zur Problemraumtheorie standen. Es zeigte sich, dass die generellen Annahmen der Problemraumtheorie für klar definierte Probleme zutrafen. Probanden verwenden die Hill-Climbing-Methode und bilden Teilziele, um solche Probleme zu lösen. Das Ziel der Problemrautheorie war es, ein generelles Modell für menschliches Problemlösen zu bieten. Dies hat sich allerdings so nicht bewahrheitet. Die Problemraumtheorie scheitert an Alltagsproblemen aufgrund der Komplexität und der unklaren Problemzustände (Funke 2003). Darüber hinaus gibt es auch, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, eine Reihe von einfachen Problemen, die mit dem Standardmodell der Problemraumtheorie nicht gelöst werden können. Dies schränkt den Geltungsbereich der Theorie ein. Im nächsten Abschnitt werden mögliche Erweiterungen der Problemraumtheorie diskutieret, die versuchen, den Anwendbarkeitsbereich dieser Theorie auf bestimmte einfache Probleme auszudehnen. Bei der Entwicklung dieser Theorien stand die Erklärung von Phänomenen im Mittelpunkt, die schon die Gestaltpsychologie thematisiert hatte.

16.5 Erweiterung der Problemraumtheorie

In der Folge soll eine Klasse von Problemen diskutiert werden, die sich dadurch auszeichnen, dass sie in der Regel durch bloße Suchprozesse nicht gelöst werden können, sondern Umstrukturierungsprozesse erfordern. Das heißt, entweder die Ausgangssituation oder der gewünschte Zielzustand ist zunächst so repräsentiert, dass eine Lösung nicht möglich ist. Bevor wir uns neuere Theorien zu diesem Themenkomplex anschauen, wollen wir zunächst die historischen Anfänge, die auf die Arbeiten der Gestaltpsychologen zurückgehen, beleuchten, um uns dann mit aktuellen kognitiven und neurokognitiven Untersuchungen zu befassen.

16.5.1 Umstrukturierung aus gestaltpsychologischer Sicht

In ▶ Abschn. 16.4.1 haben wir bereits eine zentrale Figur der Gestaltpsychologie kennengelernt. Die Arbeiten von Wolfgang Köhler (1921, 1947) stellen zusammen mit den Arbeiten von Max Wertheimer (1964) und Karl Duncker (1935) ein wichtiges Fundament der Problemlöseforschung dar, das bis heute die aktuelle Forschung befruchtet. Obwohl die Gestaltpsychologen vor allem an Wahrnehmungsphänomenen interessiert waren (▶ Kap. 2), versuchten sie die für die Wahrnehmung definierten Erklärungsprinzipien auch auf das Problemlösen und generell auf Denkvorgänge zu übertragen. Dies geschah in Auseinandersetzung mit Vertretern des *Behaviorismus*, die behaupteten, dass auch neue Probleme entweder mittels Versuch und Irrtum oder durch die Reproduktion früher gelernter Reaktionen gelöst werden (▶ Kap. 10, ▶ Abschn. 16.4.1).

Wenden wir uns noch einmal Köhlers Beobachtungen an seinen Schimpansen zu. Es wurde bereits angedeutet, dass offenbar auch diese schon in der Lage sind, ein Problem einsichtsvoll zu lösen. Hierin besteht der Kernpunkt der gestaltpsychologischen Betrachtungsweise des Denkens. Es ging den Gestaltpsychologen darum, produktives Denken zu verstehen und dieses von reproduktivem Denken abzugrenzen. Der wesentliche Mechanismus, der dabei am Werk ist, wurde als **Umstrukturierung** bezeichnet. Unter Umstrukturierung verstehen die Gestaltpsychologen, die Gegebenheiten eines Problems in einer Weise neu zu strukturieren, dass die Teile des Problems so zusammenspielen, dass sich

Zur Vertiefung 16.2

Wasserumschüttaufgaben

Atwood und Polson (1976) verwendeten in ihren Untersuchungen Aufgaben der folgenden Art: Drei Krüge, A, B und C, fassen acht, fünf und drei Tassen Wasser. Zu Beginn ist nur Krug A mit acht Tassen gefüllt, und die Krüge B und C sind leer (Anfangszustand). Die Aufgabe besteht darin, durch beliebiges Umgießen zwischen den Krügen die acht Tassen gleichmäßig auf Krug A und B zu verteilen, sodass jeder dieser Krüge vier Tassen enthält (Zielzustand). Bitte versuchen Sie, das Problem selbst zu lösen, bevor Sie weiterlesen.

Abb. 16.6 zeigt die kürzesten Lösungswege für dieses Problem (es gibt noch weitere Möglichkeiten, das Problem zu lösen). Den Annahmen der Problemraumtheorie zufolge sollten die Versuchsteilnehmer die Hill-Climbing-Methode benutzen. Sie sollten versuchen, Zustände herzustellen, in denen der Inhalt von Krug A und B möglichst vier Tassen entspricht. Aus dieser Hypothese lässt sich eine Voraussage darüber ableiten, ob Problemlöser mit dem ersten Zug eher Zustand 2 oder Zustand 9 herstellen. Wie würden Sie starten?

Wie erwartet führten zwei Drittel der Teilnehmer den Zug aus, der Zustand 9 herstellt, also den Zustand, der dem Ziel am ähnlichsten ist. Weitere Evidenz für die Verwendung der Heuristik ergab sich aus der Analyse des Zustands 11. Problemlöser, die diesen Punkt erreicht hatten, wichen an dieser Stelle oft vom korrekten Lösungspfad ab und gossen wieder von A nach C um, anstatt die große Abweichung vom Zielzustand in Zustand 12 zu akzeptieren. Dies kann als weiterer Beleg gewertet werden, dass es Problemlösern schwerfällt, von der Hill-Climbing-Heuristik abzuweichen.

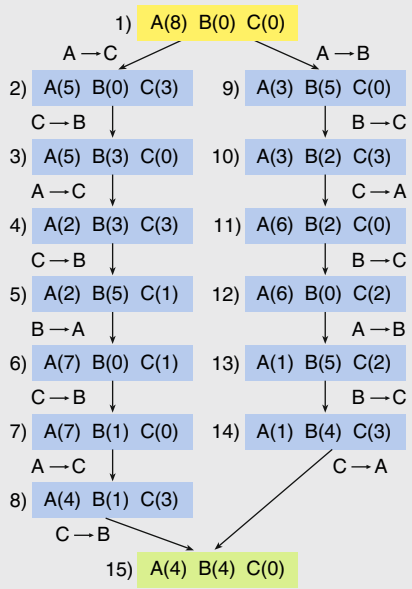


Abb. 16.6 Zwei Lösungswege für das Wasserumschüttproblem. Die Zahlen stehen für die einzelnen Problemzustände. Kritisch sind die Zustände 2 und 9

eine Lösung des Problems ergibt. Bei unserem Beispiel mit dem Kisten stapelnden Sultan liegt die Umstrukturierung darin, dass Sultan realisierte, dass die herumliegenden Kisten zur Lösung des Problems beitragen können, wenn sie aufeinandergestellt wären, d. h., Sultan hat die Elemente der Situation so in Verbindung gebracht (strukturiert), dass sich eine Lösung für sein Problem ergab.

Anhand Köhlers Beobachtungen lassen sich auch gut vier unterschiedliche Phasen kreativen Problemlösens verdeutlichen, die von Wallas (1926) eingeführt wurden und bis heute eine hilfreiche Richtschnur liefern, um kreatives Problemlösen zu strukturieren:

Wenn wir versuchen, ein schwieriges Problem zu lösen, starten wir mit einer *Vorbereitungsphase*, in der das Problem formuliert wird und erste Lösungsversuche, das Problem durch bereits bekannte Lösungsstrategien (reproduktives Denken) zu lösen, scheitern (Versuche, die Banane durch Springen zu erreichen). Danach folgt die *Inkubationsphase*, in der das Problem beiseitegelegt wird (stilles Betrachten der Situation), gefolgt von einer *Illuminationsphase*, in der eine plötzliche Einsicht die Lösung bringt (plötzliches Aufspringen und Umstrukturierung der Problemelemente). Zuletzt folgt die *Verifikationsphase*, in der überprüft wird, ob die Lösung auch tatsächlich korrekt ist und so das Ziel erreicht wird (Aufschichten der Kisten und Pflücken der Banane). An diesem Modell lassen sich auch zwei Prozesse des Problemlösens unterscheiden (Evans 2008): auf der einen Seite ein analytisches, logisches und bewusstes Vorgehen in der Vorbereitungs- und Verifikationsphase, auf der anderen Seite unbewusste, holistische und implizite Prozesse in der Inkubationsphase, die in der Illumination bzw. einem **Aha-Moment** gipfeln.

In der Folge betonten die Gestaltpsychologen, dass einsichtsvolles Problemlösen *produktives Denken* erfordert (Wertheimer 1964). Sie gingen davon aus, dass produktives Denken vor allem bei der Bearbeitung neuer Probleme auftritt und eine Reorganisation der Problemsituation erfordert, die nicht auf bestehendes Vorwissen reduzierbar ist und oft sogar durch Vorwissen behindert wird.

Solche Umstrukturierungen treten in der Wahrnehmung beim Betrachten ambiger, d. h. mehrdeutiger, Objekte wie dem Necker-Würfel auf (Abb. 16.7A). Betrachtet man diesen Würfel längere Zeit, so steht die mit dem Stern markierte Ecke manchmal im Vordergrund des Würfels und manchmal im Hinter-

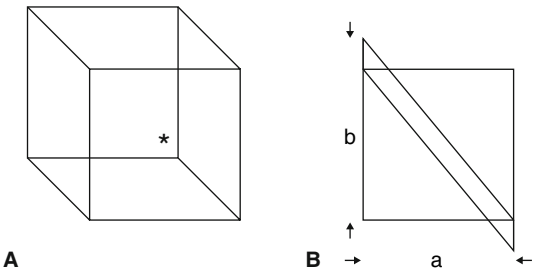


Abb. 16.7 **A** Visueller Kippeindruck beim Necker-Würfel. **B** Problemstellung des Parallelogramm-Quadrat-Problems nach Wertheimer (1925)

grund. Der Wechsel zwischen beiden Wahrnehmungseindrücken kommt durch eine gleichzeitige Neu- oder Reorganisation (Umstrukturierung) der Elemente des Würfels (Ecken, Kanten) zustande. Die Gestaltpsychologen nahmen an, dass solche Umstrukturierungsprozesse auch beim Problemlösen und beim Denken generell eine zentrale Rolle spielen.

Diese Annahme soll nun an einem eleganten Beispiel, das Max Wertheimer bereits 1925 untersucht hat, demonstriert werden. Gegeben ist die Figur in Abb. 16.7B. Sie sehen ein Quadrat, über dem ein schmales Parallelogramm liegt. Als Aufgabe ist die resultierende Fläche zu berechnen, die sich aus der Parallelogramm- und der Quadratfläche ergibt, wobei die Strecken a und b gegeben sind. Versuchen Sie bitte, dieses Problem selbst zu lösen, bevor die Lösung im Detail dargestellt wird. Die Lösung finden Sie am Ende des Kapitels (Abb. 16.15).

Es sollen nun der Lösungsprozess betrachtet und die bereits eingeführten Konzepte darauf angewandt werden. Falls Sie selbst versucht haben, das Problem zu lösen, haben Sie wahrscheinlich in der Vorbereitungsphase versucht, sich an die Flächenberechnung von Parallelogramm und Quadrat zu erinnern. Sie haben so direkt nach einer Lösung gesucht, die in Ihrem Vorwissen abgelegt ist. Das Quadrat lässt sich mit $a * a$ einfach berechnen. Schwieriger gestaltet es sich, die Fläche des Parallelogramms zu ermitteln, was prinzipiell möglich ist (Abb. 16.15A). Vielleicht haben Sie auch das Gefühl erlebt, nicht mehr weiter zu wissen, oder Sie haben das Problem verärgert zur Seite gelegt (Inkubationsphase). Vielleicht hatten Sie aber auch die plötzliche Einsicht (Illumination), dass das Problem ganz einfach gelöst werden kann, wenn es gelingt, die Linien des Problems in einer neuen Weise zu strukturieren (Umstrukturierung; siehe Lösung in Abb. 16.15).

Die Arbeiten der Gestaltpsychologen zeichnen sich generell dadurch aus, dass sie eine ganze Reihe solcher faszinierender Probleme untersucht haben. Es sollen nun ein paar ausgewählte Probleme vorstellt werden, um weitergehende Aspekte einsichtsvollen Problemlösens zu diskutieren.

16.5.2 Weitere Aspekte von Umstrukturierung beim Problemlösen

Umstrukturierung und Wirksamkeit von Lösungshinweisen beim Zwei-Seile-Problem

Ein bekanntes Problem, mit dem sich Umstrukturierungsprozesse gut demonstrieren lassen, ist das Zwei-Seile-Problem von Maier (1930, 1931). Der Versuch lief folgendermaßen ab: Die Versuchsteilnehmer wurden in einen Raum gebracht, in dem zwei Seile an der Decke montiert waren. Außerdem befanden sich mehrere Gegenstände, z. B. Stühle, eine Zange oder Stäbe, in diesem Raum. Die Aufgabe bestand darin, die zwei Seile zusammenzubinden (Ziel). Das Problem bestand darin, dass die Seile zu weit auseinander hingen (Ausgangssituation), um sie gleichzeitig mit beiden ausgestreckten Armen zu ergreifen (Abb. 16.8A). Den Teilnehmern gelang es, eine Reihe von Lösungen zu finden, die das Problem lösten. Die Maier zufolge einsichtsvolle „Pendellösung" bestand darin, eine Zange an einem der beiden Seile festzubinden und das Seil in eine starke Schwingung zu versetzen, sodass der Problemlöser, während er das eine Seil in der Hand hielt, das andere, schwingende Seil in der Aufwärtsbewegung greifen konnte. Der wesentliche Punkt war, dass die Zange in einer neuen und ungewöhnlichen Funktion verwendet wurde, eben als Pendelgewicht.

Darüber hinaus interessierte Maier, ob die Pendellösung durch einen Lösungshinweis erleichtert werden kann. Er wartete, bis die Teilnehmer bei der Lösung nicht mehr weiterkamen, und streifte dann, scheinbar unabsichtlich, eines der beiden Seile, sodass dieses leicht zu schwingen anfing. Kurz nach diesem Hinweis fanden einige der bis dato nicht erfolgreichen Teilnehmer die Pendellösung. Dabei gaben die meisten von ihnen an, den Hinweis nicht bewusst bemerkt zu haben. Maier zufolge zeigen diese Ergebnisse, dass unbemerkte Lösungshinweise eine Umstrukturierung der Problemsituation anstoßen können, die es erlaubt, die Problemelemente neu zu gruppieren.

Wie sich leicht einsehen lässt, genügen die Experimente Maiers nicht mehr den heute gültigen methodischen Kriterien. Daher sind die Ergebnisse schwer zu interpretieren. Sie inspirieren aber bis heute die Problemlöseforschung. Eine aktuellere Studie von Thomas und Lleras (2009) verwendete wieder eine Version des Zwei-Seile-Problems. Die Autoren unterteilten das Experiment in zwei Phasen. In der ersten Phase musste die eine Hälfte der Versuchspersonen eine Bewegung durchführen, bei der sie die Arme schwangen. Die andere Gruppe führte eine Bewegung durch, bei der sie die Arme streckten. Es zeigte sich in der zweiten Phase, bei der die Versuchspersonen das Zwei-Seile-Problem unter realen Bedingungen lösen sollten, dass die Armschwinggruppe signifikant besser abschnitt als die Vergleichsgruppe. Die Autoren interpretieren dies im Sinne eines Embodiment-Ansatzes (Pfeifer und Bongard 2006; ▶ Kap. 21) und gehen davon aus, dass es über die motorische Aktivierung zu einer unbewussten Bahnung (*priming*) der beteiligten semantischen Konzepte (wie schwingen) kommt.

Funktionale Gebundenheit

Eine weitere bekannte Untersuchung, die sich dezidiert mit dem Einfluss von Vorwissen auf die Problemlösung beschäftigte, stammt von Duncker (1935). Den negativen Einfluss von Vorwissen auf die Problemlösung bezeichnete er als **funktionale Gebundenheit**. Er vermutete, dass der vertraute Gebrauch von Objekten Problemlöser davon abhält, diese in einer anderen Funktion zu benutzen. Stellen Sie sich folgende Ausgangssituation vor: Sie haben eine Kerze, eine Schachtel mit Reißnägeln und eine Schachtel mit Streichhölzern zur Verfügung. Ihre Aufgabe besteht nun darin, nur mit diesen Hilfsmitteln die Kerze aufrecht

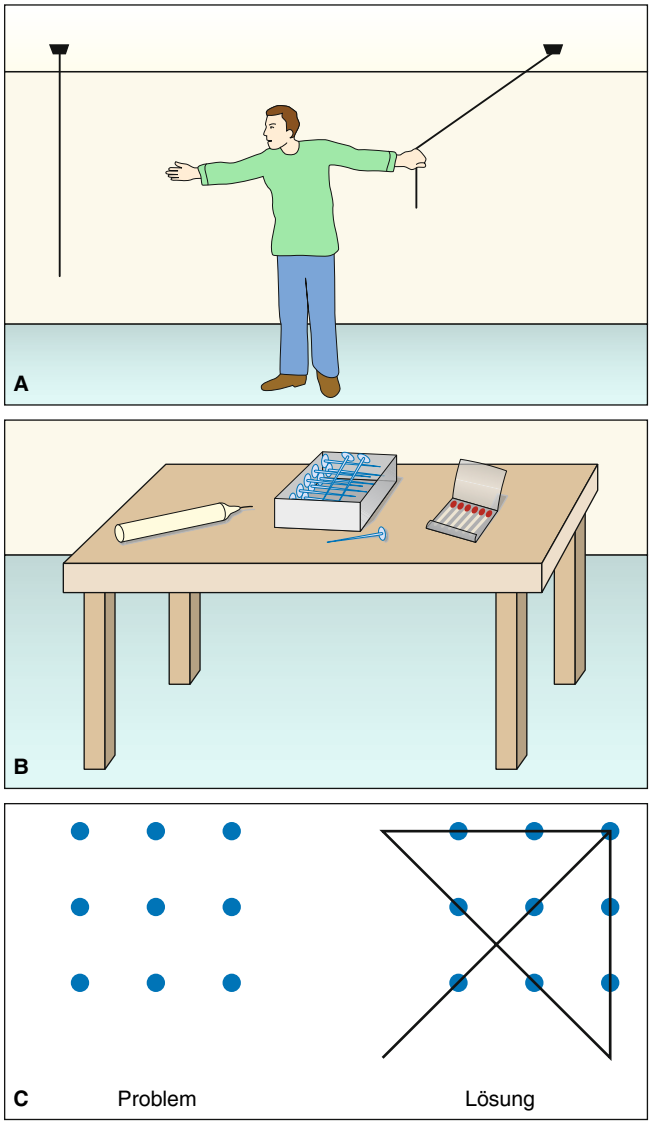


Abb. 16.8 Probleme zur Untersuchung von Umstrukturierung, funktionaler Gebundenheit und Fixierung. **A** Maiers Zwei-Seile-Problem, **B** Dunckers Kerzenproblem, **C** das Neun-Punkte-Problem

stehend an der Wand zu befestigen und anzuzünden, sodass sie als Lichtquelle dient. Wie würden Sie das Problem lösen?

Die Lösung besteht darin, die Kerze mit Wachs auf der Oberseite einer Schachtel zu befestigen und diese dann mit einem Reißnagel an der Wand zu fixieren (Abb. 16.8B). Die Teilnehmer in Dunckers Studien hatten große Schwierigkeiten, diese Aufgabe zu lösen. Viele versuchten, die Kerze mit einem Reißnagel direkt an der Wand zu befestigen oder das Wachs an der Kerze zu erhitzen, um diese direkt an die Wand zu „kleben". Duncker zufolge resultiert die Schwierigkeit des Problems daraus, dass die Schachtel nicht in ihrer gewohnten Funktion als Behälter, sondern in einer neuen Funktion als Plattform verwendet werden muss. Um weitere Evidenz für diese Vermutung zu erbringen, verwendete er in einem anderen Experiment zwei unterschiedliche Versionen der Aufgabe. Bei einer Gruppe befanden sich Kerzen, Reißnägel und Streichhölzer in den Schachteln, in der anderen Gruppe lagen die Gegenstände auf dem Tisch verstreut, und die Schachteln waren leer. Es zeigte sich, dass das Problem für die Gruppe, in der sich die Gegenstände anfangs in Schachteln befanden, wesentlich schwieriger war (vgl. auch Adamson 1952; Birch und Rabinowitz 1951). Für Duncker war dies ein klarer Beleg, dass die Benutzung der Schachteln als Behälter die Fixierung auf die gewohnte Funktion verstärkte.

Wie oben schon angedeutet wurde, kann die Schwierigkeit der Pendellösung im Zwei-Seile-Problem ebenfalls durch funktionale Gebundenheit erklärt werden. Möglicherweise ist die Lösung deswegen schwer zu finden, weil die gewohnte Funktion der Zange (z. B. Drähte zu biegen) es verhindert, dass man die Zange in der Funktion als Gewicht benutzt (Adamson und Taylor 1954; Keane 1989; Ohlsson 1992).

Fixierung beim Lösen von Problemen

Obwohl der Begriff der *Fixierung* eng mit dem Konzept der funktionalen Gebundenheit verknüpft ist, kann Fixierung auch andere Gründe haben als den gewohnten Gebrauch von Objekten, z. B. kann die Gruppierung von Einzelelementen zu einer kohärenten Gestalt dazu führen, dass innerhalb dieser Gruppierung nach einer Lösung gesucht wird. Ein berühmtes Beispiel hierfür stellt das Neun-Punkte-Problem dar (Maier 1930; Scheerer 1963).

Das Problem besteht darin, neun in einer 3×3-Matrix angeordnete Punkte mit vier kontinuierlichen, geraden Strichen zu verbinden, ohne den Stift zwischendurch anzuheben. Probieren Sie bitte selbst aus, die Lösung zu finden, bevor Sie diese in Abb. 16.8C nachschauen. Es zeigte sich in einer Reihe von Studien, dass sehr viele Personen dieses Problem nicht lösen konnten (ca. 10 % Lösungsrate), obwohl ihnen reichlich Zeit gegeben wurde (Kershaw und Ohlsson 2004). Scheerer (1963) erklärte den Befund damit, dass die Punkte, den Gestaltgesetzen folgend, zu einem Quadrat gruppiert werden. Dies führt zu der impliziten Annahme, dass die gezeichneten Linien innerhalb des Quadrats bleiben müssen (Ohlsson 1992). Solange man aber versucht, nur Linien zu zeichnen, welche die Grenzen des wahrgenommenen Quadrats nicht überschreiten, ist das Problem unlösbar. Wir werden uns später noch mit alternativen Erklärungen der Problemschwierigkeit beschäftigen.

Einstellungseffekte

Wie wir bereits gesehen haben, gingen die Behavioristen davon aus, dass „Übung den Meister macht", während die Gestaltpsychologen eher feststellten, dass sinnloser Drill produktives Denken verhindert (Katona 1940; Wertheimer 1964). Das Forschungsprogramm von Luchins (1942; Luchins und Luchins 1959) liefert umfangreiche Belege dafür, dass die gleichbleibende Wiederholung derselben Lösungsroutine Menschen tatsächlich davon abhalten kann, Probleme effektiv zu lösen (▶ Zur Vertiefung 16.3).

Luchins ging davon aus, dass **Einstellungseffekte** eine blinde Haltung gegenüber Problemen erzeugen. Diese kann Personen davon abhalten, ein Problem genauer zu analysieren, und stattdessen die mechanische Anwendung einer einmal eingeübten oder bekannten Methode begünstigen. Vertreter behavioristischer Theorien hielten dem entgegen, dass Einstellungseffekte eigentlich positiv zu bewerten seien, weil sie zu effektiverem Problemlösen führten, indem sie dem Problemlöser die Zeit sparen, für jedes Problem eine neue Strategie zu erfinden. Aktuelle Studien sprechen dafür, dass nicht nur das Wiederholen

derselben Lösungsroutine, sondern auch der wiederholte Zugriff auf dieselben Wissenselemente zu Einstellungseffekten führen kann (Lovett und Anderson 1996).

Nachdem wir einen ersten Eindruck von Umstrukturierung und einsichtsvollem Problemlösen gewonnen haben, rückt nun der Informationsverarbeitungsansatz der Problemraumtheorie wieder in den Fokus. Wie bereits erwähnt, besteht ein Problem der ursprünglichen Version von Newell und Simon (1972) darin, dass die Lösung einfacher Probleme, wie des Neun-Punkte-Problems, und der Prozess der Umstrukturierung nicht erklärt werden können. Es gibt aktuell verschiedene Ansätze, die versuchen, diese Einschränkung aufzuheben.

Zur Vertiefung 16.3

Untersuchung von Einstellungseffekten mit Wasserumfüllaufgaben

Luchins (1942) gab den Teilnehmern eine hypothetische Situation vor, in denen drei Krüge (A, B, C) unterschiedlicher Größe und ein unerschöpflicher Wasservorrat zur Verfügung standen. Die Aufgabe der Teilnehmer bestand darin, eine bestimmte Menge von Wasser in einem der Krüge herzustellen. Das erste Problem war ein Übungsproblem.

Sie können wieder mit Papier und Bleistift versuchen, das Problem selbst zu lösen. Versuchen Sie, in einem der Krüge eine Menge von 20 l herzustellen, gegeben Krug A, der 29 l fasst, und Krug B, der 3 l fasst. Die Lösung ist, Krug A einmal vollzufüllen und Krug B zu verwenden, um 3 × 3 l abzugießen. Danach bleiben in Krug A 20 l übrig. Bitte versuchen Sie, bevor sie weiterlesen, die restlichen Probleme selbst zu lösen. ◘ Tab. 16.1 zeigt eine Sequenz von Problemen, wie sie von Luchins (1942) verwendet wurden.

Probleme 2 bis 6 nannte Luchins Einstellungsprobleme, weil alle dieselbe Sequenz von Umschüttoperationen erforderten, nämlich Krug B füllen, einmal nach Krug A und zweimal nach Krug C abgießen ((B – A) – 2C, z. B. (127 – 21) – 3 – 3 = 100 in Problem 2). Danach folgten ambige Probleme (7, 8, 10 und 11). Diese zeichneten sich dadurch aus, dass sie entweder mit der eingeübten Methode gelöst werden konnten oder viel einfacher, nämlich durch einmaliges Umschütten z. B. von A nach C bei Problem 7. ◘ Tab. 16.2 zeigt jeweils beide Lösungen für die ambigen Probleme. Problem 9 aus ◘ Tab. 16.1 wurde von den Autoren verwendet, um den Teilnehmern zu helfen, sich von der eintrainierten *Einstellung* zu „erholen". Bei diesem Problem führte die eingeübte Sequenz B – A – 2C nicht zum Erfolg. Das Problem war ausschließlich mit der einfacheren Methode lösbar. Dadurch konnte festgestellt werden, ob das Scheitern der gewohnten („mechanisierten") Lösungsroutine die Problemlöser dazu bewegte, auf eine andere Methode zu wechseln.

◘ **Tab. 16.1** Beispiel für eine Sequenz von Umfüllaufgaben

Problem	Größe der Krüge			Herzustellende Menge
	A	B	C	
1. Übung	29	3		20
2. Einstellung	21	127	3	100
3. Einstellung	14	163	25	99
4. Einstellung	18	43	10	5
5. Einstellung	9	42	6	21
6. Einstellung	20	59	4	31
7. Ambig	23	49	3	20
8. Ambig	15	39	3	18
9. Nur direkt	28	76	3	25
10. Ambig	18	48	4	22
11. Ambig	14	36	8	6

◘ **Tab. 16.2** Lösungen für ambige Probleme

Problem	Einstellungslösung	Direkte Lösung
Ambig 1	49 – 23 – 3 – 3 = 20	23 – 3 = 20
Ambig 2	39 – 15 – 3 – 3 = 18	15 + 3 = 18
Ambig 3	48 – 18 – 4 – 4 = 22	18 + 4 = 22
Ambig 4	36 – 14 – 8 – 8 = 6	14 – 8 = 6

Zur Vertiefung 16.3 (*Fortsetzung*)

Tab. 16.3 zeigt typische Ergebnisse eines Experiments mit erwachsenen Teilnehmern. In der Kontrollgruppe, die nur ambige Probleme löste, wurde ausschließlich die direkte Lösung (einmaliges Umschütten) verwendet. Dagegen verwendeten die Teilnehmer der Experimentalgruppe, die zuvor mit Einstellungsproblemen trainiert wurden, in 75 % der Fälle die aufwendigere und eintrainierte Strategie. Dies übertrug sich sogar auf die Probleme 10 und 11, obwohl vorher das eindeutige Problem 9 zu lösen war. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass in der Experimentalgruppe starke Einstellungseffekte auftraten. Weitere umfangreiche Untersuchungen bestätigten diese Ergebnisse und zeigten, dass sich Teilnehmer nur sehr langsam von Einstellungseffekten erholten (Luchins 1942).

Tab. 16.3 Typische Lösungsraten für ambige Probleme

Gruppe	Einstellungslösung	Direkte Lösung	Keine Lösung
Einstellung (2–6 bearbeitet)	74 %	26 %	0 %
Kontrolle (2–6 nicht bearbeitet)	0 %	100 %	0 %

16.5.3 Kognitive Theorien einsichtsvollen Problemlösens

Eine Erweiterung der Problemraumtheorie zur Erklärung von Umstrukturierung wurde von Kaplan und Simon (1990) vorgenommen. Sie gehen davon aus, dass nicht bei allen Problemen der Ausgangszustand korrekt repräsentiert wird, obwohl das prinzipiell möglich wäre. Insbesondere besteht die Möglichkeit, dass entscheidende Aspekte bei der anfänglichen *Encodierung* des Problems nicht berücksichtigt werden. Daher kann während der Lösung eine Veränderung der Problemrepräsentation nötig werden, bei der ein *Elaborationsprozess* bisher fehlende Aspekte in der Problemrepräsentation ergänzt. Kaplan und Simon gehen davon aus, dass Problemlöser explizit, mithilfe von Heuristiken, versuchen, eine neue Problemrepräsentation zu finden, wenn sie realisieren, dass sie einer Lösung nicht näher kommen.

Um diese Annahmen zu überprüfen, forderten Kaplan und Simon einige Studenten auf, unterschiedliche Versionen des Problems des unvollständigen Schachbretts (Wickelgren 1974) zu lösen. Stellen Sie sich folgende Ausgangssituation vor: Sie sehen ein Schachbrett, bei dem das linke obere und das rechte untere Feld fehlen. Sie sollen nun angeben, ob mit 31 Dominosteinen, die immer zwei angrenzende Felder überdecken, die verbleibenden 62 Felder bedeckt werden können (Abb. 16.9 zeigt zwei Versionen des Problems). Vielleicht möchten Sie ja selbst überlegen, wie die Lösung des Problems aussieht. Aber Vorsicht! Einer der Teilnehmer am Experiment verbrachte Tage damit, die Lösung zu finden.

Die richtige Antwort ist, dass die verbleibenden 62 Felder des Brettes nicht mit 31 Dominosteinen bedeckt werden können, weil die zwei abgeschnittenen Felder dieselbe Farbe haben. In unserem Fall haben wir zwei schwarze Felder abgeschnitten, sodass es 32 weiße und 30 schwarze Felder gibt. Eine Überdeckung mit Dominosteinen, die immer ein weißes und ein schwarzes Feld bedecken, ist somit unmöglich. Dies kann man sich gut anhand der Brot-und-Butter-Version des Problems verdeutlichen (Abb. 16.9B). Jeder der rechteckigen Dominosteine kann nur zwei unterschiedliche Felder bedecken, aber niemals zwei Brotfelder oder zwei Butterfelder auf einmal. Die abgeschnitten Felder sind aber beide Butterfelder, was impliziert, dass 30 der verbleibenden Felder Butterfelder und 32 Brotfelder sind. Es zeigte sich, dass bei der Brot-und-Butter-Version dieser Missstand leichter entdeckt wurde als in der Schachbrettversion.

Kaplan und Simon vermuten, dass die große Schwierigkeit des Problems dadurch zustande kommt, dass die anfängliche Repräsentation einen Problemraum mit einer großen kombinatorischen Fülle von Zuständen generiert, der es den Versuchspersonen nicht erlaubt, diesen komplett zu repräsentieren. Zudem wird der zentrale Aspekt des Problems, dass 30 Felder eine Farbe und 32 Felder eine andere Farbe haben, schlichtweg nicht berücksichtigt. Zwei empirische Ergebnisse aus ihrer Studie unterstützen die letztere Annahme. Von den insgesamt vier verwendeten Versionen waren diejenigen am leichtesten zu lösen, welche die Unterschiedlichkeit der Felder am meisten betonte (Brot und Butter; Abb. 16.9B). Ein weiteres Ergebnis war, dass Lösungshinweise, die die Aufmerksamkeit der Problemlöser auf die Unterschiedlichkeit der Felder lenkten, die Lösung des Problems am stärksten erleichterten.

Die repräsentationale Veränderungstheorie

Die Veränderung von Problemrepräsentationen ist auch der wesentliche Mechanismus den Ohlsson (1992) in seiner repräsentationalen Veränderungstheorie zur Erklärung von Einsicht verwendet. Seine Theorie kann somit auch als eine Übersetzung der gestalttheoretischen Annahmen in kognitive Termini verstanden werden. Ohlsson geht davon aus, dass Problemlöser beim Lösen bestimmter Probleme **Sackgassen** antreffen, in denen die Lösung des Problems unmöglich erscheint, obwohl sie eigentlich alle notwendigen Kenntnisse und Fertigkeiten besitzen, um das Problem zu lösen. Das Ausbrechen aus Sackgassen ist von Einsicht begleitet. Folgt man diesen Annahmen, muss eine Theorie der Einsicht drei Fragen beantworten:

1. Warum treten Sackgassen beim Problemlösen auf?
2. Wie entkommen Problemlöser aus Sackgassen?
3. Was passiert nach dem Ausbrechen aus einer Sackgasse?

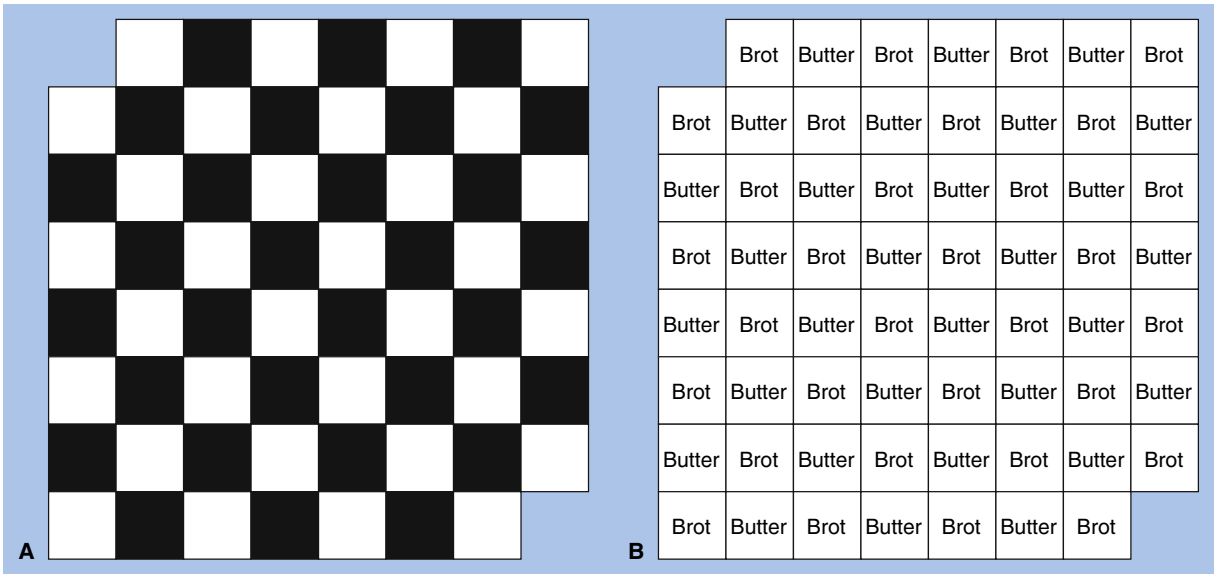


Abb. 16.9 Das Problem des unvollständigen Schachbrettes in der Originalversion (**A**) und in der Brot- und Butterversion (**B**)

Bevor wir uns mit den Antworten zu den Fragen beschäftigen, soll noch kurz auf den Begriff der Repräsentation in Ohlssons Theorie eingegangen werden. Die erste wichtige Unterscheidung bei Ohlsson ist die zwischen Problemrepräsentation und Zielrepräsentation. Die *Problemrepräsentation* umfasst dabei die Wahrnehmung und Gruppierung der gegebenen Problemelemente und die Aktivierung von Vorwissen, das mit dem Problem zu tun haben könnte. Die *Zielrepräsentation* legt dagegen fest, welche Operationen an dem gegebenen Problem möglich sind, d. h., was man machen darf oder kann, um das Problem zu lösen. Es lässt sich leicht einsehen, dass sich nun an unterschiedlichen Stellen des Problemlöseprozesses Schwierigkeiten ergeben können, was uns zurück zur Beantwortung der drei oben gestellten Fragen bringt:

1. Warum Sackgassen auftreten:
   - Einsichtsprobleme sind Probleme, bei denen mit hoher Wahrscheinlichkeit entweder die Problemrepräsentation oder die Zielrepräsentation der Problemlösung nicht angemessen, verzerrt oder unklar repräsentiert wird.
   - Probleme bei der anfänglichen Encodierung entstehen entweder durch Vernachlässigung bestimmter Problemaspekte, hinderliches Vorwissen oder unangemessene perzeptuelle Interpretation und Gruppierungen der Problemsituation.
   - Die anfängliche Problemrepräsentation legt fest, welche Operatoren im Langzeitgedächtnis aktiviert werden. Ist die Zielrepräsentation verzerrt, werden vorhandene Operatoren nicht aktiviert.
2. Wie Sackgassen aufgelöst werden:
   - Sackgassen können durch eine *Veränderung der Problem- oder Zielrepräsentation* aufgelöst werden. Durch die veränderte Repräsentation können neue Operatoren oder Gruppierungen von Problemelementen aktiviert werden, die eine Lösung des Problems möglich machen.
   - Es gibt unterschiedliche Wahrnehmungs- und Gedächtnisprozesse, die zur Veränderung der Problemrepräsentation führen können. Dazu gehören *Elaboration* (Ergänzung von Informationen zur Problemrepräsentation), *Re-Encodierung* (Reinterpretation des perzeptuellen Inputs) und die *Lockerung von Randbedingungen* (Erweiterung einer zu engen Zielrepräsentation; Beispiele s. unten).
3. Was nach einer Sackgasse passiert:
   - Nachdem eine Sackgasse durch eine Veränderung der Problem- oder Zielrepräsentation aufgelöst worden ist, kann es zu einer vollen oder teilweisen Einsicht kommen. Eine volle Einsicht tritt dann auf, wenn neu aktivierte Operatoren ein direktes Erreichen des Zielzustands ermöglichen.

Die Annahmen der Theorie von Ohlsson lassen sich an Problemen der Streichholzarithmetik (Knoblich et al. 1999) gut verdeutlichen.

Empirische Überprüfung der repräsentationalen Veränderungstheorie

Die Aufgaben der Streichholzarithmetik sind dadurch charakterisiert, dass arithmetische Gleichungen mit römischen Zahlen sowie den Zeichen =, + und – aus Streichhölzern gelegt sind. Die Gleichungen sind in der Ausgangssituation zunächst falsch und sollen durch das Umlegen genau eines Hölzchens in eine korrekte arithmetische Form gebracht werden. Die Lösung darf wiederum nur römische Zahlen, sowie =, + und – enthalten (also z. B. nicht ungleich), und es darf nicht einfach ein Hölzchen weggenommen werden. Bitte versuchen Sie, die beiden Probleme in Abb. 16.10 zu lösen, bevor Sie weiterlesen.

Abb. 16.10 Zwei Probleme der Streichholzarithmetik

Die Lösung zum Problem in ◘ Abb. 16.10A lautet: VII = VI + I. Das heißt, es ist notwendig, ein Hölzchen von einer Zahl zu einer anderen Zahl zu bewegen. Die Lösung zum Problem in ◘ Abb. 16.10B lautet: IV − III = I. Folglich muss ein Hölzchen von einem Operator zum anderen Operator gelegt werden.

Knoblich et al. (1999) vermuteten nun, dass bei der anfänglichen Encodierung des Problems eine Zielrepräsentation gebildet wird, in die Vorwissen über die Lösung gewöhnlicher arithmetischer Probleme mit eingeht. Da in der gewöhnlichen Arithmetik häufig Werte verändert werden, aber kaum die arithmetischen Operatoren (wie Plus-, Minus- und Gleichzeichen) sollten Werte in der Zielrepräsentation als veränderlich und Operatoren als nicht veränderlich repräsentiert werden. Folgerichtig sollten Problemlöser zunächst nur Züge ausführen, in denen die Werte der Gleichung manipuliert werden. Das Problem in ◘ Abb. 16.10A ist gut mit diesem allgemeinen arithmetischen Vorwissen zu lösen, das Problem in ◘ Abb. 16.10B dagegen nicht.

Daraus leitet sich direkt die Vorhersage ab, dass Problemlöser bei Problem B in Sackgassen geraten, aus denen sie nur durch eine veränderte Zielrepräsentation ausbrechen können. Diese besteht hier in einer erweiterten Zielrepräsentation, die es erlaubt, auch Operatoren zur Lösung des Problems zu verändern. Sobald die Lockerung der Zielvorstellung stattgefunden hat, ist die Lösung einfach. Aus diesen Annahmen ergibt sich die Vorhersage, dass Problem A wesentlich leichter zu lösen sein sollte als Problem B.

Diese Voraussage wurde in mehreren Experimenten bestätigt. So lösten in einem Experiment 75 % der Teilnehmer Problem A innerhalb von 1 min, aber nur 5 % Problem B (Knoblich et al. 1999). Nach 3 min hatten alle Teilnehmer Problem A gelöst, aber nur ungefähr die Hälfte Problem B. Knoblich und Kollegen entwickelten noch eine Reihe anderer Problemtypen aus den Annahmen der Theorie und konnten zeigen, dass sich die Schwierigkeit der Problemtypen sehr gut über die zu leistenden Veränderungen der Problem- bzw. Zielrepräsentation erklären ließ.

Es spricht also einiges dafür, dass das Vorwissen der Problemlöser die Schwierigkeit von Problemen beeinflusst und bedingt, ob eine repräsentationale Veränderung notwendig ist oder nicht.

▪ Weitere kognitive Aspekte von Einsichtsproblemen

Anders als Kaplan und Simon (1990) geht Ohlsson (Schooler et al. 1993) davon aus, dass die Prozesse, die zur Veränderung der Repräsentation führen, Problemlösern *nicht bewusst* sind, sondern dass *unbewusste* und parallele Wahrnehmungs- und Gedächtnisprozesse die Veränderung herbeiführen. Damit erklärt er auch die Plötzlichkeit von Einsicht. Dass die Lösung gefunden wurde, wird erst in dem Moment klar, in dem sie vor dem geistigen Auge des Problemlösers erscheint.

Untersuchungen von Metcalfe und Wiebe (1987) unterstützen diese Annahme. Sie forderten Versuchsteilnehmer auf, während der Lösung von Einsichts- und konventionellen Problemen (z. B. Algebraproblemen) auf einer Heiß-kalt-Skala regelmäßig anzugeben, wie nahe sie sich der Lösung fühlten – je näher bedeutete dabei, es fühlte sich umso wärmer an. Die Urteile für konventionelle Probleme stiegen linear an, d. h., die Versuchspersonen fühlten sich nach jeder durchgeführten Operation näher am Ziel. So ist es z. B. beim Turm von Hanoi (◘ Abb. 16.4) recht gut abschätzbar, wie weit man sich noch vom Ziel entfernt fühlt. Bei Einsichtsproblemen dagegen erwies sich die Einschätzung als wesentlich schwieriger. Die Personen hatten oft dann noch das Gefühl, weit von der Lösung entfernt zu sein, obwohl sie das Problem im nächsten Schritt lösen konnten.

Ein weiteres wichtiges Kennzeichen von Einsichtsproblemen ist der bekannte Aha-Moment. Eine verbreitete Methode besteht darin, die Versuchspersonen zu fragen, ob sie bei der Lösung einen Aha-Moment hatten. Probleme werden so oft im Nachhinein als durch Einsicht gelöst oder ohne Einsicht gelöst klassifiziert. Dies ist, wie wir sehen werden, derzeit der Königsweg, um die neuronalen Korrelate einsichtsvollen Problemlösens zu untersuchen (Danek et al. 2013). Dieses Vorgehen erlaubt dem Untersucher, indirekt festzustellen, wann während des Problemlöseprozesses Restrukturierung aufgetreten ist, da davon ausgegangen wird, dass Aha-Momente eng an Restrukturierung gebunden sind. Generell ist es schwierig, einen Aha-Moment scharf zu fassen. In der Regel wird versucht, einen Aha-Moment anhand einer Reihe von möglichen Phänomenen oder metaphorisch zu greifen. Es soll hier eine typische Instruktion von Jung-Beeman et al. (2004) exemplarisch wiedergegeben werden:

> » A feeling of insight is a kind of ‚AHA!' characterized by suddenness and obviousness. You may not be sure how you came up with the answer, but are relatively confident that it is correct without having to mentally check it. It is as though the answer came into mind all at once – when you first thought of the word, you simply knew it was the answer. This feeling does not have to be overwhelming, but should resemble what was just described. (Jung-Beeman et al. 2004, S. 507)

▪ Erweiterte Suchmodelle von Einsicht

Ohlssons Modell ist allerdings nicht unumstritten. So gibt es Kritik an seinem Konzept der Sackgasse und der offenen Frage, was denn tatsächlich in einer Sackgasse passiert und welche konkreten unbewussten Prozesse zu einer veränderten Problem- bzw. Zielrepräsentation beitragen. Darüber hinaus gibt es auch generell Kritik an dem Konzept der Umstrukturierung. Obwohl zahlreiche kognitive Psychologen überzeugt davon sind, dass Einsicht und Umstrukturierung nützliche Konzepte der Problemlöseforschung darstellen (Metcalfe und Wiebe 1987; Ohlsson 1992; Simon 1986; Sternberg und Davidson 1995), nehmen andere den Standpunkt ein, dass Umstrukturierung und Einsicht Alltagskonzepte seien, die in einer wissenschaftlichen Theorie nichts zu suchen hätten (Weisberg 1986; Weisberg und Alba 1981). Im Mittelpunkt dieser Debatte steht das Neun-Punkte-Problem, an dem sich diese unterschiedlichen Sichtweisen gut demonstrieren lassen.

Es wurde lange angenommen, dass die Hauptschwierigkeit beim Neun-Punkte-Problem darin besteht, über das durch die neun Punkte gebildete Quadrat hinaus zu zeichnen (▶ Abschn. 16.5.2), d. h. Züge an Stellen zu machen, an denen sich keine Punkte befinden. Folglich sollte das Problem sofort einfacher werden, wenn man Problemlösern mitteilt, dass sie über das Quadrat hinaus zeichnen dürfen. Weisberg und Alba (1981) prüften genau diese Hypothese und fanden, dass Problemlöser, die den Hinweis erhielten, genauso erfolglos waren wie Prob-

lemlöser, die keinen Hinweis erhielten (jeweils 20 % lösten das Problem in der gegebenen Zeit). Für sie war somit klar, dass der Umstrukturierungsansatz in der Tradition der Gestaltpsychologen falsch ist.

Ein differenziertes Modell, das versucht, die kognitiven Prozesse beim Lösen des Neun-Punkte-Problems zu identifizieren, lieferten MacGregor et al. (2001). Sie gingen davon aus, dass es nicht die falschen Repräsentationen von Problem- oder Zielvorstellungen sind, die das Problemlösen schwierig machen, sondern die Anwendung von falschen Strategien. Sie entwickelten ein kognitives Modell für die Lösung des Neun-Punkte-Problems, das sich sehr stark an die klassische Problemraumtheorie und der Suche durch Heuristiken anlehnte. Das Modell geht davon aus, dass erfolgreiche Problemlöser immer Züge auswählen, die so viele Punkte wie möglich verbinden (Hill Climbing), und nach jedem Zug ermitteln, wie viele Punkte und Linien noch übrig sind. Das klingt zunächst verwirrend, ist aber recht einfach gemeint. Stellen Sie sich vor, Sie verbinden mit den ersten zwei Linien fünf Punkte, dann bleiben Ihnen noch zwei Linien, mit denen Sie die vier übrigen Punkte verbinden können. Sie können so schnell prüfen, ob die Anordnung der noch übrigen Punkte mit zwei geraden Linien verbunden werden kann. Wenn nicht, dann startet die Suche nach neuen und einsichtsvollen Zügen, die, wenn die richtigen Heuristiken verwendet werden, auch über die neun Punkte hinausgehen. Die Ergebnisse der Studie zeigten z. B., dass Versuchspersonen tatsächlich Züge auswählten, die immer die meisten Punkte verbanden, und dass es Versuchspersonen nicht schwerfiel, Züge an Stellen ohne Punkte zu ziehen, wenn diese auf einer Linie lagen, die durch die Anwendung der Heuristiken abgedeckt werden konnten. Allerdings blieb auch bei dieser Studie die eigentliche Frage offen, warum das Neun-Punkte-Problem so schwierig ist und wie die Lösungsrate erhöht werden kann.

Integrative Modelle des Problemlösens

Wie wir gesehen haben, gibt es eine Reihe von Problemen, das Ziel, ein generelles Modell zum menschlichen Problemlösen zu entwickeln, zu erreichen. Es sind weder ausschließlich kognitive Verzerrungen (Ohlsson 1992), die die Repräsentation von Problem oder Ziel betreffen, noch die ausschließliche Anwendung von Suchprozessen auf einer Prozessebene (MacGregor et al. 2001), die ausreichen, um die Problemschwierigkeit zu erklären.

Neuere Modelle gehen nun davon aus, dass beide Sichtweisen integriert werden müssen (Jones 2003) und Probleme in der Regel aus einer Reihe von Problemschwierigkeiten bestehen, die unterschiedliche Gründe haben und miteinander interagieren können. Kershaw und Ohlsson (2004) haben z. B. für das Neun-Punkte-Problem gezeigt, dass dieses perzeptuelle Faktoren (Gruppierung), prozessbezogene Faktoren (Suche) und wissensbezogene Faktoren (Vorwissen und Vorerfahrungen mit Punkteproblemen) vereint, die in ihrem Zusammenspiel das Problem so schwierig machen. Kürzlich haben Öllinger et al. (2014) ein Modell präsentiert, das diese Befunde zusammenfasst und versucht, Aspekte der klassischen Problemraumtheorie mit den Erweiterungen von Ohlsson (1992) zu vereinen.

Das Modell (Abb. 16.11) geht davon aus, dass Probleme generell mit, aber auch ohne Einsicht gelöst werden können. Folglich existieren keine genuinen Einsichtsprobleme. Wie wir in den Ausführungen zur Problemdefinition erfahren haben, startet das Modell mit der Ausgangssituation. Diese aktiviert über perzeptuelle Prozesse, z. B. Gruppierung von Elementen (Chunking), eine Problemrepräsentation. Parallel werden Vorwissenselemente im Gedächtnis aktiviert, die mit der Ausgangssituation assoziiert sind. So entsteht eine Zielrepräsentation, die angibt, auf welche Weise und mit welchen Operationen und Strategien das Problem gelöst werden kann. Nun startet ein Suchprozess, der durch Heurisiken geleitet wird. Stimmen Ziel- und Problemrepräsentation und ist der Suchraum nicht zu groß, kann eine Lösung direkt über Suche gefunden werden. Scheitern aber die Lösungsversuche aufgrund von verzerrten Repräsentationen oder eines zu großen Suchraumes, kann eine mentale Sackgasse erreicht werden. Der Problemlöser weiß nicht mehr weiter. Nun kann es zu einer repräsentationalen Veränderung des Problems kommen, indem entweder Gruppierungsprozesse die Problemrepräsentation verändern oder die Zielvorstellung erweitert oder verändert wird. Dies kann allerdings dazu führen, dass der Suchraum sich dann noch weiter vergrößert. Denken wir an das Neun-Punkte-Problem, dann erweitert sich der Suchraum immens, wenn wir erlauben, dass Linien auch über die Grenzen der 3 × 3-Matrix gezeichnet werden können. Wir haben dann zwar die richtige Repräsentation des Problems, aber wir brauchen nun effiziente Suchstrategien, die es uns erlauben, diesen vergrößerten Suchraum effizient zu durchsuchen. Dieser Aspekt könnte erklären, warum viele Personen nicht davon profitieren, wenn man ihnen sagt, dass sie Linien über die Grenzen der 3 × 3-Matrix hinaus zeichnen dürfen (Weisberg und Alba 1981).

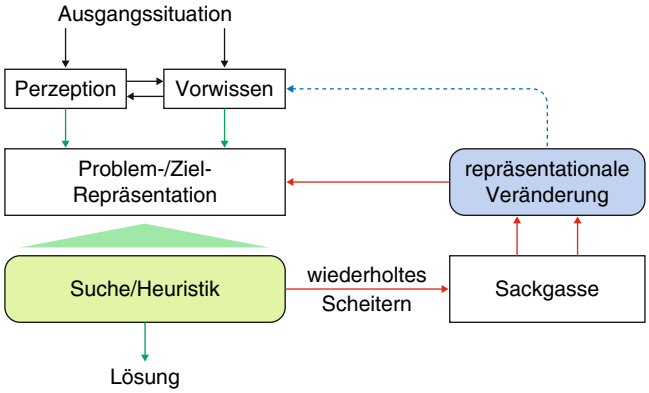


Abb. 16.11 Phasenmodell des Problemlösens mit und ohne Einsicht

Das Modell kann darüber hinaus auch kurz- und langfristigen Transfer, nachdem Personen Einsicht in ein Problem hatten, erklären. So konnten Knoblich et al. (1999) zeigen, dass einmal erfolgte **Zielerweiterungen** in der Folge bestehen bleiben, was bedeutet, dass Beschränkungen, die einmal aufgelöst wurden, aufgelöst bleiben. Darüber hinaus gibt es erste Hinweise, dass Lösungen von Problemen, die mit Umstrukturierung gelöst wurden, besser wieder erinnert werden als Probleme, die schrittweise gelöst wurden (Dominowski und Buyer 2000; Danek et al. 2013). In dem Modell in Abb. 16.11 wird dies durch den gestrichelten Pfeil, der von der repräsentationalen Veränderung auf das Vorwissen und den Gruppierungsprozess rückkoppelt. Dass dies sogar dazu führen kann, dass bisher durch unser Vor-

wissen leicht zu lösende Probleme plötzlich schwierig werden, konnten Öllinger et al. (2008) zeigen. Sie kombinierten die Logik der Wasserumschüttaufgaben (Luchins und Luchins 1942; ▶ Abschn. 16.5.2) zur Erzeugung eines Einstellungseffekts mit den unterschiedlichen Problemtypen der Streichholzdomäne. So präsentierten sie den Versuchspersonen z. B. eine ganze Reihe von Problemen des Typs B (◘ Abb. 16.10B), bei dem die Zielerweiterung darin bestand, dass die Operatoren der Gleichung verändert werden müssen, als Einstellungsproblem, um dann ein einzelnes Problem A als Testproblem zu lösen. Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen die z. B. zehnmal das Problem B gelöst hatten, plötzlich Schwierigkeiten hatten, das eigentlich sehr einfache Problem A zu lösen. Wiederholte Aktivierung der flexibleren Zielrepräsentation hat also dazu geführt, dass das bestehende Vorwissen über variable Werte gehemmt wurde.

16.6 Methoden der Problemlöseforschung

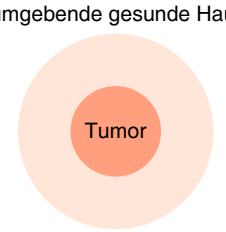
Nachdem wir klassische Untersuchungen zum Problemlösen und einsichtsvollen Problemlösen kennengelernt haben, wollen wir nun einen kurzen Überblick über weitere methodische Herangehensweisen diskutieren, die darauf abzielen, die zugrunde liegenden kognitiven oder neuronalen Prozesse zu identifizieren. Bisher wurden Studien vorgestellt, die als abhängige Variable vor allem auf Lösungsraten und Lösungszeiten fokussieren und die Lösungsverhalten und Zugauswahl auswerten und interpretieren. In der Folge soll ein kurzer Überblick über weitere methodische Möglichkeiten innerhalb der Problemlöseforschung gegeben werden.

16.6.1 Blickbewegungsstudien

Blickbewegungsstudien erlauben es, Annahmen darüber abzuleiten, welche Informationen eines Problems von einem Problemlöser beachtet werden, um ein Problem zu lösen. Als abhängige Variable dienen oft die Blickdauer und der Ort, auf den die Augen fixieren. Diese Methode erfreut sich innerhalb der Problemlöseforschung immer größerer Beliebtheit, zumal die Geräte zur Blickbewegungsmessung immer leichter zu handhaben sind (Underwood 2005).

Stellen Sie sich vor, sie messen die Blickbewegungen einer Versuchsperson, während diese Aufgaben aus der Streichholzarithmetik löst. Wohin blickt der Proband wohl am wahrscheinlichsten? Er betrachtet zunächst am längsten die Werte, die Operatoren hingegen beachtet er zunächst kaum (Knoblich et al. 2001). Werden Problemlöser mit dem Problem B (◘ Abb. 16.10B) konfrontiert, so zeigt sich, dass sich die Blickbewegungsmuster von erfolgreichen Lösern signifikant von nicht erfolgreichen Probanden unterscheiden. Löser beachten zunächst auch stärker die Werte, nach einiger Zeit zeigen sie unsystematische Blickbewegungen, d. h., sie präferieren keinen besonderen Ort (Sackgasse). Nach dieser Phase fixieren sie deutlich länger auf die Operatoren. Dieses Ergebnis zeigt deutlich die unterschiedlichen Phasen des Problemlösens auf.

Welche neuen methodischen Möglichkeiten Blickbewegungsstudien erlauben, zeigten Grant und Spivey (2003) anhand



◘ **Abb. 16.12** Tumorproblem. (Modifiziert nach Grant und Spivey 2003)

des Tumorproblems von Karl Duncker (1935). Sie können sich zunächst wieder selbst an diesem Problem versuchen.

» Gesucht ist ein Verfahren, um einen Menschen von einer inoperablen Magengeschwulst zu befreien mit Hilfe von Strahlen, die bei genügender Intensität organisches Gewebe zerstören – unter Vermeidung einer Mitzerstörung der umliegenden gesunden Körperpartien. (Duncker 1935, S. 1).

Das Problem kann gelöst werden, indem mehrere Laser von geringer Intensität so angeordnet werden, dass sich deren Strahlung im Tumor überlagert und diesen somit zerstört. Grant und Spivey (2003) führten dazu zwei Experimente durch. Im ersten Experiment sahen die Versuchspersonen eine Skizze wie in ◘ Abb. 16.12. Während sie versuchten, das Problem zu lösen, wurden ihre Blickbewegungen aufgezeichnet. Nach dem Experiment analysierten die Autoren, ob sich erfolgreiche und nicht erfolgreiche Problemlöser bezüglich der Blickbewegungsmuster unterschieden. Tatsächlich zeigte sich, dass Löser signifikant länger die umgebende Haut betrachteten als Nichtlöser, die vor allem den Bereich des Tumors fixierten. In einem zweiten Experiment nutzten Grant und Spivey diese Erkenntnisse und führten drei Versionen des Problems ein. In der ersten Version ließen sie die umgebende Haut deutlich blinken. In der zweiten Version blinkte der Tumor, und in der Kontrollgruppe wurde ein statisches Bild präsentiert. Wie von den Autoren erwartet, waren Teilnehmer, die die Version mit blinkender umgebender Haut sahen, signifikant besser als Teilnehmer in den beiden anderen Bedingungen (vgl. auch Thomas und Lleras 2007). Die blinkende Haut hat die Aufmerksamkeit folglich auf die für die Problemlösung kritischen Stellen gelenkt und so die Problemlösung erleichtert.

16.6.2 Neuropsychologische Untersuchungen

Eine weitere Möglichkeit, die kognitiven Theorien aus der Problemlöseforschung zu überprüfen, besteht in Patientenstudien, also zu prüfen, welche Hirnfunktionen betroffen, sind, wenn bestimmte Hirnareale nicht entwickelt, erkrankt, verletzt, oder zerstört sind. Problemlöseaufgaben werden dabei schon sehr lange verwendet, um Denk-, Planungs- und Entscheidungsdefizite bei neurologischen Störungen zu untersuchen (Karnath und Thier 2006). Gerade Störungen im präfrontalen Cortex beeinträchtigen häufig die exekutiven Funktionen (▶ Kap. 18). Exekutive Funktionen sind dabei notwendig, um adäquates Problemlöseverhalten zu zeigen. Schädigungen erschweren z. B. die Lösung des Turm-von-Hanoi-Problems (Miyake et al. 2000). In der Regel zeigen

sich bei dieser Art von Aufgaben Defizite, die sich in Perseveration, d. h. dem Festhalten an einer bestimmten Lösungsstrategie, der Verletzung von Regeln oder der Problematik, Teilziele während des Problemlöseprozesses zu bilden, äußern (Kammer und Karnath 2006).

Wie schon erwähnt, zeichnet sich Problemlösen als eine komplexe Fähigkeit aus, die über lange Zeitstrecken ausgedehnt sein kann und an der in der Regel eine Vielzahl unterschiedlicher kognitiver Teilprozesse beteiligt sind. Aus diesem Grund erscheint die Vorstellung einer Lokalisierung von Problemlösen in einer bestimmten Hirnregion als unangemessen. Man geht inzwischen davon aus, dass Teilsysteme, die beim Problemlösen eine wichtige Rolle spielen, im *präfrontalen Cortex* angesiedelt sind (Duncan et al. 1996; Shallice 1988). Erste Belege für diese Annahme erbrachte eine Studie von Shallice (1982) an Patienten mit einer Läsion im Frontalhirn. Er forderte Patienten auf, in einer einfachen Version des Turm-von-Hanoi-Problems (▶ Abschn. 16.4.2) Züge nicht direkt auszuführen, sondern immer erst einige Züge vorauszuplanen. Es ergab sich, dass Patienten diese Aufgabe im Vergleich zu gesunden Personen wesentlich schlechter durchführten. Daraus lässt sich folgern, dass im präfrontalen Cortex Funktionen angesiedelt sind, die zur effektiven Vorausplanung von Problemlöseschritten und der Teilzielbildung erforderlich sind (Baker et al. 1996; Owen et al. 1990). Studien, die bildgebende Verfahren an gesunden Personen nutzen (Koechlin et al. 1999) deuten darauf hin, dass übergeordnete Ziele im vordersten Teil des präfrontalen Cortex repräsentiert werden, während gerade an der Lösung eines Teilzieles gearbeitet wird. Goel und Grafman (1995) nehmen an, dass ein Ausfall dieser Funktion auch die bei Patienten mit frontalen Läsionen gefundenen Daten erklären kann, ohne dass ein generelles Defizit im Vorausplanen von Problemlöseschritten angenommen werden muss.

Interessant sind insbesondere Befunde, die zeigen, dass eine Läsion in einer bestimmten Hirnregion sogar von Vorteil sein kann, was unserem Bild von Hirnschädigungen und deren Auswirkungen zuwiderläuft. Eben solch einen Befund konnten Reverberi et al. (2005) zeigen. Sie untersuchten Patienten mit Läsionen im lateralen Frontalcortex, insbesondere im dorsolateralen Präfrontalcortex (DLPFC), von dem Frith (2000) ausgeht, dass dieser für die Aktivierung der möglichen Operationen bei einer Aufgabe verantwortlich sein könnte. Dies würde der Vorstellung einer Zielrepräsentation entsprechen, wie wir sie bereits in ▶ Abschn. 16.5.3 kennengelernt haben. In der vorliegenden Studie bekamen nun Patienten und gesunde Probanden Streichholzaufgaben vorgelegt. Darunter war ein Aufgabentyp, der folgendermaßen gestaltet war: VI = VI + VI. Wenn Sie versuchen, dieses Problem zu lösen, stellen Sie möglicherweise fest, dass weder die Veränderung von Werten noch eine direkte Veränderung der Operatoren zum Ziel führen. Die Lösung liegt darin begründet, eine andere Gleichungsstruktur zu verwenden. Die Lösung lautet: VI = VI = VI. Wir haben es hier mit einer Tautologie zu tun. Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass dieser Problemtyp am schwierigsten ist (Knoblich et al. 1999, 2001). Es zeigte sich nun aber, dass Patienten mit einer Läsion im lateralen Frontalcortex diesen Problemtyp fast doppelt so häufig lösten wie gesunde Probanden. Das Ergebnis wird als möglicher Hinweis interpretiert, dass der DLPFC zunächst die Zielrepräsentation einschränkt und dadurch flexiblere Lösungen verhindert werden.

Chi und Snyder (2011) haben diese Annahme auf eine ungewöhnliche Weise getestet. Sie haben eine Technik angewandt, die sich transkranielle Gleichstromstimulation nennt (Nitsche et al. 2008). Grob skizziert, fließt dabei ein schwacher Strom über Elektroden durch den Schädel und verändert die Ladungsverhältnisse an den Nervenzellmembranen im Gehirn. Dabei verwendeten sie das oben erwähnte Einstellungsparadigma mit streichholzarithmetischen Problemen. Es wurde eine Reihe eines speziellen Problemtyps wiederholt dargeboten und die Wirkung dieser Wiederholung auf die Lösung eines andern Problemtyps untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die positive Stimulation von Bereichen des rechten lateralen Präfrontalcortex bei einer gleichzeitigen negativen Aktivierung von Bereichen des linken Präfrontalcortex dazu führte, dass die Versuchspersonen keine Einstellungseffekte zeigten. Bei umgekehrter Polarisation des Gleichstromes waren die Einstellungseffekte genauso stark wie bei einer Kontrollgruppe ohne Stimulation. Für Chi und Snyder war dies ein weiterer Beleg, dass der DLPFC eine wichtige Rolle bei der Aktivierung, Veränderung und Aufrechterhaltung der Zielrepräsentation spielt.

16.6.3 Neuronale Korrelate beim Lösen von Problemen

Im Rahmen der Einsichtsforschung gibt es bisher nur wenige neurowissenschaftliche Untersuchungen. Im Prinzip geht man davon aus, dass die für Einsicht notwendigen Restrukturierungsprozesse eher rechtshemisphärisch angesiedelt sind, wobei dies durchaus umstritten ist, wie eine aktuellere Literaturzusammenfassung von Dietrich und Kanso (2010) zeigt.

Bowden und Beeman (1998) zeigten Probanden während der Lösung von Anagrammen nicht bewusst wahrnehmbare Lösungshinweise, die jeweils nur im rechten oder linken visuellen Feld präsentiert wurden, sodass sie entsprechend zuerst von der linken oder rechten Hirnhälfte verarbeitet wurden. Die Lösungshinweise halfen eher, wenn sie von der rechten Hirnhälfte verarbeitet wurden. Bowden und Beeman erklärten diesen Unterschied mit Hemisphärenunterschieden in der semantischen Codierung. Während die linke Hemisphäre Bedeutung sehr „wörtlich" codiert, bestehen in der rechten Hemisphäre sehr weite Assoziationsfelder. Sie spekulieren, dass die grobe semantische Codierung in der rechten Hirnhälfte eine besonders wichtige Rolle bei der Veränderung von Problemrepräsentationen spielt (Kounius und Beeman 2014). Ähnlich interpretieren Jung-Beeman et al. (2004) die Ergebnisse einer funktionellen Bildgebungsstudie (fMRI). Sie präsentierten Personen sog. RAT-Aufgaben (RAT = *remote association task*). Die Aufgabe besteht darin, zu drei vorgegebenen Wörtern ein Zielwort zu finden, das zusammengesetzt mit diesen eine sinnvolle Wortkombination ergibt.

Versuchen Sie folgendes Problem zu lösen: Gegeben sind die drei Wörter „Tür", „Baum" und „Meister". Finden Sie ein weiteres Wort, dass mit jedem der drei Wörter ein sinnvolles Wort ergibt? Ein mögliches Zielwort wäre „Haus", so ergibt sich „Haustür",

„Baumhaus“ und „Hausmeister“. Die Probanden bekamen eine ganze Reihe solcher Probleme präsentiert. Nachdem ein Problem gelöst wurde, sollten die Probanden angeben, ob sie bei der Lösung einen Aha-Moment hatten oder nicht. Es zeigte sich, dass bei einsichtsvollen Lösungen der rechte anteriore, superiore, temporale Gyrus aktiviert ist. Diese Region steht im Verdacht, Bedeutungen in Verbindung zu bringen, die zunächst nichts miteinander zu tun haben. Eine EEG-Studie, die mit dem gleichen Material die Hirnströme der Problemlöser aufzeichnete und Veränderungen in dem EEG-Frequenzspektrum untersuchte, konnte zeigen, dass es bei Durchgängen mit einem berichteten Aha-Moment zu einer hohen Aktivierung im Gamma-Band des Frequenzspektrums kam, was als Beleg für die Synchronisation von Informationen gewertet wurde. Dies wurde nicht bei Lösungen ohne Aha-Erleben gefunden.

Ebenfalls mit EEG haben Lavric et al. (2000) ereigniskorrelierte Potenziale (EKPs) beim Lösen von Einsichtsproblemen im Vergleich mit dem Lösen von analytischen Problemen untersucht. Dabei sollten die Versuchspersonen entweder eine analytische Problemlöseaufgabe, die keine Einsicht erforderte lösen, oder aber Dunckers Kerzenaufgabe, die Einsicht erfordert (Abb. 16.8B). Gleichzeitig mussten sie Töne zählen. Es zeigte sich, dass in der analytischen Bedingung eine hohe positive Aktivierung (P300) über frontalen Arealen auftrat, während diese bei Einsichtsaufgaben fehlte. Die Autoren folgerten, dass bei analytischen Aufgaben Planung und strategisches Vorgehen eine Rolle spielen und mit dem Zählen in Konkurrenz treten, während dies bei Einsichtsproblemen so nicht nötig ist.

Luo und Niki (2003), die ihren Probanden japanische Rätsel vorgaben, fanden ebenfalls, dass die rechte Hirnhemisphäre (hier der rechte Hippocampus) bei einsichtsvollen Lösungen stärker aktiviert ist als bei Lösungen, die nicht von Einsicht begleitet sind. Zusammenfassend zeigen schon diese wenigen Studien, dass es wohl nicht „das“ Umstrukturierungsareal gibt, sondern dass es sich bei Umstrukturierung eher um einen Prozess handelt, der abhängig von der Aufgabe in verschiedenen Hirnregionen festgemacht werden kann.

Anderson et al. (2005) versuchten mithilfe von fMRI unterschiedliche Phasen beim Lösen des Turm-von-Hanoi-Problems zu identifizieren. Sie unterschieden zwischen Problemrepräsentation, Planung und Ausführung von Handlungen. Sie zeigten bei ihrer Untersuchung, dass im Wesentlichen drei unterschiedliche Regionen bei der Lösung dieses Problems beteiligt sind, die Veränderungen in der Problemrepräsentation überwachen und registrieren. Dies sind Regionen, die für die Planung nächster Schritte verantwortlich sind (posteriore parietale Areale), Regionen, für die Aufgaben relevante Informationen suchen (präfrontale Areale), und Motorareale, die für die Ausführung von Manipulationen notwendig sind.

16.7 Expertise beim Problemlösen

Wir haben nun vor allem Probleme behandelt, für die entweder wenig Vorwissen notwendig ist (Turm-von-Hanoi-Problem, Hobbit-und-Orks-Problem) oder bei denen hinderliche Einflüsse des Vorwissens sichtbar werden (Kerzenproblem, Streichholzarithmetik). Obwohl die Ergebnisse dieser Forschung Aufschluss über generelle Prinzipien des Problemlösens geben können, drängt sich die Frage auf, ob man bei der Lösung alltäglicher Probleme nicht viel stärker auf bestehendes Vorwissen zurückgreift.

Für die Lösung vieler Probleme ist ein ganz spezifisches Wissen notwendig. In der *Expertiseforschung* steht die Frage nach der Art und dem Erwerb problemrelevanten Wissens im Vordergrund des Interesses. Deshalb wird in den meisten empirischen Studien das Problemlöseverhalten von *Novizen* und *Experten* bei der Lösung desselben Problems verglichen. Inzwischen liegen umfangreiche Ergebnisse zur **Expertise** in unterschiedlichsten Wissensbereichen wie Computerprogrammierung (Davies 1990), Physik (Anzai 1991), Medizin (Groen und Patel 1988; Lesgold et al. 1988; Schmidt und Boshuizen 1993) und Brettspielen wie Schach (Gobet 1998) vor. Dabei zeigten sich vor allem folgende Unterschiede zwischen Novizen und Experten (Ericsson 1996; Ericsson und Lehmann 1996):

- Experten encodieren Probleme effizienter als Novizen und haben besser ausgearbeitete Problemrepräsentationen.
- Experten erinnern problemrelevante Informationen besser. Das bessere Erinnerungsvermögen geht auf breiteres und besser organisiertes Wissen, nicht auf bessere kognitive Basiskapazitäten (z. B. breitere Gedächtnisspanne) zurück.
- Experten wenden andere Problemlösestrategien an als Novizen.
- Experte wird man durch intensives Üben.

In den nächsten Abschnitten werden exemplarisch Ergebnisse aus der Domäne des Schachspieles etwas ausführlicher dargestellt, um Unterschiede zwischen Experten und Novizen zu illustrieren. Danach wird die Frage behandelt, welche Lernprozesse zur Expertise führen können.

16.7.1 Schachexpertise

Schach war die erste Domäne, in der Expertise ausführlich untersucht wurde (DeGroot 1965). Das Schachspiel eignet sich gut für eine Analyse mittels der Problemraumtheorie, weil es klar definiert ist (▶ Abschn. 16.4.2). Der Ausgangszustand ist durch die Startpositionen aller Figuren definiert, und das Ziel ist, den Gegner mattzusetzen. Die Problemlöseoperatoren sind klar festgelegt (die erlaubten Züge für jede Figur), und jede Operatoranwendung generiert wiederum einen klar definierten Zustand. Der Problemraum im Schach ist extrem groß, und an jeder Stelle im Spiel gibt es zahlreiche alternative Züge. So gibt es alleine schon 9 Mio. Möglichkeiten, die ersten sechs Züge auszuführen (drei eigene und drei gegnerische). Man könnte nun vermuten, dass Schachexpertise darin besteht, möglichst viele Züge vorauszuplanen. Falls dies der Fall wäre, sollten Computerprogramme schon längst viel besser Schach spielen als der Mensch. Tatsächlich dauerte es aber bis 1997, als der Computer *Deep Blue* den amtierenden Schachweltmeister besiegte.

DeGroot fand bei einem Vergleich von Großmeistern und eher mittelmäßigen Spielern heraus, dass die Großmeister nicht mehr Züge in Betracht zogen als mittelmäßige Spieler. Allerdings benötigten sie weniger Zeit für jeden einzelnen Zug. In krassem

Gegensatz zu Computerprogrammen berücksichtigten beide Gruppen im Regelfall nur vier unmittelbare Züge und planten für diese Züge bis zu fünf nachfolgende Züge voraus. Insgesamt wurden selten mehr als 30 mögliche Züge berücksichtigt. DeGroot vermutete, dass sowohl Großmeister als auch geübte Spieler eine *progressive Vertiefungsstrategie* benutzen, bei der wenige Anfangszüge immer wieder geprüft werden. Bei jeder Prüfung wird ein Stück weiter vorausgeplant. Eine empirische Studie von Wagner und Scurrah (1971) bestätigte diese Vermutung.

Die Überlegenheit der Großmeister kommt DeGroot zufolge deshalb zustande, weil sie ein viel breiteres und besser organisiertes Wissen über Schachstellungen und günstige Züge bei diesen Stellungen im Gedächtnis abgespeichert haben. Dieses Wissen hilft ihnen, irrelevante Züge von vornherein auszuschließen und sich auf die wesentlichen Züge zu konzentrieren. Falls diese Annahme zutrifft, sollte sich in Gedächtnisaufgaben zeigen, dass Großmeister kurz präsentierte, sinnvolle Stellungen besser erinnern können als weniger erfahrene Spieler. Der Grund dafür ist, dass besser organisierte Gedächtnisstrukturen zu einer besseren Behaltensleistung führen (▶ Kap. 12). Diese Vermutung konnte DeGroot empirisch bestätigen.

Besonders bekannt ist die Annahme von Chase und Simon (1973). Diese gehen davon aus, dass Chunking, die Gruppierung von Einzelelementen zu größeren sinnvollen Einheiten, eine wichtige Rolle für die Schachexpertise spielt. Miller (1956) zufolge können Menschen nur eine geringe Anzahl von einzelnen Informationen (7+/−2) aktiv im Arbeitsgedächtnis halten. Allerdings lässt sich die Anzahl deutlich vergrößern, wenn Einzelinformationen zu **Chunks** zusammengebunden werden. So kann es schwierig sein. sich die Zahlen 2, 4, 0, 7, 2, 0, 1, 4 einzeln zu merken. Speichert man die Informationen in einem Chunk, den man Datum nennt, wird es wesentlich einfacher: 24.07.2014. Chase und Simon vermuten, dass die von Experten gebildeten Chunks Information z. B. über sinnvolle Spielstellungen effizienter zusammenfassen.

Sie überprüften diese Hypothese, indem sie einem Anfänger, einem mittelmäßigen Spieler und einem Experten kurzzeitig Schachstellungen auf einem Schachbrett zeigten. Es wurde sichergestellt, dass die generelle Gedächtniskapazität aller Teilnehmer in etwa vergleichbar war. Manche dieser Stellungen waren sinnvoll (aus einem tatsächlichen Spiel entnommen), und andere waren zufällig. Die Aufgabe bestand darin, innerhalb von 5 s möglichst viele Figuren zu erfassen und die Stellung auf einem leeren Schachbrett zu reproduzieren. Bei sinnvollen Stellungen konnte der Großmeister durchschnittlich 16 Figuren reproduzieren, der mittelmäßige Spieler acht und der Anfänger vier. Bei zufälligen Stellungen konnten alle Teilnehmer nur ungefähr vier Figuren korrekt reproduzieren. Dies impliziert, dass es für den Anfänger keinen Unterschied machte, ob die Stellung sinnvoll war oder nicht. Diese Ergebnisse belegen klar die Annahme, dass die Zahl der in einem Chunk gruppierten Einzelelemente mit zunehmender Expertise ansteigt. Das schlechte Abschneiden der Experten bei den zufälligen Stellungen spricht gegen die Annahme, dass Experten generell mehr Chunks gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis behalten können. Inzwischen sind auch weitere Theorien für Schachexpertise vorgeschlagen worden, die entweder die bessere Evaluation von Spielzügen bei Experten betonen (Holding 1992) oder postulieren, dass die Wissensstrukturen von Experten nicht eigentliche Schachstellungen codieren, sondern Schemata, die Wissen über eine ganze Anzahl unterschiedlicher Positionen zusammenfassen (Ericsson und Kintsch 1995; Gobet 1998).

Interessanterweise zeigen aktuelle Studien (Bilalić und McLeod 2014; Bilalić et al. 2008), dass auch Schachexperten anfällig für Einstellungseffekte sind. Das heißt, sie präferieren eine bekannte, aber aufwendige Lösungsstrategie und übersehen dadurch, wie Blickbewegungsstudien zeigen, wesentlich einfachere, aber unbekanntere Strategien, ganz ähnlich wie wir dies bereits bei den Wasserumschüttaufgaben gesehen haben (▶ Abschn. 16.5.2).

16.7.2 Voraussetzungen des Expertentums

Eine wichtige Frage ist nun: Wie wird man zum Experten? Die wenig erfreuliche Antwort der meisten Expertiseforscher lautet: Übung, Übung, Übung. Ericsson et al. (1993) analysierten die Lernverläufe von Experten in unterschiedlichen Domänen und fanden heraus, dass diese alle dem *Potenzgesetz der Übung* folgten. Dieses Gesetz wurde zuerst für einfache sensomotorische Reaktionen (Fitts und Posner 1967), wie das Drücken verschiedener Knöpfe auf unterschiedliche Reizvorlagen, beschrieben. Später stellte sich heraus, dass es auch auf komplexere kognitive Fähigkeiten gut anwendbar ist (Anderson und Lebiere 1998; Logan 1988).

Das Potenzgesetz besagt, dass man dieselbe Aufgabe mit zunehmender Übung immer schneller lösen kann. Der Übungsgewinn ist anfangs sehr groß und wird mit der Zeit immer geringer, bis er kaum mehr zunimmt und fast asymptotisch verläuft. In Abb. 16.13A zeigt sich ein typischer Verlauf, wobei hier Lerngewinn als abnehmende Reaktionszeit verstanden werden muss. Das bedeutet, dass der Übende über die Zeit immer schneller bei einer Aufgabe wird. Eine andere Darstellung ergibt sich, wenn man die Anzahl der Übungsdurchgänge und die Reaktionszeit logarithmiert. Es zeigt sich dann typischerweise eine Gerade (Abb. 16.13B).

Die nachfolgende Auflistung beschreibt eine Reihe von angenommenen Lernprozessen, bei der sich die Potenzfunktion des Lernens gezeigt hat:

- *Speicherung von Episoden* (Haider und Kluwe 1994; Logan 1988): Anfangs werden Probleme durch eine aufwendige und schrittweise Anwendung von Operatoren gelöst. Gleichzeitig wird jede einzelne Problemlöseepisode mit ihrer Lösung abgespeichert. Je öfter dasselbe Problem bearbeitet wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Lösung direkt aus dem Gedächtnis abgerufen werden kann.
- *Chunking von Prozeduren* (Newell 1990): Wenn dieselben Problemlöseoperatoren häufig nacheinander angewandt werden müssen, wird ein neuer Operator gebildet, der diese Operatoren zusammenfasst. Dadurch können Probleme, die früher in mehreren Schritten gelöst wurden, nun in einem einzigen Schritt gelöst werden.
- *Wissenskompilierung* (Anderson 1982): Anfangs werden Probleme mit einem bestimmten Faktenwissen (deklara-

tivem Wissen) und allgemeinen Heuristiken wie z. B. Hill Climbing bewältigt. Wenn dasselbe Faktenwissen wiederholt nötig ist, um ein bestimmtes Teilziel zu erreichen, wird daraus eine Prozedur generiert, die ein direktes, viel schnelleres Erreichen des Teilzieles erlaubt.

Diese Prozesse legen die Vermutung nahe, dass Expertise dadurch zustande kommt, dass man sich beim wiederholten Antreffen ähnlicher Probleme schrittweise verbessert, indem neue effizientere Wissens- und Handlungsstrukturen entwickelt werden. Dies ist nicht leicht mit den vorher beschriebenen Ergebnissen zu vereinbaren, dass Vorwissen die Problemlösung behindern kann. Eine mögliche Quelle für diese Inkonsistenzen ist, dass der Erwerb von Fertigkeiten oft in Bereichen untersucht wird, in denen Routinehandlungen eine große Rolle spielen.

Haider und Frensch (1996) fanden, dass Lernfortschritte dadurch erzielt werden können, dass nicht benötigte Information in der Aufgabenvorlage vernachlässigt wird (Mechanismus der *Informationsreduktion*). Einen ähnlichen kognitiven Mechanismus beschrieb Klauer (1993) für die Lösung des Turm-von-Hanoi-Problems und anderer logischer Probleme als *deklaratives Vereinfachen*.

Haider und Frensch (2002) zeigten zudem, dass Lernfortschritte nicht immer schrittweise zustande kommen, auch wenn die Lernkurve einer Versuchsgruppe dem **Potenzgesetz des Lernens** folgt. Betrachteten sie die individuellen Lernkurven, dann ergaben sich oft deutliche *Diskontinuitäten* im Lernverlauf, die darauf hindeuten, dass sich die Teilnehmer an einer bestimmten Stelle im Lernverlauf abrupt verbesserten, z. B. die Information für die Problemlösung einfach abrufen und nicht mehr schrittweise herstellen.

Während in der Expertiseforschung die Frage im Vordergrund steht, wie Menschen ihre Leistungen in einer bestimmten *Wissensdomäne* so verbessern können, dass sie zu besonders effektiven Problemlösungen für Routineprobleme kommen, steht in der Forschung zum analogen Transfer, die im nächsten Abschnitt behandelt wird, die Frage im Vordergrund, wie man Wissen, das man in einem Bereich erworben hat, auf die Lösung neuer Probleme in einem anderen Bereich anwenden kann.

16.8 Problemlösen durch analogen Transfer

Als letzter thematischer Bereich wird nun Problemlösen durch analogen Transfer behandelt. Generell stellt man sich hier die Frage, wie man neue unbekannte Probleme lösen kann. Analoger Transfer kann als eine kreative Form, bestehendes Vorwissen zur Lösung neuer Probleme einzusetzen, verstanden werden (Gentner et al. 2001; Holyoak 2005; Holyoak und Thagard 1995). Wir werden uns zunächst klassische Befunde und Annahmen ansehen und dann die neuronalen Korrelate zum analogen Problemlösen diskutieren.

16.8.1 Grundlegende Überlegungen zum analogen Transfer

Besonders intensiv wurde bisher der analoge Transfer zwischen unterschiedlichen Wissensdomänen untersucht. Die zentrale Frage war dabei, wie Problemstrukturen aus einer bekannten Wissensdomäne (der *Quelldomäne*) zur Lösung von Problemen in einer neuen Wissensdomäne (der *Zieldomäne*) benutzt werden können.

Ein gern verwendetes Beispiel stellt den Zusammenhang zwischen Sonnensystem und einem vereinfachten Atommodell her. Stellen wir uns vor, wir wissen schon einiges über das Sonnensystem. Es gibt Planeten, diese bewegen sich auf Umlaufbahnen und kreisen um eine Sonne. Auch die Kräfte, die bei der Bewegung entstehen (z. B. Zentrifugalkraft), könnten wir berechnen. Nun lernen wir ein völlig neues System kennen. In diesem gibt es Atomkerne und Elektronen. Letztere kreisen um den Atomkern. Wir realisieren möglicherweise, dass beide Systeme ähnliche Eigenschaften haben, und versuchen im nächsten Schritt, zugrunde liegende Gesetzmäßigkeiten von einem auf das andere System zu übertragen. Planeten sind dann z. B. Elektronen, und die Sonne wird mit dem Atomkern in Verbindung gebracht. Nachdem wir diese oberflächlichen Ähnlichkeiten hergestellt haben, sind wir im nächsten Schritt daran interessiert, ob sich die auftretenden Kräfte ähnlich bzw. nach gleichen Gesetzmäßigkeiten verhalten. Es wird eine analoge Abbildung erstellt, bei der Elemente der Quelldomäne (Sonnensystem) auf

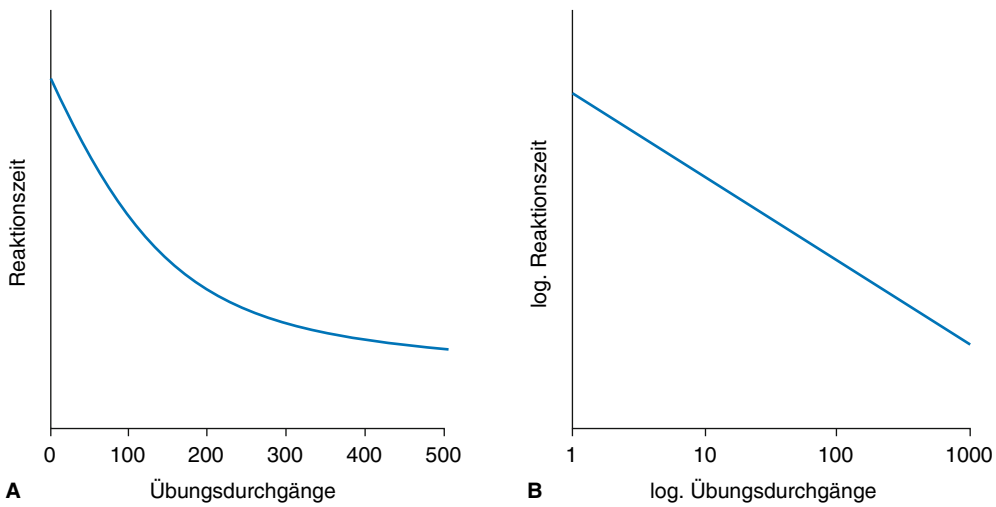


Abb. 16.13 Das Potenzgesetz der Übung in der nichtlogarithmierten (**A**) und in der logarithmierten Form (**B**)

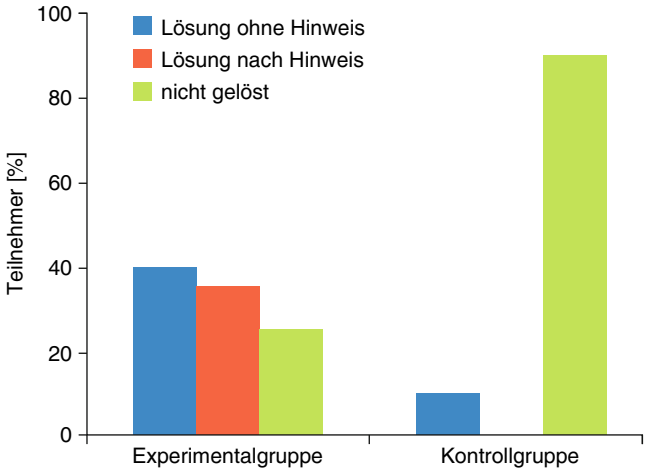


Abb. 16.14 Ergebnisse des Experiments von Gick und Holyoak (1980) zum Tumorproblem. Lösungsrate in der Experimental- und der Kontrollgruppe vor und nach dem Erhalt des Lösungshinweises, der angibt, dass ein Zusammenhang zwischen den Problemen besteht

korrespondierende Elemente der Zieldomäne (Atommodell) verweisen.

Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass dafür zwei Prozesse zentral sind: der *Abruf* einer analogen Struktur aus dem Gedächtnis und das Herstellen einer *Abbildung* zwischen der abgerufenen Struktur und der Struktur des vorliegenden Problems (Gentner 1983; Holyoak und Thagard 1995). Beim **analogen Abruf** muss der Problemlöser sich in irgendeiner Weise an Problemlösungen in anderen Bereichen erinnern, die für die Lösung des aktuellen Problems relevant sein könnten. Im zweiten Schritt müssen die Elemente oder Konzepte des Zielproblems auf die Elemente oder Konzepte des analogen Quellproblems abgebildet werden, sodass die Relationen zwischen den Elementen des Zielproblems den Relationen zwischen den Elementen des Quellproblems entsprechen.

16

16.8.2 Klassische Untersuchungen zum analogen Transfer

Eine Studie von Gick und Holyoak (1980) erbrachte wichtige Ergebnisse zu Abruf und Abbildung beim analogen Transfer und bildete den Ausgangspunkt für viele Folgeuntersuchungen (▶ Zur Vertiefung 16.4). Gick und Holyoak verglichen zwei Gruppen von Versuchsteilnehmern. Die Experimentalgruppe löste das Tumorproblem, nachdem sie die Geschichte vom General gelesen hatte. Die Kontrollgruppe bearbeitete das Tumorproblem, ohne vorher die Geschichte vom General gelesen zu haben. Abb. 16.14 zeigt die Lösungsraten für die Experimental- und die Kontrollgruppe.

Die Lösungsrate in der Kontrollgruppe war deutlich niedriger als in der Experimentalgruppe, was bestätigt, dass das Lesen der Geschichte vom General die Lösung erleichterte. Aber auch vielen Personen in der Experimentalgruppe gelang die Lösung nicht, *bevor sie den Hinweis erhielten*, dass ein Zusammenhang zwischen der Geschichte vom General und dem Tumorproblem besteht (Abb. 16.14, Experimentalgruppe mittlerer Balken). Das erste Ergebnis bestätigte, dass Problemlöser tatsächlich Analogien nutzen können, um neue Probleme zu lösen. Das zweite Ergebnis zeigt, dass die Abbildung auf ein analoges Quellproblem viel leichter fällt, wenn man weiß, dass es relevant ist. In einer Nachfolgeuntersuchung fanden Gick und Holyoak (1983) ähnliche Ergebnisse für die Vorgabe von visuellen Analogien (den Teilnehmern wurde eine Abbildung mit Pfeilen gezeigt, die auf einen Punkt konvergierten).

Die Ähnlichkeit zwischen dem Tumorproblem und der Geschichte vom General besteht ausschließlich in den Relationen zwischen Problemelementen (in der Tiefenstruktur), nicht aber in den Problemelementen selbst. In solchen Fällen spricht man von einer **strukturellen Ähnlichkeit** zwischen Quell- und Zielproblem. Wenn eine Ähnlichkeit zwischen Problemelementen oder ihren Eigenschaften besteht, dann spricht man von **Oberflächenähnlichkeit**.

Holyoak und Koh (1987) analysierten den Einfluss von Oberflächenähnlichkeit und struktureller Ähnlichkeit auf den analogen Transfer. Vier unterschiedliche Experimentalgruppen lasen unterschiedliche Geschichten, bevor sie ein Zielproblem lösten. Zwischen der Geschichte und dem Zielproblem bestand entweder hohe Ähnlichkeit in der Oberfläche und der Struktur, nur in der Oberfläche, nur in der Struktur oder in keinem von beiden. Die Autoren fanden, dass das Zielproblem am häufigsten spontan gelöst wurde, wenn hohe strukturelle und Oberflächenähnlichkeit vorlag (70 %), weniger häufig, wenn hohe strukturelle oder Oberflächenähnlichkeit vorlag (38 % und 33 %), und nur sehr selten, wenn die Ähnlichkeit auf beiden Dimensionen niedrig war (13 %). Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass sowohl Oberflächenähnlichkeiten als auch strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Quell- und Zielproblem zum analogen Transfer beitragen.

Weitere Untersuchungen deuten darauf hin, dass Problemlöser dazu tendieren, auf Oberflächenähnlichkeiten zu achten und die Tiefenstruktur zu vernachlässigen, zumindest wenn sie nicht auf einen Zusammenhang zwischen Quell- und Zielproblem hingewiesen werden (Gentner et al. 1993; Markman und Gentner 1993).

Hummel und Holyoak (1997) geben einen Überblick über weitere Ergebnisse im Bereich des analogen Transfers. So erleichtert die semantische Ähnlichkeit zwischen zwei Domänen die Abbildung von Ziel- auf Quellproblem (Gentner und Toupin 1986), und es ist sehr schwer, Analogien zu finden, wenn diese Ähnlichkeit nicht gegeben ist (Keane et al. 1994). Außerdem gibt es fast immer mehrere Möglichkeiten, ein Zielproblem auf die Quelldomäne abzubilden (Spellman und Holyoak 1996). Deshalb kann auch die Betonung bestimmter Problemelemente durch die eigene Zieldefinition, eine vorgegebene Instruktion oder die zeitliche Abfolge der Abbildung von Einzelelementen die letztendlich resultierende Gesamtabbildung beeinflussen (Keane 1997). Schließlich gibt es Belege dafür, dass nicht nur Ähnlichkeiten in der konzeptuellen Struktur, sondern auch Ähnlichkeiten in der Struktur des Lösungsweges analog von einem Quellproblem auf ein Zielproblem übertragen werden können (Schmidt et al. 1999).

Zur Vertiefung 16.4

General und Tumor

Gick und Holyoak (1980) legten einer Gruppe von Versuchsteilnehmern folgende Geschichte vor:

Ein kleines Land wurde von einem Diktator, der sich in einer stark befestigten Burg befand, regiert. Die Burg lag in der Mitte des Landes und war von Landgütern und Dörfern umgeben. Viele Straßen führten von der Burg aus sternförmig ins Land. Ein General wollte nun die Burg erobern. Er versammelte seine Truppen an der Grenze. Der General wusste, dass seine Truppen die Burg einnehmen konnten, wenn alle Mann zugleich angriffen. Allerdings gab es ein Problem. Der Diktator hatte auf allen Straßen Minen auslegen lassen. Einzelne Personen konnten diese gefahrlos passieren. Allerdings brachte jede größere Menschenansammlung die Minen zum Explodieren. Es schien also unmöglich, die Burg durch einen direkten Angriff aller Truppen einzunehmen. Dennoch zögerte der General nicht. Er teilte seine Armee in kleine Einheiten auf und schickte jede Einheit sternförmig zum Ende einer anderen Straße. Jede kleine Einheit bewegte sich so auf einer anderen Straße auf die Burg zu. Die kleinen Gruppen kamen unverletzt über die Minen und trafen sich bei der Burg, wo sie mit gesammelten Kräften angriffen. Auf diese Weise gelang es dem General die Burg einzunehmen und den Diktator zu stürzen.

Nach dem Lesen der Geschichte wurden die Teilnehmer aufgefordert, Dunckers (1935) Tumorproblem zu lösen, das in ▶ Abschn. 16.6.1 diskutiert wurde. Sie erinnern sich. Es ging darum, einen Tumor mithilfe von Strahlen zu zerstören. Wie wir gesehen haben, liegt die Lösung des Problems darin begründet, mehrere Strahlenquellen auf den Tumor zu richten, sodass sich alle Strahlenquellen im Tumor treffen. Das Tumorproblem kann gelöst werden, indem man folgende Analogie zur Geschichte mit dem General herstellt: Der Tumor wird auf die Burg abgebildet, die umgebende Haut auf die verminten Straßen und die Strahlen auf die Truppen. Falls die Abbildung gelingt, kann man die Lösung des Generals für die Eroberung der Burg auf das Tumorproblem übertragen. So wie das Aufteilen der Truppen auf unterschiedliche Straßen das Explodieren der Minen verhindert und gleichzeitig zur notwendigen Konzentration der Kräfte bei der Burg führt, verhindert das Aufteilen der Strahlen die Beschädigung des gesunden Gewebes und führt gleichzeitig zu der für die Zerstörung des Tumors benötigten Intensität.

16.8.3 Neuronale Korrelate zum analogen Transfer

Zum analogen Denken gibt es mittlerweile wesentlich mehr Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren als zu klassischen Problemlöseaufgaben. Eine ältere Studie stammt von Wharton und Grafman (1998). Diese erhoben mit PET die Hirnaktivierung, während die Teilnehmer versuchten, analoge geometrische Strukturen aufeinander abzubilden. Dabei zeigte sich eine erhöhte Aktivierung im linken präfrontalen und im linken anterioren parietalen Cortex. Es scheint also so, dass diese Regionen an der Integration von Relationen zwischen Problemelementen beteiligt sind.

Bunge et al. (2005) gingen in einer fMRI-Studie der Frage nach, inwieweit sich analoges Schließen und generelle semantische Verarbeitungsprozesse voneinander unterscheiden. Dazu präsentierten sie den Probanden nacheinander Wortpaare. Jeweils nach dem ersten Wortpaar erhielten sie eine Anweisung. Diese legte fest, ob das zweite Wortpaar eine analoge Beziehung zum ersten haben sollte oder ob beide Wortpaare eine semantische Beziehung aufweisen sollten. Ein Beispiel für eine korrekte analoge Beziehung ist Paar 1 („bouquet“ – „flower“) und Paar 2 („chain“ – „link“). Ein Beispiel für eine semantische Beziehung ist Paar 1 („note“ – „scale“) und Paar 2 („rain“ – „drought“). Die Autoren fanden präfrontale Areale, die bei dieser Aufgabe sowohl bei analogen als auch bei semantischen Paarungen involviert waren. Analoge Entscheidungen aktivierten jedoch besonders stark linke frontopolare Areale. Eine Übersicht über einfachere kognitive Funktionen, die für das analoge Schließen bedeutsam sind, findet sich bei Robin und Holyoak (1995).

Einen aktuelleren Überblick geben Knowlton und Holyoak (2009). Sie zeigen anhand von neuropsychologischen Untersuchungen, dass der präfrontale Cortex eine zentrale Rolle bei der Herstellung von Relationen (Abbildungen zwischen Quell- und Zieldomäne) spielt. Dabei erweisen sich frontopolare Regionen, also die am weitesten vorn liegenden Regionen des Cortex, als besonders wichtig, wenn eine Vielzahl von solchen Relationen hergestellt und aktiv gehalten werden muss. Darüber hinaus zeigte sich auch dass diese Aktivierung unabhängig von der Problemschwierigkeit ist, also tatsächlich eine spezifische Funktion beim analogen Problemlösen übernimmt.

16.9 Anwendungsbeispiele

Es wurde bereits in den einleitenden Überlegungen darauf hingewiesen, dass Problemlösen eine wichtige Alltagskompetenz ist. Allerdings wird wahrscheinlich in den wenigsten Fällen so systematisch beim Problemlösen vorgegangen wie z. B. bei der analytischen Konstruktion von Problemräumen. Hilfreiche Fragen, um ein Problem zu strukturieren, kennen wir bereits aus unserer Schulzeit. Beispielsweise werden im Physikunterricht die meisten Aufgaben nach dem Schema gelöst: Was ist gegeben? – der Ausgangszustand. Was ist gesucht? – der Zielzustand. Wie kann das Ziel erreicht werden? – zur Verfügung stehende Methoden. Es sollen nun in der Folge drei unterschiedliche Anwendungsbereiche skizziert werden, bei denen systematisches Problemlösen eine Rolle spielt.

▪ Problemlösetraining

Ein sehr bekannter Problemlöseansatz aus der Klinischen Psychologie ist das Problemlösetraining von D’Zurilla und Goldfried (1971). Sie entwickelten einen fünfstufigen Problemlöseprozess, den sie Patienten mit psychischen Störungen im Rahmen einer verhaltenstherapeutischen Intervention vermittelten, um bestehende Probleme des Alltags wieder selbstständig lösen zu können. Mithilfe dieser Kompetenz sollen sich die Kontrollüberzeugung und Selbstwirksamkeitserwartung der Patienten erhöhen. Die festgelegten Stufen lauten nach Bittner und Helbig-Lang (2011):

1. Problemdefinition und -formulierung,
2. Generieren von Lösungsalternativen,

3. Entscheidungsfindung,
4. Implementierung der Lösung,
5. Überprüfung.

Wie wir sehen, startet die Problemlösung mit einer genauen Beschreibung des Problems, ähnlich einer Problemanalyse, wie wir sie kennengelernt haben: Was ist die Ausgangssituation, und welches Ziel soll erreicht werden? Dann startet ein Suchprozess, anhand dessen mögliche Lösungen generiert werden. Die Phase der Entscheidungsfindung haben wir in diesem Kapitel nicht genauer untersucht. Es handelt sich dabei um einen eigenständigen Bereich (► Kap. 17). Nach der Entscheidung kommt es zur Umsetzung einer gewählten Lösungsalternative. Auch das ist ein wichtiger Bereich, der mit Motivation und Handlung zu tun hat und der bei unseren Ausführungen keine Rolle gespielt hat (► Kap. 8 und 9). Die Phase der Überprüfung haben wir dagegen in ► Abschn. 16.5.1 im Modell von Wallas (1926) kennengelernt. Generell zeigt sich, dass es für Patienten mit psychischen Störungen hilfreich sein kann, die bestehenden Probleme in Einzelschritte zu zerlegen, um so zu erfahren, dass Probleme prinzipiell bewältigbar sind. Es zeigte sich auch, dass der Einfluss von Stress und Emotionalität in schwierigen Lebenssituationen durch diese Methode verringert werden konnte.

■ Medizin

Ein weiterer klinischer Bereich, in dem Problemlösekompetenzen systematisch angewandt werden sollten, betrifft die Medizin. Hier geht es sehr oft darum, aus einer komplexen Symptomkonstellation möglichst schnell und zuverlässig eine Diagnose und damit verbundene therapeutische Maßnahmen abzuleiten. Medizinstudenten lernen an konkreten medizinischen Fällen Hypothesen zu generieren und zu prüfen, um so allgemeine Lösungsschemata abzuleiten und diese auf andere Situationen über analogen Transfer übertragen zu können. Im Prinzip kann auch hier wieder ein Suchprozess angenommen werden. Ein Patient schildert seine Beschwerden (Ausgangszustand). Der Arzt sucht in seinem Vorwissen nach möglichen Hypothesen, die er testet. Er verschafft sich darüber hinaus noch mehr Informationen, indem er dem Patient Fragen stellt oder diagnostische Tests durchführt, um mögliche andere Ursachen (Differenzialdiagnosen) für die Problematik auszuschließen. Nach diesem Prozess hat der Arzt in der Regel eine Arbeitsdiagnose, aus der er Interventionen ableitet.

Da der genaue medizinische Problemlöseprozess noch nicht verstanden ist, untersuchen Kiesewetter et al. (2013) den Problemlöseprozess bei Medizinstudenten in einer aktuellen qualitativen Studie. Sie gingen davon aus, dass beim medizinischen Problemlösen folgende kognitive Prozesse zu beobachten sind:

1. Informationen suchen und sichten,
2. Informationen analysieren und eine erste generelle Hypothese über die Diagnose entwickeln,
3. Mögliche Strategien explorieren,
4. Verschiedene Pläne entwickeln und einen Plan auswählen,
5. Den Plan implementieren,
6. Das Vorgehen vor dem Hintergrund neuer Informationen evaluieren; Hypothesen validieren oder verifizieren,
7. Innere Repräsentation des gesamten Problems anlegen,
8. Sich für eine Diagnose, die verfolgt werden soll, entscheiden.

Die Autoren fanden, dass all diese kognitiven Teilprozesse während des erfolgreichen Problemlösens auftreten können. Sie fanden auch, dass grundlegendere Prozesse, z. B. Informationen sichten und sammeln oder Informationen analysieren, sehr viel Zeit in Anspruch nahmen. Dagegen beschäftigten sich die Studenten eher weniger mit höheren kognitiven Funktionen, z. B. innere Repräsentationen anlegen, Information integrieren und strategisch planen. Schließlich zeigte sich, dass vor allem Studenten, die sowohl die grundlegenderen Prozesse als auch die höheren Prozesse in einem sogenannten vollständigen kognitiven Modell verwendet hatten, erfolgreich das Problem lösen konnten. Es lässt sich somit folgern, dass das Lösen von medizinischen Problemen klar durch das Zusammenspiel einer Reihe von gut identifizierbaren Prozessen erklärt werden kann, die die Repräsentation des Problems (Ausgangszustand und Vorwissen), des möglichen Zieles (Behandlungsstrategie und Diagnose) und die Strategie, dieses Ziel zu erreichen, betreffen.

■ Softwareprogrammierung

Die Erstellung von Software kann als Paradebeispiel für angewandtes Problemlösen gesehen werden. Schon aus der Tatsache heraus, dass sich viele Ideen der Problemraumtheorie aus Annahmen der Informationstheorie entwickelt haben, die auch die Grundlagen für die theoretische Informatik lieferte, gibt es viele Überlappungen, z. B. hinsichtlich Suchprozesse und die Repräsentation von Informationen.

Bei Computerprogrammen ist oft das grobe Ziel schnell klar, beispielsweise ein Programm zur Erstellung von Texten programmieren. Wie man aber an den unterschiedlichen Programmversionen und unterschiedlichen Herangehensweisen (Texteditor, LaTeX, Officelösung usw.) sehen kann, kann die Zielrepräsentation sehr unterschiedlich ausfallen. Innerhalb des Programmiervorgangs werden in der Regel klar unterscheidbare Teilprobleme bearbeitet, die oft modular bestimmte Aufgaben lösen, z. B. während der Eingabe überprüfen, ob ein Wort korrekt geschrieben wird. Computerprogramme starten meist mit einem konkreten Ausgangszustand, der über Schleifen, Bedingungen und die Verwendung von anderen Funktionen einen gewünschten Zielzustand erreicht. Beispielsweise öffnet sich ein weißes leeres Dokument, wenn ich mein Textverarbeitungsprogramm starte. Wenn wir schreiben, passieren eine Vielzahl von Teilprozessen: Ausgabe des Textes am Bildschirm, Speichern des Textes im Speicher etc. Je nach Programmiersprache bestehen Programme oft aus bedingten Abfragen, die es erlauben, unterschiedliche Verhaltensweisen zu implementieren. Wenn eine Bedingung zutrifft, dann führe ich jenen Befehl aus, wenn nicht, dann einen anderen. Mithilfe von Schleifen können Probleme und Vorgänge automatisiert werden. Die systematische schrittweise Vorgehensweise, ein Problem zu lösen, wird *Algorithmus* genannt. Dies unterscheidet den maschinellen Problemlöseprozess meist vom menschlichen Problemlöseprozess, bei dem zwar auch, wie wir gesehen haben, Strategien und Heuristiken verwendet werden, aber diese weniger starr und präzise ausgeführt werden, wobei sich auch dies zunehmend bei Computerprogrammen ändert. Computerprogramme lösen heute eine Vielzahl von Problemen für uns. Sie stecken in jeder modernen Kaffeemaschine genauso wie in ausgeklügelten Ex-

pertensystemen, die uns bei medizinischen, technischen oder wirtschaftlichen Problemstellungen unterstützen (z. B. Wallisch et al. 2014).

16.10 Ausblick

Wir haben gesehen, dass die Psychologie des Denkens aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden kann und viele Facetten von möglichen Untersuchungsansätzen anbietet. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass es einige etablierte und aussagekräftige kognitive Theorien gibt, die eine Reihe von Phänomenen menschlichen Problemlösens erklären können. Trotz der Komplexität und Vielfältigkeit der untersuchten Phänomene ist es der Denkpsychologie vor allem in den vergangenen 30 Jahren gelungen, erhebliche Fortschritte zu erzielen. Entscheidend für diese Fortschritte war die Abkehr vom Behaviorismus, die mit der kognitiven Wende Ende der 1950er Jahre einsetzte, und die damit verbundene Hinwendung zu Informationsverarbeitungsmodellen, die menschliches Denken in Analogie zu den in Computern ablaufenden Prozessen konzeptualisierten. Die Auswirkungen dieser theoretischen Umorientierung waren enorm. Vergleicht man den Stand der Denkpsychologie am Ende der 1950er Jahre mit dem heutigen Wissensstand, dann wird deutlich, dass in vielen Bereichen große Fortschritte erzielt und viele heute etablierte Felder in den letzten 60 Jahren überhaupt erst entstanden sind. Die Hoffnung, einen geschlossenen informationstheoretischen Ansatz zu entwickeln, um Denken generell zu erklären, wurde nicht erfüllt. Derzeit lassen diesbezüglich neuere Ansätze, wie Bayes-Lernen (Tenenbaum et al. 2006) oder darwinistische Ansätze (Dietrich und Haider 2015; Fernando et al. 2010) hoffen, dass neue Impulse gesetzt werden und noch offene Fragen beantwortet werden können.

Es lässt sich aus obigen Ausführungen auch schließen, dass Vorwissen im unterschiedlichsten Sinne eine zentrale Rolle beim Problemlösen spielt und dass letztlich das Zusammenspiel zwischen strategischen und systematischen Suchprozessen sowie das Auftreten von Geistesblitzen erfolgreiches Denken kennzeichnen. Allerdings haben wir auch gesehen, dass es mehr offene Fragen als Antworten gibt. Die Problemlöseforschung konnte bisher von der Verfügbarkeit neuer Techniken wie den bildgebenden Verfahren weniger profitieren als andere Bereiche der Allgemeinen Psychologie. Der Grund dafür ist, dass eine Verbindung zwischen funktionalen Prinzipien und neurophysiologischen Daten am ehesten für basale Wahrnehmungs-, Gedächtnis- und Handlungsprozesse hergestellt werden kann. So ist z. B. noch weitestgehend unklar, wie das konzertierte Zusammenspiel unterschiedlicher Hirnregionen bei der Lösung von einfachen Problemen abläuft. Wir haben zwar Annahmen darüber, welche Hirnregionen beteiligt sein könnten, aber deren genaue Funktion und das zeitliche Management dieser Prozesse bleiben unklar. Spannend ist auch die Frage, wie Umstrukturierung letztendlich neuronal realisiert ist. Wir haben gesehen, dass Umstrukturierung bei einer Reihe von Problemen sehr wahrscheinlich auftritt und einen Aha-Moment zur Folge hat. Allerdings ist noch weitestgehend unklar, warum und vor allem wie diese Veränderungen auf neuronaler Ebene ablaufen. Wie findet das Gehirn neue

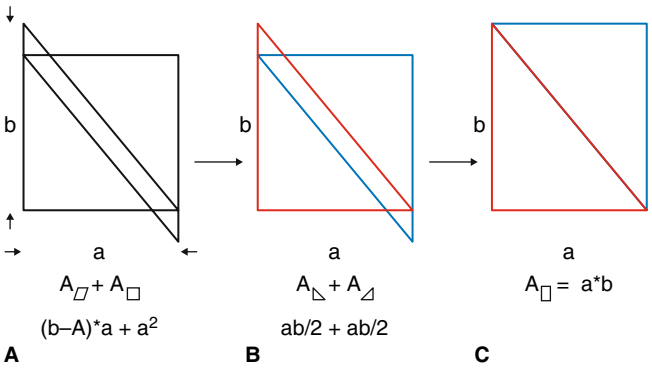


Abb. 16.15 Lösung des Parallelogramm-Quadrat-Problems. Es werden die unterschiedlichen Schritte angegeben und die möglichen Lösungsformeln für das Problem präsentiert. **A** Problem, **B** Umstrukturierung, **C** Lösung

Lösungen? Haben wir es mit einem evolutionären Mechanismus zu tun, der z. B. Wissensinhalte rekombiniert und testet (Fernando et al. 2010), ob diese uns näher an die Zielrepräsentation bringen? Hier ist zu erwarten und zu wünschen, dass sich in den nächsten Jahren neue theoretische Annahmen entwickeln, die diese Probleme lösen können.

16.11 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Im Bereich des komplexen Problemlösens wird die Steuerung von Systemen untersucht, die eine schwer durchschaubare Eigendynamik besitzen.
- Komplexe Probleme zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus vielen Elementen bestehen, stark vernetzt sind, oft mehrere Ziele verfolgt werden müssen, intransparent sind und sich die Zustände des Systems ständig verändern.
- In der Problemraumtheorie von Newell und Simon (1972) wird Problemlösen als Suche in einem Problemraum unter Anwendung mentaler Operatoren verstanden, die durch schrittweise Anwendung aus einem gegebenen Anfangszustand den gewünschten Zielzustand erzeugt. Mentale Operatoren encodieren zulässige Transformationen von Zuständen. Alle möglichen Zustände konstituieren den Problemraum.
- Menschen nutzen allgemeine Heuristiken oder Daumenregeln (z. B. Unterschiedsreduktion oder Mittel-Ziel-Analyse), um die Zahl möglicher Lösungspfade vom Anfangs- zum Zielzustand einzuschränken.
- Die Gestaltpsychologen nahmen an, dass Problemlösen nicht allein durch Reproduktion früher gelernter Reaktionen erklärt werden kann, sondern dass in vielen Fällen nur Umstrukturierungen der Problemsituation zur Lösung führen können. Das heißt, die vorhandenen Problemelemente einer Situation werden in einer neuen Weise miteinander in Verbindung gesetzt.
- In theoretischen Erweiterungen der Problemraumtheorie werden Einsichtsphänomene dadurch erklärt, dass Problemlöser die Problemsituation oder das Ziel der Problemlösung anfangs nicht korrekt repräsentieren. Zur Lösung des

Problems ist eine Veränderung der Problemrepräsentation nötig.
- Bei der Lösung von Einsichtsproblemen zeigen sich sehr unterschiedliche Hirnaktivitäten, die aber zwischen einsichtsvollem und schrittweisem Problemlösen unterscheiden lassen.
- Die Expertiseforschung untersucht, wie sich Experten von Novizen unterscheiden. Experten encodieren Probleme effizienter als Novizen, haben reichere Problemrepräsentationen, besitzen breiteres und besser organisiertes Vorwissen und benutzen effizientere Problemlösestrategien. Experte wird man durch Übung, wobei sich der Übungsverlauf oft mit dem Potenzgesetz des Lernens beschreiben lässt.
- Bereits bekannte Lösungen aus einer Wissensdomäne können bei der Lösung schwieriger Probleme in einer anderen Domäne helfen. Um eine Analogie herzustellen, muss die analoge Problemstellung zunächst aus dem Gedächtnis abgerufen und dann auf das aktuelle Problem abgebildet werden. Dabei unterscheidet man zwischen Abbildungen, welche die oberflächlichen Merkmale betreffen, und der zugrunde liegenden Tiefenstruktur.
- Bei der Lösung mithilfe von analogem Transfer spielen Areale des Präfrontalcortex eine wichtige Rolle.

Schlüsselbegriffe

Aha-Moment (*aha-experience*) Subjektives Erleben bei einer plötzlichen Einsicht.

Analoge Abbildung (*analogical mapping*) Abbildung der Elemente eines Zielproblems auf die Elemente eines Quellproblems unter Beibehaltung der Relationen zwischen Elementen.

Analoger Abruf (*analogical retrieval*) Absuchen des Gedächtnisses nach einer Problemstellung aus einer anderen Wissensdomäne zur Lösung eines aktuellen Problems.

Anfangszustand (*initial state*) Zustand, der zu Beginn einer Problemlösung gegeben ist.

Chunk (*chunk*) Wissenselement, das einzelne Elemente zu größeren Einheiten zusammenfasst.

Einsicht (*insight*) Plötzliches vollständiges Verstehen eines schwierigen Problems, das zur Lösung führt.

Einstellungseffekt (*mental set effect*) Negativer Vorwissenseffekt, der nach wiederholter Ausführung derselben Lösungsroutine die Entdeckung einfacherer Lösungen verhindert.

Expertise (*expertise*) Außergewöhnlich gute Problemlösefähigkeit oder Performanz in einem bestimmten Bereich, die auf extensive Erfahrung gegründet ist.

Funktionale Gebundenheit (*functional fixedness*) Unfähigkeit, bekannte Objekte oder Werkzeuge in einer neuen Funktion zu gebrauchen.

Heuristik (*heuristic*) Daumenregel zur Verringerung der möglichen Zustände bei der Suche im Problemraum.

Komplexes Problemlösen (*complex problem solving*) Steuerung von Simulationen mit komplexer Eigendynamik.

Methode der Unterschiedsreduktion (*hill climbing*) Heuristik, um den Problemraum zu begrenzen. Es werden immer Züge ausgewählt, die den aktuellen Zustand dem Zielzustand möglichst ähnlich machen.

Mittel-Ziel-Analyse (*means-end analysis*) Heuristisches Verfahren, um Teilziele zu generieren, bis ein Operator direkt angewandt werden kann.

Oberflächenähnlichkeit (*surface similarity*) Ähnlichkeiten zwischen den konkreten Elementen eines Quell- und Zielproblems beim analogen Transfer.

Operator (*operator*) Abstrakte Beschreibung einer Handlung, die einen Problemzustand in einen anderen überführt.

Potenzgesetz des Lernens (*power law of learning*) Beschreibt den Zusammenhang zwischen Übung und Leistungsverbesserung. Der Übungsgewinn nimmt mit zunehmender Übung ab.

Problemraum (*problem space*) Alle möglichen Zustände, die durch Anwendung von Operatoren auf ein bestimmtes Problem generiert werden können.

Problemraumtheorie (*problem space theory*) Theorie, die davon ausgeht, dass menschliches Denken durch Suchprozesse innerhalb eines Problemraumes verstanden werden kann.

Sackgasse (*impasse*) Zustand, bei dem Problemlöseversuche eingestellt werden und davon ausgegangen wird, dass keine Lösung für das Problem vorhanden ist.

Strukturelle Ähnlichkeit (*structural similarity*) Ähnlichkeiten in den Relationen zwischen Elementen eines Quell- und Zielproblems beim analogen Transfer.

Umstrukturierung (*restructuring*) Plötzliche Veränderung in der Wahrnehmung der Problemsituation (Gestaltpsychologie); Veränderung der Problemrepräsentation (in der Kognitionswissenschaft).

Vorwissen (*prior knowledge*) Wissensbestand, der zu Beginn der Problemlösung zur Verfügung steht.

Zielzustand (*goal*) Zustand, der durch eine Problemlösung angestrebt wird.

Zielerweiterung (*constraint relaxation*) Auflösung einer bestehenden Beschränkung in der Zielrepräsentation.

Weiterführende Literatur

Braine, M. D. S. & O'Brien, D. P. (Eds.). (1998). *Mental logic*. Mahwah, NJ: Erlbaum. (Liefert einen umfassenden Überblick über die Theorie der mentalen Logik.)

Dörner, D. (1989). *Die Logik des Misslingens*. Reinbek: Rowohlt. (Eine gut verständliche Einführung zum komplexen Problemlösen.)

Ericsson, K. A. & Lehmann, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology, 47*, 273-305. (Ein präziser Überblick zum Stand der Expertiseforschung.)

Funke, J. (2006). *Denken und Problemlösen. Enzyklopädie der Psychologie*. Göttingen, Hogrefe. (Sammelband, in dem die angesprochenen Aspekte des Denkens noch wesentlich vertieft werden.)

Gazzaniga, M. S. (2009). *The cognitive neurosciences*. MIT press. (Gibt einen ausführlichen Überblick über neurowissenschaftliche Befunde und Methoden).

Glatzeder, B., Goel, V., & von Müller, A. (2010*). Towards a Theory of Thinking*. Springer, Heidelberg. (Behandelt verschiedene Themenfelder zum Thema „Denken und Problemlösen".)

Holyoak, K. J., Gentner, D. & Kokinov, B. (2000). *Analogy: A cognitive science perspective*. Cambridge: MIT Press. (Ein interdisziplinärer Sammelband zur Bedeutung von Analogien für das Problemlösen.)

Holyoak, K. J. & Morrison, R. G. (2005). *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*. Cambridge: Cambridge University Press. (Aktueller Sammelband, der einen guten Über- und Einblick in die vielfältigen Themengebiete der Denkforschung gibt.)

Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Macmillan, 2011 (Eine schöne Diskussionsgrundlage für Zwei-Prozess-Modelle des Denkens und Problemlösens.)

Mayer, R. E. (1992). *Thinking, problem solving, cognition (2nd edn.)*. New York: Freeman. (Ein ausführliches und gut verständliches Buch zum problemlösenden Denken.)

Sternberg, R. J. & Davidson, J. E. (1995). *The nature of insight*. Cambridge; MIT Press. (Ein interdisziplinärer Sammelband zum Thema „Einsicht beim Problemlösen".)

Webseiten

- http://act-r.psy.cmu.edu/ – Bietet einen Überblick über die ACT-R-Architektur an. Ein kognitives Framework, mit dem Denk- und Problemlöseprozesse modelliert werden können.
- http://docs.lib.purdue.edu/jps/ – Homepage der Zeitschrift *Journal of Problem Solving*, in der empirische Studien zum Thema Problemlösen veröffentlicht werden.
- http://www.cognitivesciencesociety.org/ – Homepage der Cognitive Science Society mit Tagungsankündigungen, Newsletter und Link zur Zeitschrift *Cognitive Science*.

Danksagung

Ich möchte Günther Knoblich ganz herzlich für die Zusammenarbeit bei einer früheren Version dieses Kapitels danken. Viele seiner Ideen und Argumente sind auch in dieser überarbeiteten Version noch wesentlicher Bestandteil. Danken möchte ich außerdem Franziska Konitzer, die mich beim Layout des Kapitels und bei Korrekturen unterstützt hat.

Literatur

Adamson, R. E. (1952). Functional fixedness as related to problem solving: A repetition of three experiments. *Journal of Experimental Psychology*, *44*, 288–291.

Adamson, R. E., & Taylor, D. W. (1954). Functional fixedness as related to elapsed time and to set. *Journal of Experimental Psychology*, *47*, 122–126.

Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, *89*, 369–406.

Anderson, J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Anderson, J. R., Albert, M. V., & Ficham, J. M. (2005). Tracing problem solving in real time: fMRI analysis of the subject-paced Tower of Hanoi. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(8), 1261–1274.

Anderson, J. R., & Lebiere, C. (1998). *The atomic components of thought*. Mahwah, NJ: Erlbaum.

Anzai, Y. (1991). Learning and use of representations for physics expertise. In K. A. Ericsson, & J. Smith (Hrsg.), *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits* (S. 64–92). New York: Cambridge University Press.

Atwood, M. E., & Polson, P. G. (1976). A process model for water jug problems. *Cognitive Psychology*, *8*, 191–216.

Baker, S., Rogers, R., Owen, A., Frith, C., Dolan, R., Frackowiak, R., & Robbins, T. (1996). Neural systems engaged by planning: a PET study of the Tower of London task. *Neuropsychologia*, *34*(6), 515–526.

Berry, D. C., & Broadbent, D. E. (1984). On the relationship between task performance and associated verbalizable knowledge. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *36A*, 209–231.

Bilalić, M., & McLeod, P. (2014). Why do good thoughts block better ones. *Scientific American*, *310*(3), 74–79.

Bilalić, M., McLeod, P., & Gobet, F. (2008). Why good thoughts block better ones: The mechanism of the pernicious Einstellung effect. *Cognition*, *108*, 652–661.

Birch, H. G., & Rabinowitz, H. S. (1951). The negative effect of previous experience on productive thinking. *Journal of Experimental Psychology*, *41*, 121–125.

Bischof, N. (1985). *Das Rätsel Ödipus*. München: Piper.

Bittner, A., & Helbig-Lang, S. (2011). Stressbewältigungs-und Problemlösetrainings. In H.-U. Wittchen, & J. Hoyer (Hrsg.), *Klinische Psychologie & Psychotherapie* (S. 577–585). Berlin, Heidelberg: Springer.

Bowden, E. M., & Beeman, M. J. (1998). Getting the right idea: Semantic activation in the right hemisphere may help solve insight problems. *Psychological Science*, *9*, 435–440.

Buchner, A. (1999). Komplexes Problemlösen vor dem Hintergrund der Theorie finiter Automaten. *Psychologische Rundschau*, *50*, 206–212.

Bunge, S., Wendelken, C., Badre, D., & Wagner, A. (2005). Analogical reasoning and prefrontal cortex: Evidence for separable retrieval and integration mechanisms. *Cerebral Cortex*, *15*, 239–249.

Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, *4*, 55–81.

Chi, R. P., & Snyder, A. W. (2011). Facilitate insight by non-invasive brain stimulation. *PLoS ONE*, *6*(2), e16655.

Danek, A. H., Fraps, T., Müller, A. von, Grothe, B., & Öllinger, M. (2013). Aha! experiences leave a mark: facilitated recall of insight solutions. *Psychological Research*, *77*(5), 659–669.

Davies, S. P. (1990). Plans, goals and selection rules in comprehension of computer programs. *Behaviour and Information Technology*, *9*, 201–214.

DeGroot, A. D. (1965). *Thought and choice in chess*. Mouton: The Hague.

Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(4),897–915.

Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 822–848.

Dominowski, R. L., & Buyer, L. S. (2000). Retention of problem solutions: The resolution effect. *American Journal of Psychology*, *113*, 249–274.

Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
Dörner, D. (1989). *Die Logik des Mißlingens*. Reinbek: Rowohlt.
Dörner, D., & Schölkopf, J. (1991). Controlling complex systems: Or Expertise as „grandmother's know-how.". In K. A. Ericsson, & J. Smith (Hrsg.), *Toward a general theory of expertise: Prospects and limits* (S. 218–239). New York: Cambridge University Press.
Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F., & Stäudel, T. (1983). *Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität*. Bern: Huber.
Dörner, D., Schaub, H., & Strohschneider, S. (1999). Komplexes Problemlösen – Königsweg der Theoretischen Psychologie? *Psychologische Rundschau*, *50*, 198–205.
Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: The organization of goal-directed behavior. *Cognitive Psychology*, *30*, 257–303.
Duncker, K. (1935). *Zur Psychologie des produktiven Denkens*. Berlin: Springer.
D´Zurilla, T. J., & Goldfried, M. R. (1971). Problem solving and behavior modification. *Journal Of Abnormal Psychology*, *78*, 107–126.
Ericsson, K. A. (1996). *The road to excellence: The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports, and games*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, *102*, 211–245.
Ericsson, K. A., & Lehmann, A. C. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, *47*, 273–305.
Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Roemer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, *100*, 363–406.
Evans, J. S. B. T. (2008). Dual-Processing Accounts of Reasoning, Judgment, and Social Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 255–278.
Fernando, C., Goldstein, R., & Szathmáry, E. (2010). The neuronal replicator hypothesis. *Neural Computation*, *22*, 2809–2857.
Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human Performance*. London: Prentice-Hall.
Frensch, P. A., & Funke, J. (Hrsg.). (2014). *Complex problem solving: The European perspective*. Hove, Sussex: Psychology Press.
Frith, C. (2000). The role of the dorsolateral prefrontal cortex in the selection of action as revealed by functional imaging. In S. S. Monsell, & J. J. Driver (Hrsg.), *Control of cognitive processes: attention and performance XVIII*. Cambridge, US: MIT Press.
Funke, J. (1984). Diagnose der westdeutschen Problemlöseforschung in Form einiger Thesen. *Sprache und Kognition*, *3*, 159–172.
Funke, J. (1995). Experimental research on complex problem solving. In P. A. Frensch, & J. Funke (Hrsg.), *Complex problem solving: The European perspective* (S. 243–268). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Funke, J. (1999). Komplexes Problemlösen – Ein Blick zurück und ein Blick nach vorne. *Psychologische Rundschau*, *50*, 194–197.
Funke, J. (2003). *Problemlösendes Denken*. Stuttgart: Kohlhammer.
Funke, J. (2006). Komplexes Problemlösen. In J. Funke (Hrsg.), *Denken und Problemlösen* Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C: Theorie und Forschung, Serie II: Kognition, (Bd. 8, S. 375–446). Göttingen: Hogrefe.
Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, *7*(2), 155–170.
Gentner, D., & Toupin, C. (1986). Systematicity and surface similarity in the development of analogy. *Cognitive Science*, *10*, 277–300.
Gentner, D., Rattermann, M. J., & Forbus, K. D. (1993). The roles of similarity in transfer: Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology*, *25*, 524–575.
Gentner, D., Holyoak, K. J., & Kokinov, B. N. (2001). *The analogical mind: Perspectives from cognitive science*. Cambridge: MIT-Press.
Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, *12*, 306–355.
Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, *15*, 1–38.
Gobet, F. (1998). Expert memory: A comparison of four theories. *Cognition*, *66*, 115–152.
Goel, V., & Grafman, J. (1995). Are the frontal lobes implicated in „planning" functions? Interpreting data from the Tower of Hanoi. *Neuropsychologia*, *33*, 623–642.
Grant, E. R., & Spivey, M. J. (2003). Eye movements and problem solving: guiding attention guides thought. *Psychological Science*, *14*(5), 462–466.
Greeno, J. G. (1978). Natures of problem solving abilities. In K. W. Estes (Hrsg.), *Handbook of learning and cognitive processes* (Bd. 5, S. 239–270). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Groen, G. J., & Patel, V. L. (1988). The relationship between comprehension and reasoning in medical expertise. In M. T. H. Chi, & R. Glaser (Hrsg.), *The nature of expertise* (S. 287–310). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Gruber, H. E. (1995). Insight and affect in the history of science. In R. J. Sternberg, & J. E. Davidson (Hrsg.), *The nature of insight* (S. 397–431). Cambridge, MA: MIT Press.
Haider, H., & Frensch, P. A. (1996). The role of information reduction in skill acquisition. *Cognitive Psychology*, *30*, 304–337.
Haider, H., & Frensch, P. A. (2002). Why aggregated learning follows the power law of practice when individual learning does not: Comment on Rickard (1997, 1999), Delaney et al. (1998), and Palmeri (1999). *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *28*, 392–406.
Haider, H., & Kluwe, R. H. (1994). Erwerb kognitiver Leistungen. Eine experimentelle Prüfung der 'Instance Theory' von Logan (1988). *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, *41*, 39–77.
Holding, D. H. (1992). Theories of chess skill. *Psychological Research*, *54*, 10–16.
Holyoak, K. J. (2005). Analogy. In K. J. Holyoak, & R. G. Morrison (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning* (S. 117–142). Cambridge: Cambridge University Press.
Holyoak, K. J., & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory and Cognition*, *15*, 332–340.
Holyoak, K. J., & Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
Hummel, J. E., & Holyoak, K. J. (1997). Distributed representations of structure: A theory of analogical access and mapping. *Psychological Review*, *104*, 427–466.
Jones, G. (2003). Testing two cognitive theories of insight. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(5), 1017–1027.
Jung-Beeman, M., Bowden, E., Haberman, J., Frymiare, J., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., & Reber, P. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *Plos Biology*, *2*, 500–510.
Kammer, T., & Karnath, H. O. (2006). Manifestationen von Frontalhirnschädigungen. In H. O. Karnath, & P. Thier (Hrsg.), *Neuropsychologie*. Heidelberg: Springer.
Kaplan, C. A., & Simon, H. A. (1990). In search of insight. *Cognitive Psychology*, *22*, 374–419.
Karnath, H. O., & Thier, P. (Hrsg.). (2006). *Neuropsychologie*. Heidelberg: Springer.
Katona, G. (1940). *Organizing and memorizing: Studies in the psychology of learning and teaching*. New York: Columbia University Press.
Keane, M. T. (1989). Modelling problem solving in Gestalt „insight" problems. *Irish Journal of Psychology*, *10*, 201–215.
Keane, M. T. (1997). What makes an analogy difficult? The effects of order and causal structure on analogical mapping. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *23*, 946–967.
Keane, M. T., Ledgeway, T., & Duff, S. (1994). Constraints on analogical mapping: A comparison of three models. *Cognitive Science*, *18*, 387–438.
Kershaw, T. C., & Ohlsson, S. (2004). Multiple causes of difficulty in insight: The case of the Nine-Dot Problem. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *30*, 3–13.
Kiesewetter, J., Ebersbach, R., Görlitz, Görlitz, M., Fischer, & Fischer, M. R. (2013). Cognitive problem solving patterns of medical students correlate with success in diagnostic case solutions. *PloS one*, *8*(8), e71486.
Klauer, K. C. (1993). *Belastung und Entlastung beim Problemlösen: Eine Theorie des deklarativen Vereinfachens*. Göttingen: Hogrefe.
Klix, F. (1971). *Information und Verhalten*. Bern: Huber.
Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. (1999). Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *25*, 1534–1556.
Knoblich, G., Ohlsson, S., & Raney, G. (2001). An eye movement study of insight problem solving. *Memory and Cognition*, *29*, 1233–1242.
Knowlton, B. J., & Holyoak, K. J. (2009). Prefrontal substrate of human relational reasoning. In M. S. Gazzaniga (Hrsg.), *The cognitive neurosciences*. Cambridge, USA, London, UK: MIT Press.

Koechlin, E., Gianpaolo, B., Pietro, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, *399*, 148–151.
Köhler, W. (1921). *Intelligenzprüfungen am Menschenaffen*. Berlin: Springer.
Köhler, W. (1947). *Gestalt Psychology*. New York: Livewright.
Kounios, J., & Beeman, M. (2014). The cognitive neuroscience of insight. *Annual review of psychology*, *65*, 71–93.
Krause, W. (1982). Problemlösen – Stand und Perspektiven Teil 1. *Zeitschrift für Psychologie*, *19*, 17–36.
Lavric, A., Forstmeier, S., & Rippon, G. (2000). Differences in working memory involvement in analytical and creative tasks: an ERP study. *NeuroReport*, *11*(8), 1613–1618.
Lesgold, A., Rubinson, H., Feltovich, P., Glaser, R., Klopfer, D., & Wang, Y. (1988). Expertise in a complex skill: Diagnosing x-ray pictures. In M. T. H. Chi, & R. Glaser (Hrsg.), *The nature of expertise* (S. 311–342). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492–527.
Lovett, M. C., & Anderson, J. R. (1996). History of success and current context in problem solving: Combined influences on operator selection. *Cognitive Psychology*, *31*, 168–217.
Luchins, A. S. (1942). Mechanization in problem solving: The effect of Einstellung. *Psychological Monographs*, *54*(6).
Luchins, A. S., & Luchins, E. H. (1959). *Rigidity of behavior: A variational approach to the effect*
Luo, J., & Niki, K. (2003). Function of hippocampus in „insight" of problem solving. *Hippocampus*, *13*, 316–323.
MacGregor, J. N., Ormerod, T. C., & Chronicle, E. P. (2001). Information-processing and insight: A process model of performance on the nind-dot and related problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *27*, 176–201.
Maier, N. R. F. (1930). Reasoning in humans: I. On direction. *Journal of Comparative Psychology*, *10*, 115–143.
Maier, N. R. F. (1931). Reasoning in humans. II. The solution of a problem and its appearance in consciousness. *Journal of Comparative Psychology*, *12*, 181–194.
Mandler, J. M., & Mandler, G. (1964). *Thinking: from association to Gestalt*. New York: John Wiley & Sons.
Markman, A. B., & Gentner, D. (1993). Structural alignment during similarity comparisons. *Cognitive Psychology*, *25*, 431–467.
Mayer, R. E. (1992). *Thinking, problem solving, cognition* (2. Aufl.). New York, NY: Freeman.
Metcalfe, J., & Wiebe, D. (1987). Intuition in insight and noninsight problem solving. *Memory and Cognition*, *15*, 238–246.
Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*, 81–97.
Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex „frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*, 49–100.
Newell, A. (1990). *Unified theories of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
Nitsche, M. A., Cohen, L. G., Wassermann, E. M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P. S., & Fregni, F. (2008). Transcranial direct current stimulation: state of the art 2008. *Brain Stimulation*, *1*(3), 206–223.
Ohlsson, S. (1992). Information-processing explanations of insight and related phenomena. In M. Keane, & K. Gilhooly (Hrsg.), *Advances in the psychology of thinking* (S. 1–44). London: Harvester-Wheatsheaf.
Öllinger, M., Jones, G., & Knoblich, G. (2008). Investigating the effect of set on insight problem solving. *Experimental Psychology*, *55*, 270–282.
Öllinger, M., Jones, G., & Knoblich, G. (2014). The dynamics of search, impasse, and representational change provide a coherent explanation of difficulty in the nine-dot problem. *Psychological Research*, *78*, 266–275.
Owen, A. M., Downes, J. J., Sahakian, B. J., Polkey, C. E., & Robbins, T. W. (1990). Planning and spatial working memory following frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, *28*, 1021–1034.
Pfeifer, R., & Bongard, J. C. (2006). *How the body shapes the way we think. A new view of intelligence*. Cambridge: MIT Press.
Pretz, J. E., Naples, A. J., & Sternberg, R. J. (2003). Recognizing, defining, and representing problems. In J. E. Davidson, & R. J. Steinberg (Hrsg.), *The psychology of problem solving* (S. 3–30). New York, NY: Cambridge University Press.
Putz-Osterloh, W., & Lüer, G. (1981). The predictability of complex problem solving by performance on an intelligence test. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, *28*, 309–334.
Reichert, U., & Dörner, D. (1988). Heurismen beim Umgang mit einem einfachen dynamischen System. *Sprache und Kognition*, *7*, 12–24.
Reitman, W. R. (1965). *Cognition and thought: An information processing approach*. New York: Wiley.
Reverberi, C., Toraldo, A., D'Agostini, S., & Skrap, M. (2005). Better without (lateral) frontal cortex? Insight problems solved by frontal patients. *Brain*, *128*, 2882–2890.
Robin, N., & Holyoak, K. J. (1995). Relational complexity and the functions of prefrontal cortex. In M. S. Gazzaniga (Hrsg.), *The cognitive neurosciences* (S. 987–997). Cambridge, MA: MIT Press.
Scheerer, M. (1963). Problem-Solving. *Scientific American*, *208*, 118–128.
Schmidt, H. G., & Boshuizen, H. P. (1993). On acquiring expertise in medicine. *Educational Psychology Review*, *5*, 205–221.
Schmidt, U., Wirth, J., & Polkehn, K. (1999). Analogical transfer of non-isomorphic source problems. In M. Hahn, & S. C. Stoness (Hrsg.), *Proceedings of the 21st Meeting of the Cognitive Science Society* (S. 631–636). Mahwah, NJ: Erlbaum.
Schooler, J. W., Ohlsson, S., & Brooks, K. (1993). Thoughts beyond words: When language overshadows insight. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*, 166–183.
Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *198*, 199–209.
Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. New York, NY: Cambridge University Press.
Simon, H. (1986). The information processing explanation of Gestalt phenomena. *Computers in Human Behaviour*, *2*, 241–255.
Skinner, B. F. (1938). *The behavior of organisms: An experimental analysis*. Oxford, UK: Appleton-Century.
Spellman, B. A., & Holyoak, K. J. (1996). Pragmatics in analogical mapping. *Cognitive Psychology*, *31*, 307–346.
Spies, K., & Hesse, F. (1987). Problemlösen. In G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine Experimentelle Psychologie* (S. 371–430). Stuttgart: Fischer.
Sternberg, R. J., & Davidson, J. E. (Hrsg.). (1995). *The nature of insight*. Cambridge, MA: MIT Press.
Tenenbaum, J. B., Thomas, L. G., & Charles, K. (2006). Theory-based Bayesian models of inductive learning and reasoning. *Trends in cognitive sciences*, *10*(7), 309–318.
Thomas, J. C. (1974). An analysis of behavior in the hobbits-orcs problem. *Cognitive Psychology*, *6*, 257–269.
Thomas, L. E., & Lleras, A. (2007). Moving eyes and moving thought: on the spatial compatibility between eye movements and cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*(4), 663–668.
Thomas, L. E., & Lleras, A. (2009). Swinging into though: directed movement guides insight in problem solving. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*, 719–723.
Thorndike, E. L. (1898). *Animal intelligence: An experimental study of the associative processes in animals*. Bd. 8. New York: Macmillan.
Thorndike, E. L. (1911). *Animal Intelligence: Experimental studies*. New York: Macmillian.
Underwood, G. (Hrsg.). (2005). *Cognitive processes in eye guidance*. Oxford: Oxford University Press.
Wagner, D. A., & Scurrah, M. J. (1971). Some characteristics of human problem-solving in chess. *Cognitive Psychology*, *2*, 454–478.
Wallach, D. (1998). *Komplexe Regelungsprozesse. Eine kognitionswissenschaftliche Analyse*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
Wallas, G. (1926). *The art of thought*. London: Cape.
Wallisch, P., Lusignan, M. E., Benayoun, M. D., Baker, T. I., Dickey, A. S., & Hatsopoulos, N. G. (2014). *MATLAB for neuroscientists: an introduction to scientific computing in MATLAB*. London, UK: Academic Press.
Weisberg, R. W. (1986). *Creativity: Genius and other myths*. New York, NY: Freeman.
Weisberg, R. W., & Alba, J. W. (1981). An examination of the alleged role of „fixation" in the solution of several „insight" problems. *Journal of Experimental Psychology: General*, *110*, 169–192.

Wertheimer, M. (1925). *Drei Abhandlungen zur Gestalttheorie*. Erlangen: Verlag der Philosophischen Akademie.
Wertheimer, M. (1964). *Produktives Denken*. Frankfurt am Main: Kramer.
Wharton, C. M., & Grafman, J. G. (1998). Deductive reasoning and the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 54–59.
Wickelgren, W. A. (1974). *How to solve problems*. New York: Freeman.

Urteilen und Entscheiden

Arndt Bröder und Benjamin E. Hilbig

17.1 Einleitung – 620
17.1.1 Urteilen und Entscheiden – Abgrenzung und Gemeinsamkeiten – 621
17.1.2 Historische Einordnung – 622
17.1.3 Grundbegriffe und Methoden – 623
17.1.4 Gliederung des Kapitels – 623

17.2 Strukturmodelle – 625
17.2.1 Was ist eine gute Entscheidung? – 625
17.2.2 Erwartungswert und Erwartungsnutzen – 625
17.2.3 Verletzung der Axiome – 627
17.2.4 Prospect-Theorie – 628
17.2.5 Das „große Ganze" und neuere Entwicklungen – 631

17.3 Modelle mit psychologischen Einflüssen – 632
17.3.1 Das Bayes-Theorem und der Basisratenfehler – 632
17.3.2 Ein umfassendes Rahmenmodell des Urteilens – 637

17.4 Kognitive Prozessmodelle des Urteilens und Entscheidens – 641
17.4.1 Was ist ein Prozessmodell? – 641
17.4.2 Der adaptive Entscheider und seine „Werkzeugkiste" – 641
17.4.3 Andere kognitive Mechanismen – 643
17.4.4 Welche Faktoren bestimmen die Art des Entscheidungsprozesses? – 646
17.4.5 Abschließende Bemerkungen – 649

17.5 Anwendungsbeispiele – 649

17.6 Ausblick – 650

17.7 Weiterführende Informationen – 651

Literatur – 654

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_17

Im Blickfang

Eine wichtige Entscheidung

Täglich treffen wir viele Entscheidungen, manche davon konsequenzenreich und wichtig („Welche berufliche Laufbahn will ich einschlagen?"), andere dagegen ohne gravierende Auswirkungen („Kaufe ich heute Erdbeer- oder Himbeerjoghurt?"). Gelegentlich treffen wir auch Entscheidungen, die das Leben anderer Personen maßgeblich beeinflussen. Genauso wird unser Leben von vielen (z. B. politischen) Entscheidungsträgern mitbestimmt.

Insbesondere bei wichtigen Entscheidungen, die auch andere Personen betreffen, erwarten wir von den beteiligten Personen, dass sie die relevante Information möglichst neutral bewerten und sich nicht von irrelevanten Details leiten lassen. Andernfalls würden wir der Entscheidung die Rationalität absprechen. Shafir et al. (1993) legten in einer Studie vielen Versuchsteilnehmern das folgende schwierige Entscheidungsszenario vor:

„Stellen Sie sich vor, Sie sind Mitglied einer Jury, die über das alleinige Sorgerecht eines Elternteils für das einzige Kind zu entscheiden hat. Es ist eine recht feindselige Scheidung der Eltern vorausgegangen. Aufgrund der schwierigen Details des Falles bittet der Familienrichter Sie, nur die folgenden Informationen über die beiden Eltern für Ihre Entscheidung zu berücksichtigen:

- **Elternteil A:**
- durchschnittliches Einkommen,
- durchschnittlicher Gesundheitszustand,
- normale Arbeitszeiten,
- recht gute Beziehung zum Kind,
- relativ stabiles Sozialleben.
- **Elternteil B:**
- überdurchschnittliches Einkommen,
- sehr enge Beziehung zum Kind,
- sehr aktives Sozialleben,
- viele berufsbedingte Reisen,
- leichte Gesundheitsprobleme.

Welchem Elternteil würden Sie das Sorgerecht zusprechen?

Bevor Sie weiterlesen, überlegen Sie bitte selbst, welche Entscheidung Sie in diesem Fall treffen würden!"

In der Studie von Shafir et al. (1993) entschied sich die Mehrheit der Probanden (64 %) dafür, das Sorgerecht Elternteil B zuzusprechen.

Im vorliegenden Fall ist es schwierig oder gar unmöglich, eine „korrekte" Entscheidung zu definieren, da diese Bewertung von der subjektiven Gewichtung der einzelnen Informationen abhängt, die nicht jedermann auf gleiche Weise vornehmen muss.

Der springende Punkt an der genannten Studie ist jedoch der Folgende: Eine andere Gruppe von Versuchsteilnehmern erhielt exakt dieselbe Information, allerdings mit der abschließenden Frage „Welchem Elternteil würden Sie das Sorgerecht *verwehren*?" In dieser Versuchsbedingung entschied sich *ebenfalls* die Mehrheit der Probanden (55 %) für Elternteil B! Exakt dieselbe objektive Information führte also je nach abschließender Frage zu gegensätzlichen Entscheidungen.

Hängen menschliche Entscheidungen von irrelevanten Details – wie im Beispiel von Shafir et al. (1993) von der Fragerichtung – ab? Wie genau entstehen Entscheidungen, und wodurch sind sie beeinflusst? Ist der Mensch irrational? Falls ja, lassen sich menschliche Entscheidungen verbessern? Diese und ähnliche Fragen beschäftigen die Urteils- und Entscheidungsforschung.

17.1 Einleitung

Am 16. April 2014 sank vor der südkoreanischen Küste die Fähre *Sewol*. Nur 174 der 476 Passagiere konnten gerettet werden. Sie hatten sich ins offene Meer geflüchtet, wo herbeigerufene andere Schiffe sie aufnehmen konnten. Die meisten Passagiere waren dagegen auf Anweisung des Kapitäns in ihren Kabinen geblieben und gingen mit dem Schiff unter. Die Anweisung des Kapitäns stellte sich im Nachhinein demnach als „fatale Fehlentscheidung" heraus, wie die Presse weithin urteilte. Gleichwohl begründete der Kapitän seine Entscheidung damit, dass die niedrige Wassertemperatur und starke Strömungen sich ebenfalls als tödliche Falle hätten erweisen können, wenn er sich anders entschieden und die Passagiere mit Schwimmwesten ins Wasser geschickt hätte. Er hielt das schnelle Sinken des Schiffes für weniger wahrscheinlich. Insofern erwies sich die Entscheidung des Kapitäns zwar letztlich als *falsch*, aber möglicherweise war sie nicht *irrational*. Es galt, unter massivem emotionalem und zeitlichem Druck die Wahrscheinlichkeit des schnellen Sinkens und den vermuteten Zeitpunkt des Eintreffens von Hilfe gegeneinander abzuwägen. Beides waren unbekannte Größen, die der Kapitän nur einschätzen, aber nicht exakt wissen konnte (Hohleiter 2014). (Die mögliche Bewertung der Fehlentscheidung des Kapitäns soll keinesfalls andere Aspekte seines Fehlverhaltens entschuldigen.)

Glücklicherweise hängen von unseren privaten und beruflichen Entscheidungen relativ selten Menschenleben ab, wenngleich die Konsequenzen für uns und andere unterschiedlich bedeutsam sein können. Das gemeinsame Merkmal ist jedoch, dass die (Handlungs-)Optionen beurteilt werden müssen, um eine Wahl zwischen ihnen zu treffen. Dabei kann auch Nichthandeln eine Option sein.

Entscheidungen können aus drei maßgeblichen Gründen „schwierig" sein:

1. Die Wahrscheinlichkeiten relevanter Ereignisse oder gar die Ereignisse selbst sind unbekannt wie im Eingangsbeispiel.
2. Sie sind mit einem Zielkonflikt verbunden, der einen Kompromiss oder eine Abwägung verlangt. Zum Beispiel hätten wir vielleicht gerne das coolste und beste Smartphone, das aber leider auch das teuerste ist. Die Ziele „cool sein" und „sparen" stehen hier im Konflikt, und ein Ziel muss gegenüber dem anderen zurückstehen.
3. Es sind sehr viele Informationen zu berücksichtigen, die die Entscheidung komplex machen.

Wie Menschen urteilen und entscheiden gehört zu den spannendsten Fragen der Psychologie, und es gibt dazu schon seit Jahrzehnten eine reiche Forschungsaktivität. Diese hat in den letzten Jahren nochmals deutlich zugenommen, was sich z. B. an der Etablierung neuer Fachzeitschriften ablesen lässt (z. B. *Decision* seit 2014 oder *Judgment and Decision Making* seit 2006).

Wir definieren in diesem Kapitel zunächst Urteilen und Entscheiden und begründen, warum wir die oft getrennte Behandlung beider Phänomene nicht für sinnvoll halten. Dann erläutern wir einige Grundbegriffe und Methoden. Schließlich beschreiben wir die wesentlichen Befunde und Theorien anhand der jeweils verwendeten Theoriesprache, die grob auch mit der historischen Entwicklung von den Anfängen zur gegenwärtigen Forschung zusammenfällt: Zunächst behandeln wir Strukturmodelle des

Entscheidens, dann psychologisch inspirierte Modelle und zuletzt kognitive Prozessmodelle.

17.1.1 Urteilen und Entscheiden – Abgrenzung und Gemeinsamkeiten

Mehr als in anderen Gebieten der Psychologie (mit Ausnahme z. B. des logischen Schlussfolgerns) spielt bei Urteilen und Entscheidungen das Kriterium der *Rationalität* eine Rolle: Vernünftige *Urteile* folgen aus rationalen *Überzeugungen*, vernünftige *Entscheidungen* spiegeln rationales *Handeln* (Hardman 2009; Over 2004). Philosophen, Ökonomen und Mathematiker haben seit jeher versucht, Kriterien der Rationalität zu definieren (z. B. Widerspruchsfreiheit, Wahrscheinlichkeitstheorie), die als normativ angesehen werden und daher einen „idealen" Maßstab für Urteile und Entscheidungen bereitstellen (**normative Sichtweise**). Die Psychologie interessiert sich dagegen für tatsächliches Verhalten und eine Beschreibung der zugrunde liegenden kognitiven Prozesse und ist daher eher deskriptiv (**deskriptive Sichtweise**). Es liegt dabei nahe, tatsächliches Verhalten mit dem normativen Maßstab zu vergleichen, und ein großer Teil der Forschung hat hier Diskrepanzen aufgezeigt, was zu einer ausgeprägten Rationalitätsdebatte geführt hat, die hier nicht vertieft werden kann (z. B. kurze Erläuterung in Bröder 2005, Kap. 2; ausführlicher in Dawes 2001; Stanovich 2010; Stein 1996).

Urteilen (*judgment*) und Entscheiden (*decision making*) wird in vielen Lehrbüchern (wie in diesem Kapitel) gemeinsam behandelt. Wir definieren zunächst die Begriffe „Urteil" und „Entscheidung", um sie voneinander abzugrenzen. Anschließend begründen wir, warum wir eine inhaltlich getrennte Behandlung beider Phänomene nicht für sinnvoll halten.

Nach der allgemeinsten möglichen Definition ist ein *Urteil* die Zuordnung eines Wertes auf einer Urteilsdimension zu einem Urteilsobjekt (Betsch et al. 2011). Urteilsobjekte können Situationen, Objekte, Personen und beliebige andere Stimuli sein; Urteilsdimensionen sind Eigenschaften, die diesen Stimuli in veränderlichem Ausmaß sinnvoll zugeordnet werden können, z. B. das Gewicht eines Steins, die Freundlichkeit einer Person, die Attraktivität einer Lotterie oder die Gefährlichkeit einer Situation. Im geäußerten Urteil einer Person kommt ihre Überzeugung über das Urteilsobjekt zum Ausdruck. Urteile sind gemäß dem Philosophen John Locke (1690/1997) Schlussfolgerungen (Inferenzen) im „Zwielicht der Wahrscheinlichkeit". Wenn exaktes Wissen fehlt, müssen wir uns mit Hinweisen (*cues*) begnügen, um den „wahren" Wert des Urteilsobjekts auf der Dimension zu erschließen, z. B. das Gewicht eines Steins aus seinem Volumen (falls keine Waage zur Hand ist). Urteile können auf verschiedene Arten geäußert werden, z. B. als kategoriales Urteil („Der Stein ist schwer"), als Vergleichsurteil („Der Stein ist schwerer als der Stock") oder als quantitatives Urteil („Der Stein wiegt ca. 5 kg").

Nach einer ebenfalls möglichst breit gefassten Definition ist eine *Entscheidung* die Wahl zwischen mindestens zwei möglichen (Handlungs-)Optionen. Ich kann mich entscheiden, den Bus oder das Fahrrad zur Arbeit zu nehmen, den Beruf des Arztes oder einen anderen Beruf anzustreben, dem Seelenheil oder dem materiellen Erfolg nachzujagen etc. Entscheidungssituationen sind also sehr unterschiedlich, enthalten aber immer mindestens zwei Handlungsalternativen (die Zahl ist nach oben offen), und der Entscheider wählt explizit und bewusst zwischen ihnen. Rein routinisierte oder gar automatisierte Entscheidungen wie die, sich morgens die Zähne zu putzen, sind typischerweise nicht Gegenstand der Entscheidungspsychologie. Durch eine Wahl drückt der Entscheider seine Präferenz für die gewählte gegenüber den nicht gewählten Alternativen aus.

Gemäß der oben skizzierten Unterschiede sind demnach „judgments [...] evaluations or estimates whereas decisions indicate an intention to pursue a particular course of action" (Hardman 2009, S. 3). Manche Autoren verwenden den Begriff „Urteil" für Inferenzen über nicht direkt beobachtbare objektive Größen (s. Steinbeispiel) und reservieren den Begriff der Entscheidung für Präferenzen, die immer subjektive Wertungen beinhalten. Erstere sind mindestens im Prinzip an der Realität überprüfbar, während Präferenzen subjektive Vorlieben darstellen. Insofern kann man bei Urteilen ihre *Akkuratheit* (Übereinstimmung mit der Realität, auch **Korrespondenz** genannt) zumindest dem Prinzip nach prüfen, bei Präferenzen kann man dagegen nur ihre **Kohärenz** (innere Widerspruchsfreiheit) beurteilen (s. unten).

Viele Einführungstexte behandeln Urteilen und Entscheiden wegen der genannten Unterschiede getrennt in verschiedenen Abschnitten. Dabei variiert das Unterscheidungsmerkmal häufig zwischen Texten, und die Separierung lässt sich nicht immer konsistent durchhalten. Zudem erscheinen dieselben Themen in manchen Texten unter dem Stichwort „Entscheiden", in anderen unter „Urteilen". Die Trennung beider Bereiche ist nach unserer Auffassung nicht *inhaltlich* zu rechtfertigen, sondern vielmehr *historisch bedingt*, da sich die Forschungsthemen und -paradigmen aus verschiedenen Traditionen entwickelt haben. Während die Urteilsforschung stark von der frühen Wahrnehmungsforschung beeinflusst (Brunswik 1952; Fechner 1860) und später auf klinische und soziale Urteile übertragen wurde (Brehmer und Joyce 1988; Hammond 1955), hat sich die Entscheidungsforschung stärker aus mathematischen und philosophischen (später ökonomischen) Theorien entwickelt (Goldstein und Hogarth 1997). Urteilsforschung wurde traditionell eher mit „reicherem" Stimulusmaterial betrieben (z. B. diagnostische Urteile), Entscheidungsforschung dagegen mit artifiziellen Paradigmen wie Wahlen zwischen Lotterien.

Wir glauben, dass eine getrennte Behandlung weder sinnvoll noch zeitgemäß ist, und behandeln die Urteils- und Entscheidungspsychologie daher zusammen. Erstens ist die Unterscheidung zwischen Inferenzen und Präferenzen nicht scharf: Beim Ziehen einer Schlussfolgerung werden wir meistens die korrekte Inferenz gegenüber einer falschen präferieren. Ebenso müssen wir zum Bilden einer Präferenz oft viele unsichere Beurteilungen der Optionen vornehmen (z. B. die vermutete Menge von Kalorien im Dessert oder die geschätzte Lebensdauer des Smartphones, das ich kaufen will). Das Eingangsbeispiel demonstriert dies anschaulich: Die Entscheidung des Kapitäns hing untrennbar mit der Beurteilung der unklaren Situation zusammen. Zweitens impliziert jede Präferenzwahl zwischen Optionen ein Wert*urteil* über die Alternativen (ich wähle die Option, die ich relativ zu meinen Zielen als „besser" beurteile). Das heißt also: Urteile und Entscheidungen bedingen sich gegenseitig, bzw. Entscheidungen

hängen fast immer auch von vorgenommenen Beurteilungen ab. Drittens nähern sich beide Traditionen in Methoden, Theoriesprache und empirischen Ergebnissen einander zunehmend an (Pachur und Bröder 2013; Weber und Johnson 2009).

Baron (2004, S. 19) verzichtet ebenfalls auf eine begriffliche Unterscheidung: „I use the term ‚judgments' to include decisions which are judgments about what to do." Genauso könnte man ein Urteil auch als Entscheidung darüber definieren, was man glaubt.

Die Gliederung dieses Kapitels folgt daher nicht der inhaltlich fragwürdigen Unterscheidung zwischen Urteilen und Entscheiden. Vielmehr versuchen wir, die Forschung anhand der Theorieklassen zu ordnen, die für die jeweiligen Phänomene entwickelt wurden. Diese wiederum hängen stark von der historischen Entwicklung des Gebiets ab.

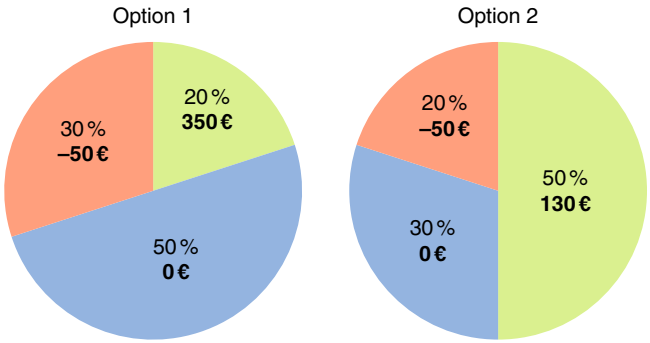


Abb. 17.1 Typische Lotterieaufgabe, hier in grafischer Darstellung mit Ereigniswahrscheinlichkeiten und Gewinn- bzw. Verlustbeträgen. Welche Lotterie würden Sie bevorzugen? Welche hat den höheren Erwartungswert?

17.1.2 Historische Einordnung

In einem historischen Überblick der Urteils- und Entscheidungsforschung (in der Fachliteratur findet man auch die Abkürzung JDM für *judgment and decision making*) warnen Goldstein und Hogarth (1997, S. 3) den Leser, dass „the topics studied under the heading ‚judgment and decision making' are [...] studied with methods and from perspectives that can seem puzzling to people with backgrounds in other areas of psychology". In der Tat wird man beim ersten Lesen vor allem „klassischer" Arbeiten aus der Urteils- und Entscheidungsliteratur vieles merkwürdig finden, nämlich zum einen die Themen und Paradigmen und zum anderen die Art der Theoriesprache. Beides ist unseres Erachtens nur historisch durch die Entwicklung des Gebiets zu verstehen, weshalb wir diese kurze historische Einordnung voranstellen.

Zunächst denken wir beim Begriff „Entscheidung" entweder an alltägliche Probleme (Welche Pizza nehme ich?) oder an dramatische Situationen wie die des Eingangsbeispiels. In vielen typischen Entscheidungsexperimenten wird man dagegen sehr künstliche Situationen vorfinden, in denen die Versuchsteilnehmer zwischen „Lotterien" wählen müssen, die mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten definierte Verteilungen von Gewinnen und Verlusten beinhalten (Abb. 17.1). Oder die Teilnehmer ziehen Karten von Stapeln mit verdeckten Gewinnen und Verlusten (Bechara und Damasio 2005). Viele Untersuchungen beschäftigen sich auch mit der Beurteilung von Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten. Die Fokussierung auf dieses *Lotterieparadigma* (*gambling paradigm*) als Forschungsmethode und auf Wahrscheinlichkeiten als Gegenstand stammt aus der Tradition der Nutzentheorien riskanter Wahl. Mathematiker und Philosophen der Aufklärung (z. B. Daniel und Nicholas Bernoulli) hatten aufgrund von Überlegungen zum Glücksspiel versucht, *normative* Prinzipien des Entscheidens unter Risiko zu formulieren (▶ Abschn. 17.2.2). Diese Überlegungen hatten großen Einfluss auf die Ökonomie (von Neumann und Morgenstern 1947) und wurden von Edwards (1954) in der Psychologie bekannt gemacht.

Der große Vorteil des skizzierten Ansatzes liegt darin, dass mit der Nutzentheorie eine starke normative Theorie den Ausgangspunkt für den Vergleich mit tatsächlichem Verhalten zur Verfügung steht, die auch auf andere riskante Entscheidungssituationen anwendbar ist. Das Lotterieparadigma hat sich lange Zeit als Standardmethode etabliert, da es eine gute Kontrolle der interessierenden theoretischen Variablen (Wahrscheinlichkeiten und Auszahlungen) ermöglicht. Zahlreiche „Anomalien" (d. h. empirische Abweichungen von der Theorie) sind inzwischen dokumentiert, was zu Erweiterungen und Modifikationen der Nutzentheorie geführt hat. Da Wahrscheinlichkeiten eine zentrale Rolle in der Theorie einnehmen, verwundert auch der starke Fokus auf Wahrscheinlichkeitsverarbeitung in der Urteils- und Entscheidungsforschung nicht. Kritiker haben allerdings eingewendet, dass sich das einfache Laborparadigma zu stark verselbstständigt und den Blick auf „natürliche" Entscheidungssituationen zu lange verstellt habe (Klein 2008).

Ein zweiter Punkt, der die Urteils- und Entscheidungsforschung von anderen Teilen der Psychologie abhebt ist die Art der Theoriebildung. Während die Kognitive Psychologie versucht, *Prozesse* der Informationsverarbeitung zu identifizieren (z. B. Speicher- bzw. Abrufprozesse im Gedächtnis; ▶ Kap. 12), wurden in der Entscheidungsforschung Theorien formuliert, die wir hier als „Strukturmodelle" bezeichnen: Bestimmte Nutzenfunktionen und Wahrnehmungen von Wahrscheinlichkeiten werden angenommen, und aus formalen Axiomen der Theorie folgen Vorhersagen über Relationen zwischen verschiedenen Entscheidungssituationen. So sagt z. B. die Theorie des erwarteten Nutzens (▶ Abschn. 17.2.2) vorher, dass tatsächliche Entscheidungen so aussehen, „als ob" Personen die Wahrscheinlichkeit und den Nutzen von möglichen Konsequenzen multiplizieren würden. Ob und wie diese internen Berechnungen kognitiven Prozessen entsprechen, ist zunächst nicht Gegenstand der Theorie. Dies hat z. B. Herbert Simon (1957) veranlasst, derartige Modelle als psychologisch unplausibel oder zumindest unvollständig zu kritisieren. Menschen seien nicht rational im Sinne der Theorie des erwarteten Nutzens, sondern begrenzt rational, d. h., sie müssten mit limitierten kognitiven Ressourcen auskommen, und Rationalität müsse immer relativ zu dieser Kapazität definiert werden (vgl. auch Gigerenzer et al. 1999; Simon 1990).

Unter anderem von Simons Kritik beeinflusst hat seit den 1980er Jahren eine Trendwende in der Forschung eingesetzt, die maßgeblich von Huber (1982) und Payne et al. (1988; 1993) begründet wurde und die versucht, die Entscheidungspsychologie deutlich stärker in der Kognitiven Psychologie zu verankern. Auch Entscheidungen sind kognitive Prozesse, die

Tab. 17.1 Elementare Informationsverarbeitungsprozesse in einer Entscheidungsaufgabe nach Johnson und Payne (1985)

READ	Lies den Attributwert einer Option ins Kurzzeitgedächtnis.
COMPARE	Vergleiche zwei Optionen auf einem Attribut.
DIFFERENCE	Berechne den Differenzwert eines Attributs zwischen zwei Optionen.
ADD	Addiere den Wert eines Attributs im Kurzzeitgedächtnis.
PRODUCT	Gewichte einen Attributwert mit einem Attributgewicht (multiplizieren).
ELIMINATE	Entferne eine Option aus der betrachteten Menge.
MOVE	Gehe zum nächsten Element in der externen Umwelt.
CHOOSE	Verkünde Präferenz und beende den Bewertungsprozess.

auf die gleichen Hirnstrukturen angewiesen sind wie alle anderen Denkvorgänge. Huber (1980) sowie Johnson und Payne (1985) verwendeten das Konzept der **elementaren Informationsverarbeitungsprozesse** aus der Denkpsychologie, um Entscheidungsstrategien formal zu beschreiben (Tab. 17.1). Diese sind einfache kognitive Operationen (z. B. eine Information *lesen*, sie mit einer anderen *vergleichen*, das Ergebnis *speichern*), mit deren Hilfe die Komplexität verschiedener Strategien messbar wird. Diese Initialzündung hat zu einem derzeit noch anhaltenden Trend geführt, die theoretischen Konzepte und die Methoden der Kognitiven Psychologie zunehmend in die Urteils- und Entscheidungsforschung zu integrieren und diese im Gegenzug auch als Teil der Kognitiven Psychologie zu etablieren. Wir werden die neuere Tradition in ▶ Abschn. 17.4 näher beschreiben.

Auf die vielfältigen Traditionen, die unter dem breiten Label *Urteilen* zusammengefasst sind, gehen wir in ▶ Abschn. 17.3 näher ein. Die dort vorgestellten Forschungen in den Traditionen von Egon Brunswik sowie Amos Tversky und Daniel Kahneman nehmen eine Zwischenstellung ein, da sie über reine Strukturmodelle hinausgehen und psychologische Hypothesen formulieren, ohne jedoch präzise Mechanismen oder Prozesse zu formulieren, wie es die Prozessmodelle tun.

17.1.3 Grundbegriffe und Methoden

Wie wir erfahren haben, erfordert eine Entscheidungssituation die Wahl zwischen *Optionen*; oft werden diese auch als *Alternativen* bezeichnet. Unterschieden werden typischerweise sichere Entscheidungen von Entscheidungen unter Risiko oder Unsicherheit. Bei Entscheidungen unter Sicherheit sind die Konsequenzen (weitgehend) klar, d. h., „man weiß, was man kriegt". Dies ist z. B. bei vielen Konsumentenentscheidungen der Fall. Die Konsequenzen nennt man in diesem Fall **Attribute** der Optionen. Wenn mich beim Fahrradkauf die Zahl der Gänge, das Gewicht und der Preis interessieren, so sind dies die entscheidungsrelevanten Attribute. Fast alle Entscheidungen sind Multi-Attribut-Entscheidungen und beinhalten oft einen Zielkonflikt (das Fahrrad mit der besseren Gangschaltung ist auch das teurere). Ein Zielkonflikt liegt dagegen nicht vor, wenn es eine *dominante Option* gibt: Diese ist auf allen Attributen mindestens genauso gut wie alle anderen Alternativen und mindestens auf einem Attribut besser. Es liegt auf der Hand, dass jede vernünftige Entscheidungsstrategie immer die dominante Option wählen sollte, sofern eine solche vorliegt.

Entscheidungen unter Sicherheit sind eine ideale Abstraktion, denn meist müssen Entscheidungen unter Risiko oder sogar unter Unsicherheit getroffen werden, da *Ereignisse* eintreten können, die der Entscheider nicht beeinflussen kann, die aber die Konsequenzen bestimmen. Wenn wir uns für eine Wanderung entscheiden, hängt die dabei erlebte Freude auch von der Entwicklung des Wetters ab. Sind die Wahrscheinlichkeiten solcher Ereignisse (Regen oder Sonne) annähernd bekannt, spricht man von *riskanten Entscheidungen*, da das damit verbundene Risiko abschätzbar ist. Bei unbekannten Wahrscheinlichkeiten oder gar unabsehbaren Konsequenzen spricht man von *Entscheidungen unter Unsicherheit*. Riskante Entscheidungen können in Auszahlungsmatrizen dargestellt werden, die mögliche Konsequenzen (in den Zellen) als Kombination aus gewählter Option und eingetretenem Ereignis darstellen (Tab. 17.3). Eine alternative Darstellung sind Entscheidungsbäume (Abb. 17.4).

Wie im historischen Überblick angesprochen haben viele Studien der Entscheidungsforschung Wahlen zwischen Lotterien untersucht. Studien zum statistischen Urteilen vergleichen dagegen häufig tatsächliche Urteile mit den Vorgaben eines normativen Modells. Diese Methoden untersuchen also vornehmlich die Informationsintegration. Seit der oben beschriebenen „kognitiven Wende" in der Entscheidungspsychologie hat eine Fülle neuer empirischer Methoden Einzug gehalten, die vornehmlich Parameter der entscheidungsvorbereitenden *Informationssuche* messen. Dies kann durch Beobachtung geschehen oder vom Computer registriert werden (MouseLab; ▶ Zur Vertiefung 17.1) (Payne et al. 1988). Weitere Möglichkeiten sind die Erfassung von Augenbewegungen und Reaktionszeiten (Überblick über moderne Techniken der Prozessverfolgung [*process tracing*] in Schulte-Mecklenbeck et al. 2011). Inwieweit die Prozesse der Informationssuche auch Aussagen über die weitere *Verarbeitung* dieser Information erlauben, ist jedoch umstritten (Bröder 2000a; Glöckner und Betsch 2008c).

17.1.4 Gliederung des Kapitels

In ▶ Abschn. 17.2 werden wir die Strukturmodelle, die aus der Theorie des erwarteten Nutzens und deren Erweiterungen entstanden sind, behandeln. In ▶ Abschn. 17.3 wenden wir uns psychologisch angereicherten Modellen zu, die wesentlich aus der Urteilsforschung stammen, und in ▶ Abschn. 17.4 behandeln wir Befunde im Rahmen von kognitiven Prozessmodellen, die in der Urteils- und Entscheidungsforschung der letzten Jahre zunehmend an Bedeutung gewonnen haben. Tab. 17.2 enthält eine Übersicht wichtiger Grundbegriffe.

Zur Vertiefung 17.1

MouseLab

Eine weit verbreitete Methode zur Untersuchung der Informationssuche bei Multi-Attribut-Entscheidungen ist das aus der früheren Variante einer Informationstafel mit verschlossenen Umschlägen hervorgegangene *MouseLab*. Wie in ◘ Abb. 17.2 gezeigt werden Attributinformationen (Zeilen) über verschiedene Alternativen (Spalten) in einer verdeckten Matrix präsentiert. Durch Anklicken einzelner Zellen kann der Versuchsteilnehmer Informationen aufdecken. Dies kann mit expliziten Kosten verbunden sein. Verschiedene Parameter der Informationssuche können erfasst werden, nämlich die *Anzahl* der angeschauten Informationen, die *Sequenz*, mit der sie angeschaut werden, sowie die *Zeit*, die auf jede Information verwendet wird. Daraus lassen sich auch abgeleitete Indizes berechnen wie z. B. Paynes (1982) *Strategieindex*, der angibt, ob die Suche stärker optionsweise oder attributweise organisiert ist (d. h., ob man Optionen eher nacheinander anschaut oder ob man Optionen direkt auf bestimmten Attributen vergleicht), oder die *Varianz* der Zeit, die für verschiedene Attribute verwendet wird. Je größer diese ist, umso stärker ist die Ungleichgewichtung von Attributen.

Die Art der Informationssuche wird häufig mit bestimmten Entscheidungsstrategien in Zusammenhang gebracht (► Abschn. 17.4), die bestimmte Suchmuster voraussagen. Dazu muss man allerdings annehmen, dass die Informationssuche und die Verarbeitung dieser Information sehr eng zusammenhängen, was von einigen Autoren kritisch gesehen wird (z. B. Bröder 2000a; Glöckner und Betsch 2008c).

Die MouseLab-Methode ist auf verschiedene Arten erweitert worden. Beispielsweise kann man auch Blickbewegungen in einer offenen Matrix aufzeichnen (Russo 2011) oder auf die Matrixanordnung verzichten, um auch subjektive Organisationsprozesse untersuchen zu können (Ettlin et al. 2015). Eine webbasierte Implementierung des MouseLab kann unter ► http://www.mouselabweb.org/ erstellt werden.

◘ **Abb. 17.2** Beispiel einer einfachen MouseLab-Aufgabe. Die Versuchsperson soll eine Investitionsentscheidung zwischen vier Firmen (Spalten) treffen. Dazu kann sie per Mausklick Empfehlungen hypothetischer Broker (Zeilen) einsehen. Anzahl und Art der eingeholten Informationen sowie das Suchmuster und daraus abgeleitete Indizes können erfasst werden

17

◘ **Tab. 17.2** Übersicht wichtiger Grundbegriffe

Option/Alternative	Zur Wahl stehendes Objekt oder Handlung
Attribut	Eine entscheidungsrelevante Eigenschaft der Option
Ereignis	Nicht beeinflussbares Geschehen in der Umwelt, das das Ergebnis einer Handlung mitbestimmt (z. B. „Regen“)
Konsequenz/Outcome	Ergebnis der Kombination aus einer Entscheidung und möglichen Ereignissen in der Umwelt
Zielkonflikt	Unterschiedliche Konsequenzen/Attribute favorisieren unterschiedliche Optionen

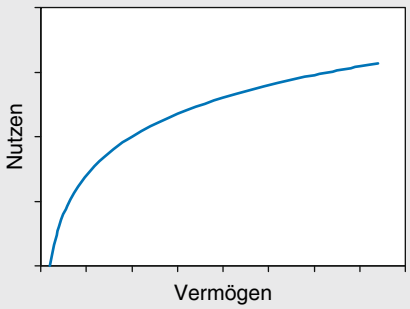
◘ **Tab. 17.2** (*Fortsetzung*)

Dominante Option	Ist auf allen Attributen mindestens so gut wie alle anderen Optionen und auf mindestens einem Attribut besser
Riskante Entscheidung	Die Konsequenzen der Optionen hängen von Ereignissen ab, die mit bekannten Wahrscheinlichkeiten eintreten
Prozessverfolgung (*process tracing*)	Beobachtung von Teilschritten der Verarbeitung während der Entscheidungsfindung (z. B. der Informationssuche)

Zur Vertiefung 17.2

Die Form der Nutzenfunktion

Bereits Mitte des 18. Jahrhunderts argumentierte der Mathematiker Daniel Bernoulli, dass der Nutzen eines Geldgewinns nicht linear mit dessen Betrag steigt. Der Nutzenunterschied zwischen 0,00 € und 10,00 € entspricht demnach also nicht dem Nutzenunterschied zwischen 100,00 € und 110,00 €. Bernoulli demonstrierte dies anhand eines hypothetischen Münzwurfspiels, das als das *St.-Petersburg-*Spiel bekannt geworden ist (ausführliche Erläuterungen z. B. in Jensen 1967; Jerger 1992). Letztlich ist die Idee, dass der Nutzenzugewinn negativ beschleunigt ist, d. h. mit zunehmenden Werten immer geringer ausfällt (dies wird auch als „abnehmender Grenznutzen" bezeichnet). Bernoullis Vorstellung entspricht dabei einer logarithmische Nutzenfunktion, wie in ◘ Abb. 17.3 dargestellt. Diese impliziert, dass der Nutzenunterschied zwischen 1.000 € und 10.000 € in etwa dem zwischen 10.000 € und 100.000 € entspricht. Dabei entspricht die vorgeschlagene Beziehung zwischen Wert und Nutzen letztlich derjenigen, die Fechner (1860) in der Psychophysik für den Zusammenhang zwischen Reizstärken und Empfindungsstärken vorschlug (▶ Kap. 2).



◘ **Abb. 17.3** Die logarithmische Nutzenfunktion nach Bernoulli

17.2 Strukturmodelle

17.2.1 Was ist eine gute Entscheidung?

Nehmen wir an, wir begegnen in der Fußgängerzone einem Promotionsteam, das uns einen Gutschein über einen kostenlosen Espresso in einem neu eröffneten Café schenken möchte. Wir haben zwei Entscheidungsalternativen oder Optionen: Wir können das Geschenk annehmen oder ablehnen. Aus normativer Sicht sollten wir immer diejenige Option wählen, die den eigenen *Nutzen* maximiert, d. h. deren Konsequenzen oder Ergebnisse (Outcomes) möglichst viel Nutzen bringen. Im Beispiel sollten wir also überlegen, ob es uns mehr Nutzen bringt, den Café-Gutschein zu haben oder nicht. Zu bedenken ist dabei, dass Nutzen nicht gleichzusetzen ist mit monetärem Wert, Glück, Freude oder Genuss. Vielmehr bezieht sich Nutzen immer auf die aktuellen *Ziele* des Entscheidenden, die variieren können: Je eher eine Konsequenz zielförderlich ist, desto größer ist ihr Nutzen. Ist jemand krank und hat das Ziel gesund zu werden, dann kann eine bestimmte Behandlung großen Nutzen haben, ohne angenehm oder erfreulich zu sein. Auch kann eine 2 €-Münze einen größeren Nutzen haben als ein 5 €-Schein, dann nämlich, wenn der Fahrkartenautomat keine Scheine annimmt (▶ Zur Vertiefung 17.2).

Das genannte Beispiel des Promotionsteams mag nun einfach erscheinen; mögen wir Espresso, ist der Nutzen des Café-Gutscheins positiv, und wir nehmen das Geschenk an. Mögen wir dagegen keinen Espresso oder haben gerade keine Zeit, hat der Gutschein eventuell keinen Nutzen, und wir würden ablehnen. Sehr viele Entscheidungen allerdings sind schwieriger, weil sie verschiedene Konsequenzen haben können, die zudem *unsicher* sind, d. h. nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten. Müssen wir uns beispielsweise zwischen zwei Karriereoptionen entscheiden, wissen wir bestenfalls, mit welcher Wahrscheinlichkeit mögliche Konsequenzen (z. B. Gehaltserhöhungen oder Kündigung) voraussichtlich eintreten. Dabei sind Entscheidungen oft von einem Konflikt gekennzeichnet: Job A wird mit hoher Wahrscheinlichkeit schon im ersten Jahr eine Gehaltserhöhung beinhalten, birgt aber das Risiko einer Kündigung im ersten Jahr. Dagegen ist eine Gehaltserhöhung bei Job B eher unwahrscheinlich, eine Kündigung aber auch. Wir müssen also zwischen Nutzen und Wahrscheinlichkeit möglicher Konsequenzen abwägen. Viele Entscheidungen kann man daher auch als Glücksspiel oder Lotterie auffassen, da die Ergebnisse (z. B. ein bestimmter Gewinn) riskant sind und nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten. Wie wir am besten mit solchen Situationen umgehen können, ist seit der Entstehung der modernen Wahrscheinlichkeitstheorie (im frühen 18. Jahrhundert) gut beschrieben. Daher bildet diese die Grundlage für das zentrale normative Entscheidungsmodell, die Theorie des (subjektiven) Erwartungsnutzens.

17.2.2 Erwartungswert und Erwartungsnutzen

Grundlage für normativ optimale Entscheidungen bildet das Konzept des Erwartungswertes einer Lotterie. Der **Erwartungswert** (*expected value*) einer Lotterie ist die Summe der Werte aller möglichen Konsequenzen multipliziert mit deren Eintretenswahrscheinlichkeiten. Nehmen wir zwei Würfelspiele: In Spiel A bekommen wir 12,00 € wenn wir eine 6 würfeln (sonst nichts); in Spiel B bekommen wir 9,00 €, wenn wir eine 5 oder eine 6 würfeln (sonst nichts). In Spiel A gibt es also zwei mögliche Konsequenzen, nämlich 12,00 € oder 0,00 €. Deren Eintre-

Tab. 17.3 Das Freizeitgestaltungsbeispiel als Auszahlungsmatrix

		Unbekannter Zustand der Welt (Ereignis)	
		Regen	Sonne
Entscheidungsoptionen	Option 1: Wandern	Wandern bei Regen, Nutzen: – 30	Wandern bei Sonne, Nutzen: 50
	Option 2: Fernsehen	Fernsehen bei Regen, Nutzen: 20	Fernsehen bei Sonne, Nutzen: 20

tenswahrscheinlichkeiten sind 1/6 und 5/6. Der Erwartungswert von Spiel A ist also 12,00 € • 1/6 + 0,00 € • 5/6 = 2,00 €. Analog ist der Erwartungswert von Spiel B 9,00 € • 2/6 + 0,00 € • 4/6 = 3,00 €. Spiel B bietet also den höheren Erwartungswert (weil der Gewinn – obschon kleiner als in Spiel A – wahrscheinlicher ist), und es wäre rational, Spiel B zu wählen, sofern man mehr Geld gegenüber weniger Geld bevorzugt. Anders ausgedrückt: Würden wir jedes der Würfelspiele häufig spielen, böte Spiel B langfristig die höhere Auszahlung.

Die gleiche Logik lässt sich auch auf das allgemeinere Konzept des Nutzens übertragen. Dies kann der Nutzen von Geldbeträgen sein (z. B. Abb. 17.3) oder auch der Nutzen nichtmonetärer Konsequenzen von Optionen: Man wählt diejenige Option, die den Erwartungsnutzen (*expected utility*) maximiert. Der Erwartungsnutzen einer Option ist die Summe der Nutzenwerte aller ihrer Konsequenzen, jeweils gewichtet mit der Eintretenswahrscheinlichkeit der Konsequenz. Diese Kernannahme wird in der Literatur auch als **Theorie des erwarteten Nutzens** bezeichnet. Nehmen wir an, es ist Wochenende, und wir überlegen uns, ob wir lieber wandern gehen oder Fernsehen wollen. Diese Entscheidung wird u. a. auch vom Wetter – besonders der Regenwahrscheinlichkeit – abhängen, denn das Wetter beeinflusst natürlich den Nutzen bestimmter Optionen. Wir könnten z. B. Wandern bei Regen besonders unangenehm finden. Diese Konsequenz hätte also einen negativen Nutzen. Wandern bei Sonne könnte dagegen besonders hohen Nutzen haben. Weiterhin könnte der Nutzen von Fernsehen weniger wetterabhängig sein und z. B. ungefähr mittleren Nutzen aufweisen (egal, wie das Wetter letztlich ist). Tab. 17.3 veranschaulicht diese Entscheidungssituation und weist den vier möglichen Konsequenzen arbiträr Nutzenwerte zu. Eine andere Darstellungsform der gleichen Situation ist ein Entscheidungsbaum, wie in Abb. 17.4 dargestellt.

Nehmen wir weiterhin an, wir schauen im Internet die Wettervorhersage nach und erfahren, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von 30 % im relevanten Zeitraum regnen wird. Dann wäre der Erwartungsnutzen von Wandern .30 • – 30 + .70 • 50 = 26. Der Erwartungsnutzen von Fernsehen wäre .30 • 20 + .70 • 20 = 20; normativ betrachtet sollten wir also wandern gehen. Wäre die Regenwahrscheinlichkeit aber beispielsweise 40 %, hätte Fernsehen den größeren Erwartungsnutzen. Natürlich könnte die Entscheidung bei einer Person mit anderen Nutzenwerten anders ausfallen. Hätte für diese Person Wandern bei Regen z. B. einen Nutzen von 0, bräuchte es schon eine Regenwahrscheinlichkeit von mehr als 60 %, um sie zum Fernsehen zu bewegen. So wird auch unmittelbar klar, warum unterschiedliche Personen zu unterschiedlichen Entscheidungen kommen können: Sie können den möglichen Konsequenzen durchaus sehr verschiedene Nutzen zuweisen.

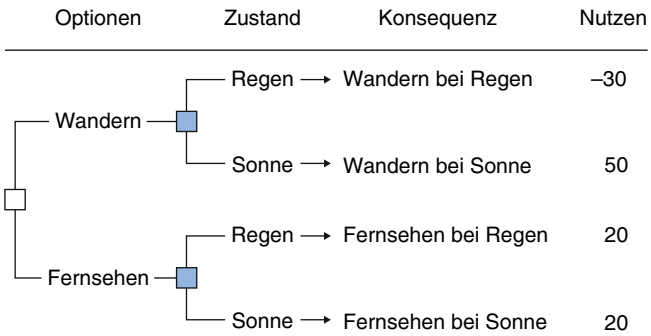


Abb. 17.4 Alternative Darstellung des Freizeitgestaltungsbeispiels als Entscheidungsbaum

Mitunter finden sich in der Literatur – neben Erwartungswert und Erwartungsnutzen – auch die Bezeichnungen subjektiver Erwartungswert (*subjective expected value*) und subjektiver Erwartungsnutzen (*subjective expected utility*). Der Zusatz „subjektiv" soll dabei anzeigen, dass die Wahrscheinlichkeiten gegebenenfalls nicht objektiv vorliegen, sondern von uns subjektiv zugeschrieben werden müssen. Schauen wir im obigen Beispiel nicht im Internet nach der (zumindest weitestgehend) objektiven Regenwahrscheinlichkeit, sondern einfach aus dem Fenster und schätzen die Regenwahrscheinlichkeit anhand der aktuellen Bewölkung ein, ist dies eher subjektiv. Letztlich hat die begriffliche Unterscheidung aber kaum Konsequenzen: Egal ob es um objektive Werte (Geld) oder persönlichen Nutzen geht und egal ob wir objektive Eintretenswahrscheinlichkeiten haben oder diese subjektiv zuschreiben, das normative Prinzip ist immer gleich: Wir sollten die Werte oder Nutzen der Konsequenzen je Option mit den objektiven oder subjektiven Eintretenswahrscheinlichkeiten multiplizieren, um die „bessere" Option zu identifizieren.

Genau wie im Fall von Erwartungswerten ist es deswegen normativ rational, die Option mit dem höheren Erwartungsnutzen zu wählen, weil sie – würde man die Entscheidung häufig wiederholen – auf lange Sicht zu mehr Nutzen führt. Über dieses Argument hinaus gibt es aber einen weiteren guten Grund: Die Maximierung des Erwartungsnutzens folgt aus einer Reihe von Prinzipien (*Axiomen*). Diese Axiome sind sozusagen Voraussetzung für konsistente – und damit nach dem Kriterium der Kohärenz rationale (▶ Abschn. 17.1) – Entscheidungen. Solange jede unserer Entscheidungen mit diesen Axiomen konform ist, entscheiden wir auch entsprechend der Theorie und somit normativ rational. Wichtig ist hierbei, dass die Theorie des erwarteten Nutzens nicht die Wahl einer *bestimmten Option* als rational definiert (dies hängt von den individuellen Nutzenwerten ab), sondern verlangt, dass die Präferenzen einer bestimmten *Struktur* folgen, die in den Axiomen der Theorie festgelegt ist. Für verschiedene Situationen wird somit *konsistentes* Verhalten

Tab. 17.4 Die von Tversky (1969) verwendeten Lotterien zur Demonstration von Intransitivität

Lotterie	Gewinnwahrscheinlichkeit	Gewinnbetrag	Erwartungswert
A	.29	5,00	1,46
B	.33	4,75	1,58
C	.38	4,50	1,69
D	.42	4,25	1,77
E	.46	4,00	1,83

vorhergesagt (Hammond 1997). Formal beschrieben wurden die Axiome zuerst von von Neumann und Morgenstern (1947) und auf subjektive Erwartungsnutzen erweitert von Savage (1954). Zwei der Axiome werden in der Literatur als besonders zentral und grundlegend angesehen: Transitivität und Unabhängigkeit.

Das Axiom der *Transitivität* meint, dass unsere Rangfolge von Präferenzen in sich stimmig sein muss. Aus X ≻ Y und Y ≻ Z muss zwingend folgen X ≻ Z (das ≻-Zeichen zeigt die Präferenzrelation an; X ≻ Y meint also „X wird gegenüber Y bevorzugt"). Mögen wir Espresso lieber als Latte Macchiato und Latte Macchiato lieber als Cappuccino, dann sollten wir auch Espresso lieber mögen als Cappuccino. Die Notwendigkeit transitiver Präferenzen für rationale Entscheidungen lässt sich leicht demonstrieren, wenn man sich die negativen Folgen eines hypothetischen Beispiels intransitiver Präferenzen verdeutlicht: Nehmen wir an, jemand mag Espresso lieber als Latte Macchiato und Latte Macchiato lieber als Cappuccino, aber Cappuccino lieber als Espresso. Jede dieser Präferenzen sei so stark, dass er immer 0,50 € zuzahlen würde, um das präferierte Getränk zu bekommen. Hat die Person einen Cappuccino, bieten wir ihr alternativ Latte Macchiato an – sie nimmt den Latte Macchiato und zahlt uns 0,50 €. Nun bieten wir ihr Espresso an. Auch diesen nimmt sie und zahlt wiederum 0,50 €. Jetzt bieten wir ihr für weitere 0,50 € Cappuccino, und das Spiel fängt von vorn an; die Person wird uns so lange 0,50 € geben, bis sie pleite ist. Dieses sogenannte Argument der „Geldpumpe" demonstriert die möglichen negativen Konsequenzen intransitiver Präferenzen drastisch. Das genannte Beispiel ist leicht zu durchschauen, aber weniger offensichtliche Zyklen intransitiver Präferenzen sind ebenso denkbar wie zum Beispiel im Märchen *Hans im Glück*.

Das *Unabhängigkeitsaxiom* fordert, dass identische und gleich wahrscheinliche Konsequenzen keine Rolle spielen sollten. Anders gesagt: Tritt eine bestimmte Konsequenz unabhängig davon auf, für welche Option wir uns entscheiden, sollte diese Konsequenz für unsere Entscheidung irrelevant sein. Wenn Job A (Gehaltserhöhung und Kündigung eher wahrscheinlich) und Job B (Gehaltserhöhung und Kündigung eher unwahrscheinlich) beide in derselben Stadt sind, ist eine identische und gleich wahrscheinliche Konsequenz, dass wir dorthin umziehen müssen, egal wie wir uns entscheiden. Folglich sollte diese Konsequenz keinen Einfluss darauf haben, ob wir uns für Job A oder Job B entscheiden.

Man kann diese Axiome als Bedingungen normativ rationaler Entscheidungen auffassen. Sind sie nicht erfüllt, werden unsere Entscheidungen nicht dem Prinzip der Maximierung des Erwartungsnutzens folgen (können), sodass wir auf lange Sicht weniger Nutzen erreichen, als wir könnten. Tatsächlich erscheinen diese Axiome den meisten Menschen selbstverständlich und kaum der Rede wert. Empirisch allerdings spricht eine Vielzahl an Befunden dagegen, dass wir uns immer konsistent zu diesen – und anderen – scheinbar trivialen Axiomen entscheiden. Einige besonders problematische Abweichungen werden in ▶ Abschn. 17.2.3 zusammengefasst.

17.2.3 Verletzung der Axiome

Obwohl das Axiom der Transitivität (aus X ≻ Y und Y ≻ Z folgt X ≻ Z) unmittelbar einsichtig ist, haben verschiedene empirische Untersuchungen deutliche Zweifel daran geschürt, ob es auch deskriptiv zutreffend ist. In einer frühen Untersuchung gab Tversky (1969) seinen Versuchspersonen die in Tab. 17.4 dargestellten Lotterien; sie sollten sich zwischen Paaren dieser Lotterien (z. B. A und B, B und C) entscheiden, d. h. angeben, welche Lotterie sie lieber spielen möchten. Tatsächlich zeigte sich für fast die Hälfte der Verspersonen, dass sie *intransitive* Präferenzen hatten, nämlich A ≻ B, B ≻ C, C ≻ D, D ≻ E, aber E ≻ A. Erklärt wird dies damit, dass Personen in Lotteriepaaren mit ähnlichen Gewinnwahrscheinlichkeiten (A vs. B, B vs. C, C vs. D, D vs. E) diejenige mit dem höheren Gewinnbetrag wählen, bei sehr deutlich unterschiedlichen Gewinnwahrscheinlichkeiten (A vs. E) aber danach, in welcher der Gewinn wahrscheinlicher ist. Verschiedene Studien (z. B. Budescu und Weiss 1987; Loomes et al. 1991; Mellers und Biagini 1994) haben wiederholt Entscheidungsmuster berichtet, die nahelegen, dass zumindest einige Personen das Axiom der Transitivität zu verletzten scheinen. Andere Autoren haben allerdings argumentiert, dass solche Befunde nur oberflächlich intransitive Präferenzen nahelegen, aber nicht zwangsläufig durch diese erzeugt werden, sondern auch durch Variabilität in den Daten bei eigentlich transitiven Präferenzen erklärbar sind (Argumente für und gegen intransitive Präferenzmuster finden sich bei Birnbaum 2011; Regenwetter et al. 2011).

Auch für das Unabhängigkeitsaxiom haben empirische Studien wiederholt problematische Entscheidungsmuster gezeigt (z. B. Birnbaum 2004; Kahneman und Tversky 1979; Loomes und Sugden 1998; Starmer und Sugden 1991). Diese orientierten sich im experimentellen Aufbau an der klassischen Demonstration von Allais (1953), die auch als das *Allais-Paradox* bekannt ist: Personen wählen zunächst zwischen X und Y, nämlich:

- Option X: Gewinne 1 Mio. € sicher.
- Option Y: Gewinne 5 Mio. € mit $p = .10$ oder 1 Mio. € mit $p = .89$ oder 0 € mit $p = .01$.

In dieser Entscheidungssituation präferieren Personen mehrheitlich Option X. In einer weiteren Situation entscheiden sie sich zwischen X′ und Y′, nämlich:

- Option X′: Gewinne 1 Mio. € mit $p = .11$ oder 0 € mit $p = .89$.
- Option Y′: Gewinne 5 Mio. € mit $p = .10$ oder 0 € mit $p = .90$.

In diesem Fall wählen Personen meist Y′. Dieses Muster (X ≻ Y und Y′ ≻ X′) verletzt das Unabhängigkeitsaxiom. Dies lässt sich

Tab. 17.5 Darstellung von Allais' (1953) Aufgabe als Urne mit Losen

		Urne mit 100 Losen, davon		
		89 Lose im Wert von (p = .89)	10 Lose im Wert von (p = .10)	1 Los im Wert von (p = .01)
Entscheidung 1	Option X	1 Mio. €	1 Mio. €	1 Mio. €
	Option Y	1 Mio. €	5 Mio. €	0 €
Entscheidung 2	Option X′	0 €	1 Mio. €	1 Mio. €
	Option Y′	0 €	5 Mio. €	0 €

leicht verstehen, wenn man die gleichen Optionen bzw. Lotterien (Tab. 17.5) als Urnen mit je 100 Losen, die verschiedene Gewinnbeträge enthalten, darstellt (Savage 1954). Dann wird unmittelbar klar, dass der sichere Gewinn von 1 Mio. € in Option X auch als Gewinn von 1 Mio. € mit der Summe der Wahrscheinlichkeiten $p = .89 + .10 + .01 = 1.0$ dargestellt werden kann. Wie unschwer zu erkennen ist, haben Option X und Y eine identische und gleich wahrscheinliche Konsequenz, nämlich 89 Lose im Wert von 1 Mio. € (in Tab. 17.5 grau unterlegt). Diese eine Konsequenz sollte also nach dem Unabhängigkeitsaxiom für die Entscheidung zwischen X und Y irrelevant sein, und die Entscheidung sollte nur auf den unterschiedlichen Konsequenzen (die elf verbleibenden Lose) beruhen. Ebenso haben X′ und Y′ eine identische und gleich wahrscheinliche Konsequenz, nämlich 89 Lose im Wert von 0 € (in Tab. 17.5 ebenfalls grau unterlegt). Auch diese Konsequenz sollte nach dem Unabhängigkeitsaxiom für die Entscheidung zwischen X′ und Y′ irrelevant sein. Ignoriert man alle irrelevanten Konsequenzen, wird klar, dass die Entscheidung zwischen X und Y der Entscheidung zwischen X′ und Y′ genau entspricht: Man entscheidet in beiden Fällen zwischen einer Option, die immer 1 Mio. € Gewinn bringt (nämlich X bzw. X′), und einer anderen Option, die 5 Mio. € mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % und sonst nichts bringt (nämlich Y bzw. Y′). Präferiert man also X gegenüber Y, muss man gemäß der Theorie des erwarteten Nutzens auch X′ gegenüber Y′ präferieren (oder umgekehrt). Die von zumindest einigen Personen gezeigten inkonsistenten Muster ($X \succ Y$ und $Y' \succ X'$ oder auch $Y \succ X$ und $X' \succ Y'$, wobei Letzteres seltener vorkommt) verletzen folglich das Unabhängigkeitsaxiom.

Wie diese und viele andere empirischen Befunde (▶ Zur Vertiefung 17.3) zeigen, kann man nicht davon ausgehen, dass die Axiome bzw. die Theorie des erwarteten Nutzens deskriptiven Charakter haben (Übersicht z. B. in MacCrimmon und Larsson 1979; Schoemaker 1982; Starmer 2000). Obschon sie normativ beschreiben, wie Menschen entscheiden *sollten*, können sie offensichtlich nicht beschreiben, wie Menschen *tatsächlich* entscheiden. Somit stellt sich die Frage, ob und mit welchem Modell sich tatsächliche Entscheidungen adäquat beschreiben lassen. Ein besonders prominentes Modell, das mit genau diesem deskriptiven Ziel entwickelt wurde, ist die Prospect-Theorie (Kahneman und Tversky 1979; Tversky und Kahneman 1992).

17.2.4 Prospect-Theorie

Wenige Entwicklungen in der Entscheidungsforschung haben so viel Einfluss gehabt, wie das von Kahneman und Tversky (1979) unter dem Namen **Prospect-Theorie** vorgeschlagene deskriptive Modell, das viele ähnliche Modelle inspiriert hat. Die Prospect-Theorie erklärt, warum unsere Entscheidungen oft nicht im Einklang mit dem normativen Modell der Maximierung des Erwartungsnutzens sind. Dabei ist bemerkenswert, dass die Prospect-Theorie dem normativen Modell weitestgehend folgt und es lediglich modifiziert und ergänzt. Diese Änderungen betreffen primär die interne Repräsentation von (1) Werten bzw. Nutzen und (2) deren Wahrscheinlichkeiten. Ansonsten wird aber an der Idee festgehalten, dass diese *gemeinsam* die präferierte Option bestimmen. Entscheidungen gemäß der Prospect-Theorie funktionieren also prinzipiell genau wie die oben beschriebene Maximierung des Erwartungswertes bzw. -nutzens. Der zentrale Unterschied besteht darin, dass die Werte und Wahrscheinlichkeiten gemäß bestimmter Annahmen kognitiv transformiert werden, bevor sie miteinander verrechnet werden. Zudem werden Werte bzw. Nutzen immer relativ zu einem *Referenzpunkt* betrachtet, der sich zwischen Situationen verändern kann. Im Rahmen der Prospect-Theorie beschreiben zwei mathematische Funktionen, wie die Werte und Wahrscheinlichkeiten vor ihrer Integration transformiert werden: Dies sind die *Wertfunktion* und die *Gewichtungsfunktion* (Abb. 17.5).

Referenzpunkt und Wertfunktion

Im Rahmen der Prospect-Theorie wird angenommen, dass die vorgegebenen objektiven Werte transformiert werden und diese nicht absolut, sondern relativ zu einem Referenzpunkt repräsentiert werden. Erwarten wir, in einer Prüfung beispielsweise eine 1,0 zu erreichen, mag eine 3,0 wie ein Verlust wirken; erwarten wir dagegen durchzufallen, ist eine 3,0 hocherfreulich und ein Gewinn. Somit kann das gleiche Ergebnis (hier die Note 3,0) je nach Referenzpunkt (1,0 oder 5,0) einmal als Verlust und einmal als Gewinn repräsentiert sein. Die Transformation von vorgegebenen Werten in subjektive Werte (bzw. Nutzen) wird wiederum durch eine mathematische Funktion, die Wertfunktion, beschrieben (Abb. 17.5A). Diese trägt Werte (*x*-Achse) gegen den subjektiven Wert bzw. Nutzen (*y*-Achse) ab. Der Nullpunkt der *x*-Achse ist der Referenzpunkt. Werte oberhalb dieses Punktes werden als Gewinne empfunden und haben positiven Nutzen. Werte un-

Zur Vertiefung 17.3

Präferenzumkehr und Kontexteffekte

Neben den klassischen Demonstrationen der Verletzung von Axiomen der Theorie des erwarteten Nutzens sind weitere eindrückliche Anomalien demonstriert worden.

Präferenzumkehr

Lichtenstein und Slovic (1971) ließen Probanden entweder zwischen Lotterien wählen oder den minimalen Verkaufspreis für ein Lotterieticket bestimmen. Die Präferenz für eine Lotterie sollte sich darin ausdrücken, dass sie sowohl gewählt als auch für einen höheren Preis verkauft wird als eine nichtpräferierte Lotterie. Bei Vergleichen zwischen Lotterien mit hoher Wahrscheinlichkeit eines moderaten Gewinns (A) oder kleiner Wahrscheinlichkeit eines hohen Gewinns (B) unterscheidet sich die Präferenz aber häufig abhängig davon, wie man sie erfragt: Die Probanden wählen mehrheitlich A, verlangen aber einen höheren Preis für B (Tversky et al. 1988; s. auch das Eingangsbeispiel ▶ Im Blickfang).

Kontexteffekte: Simultane vs. getrennte Bewertung

List (2002) erfasste Auktionspreise für Baseballkartensammlungen, die entweder aus zehn (bei Sammlern begehrten) Karten in exzellentem Zustand bestanden (Set A) oder aus einem identischen Set B mit *zusätzlich* drei beschädigten Karten. Wenn beide Sets gemeinsam zur Beurteilung vorgelegt wurden, boten die Probanden erwartungsgemäß höhere Preise für Set B. Bei getrennter Vorlage der Sets erzielte aber Set A höhere Preise (vgl. auch Hsee 1996).

Diese Beispiele zeigen deutlich, dass Präferenzen nicht fix vorliegen und je nach Kontext oder Aufgabenstellung unterschiedlich ausfallen können. Weitere problematische Befunde für die Theorie des erwarteten Nutzens als deskriptives Modell sind der *Ähnlichkeitseffekt* (Tversky 1972), der *Attrahierungseffekt* (Huber et al. 1982) und der *Kompromisseffekt* (Simonson 1989). Beim Ähnlichkeitseffekt kann sich die Präferenz zwischen zwei Optionen A und B umkehren, wenn eine zu A ähnliche Option hinzugefügt wird, die auf einem Attribut besser, auf dem anderen schlechter als A ist. Beim Attrahierungseffekt kann eine zu A ähnliche (aber auf allen Attributen etwas schlechtere) Option zu einer häufigeren Wahl von A führen. Ein Kompromisseffekt liegt schließlich vor, wenn die Versuchspersonen unentschieden sind, sofern man sie paarweise aus je drei Optionen A, B, und C wählen lässt, aber bei simultaner Darbietung aller drei Optionen eine von ihnen klar bevorzugen. Diese stellt oft einen Kompromiss aus den beiden anderen dar (genauere Beschreibung der Effekte in Speekenbrink und Shanks 2013).

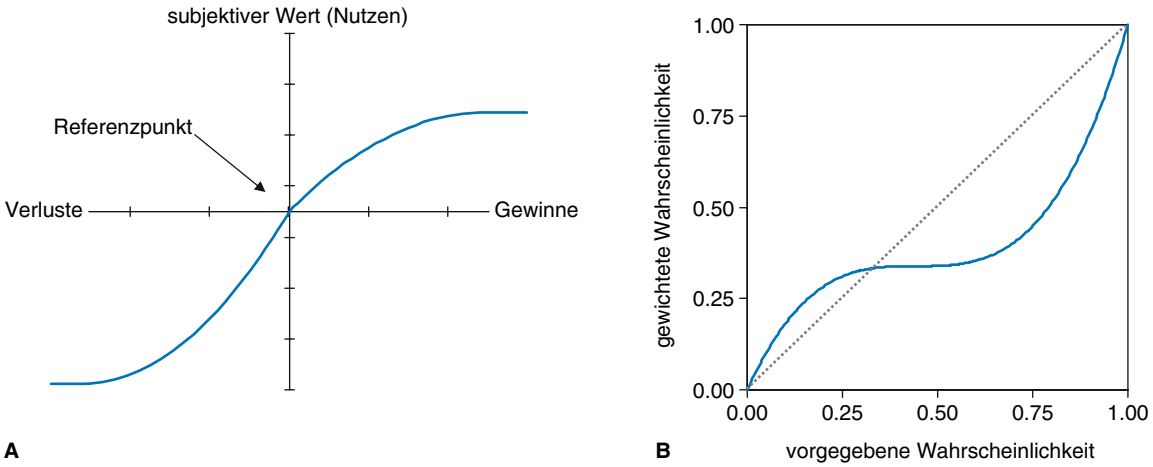


Abb. 17.5 Wertfunktion (**A**) und Gewichtungsfunktion (**B**) der kumulativen Prospect-Theorie (CPT)

terhalb werden als Verluste repräsentiert und haben negativen Nutzen. Wie im Prüfungsbeispiel ist die zentrale Idee, dass sich der Referenzpunkt – beispielsweise je nach Situation oder Beschreibung von Optionen – verschieben kann, sodass die gleiche Konsequenz mal als Gewinn und mal als Verlust repräsentiert sein kann. Die Wertfunktion selbst hat zwei zentrale Eigenschaften mit wichtigen Implikationen: Zum einen ist sie im Verlustbereich steiler als im Gewinnbereich, zum anderen verläuft sie im Gewinnbereich konkav und im Verlustbereich konvex.

Die größere Steilheit der Funktion im Verlustbereich impliziert, dass Verluste größeren negativen Nutzen haben, als Gewinne gleicher objektiver Höhe positiven Nutzen haben. Einfach gesagt: 10 € zu verlieren, ist schlechter, als 10 € zu gewinnen gut ist. Daher sind Menschen auch meist nicht geneigt, eine Lotterie wie diese zu spielen: „Gewinne 100 € mit $p = .50$ oder verliere 100 € mit $p = .50$." Tatsächlich ist der Erwartungswert der Lotterie genau 0 €. Menschen sind aber nicht indifferent, sondern wollen die Lotterie meist nicht spielen. Dieses Verhalten wird als *Verlustaversion* bezeichnet und ist eine zentrale Vorhersage der Wertfunktion der Prospect-Theorie. Verlustaversion ist dabei eine prominente Erklärung für den sogenannten Besitztumseffekt (*endowment effect*), der darin besteht, dass Personen höhere Beträge verlangen, wenn sie einen Gegenstand verkaufen sollen, als sie für den gleichen Gegenstand zu bezahlen bereit wären (Kahneman et al. 1990; 1991).

Neben der unterschiedlichen Steilheit im Gewinn- und Verlustbereich sind diese beiden Bereiche besonders durch die konkave bzw. konvexe Form der Funktion gekennzeichnet: Konkav meint, dass die Steigung zunächst groß ist und mit zunehmendem Wert geringer wird. Dies bedeutet, dass der Nutzenzuwachs zunächst (also nahe am Referenzpunkt) mit jeder Wertsteigerung groß ausfällt und mit steigenden Werten immer mehr abflacht

(▶ Zur Vertiefung 17.2). Einfach gesagt ist der Nutzen des Zugewinns von 0 € zu 10 € größer als derjenige von 10 € zu 20 €. Folglich sollte Entscheidungsverhalten *risikoavers* sein (lieber den Spatzen in der Hand als die Taube auf dem Dach), wie es tatsächlich empirisch oft beobachtet wird: Die meisten Menschen nehmen lieber sichere 10 € als 20 € mit $p = .50$. Dies wird von der Wertfunktion direkt impliziert, da sie annimmt, der Nutzenzugewinn von 0 € zu 10 € sei größer als die Hälfte des Nutzenzugewinns von 0 € zu 20 €. Die konvexe Form der Funktion im Verlustbereich impliziert das genaue Gegenteil. Hier fällt der Nutzen zunächst steil ab und mit zunehmenden Verlusten immer weniger. Somit ist der negative Nutzen des Verlusts von – 10 € größer als die Hälfte des Verlusts von – 20 €. Dies impliziert wiederum *risikogeneigtes* Entscheidungsverhalten: Menschen sollten lieber 20 € mit $p = .50$ verlieren, als 10 € sicher zu verlieren, was ebenfalls empirisch gut bestätigt ist. Das Gesamtmuster wird auch als Spiegelbildeffekt (*Reflection-Effekt*) bezeichnet: Kehrt man die Vorzeichen der Werte um, kehrt sich auch die Risikoneigung um.

Durch einen variablen Referenzpunkt und den Spiegelbildeffekt der Risikoneigung gemeinsam erklärt sich ein empirisches Phänomen, das ebenfalls als eklatante Abweichung von rationalem Entscheiden gilt: der Rahmungseffekt (**Framing-Effekt**), der vorliegt, wenn die gleichen Optionen allein durch unterschiedliche Formulierung oder Einbettung (Framing) zu unterschiedlichen Entscheidungen führen. In einer Untersuchung legten Tversky und Kahnemann (1981) ihren Versuchspersonen ein hypothetisches Entscheidungsszenario vor. Sie sollten eine Intervention wählen, um der Bedrohung durch eine seltene Epidemie entgegenzuwirken, die die Leben von 600 Menschen bedroht. Die erste Gruppe von Versuchspersonen wählte zwischen folgenden Optionen:

- Intervention A: 200 Menschen werden gerettet.
- Intervention B: Mit $p = 1/3$ werden alle gerettet; mit $p = 2/3$ wird niemand gerettet.

Die Mehrheit entschied sich für Intervention A, d. h. risikoavers. Eine andere Gruppe erhielt die gleichen Optionen, jedoch nicht in Termini von Geretteten (positives Framing), sondern von Toten (negatives Framing), entschied sich also zwischen folgenden Optionen:

- Intervention A′: 400 Menschen sterben.
- Intervention B′: Mit $p = 1/3$ stirbt niemand; mit $p = 2/3$ sterben alle.

Die Mehrheit wählte Intervention B′, also risikogeneigt. Da rein formal A = A′ und B = B′, ist dies paradox und verletzt eine weitere wichtige Eigenschaft normativ rationaler Entscheidungen: das Invarianzprinzip, das besagt, dass Entscheidungen nur von den Konsequenzen und Wahrscheinlichkeiten (nicht aber von deren Beschreibung oder deren Formulierung) abhängen sollte. Im Rahmen der Prospect-Theorie wird der Effekt dadurch plausibel erklärt, dass Framing den Referenzpunk verschiebt: Im positiven Frame (Gerettete) werden alle Konsequenzen als potenzielle Verbesserung gegenüber dem Referenzpunkt von 600 Toten repräsentiert. Die Konsequenzen sind also Gewinne und Menschen entscheiden gemäß Wertfunktion risikoavers. Im negativen Frame (Tote) werden dagegen alle Konsequenzen als potenzielle Verschlechterung gegenüber dem Referenzpunkt von null Toten repräsentiert. Die Konsequenzen sind also Verluste, was gemäß Wertfunktion zu risikogeneigten Entscheidungen führt.

Obschon ein variabler Referenzpunkt und die unterschiedliche Risikoneigung im Gewinn- vs. Verlustbereich solches Verhalten erklären können und an sich plausibel scheinen, lässt sich leicht scheinbare Gegenevidenz anführen: Entgegen der Vorhersage risikoaversen Verhaltens im Gewinnbereich spielen nicht wenige Menschen Lotto, entscheiden also risikogeneigt. Ebenso kaufen Menschen Versicherungen (und nehmen somit lieber einen sicheren Verlust in Kauf), entscheiden im Verlustbereich also risikoavers, was ebenfalls inkompatibel mit den oben beschriebenen Implikationen der Wertfunktion scheint. Erklärt wird diese Diskrepanz in der Prospect-Theorie durch die zweite Transformationsfunktion: die Gewichtungsfunktion für Wahrscheinlichkeiten.

Gewichtungsfunktion

Ähnlich wie bei der Wertfunktion ist die Grundidee bei der Gewichtungsfunktion, dass wir Wahrscheinlichkeiten nicht entsprechend ihrer tatsächlichen Höhe einbeziehen, sondern sie entsprechend der in ◘ Abb. 17.5B dargestellten mathematischen Funktion transformieren. Mit anderen Worten: Anstatt die Werte bzw. Nutzen mit den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten zu multiplizieren, verrechnen wir sie mit *gewichteten* Wahrscheinlichkeiten, die eine nichtlineare Funktion der vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten sind. Die Transformationsfunktion hat dabei zwei wesentliche Eigenschaften: unterschiedliche Steilheit und Über- vs. Untergewichtung.

Die in der Prospect-Theorie angenommene Gewichtungsfunktion ist gegen 0 und gegen 1 besonders steil und im mittleren Bereich vergleichsweise flach; kleine Änderungen in den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten wirken sich knapp über 0 und knapp unter 1 also besonders stark aus. Können wir unsere Gewinnchancen beispielsweise von 0 % auf 5 % steigern, hat diese Steigerung mehr Gewicht als die gleiche Steigerung unserer Gewinnchancen von 45 % auf 50 %. Dies wird auch als abnehmende Sensitivität bezeichnet. Eine Demonstration dieses Prinzips ist der Sicherheitseffekt (*Certainty-Effekt*), wie von Kahneman und Tversky (1979) gezeigt: Menschen präferieren meist A (Gewinne 40 € mit $p = .20$; sonst nichts) gegenüber B (Gewinne 30 € mit $p = .25$; sonst nichts), was konsistent mit Erwartungswertmaximierung ist. Nimmt man nun die gleichen Optionen (A und B) und vervierfacht alle Gewinnwahrscheinlichkeiten (was nichts am Verhältnis der Optionen ändert), erhält man Lotterie A′ (Gewinne 40 € mit $p = .80$; sonst nichts) und B′ (Gewinne 30 € sicher). Hier haben Menschen meist eine klare Präferenz für den sicheren Gewinn, d. h. Option B′, obwohl diese den geringeren Erwartungswert hat. Dieses Muster (A ≻ B und B′ ≻ A′) ist paradox, da sich am Verhältnis der Optionen nichts geändert hat. Nach der Gewichtungsfunktion in der Prospect-Theorie ergibt das Muster dagegen Sinn, da die Steigerung hin zu Sicherheit (in Option B′) besonders stark empfunden wird. Anders gesagt:

Die 80 % Gewinnwahrscheinlichkeit in A′ wirkt relativ zu den 100 % in B′ viel kleiner als die 20 % in A relativ zu den 25 % in B – obwohl diese Verhältnisse identisch sind (.80/1.0 = .80 und .20/.25 = .80).

Die zweite Implikation der Gewichtungsfunktion in der Prospect-Theorie besteht darin, dass kleine Wahrscheinlichkeiten (in etwa zwischen 0 und .30) *übergewichtet*, mittlere und große Wahrscheinlichkeiten dagegen *untergewichtet* werden. Lotterien mit kleinen Gewinnwahrscheinlichkeiten erscheinen demnach attraktiver, als sie (gemessen an den „wahren" Gewinnwahrscheinlichkeiten) sind. Mit der Übergewichtung kleiner Wahrscheinlichkeiten kann man gut erklären, warum Menschen Lotto spielen und Versicherungen kaufen: Die (tatsächlich sehr kleine) Gewinn- bzw. Verlustwahrscheinlichkeit wird übergewichtet, sodass die unwahrscheinliche Konsequenz (Lottogewinn oder ein vernichtender Wohnungsbrand) besonders zum Tragen kommt. Auch in Experimenten zeigen sich entsprechende Entscheidungsmuster: So sind Versuchspersonen eher geneigt, 1 € zu bezahlen, um an einer Lotterie um 100 € mit $p = .01$ teilzunehmen, obwohl der Erwartungswert der Lotterie auch nur 1 € beträgt. Die gleichen Personen sind aber nicht bereit, 6 € zu zahlen, um an einer Lotterie um 10 € mit $p = .60$ teilzunehmen, obwohl auch hier der Erwartungswert beider Optionen gleich ist (solche und ähnliche Befunde finden sich z. B. bei Cohen et al. 1987; Tversky und Kahneman 1992). Da gemäß der Gewichtungsfunktion $p = .01$ übergewichtet und $p = .60$ tendenziell untergewichtet wird, erklärt sich diese Diskrepanz mithilfe der Prospect-Theorie.

Auch das in ▶ Abschn. 17.2.3 dargestellte Allais-Paradox lässt sich durch die Implikationen der Gewichtungsfunktion gut abbilden bzw. vorhersagen (Baron 2008): Zunächst beinhaltet Option X einen sicheren Gewinn, sodass diese Option – wie im Certainty-Effect – attraktiver wirken kann als Y (obschon Y den höheren Erwartungswert hat). Weiterhin sollte die sehr geringe Wahrscheinlichkeit von 1 % – gemäß Gewichtungsfunktion der Prospect-Theorie – stark übergewichtet werden, d. h. besonders ins Gewicht fallen. In der Entscheidung zwischen X und Y hat dies einen großen Einfluss, da diese 1 %-Wahrscheinlichkeit ausschlaggebend dafür ist, ob man überhaupt etwas gewinnt oder leer ausgeht. Dies ist bei der Entscheidung zwischen X′ und Y′ aber nicht der Fall. Normativ sollte es natürlich keine Rolle spielen, ob die Wahrscheinlichkeit, leer auszugehen, von 0 auf .01 steigt (im Vergleich von Y und X) oder von .89 auf .90 (im Vergleich von X′ und Y′) – gemäß Gewichtungsfunktion in der Prospect-Theorie macht dies aber einen enormen Unterschied.

17.2.5 Das „große Ganze" und neuere Entwicklungen

Gemeinsam ergibt sich aus der Wert- und Gewichtungsfunktion der Prospect-Theorie ein Gesamtmuster, das empirisch recht gut im Einklang mit tatsächlichen Entscheidungen ist (Cohen et al. 1987; Starmer 2000; Tversky und Kahneman 1992): Im Gewinnbereich entscheiden Menschen – gemäß der Wertfunktion – tendenziell risikoavers. Gemäß der Gewichtungsfunktion kehrt sich dies genau dann um, wenn die Gewinnwahrscheinlichkeit sehr klein ist (weil diese stark übergewichtet wird). Tatsächlich sind wir eher risikoavers bei mittleren und großen Gewinnwahrscheinlichkeiten (6 € mit $p = 1.0 \succ$ 10 € mit $p = .60$), aber risikogeneigt bei kleinen Gewinnwahrscheinlichkeiten (100 € mit $p = .01 \succ$ 1 € mit $p = 1.0$). Wie oben außerdem dargestellt, dreht sich die Risikoneigung – gemäß der Wertfunktion – im Verlustbereich um (Reflection-Effekt). Dementsprechend sind wir bei mittleren und großen Verlustwahrscheinlichkeiten risikogeneigt (– 10 € mit $p = .60 \succ -6$ € mit $p = 1.0$) und risikoavers bei kleinen Verlustwahrscheinlichkeiten (– 1 € mit $p = 1.0 \succ -100$ € mit $p = .01$). Zusammen ergibt sich das sogenannte Vierfachmuster (*fourfold-pattern*) der Risikoneigung (Newell et al. 2007a): Risikoaversion bei (1) mittleren/großen Gewinnwahrscheinlichkeiten sowie (2) kleinen Verlustwahrscheinlichkeiten und Risikoneigung bei (3) kleinen Gewinnwahrscheinlichkeiten und (4) mittleren/großen Verlustwahrscheinlichkeiten (Tab. 17.6).

Tab. 17.6 Das Vierfachmuster der Risikopräferenz in einer Übersicht

	Gewinne	Verluste
Mittlere/große Wahrscheinlichkeit	Risikoaversion	Risikoneigung
Kleine Wahrscheinlichkeit	Risikoneigung	Risikoaversion

Die Prospect-Theorie gilt insofern als gut etabliertes Modell, als sie viele durchaus robuste Abweichungen von den Axiomen der Theorie des erwarteten Nutzens erklären kann. Allerdings fällt auf, dass die Prospect-Theorie letztlich an der „kühlen" Kalkulationslogik der Nutzentheorie festhält und die Emotionen unberücksichtigt lässt. Sowohl die Theorie des erwarteten Nutzens also auch die Prospect-Theorie gehen davon aus, dass Nutzen unabhängig davon ist, was hätte passieren können bzw. letztlich tatsächlich passiert. Jedoch ist intuitiv plausibel, dass dies nicht so sein muss: Entscheiden wir uns im Einführungsbeispiel tatsächlich für die Wanderung, werden wir uns vermutlich ziemlich ärgern, wenn es regnet. Wir sind enttäuscht (*disappointment*) über den letztendlichen Ausgang oder bedauern (*regret*) unsere Entscheidung, und diese Emotionen können wir schon vorher antizipieren. Sie können bestimmte Konsequenzen – über deren reinen Nutzen hinaus – attraktiv oder aversiv machen. Solche Einflüsse werden in der *Disappointment-Theorie* und *Regret-Theorie* (Bell 1985; Loomes und Sugden 1987; Loomes und Sugden 1986) berücksichtigt, indem antizipierte emotionale Reaktionen auf Konsequenzen bei der Integration von Nutzen und Wahrscheinlichkeiten zum Tragen kommen. Allerdings ist auch kritisch diskutiert worden, inwieweit antizipierte Emotionen überhaupt von (dem Nutzen von) antizipierten Konsequenzen unterschieden werden können (Mellers et al. 1997).

Eine andere, aktuellere Entwicklung in diesem Bereich betrifft die Rolle der Informationsdarstellung oder -formate. Wie oben durchweg geschehen, werden Entscheidungsoptionen (meist Lotterien) klassischerweise vollständig beschrieben. In solchen Situationen (*decisions from descriptions*) treffen die Vorhersagen der Prospect-Theorie oft zu. Gibt man Menschen die

Wahrscheinlichkeiten der Konsequenzen aber nicht vor – sondern lässt sie diese „erfahren", indem sie sequenziell zufällig aus einer entsprechenden Verteilung ziehen (*decisions from experience*) –, finden sich systematische Abweichungen (Barron und Erev 2003; Rakow und Newell 2010). Speziell legen Entscheidungsmuster hier eher nahe, dass kleine Wahrscheinlichkeiten unter- statt übergewichtet werden (Camilleri und Newell 2011; Hertwig et al. 2004), wobei dies nur für ganz bestimmte – stark übervereinfachte – Lotterien zu gelten scheint (Glöckner et al., 2016). Zuletzt lassen sich auch Informationsformate nutzen, bei denen die beobachtbaren Entscheidungsmuster weder Über- noch Untergewichtung kleiner Wahrscheinlichkeiten nahelegen (Hilbig und Glöckner 2011). Wenn diese Befunde sich als stabil erweisen, wäre die typische Gewichtungsfunktion der Prospect-Theorie demnach nicht vollkommen unabhängig vom Informationsformat der Lotterien gültig.

17.3 Modelle mit psychologischen Einflüssen

Die in ▶ Abschn. 17.2 beschriebenen Entscheidungsmodelle wurden als Strukturmodelle bezeichnet, da sie Wahlen durch interne Nutzen- und Gewichtungsfunktionen erklären. Aus deren Verrechnung werden bestimmte Muster von Entscheidungen vorhergesagt, welche für jede Versuchsperson anders aussehen können (wegen unterschiedlicher Form der Kurven), aber innerhalb von Versuchspersonen konsistentes Verhalten nahelegen. Manche Autoren nennen sie Als-ob-Modelle, weil sie zwar Vorhersagen über Wahlverhalten machen, aber keine Aussagen über psychologische Prozesse dahinter formulieren.

Wie wir gesehen haben, werden manche Annahmen der Nutzentheorie aber empirisch verletzt, und Urteilsforscher haben sich stärker mit den psychologischen Einflüssen auf Urteile und Entscheidungen beschäftigt. Wir werden im Folgenden zwei Traditionen näher beleuchten: Wegen der zentralen Bedeutung von Wahrscheinlichkeiten für rationales Urteilen gemäß der normativen Theorie des erwarteten Nutzens sind *statistische Urteile* besonders intensiv untersucht worden. Wir werden zunächst diese Befunde darstellen, die als Heuristics-and-Biases-Forschungsprogramm bekannt geworden sind. In ▶ Abschn. 17.3.2 stellen wir das Linsenmodell vor (Brunswik 1955). Es handelt sich dabei nicht um eine testbare Theorie, sondern um eine allgemeine Konzeptualisierung des Urteilsprozesses, die sich als enorm fruchtbar zu dessen Untersuchung erwiesen hat und heute wieder eine Renaissance (insbesondere in der Differenziellen Psychologie) erfährt.

17.3.1 Das Bayes-Theorem und der Basisratenfehler

Im vorhergehenden Abschnitt zu Strukturmodellen galten die möglichen Entscheidungskonsequenzen und ihre Eintretenswahrscheinlichkeiten als zentrale Komponenten jeder Entscheidung. Dabei wurden diese durchweg als „gegeben" angenommen, wenn auch mit der Einschränkung, dass sie mitunter subjektiv generiert sein könnten und nicht notwendigerweise objektiv vorliegen. Tatsächlich sind aber gerade Wahrscheinlichkeiten so gut wie nie gegeben bzw. bekannt. In vielen realen Situationen und vielen der obigen Beispiele müssten Entscheider diese Wahrscheinlichkeiten irgendwie abschätzen oder generieren, z. B. die Wahrscheinlichkeit einer Gehaltserhöhung oder Kündigung, die Wahrscheinlichkeit von Sonne oder Regen. Aufgrund dieser zentralen Rolle von Wahrscheinlichkeiten hat sich die Urteils- und Entscheidungsforschung ausführlich damit befasst, wie Menschen zu Wahrscheinlichkeitsurteilen kommen.

Wie wahrscheinlich ist es, dass „meine Mannschaft" gewinnt, wenn sie zur Halbzeitpause 2:1 hinten liegt? Wie wahrscheinlich ist es, dass eine Person ein Verbrechen begangen hat, wenn am Tatort DNA-Spuren gefunden werden, die höchstwahrscheinlich von dieser Person stammen? Abstrakt ausgedrückt: Wie ändern sich Wahrscheinlichkeiten (z. B. die Wahrscheinlichkeit zu gewinnen) im Lichte neuer Evidenz (dass die Mannschaft hinten liegt)? Wie dies normativ korrekt zu beantworten ist, leitete der englischen Mathematiker und presbyterianische Pfarrer Thomas Bayes im 18. Jahrhundert aus den Axiomen der Wahrscheinlichkeitstheorie her, weshalb diese normative Regel auch als **Bayes-Theorem** bekannt ist. Dieses lässt sich am besten anhand eines alltagsnahen Beispiels erklären (angelehnt an Eddy 1982; Hoffrage und Gigerenzer 1998): Eine Frau lässt im Rahmen einer Vorsorgeuntersuchung eine Mammografie (Röntgenuntersuchung der Brust) vornehmen. Die Prävalenz von Brustkrebs bei Frauen mit gleicher Vorgeschichte, im gleichen Alter etc. ist 1 %; d. h., eine von 100 „vergleichbaren" Frauen ist von Brustkrebs betroffen. Im Fall von tatsächlich vorhandenem Brustkrebs wird die Mammografie mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % ein positives Testergebnis erzeugen, d. h., die *Sensitivität* des Tests ist 80 %. Ist tatsächlich kein Brustkrebs vorhanden, erhält man mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % ein positives Testergebnis („falscher Alarm"), d. h., die *Spezifität* des Tests ist 90 %. Nehmen wir an, das Testergebnis ist positiv: Wie hoch ist nun die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Frau tatsächlich Brustkrebs hat?

In einer Studie von Casscells et al. (1978) wurde Studierenden und Mitarbeitern der Harvard Medical School eine strukturell ähnliche Aufgabe vorgelegt, und die häufigste Antwort entsprach einfach der Spezifität des Tests – in unserem Beispiel also 90 %. Ähnliche häufige und deutliche Fehler unter medizinisch ausgebildeten Experten berichtet Eddy (1982; vgl. auch Hoffrage und Gigerenzer 1998), in dessen Studie die typische Antwort in etwa der Sensitivität des Tests entsprach. In einem Überblick über eine Reihe von Studien mit mehreren Hundert Versuchspersonen (darunter Experten und Laien) berichten Barbey und Sloman (2007), dass nur zwischen 5 % und 25 % der Versuchspersonen in solchen Aufgaben die korrekte Wahrscheinlichkeit angeben. Aber wie hoch ist die korrekte Wahrscheinlichkeit? Laut Bayes-Theorem (Formeln in ▶ Zur Vertiefung 17.4) beträgt sie in unserem Beispiel lediglich 7,5 %, wie sich anhand eines (in ◘ Abb. 17.6 dargestellten) Gedankenexperiments leicht demonstrieren lässt. In diesem Gedankenexperiment testen wir 1000 Frauen. Wir gehen von einer Prävalenz von 1 % aus, sodass von unseren 1000 Frauen zehn von Brustkrebs betroffen wären. Diese 1 %-Wahrscheinlichkeit ist die *A-priori-Wahrscheinlichkeit* oder *Basisrate*. Wir wissen weiterhin, dass die Mammografie bei denjenigen, die Brustkrebs haben, mit 80 % Wahrscheinlichkeit ein positives Testergebnis produziert; dies ist also bei acht der zehn Frauen

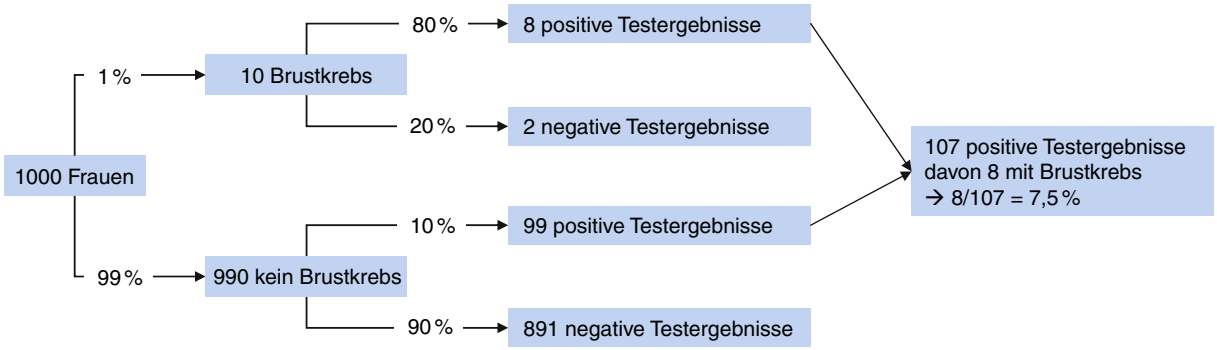


Abb. 17.6 Veranschaulichung des Mammografieproblems mit 1000 fiktiven Tests

Zur Vertiefung 17.4

Formale Version des Bayes-Theorems

Die von Bayes entwickelte Formel zur Berechnung der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit einer Hypothese (z. B. Brustkrebs), wenn beobachtete Daten gegeben sind (z. B. positives Testergebnis), $p(H|D)$, lautet:

$$p(H|D) = \frac{p(D|H) \cdot p(H)}{p(D|H) \cdot p(H) + p(D|\neg H) \cdot p(\neg H)},$$

wobei $p(D|H)$ und $p(D|\neg H)$ die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Beobachtung sind, wenn die Hypothese zutrifft bzw. nicht zutrifft, in unserem Beispiel also die Wahrscheinlichkeit eines positiven Testergebnisses, wenn tatsächlich Brustkrebs vorliegt ($p(D|H) = 80\,\%$), und die Wahrscheinlichkeit eines positiven Testergebnisses, wenn tatsächlich kein Brustkrebs vorliegt ($p(D|\neg H) = 10\,\%$). Weiterhin bezeichnet $p(H)$ die Basisrate oder A-priori-Wahrscheinlichkeit (in unserem Beispiel die Prävalenz von Brustkrebs, d. h. $p(H) = 1\,\%$) und $p(\neg H)$ die Gegenwahrscheinlichkeit (in unserem Beispiel also $p(\neg H) = 99\,\%$). Eine ausführliche Darstellung des Bayes Theorems findet sich beispielsweise bei Baron (2008) und in vielen Lehrbüchern der Statistik.

mit Brustkrebs der Fall. Weiterhin liefert die Mammografie bei denjenigen ohne Brustkrebs mit 10 % Wahrscheinlichkeit ein positives Testergebnis; es sind also bei den 990 Frauen ohne Brustkrebs 99 „falsche Alarme" zu erwarten. Dies sind die *bedingten Wahrscheinlichkeiten*. In der Summe beobachten wir in unseren 1000 fiktiven Tests also 107 positive Testergebnisse (8 + 99). Wir wissen, dass acht von diesen 107 Frauen tatsächlich Brustkrebs haben, also ist die *A-posteriori-Wahrscheinlichkeit* für Brustkrebs im Fall eines positiven Testergebnisses 8/107 oder 7,5 %.

Die fehlerhafte Einschätzung solcher Wahrscheinlichkeiten – die robust beobachtet worden ist, wobei das Ausmaß mitunter stark von der Ausgestaltung der Aufgabe abhängt (Koehler 1996) – wird auch als Basisratenfehler (*base-rate fallacy*) oder unzureichende Berücksichtigung der Basisraten (*base-rate neglect*) bezeichnet. Offenbar beziehen Versuchspersonen nicht oder nicht hinreichend in ihre Überlegungen ein, dass die A-priori-Wahrscheinlichkeit für Brustkrebs relativ gering ist. Ein weiteres klassisches Beispiel für den Basisratenfehler ist das Taxiproblem von Kahneman und Tversky (1972a). Sie legten ihren Versuchspersonen folgendes Szenario vor:

„Ein Taxi war in einen nächtlichen Unfall mit Fahrerflucht verwickelt. In der Stadt gibt es zwei Taxiunternehmen mit verschiedenfarbigen Fahrzeugen: 85 % der Taxis sind grün und 15 % blau. Ein Zeuge sagt aus, das Unfalltaxi sei blau gewesen. Das Gericht prüft die Zuverlässigkeit des Zeugen unter vergleichbaren Bedingungen und stellt fest, dass dieser die Taxifarbe in 80 % aller Versuche korrekt identifizieren kann. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Unfalltaxi tatsächlich blau war?"

Ähnlich wie im Brustkrebsbeispiel war die typische Antwort von Versuchspersonen in verschiedenen Varianten der Aufgabe „80 %" (Bar-Hillel 1980), also einfach die Zuverlässigkeit des Zeugen. Nach dem Bayes-Theorem allerdings beträgt die gesuchte Wahrscheinlichkeit 41 %, was plausibel ist, wenn man sich die geringe Basisrate von blauen Taxis (15 %) vor Augen führt. Menschen scheinen dies aber häufig zu ignorieren oder einfach eine der bedingten Wahrscheinlichkeiten „umzudrehen" und als Antwort zu nehmen (Villejoubert und Mandel 2002). Weist man sie allerdings explizit darauf hin, dass die Basisrate kausal relevant ist (z. B. „85 % aller Unfälle werden von grünen Taxis und 15 % von blauen Taxis verursacht"), scheint die Basisrate eher Berücksichtigung zu finden, wobei die typischen Wahrscheinlichkeitsurteile dennoch größer waren als 41 % (Tversky und Kahneman 1982), der Basisratenfehler also nicht völlig verschwindet. Weitere deutliche Verbesserungen der Urteile erreichten Gigerenzer und Hoffrage (1995) dadurch, dass sie die Aufgabe im Häufigkeitsformat (also ähnlich unserem Mammografie-Gedankenexperiment; s. auch Abb. 17.6) statt in Termini von Wahrscheinlichkeiten vorgaben. Allerdings blieb der Anteil falscher Antworten mit ca. 50 % weiterhin substanziell.

Obschon wir uns auf das Bayes-Theorem als normatives Modell und den Basisratenfehler als offensichtliche Abweichung von diesem Modell konzentriert haben, lassen sich eine ganze Reihe weiterer systematischer Urteilsfehler beobachten (Überblick über einige prominente „kognitive Täuschungen" dieser Art in Pohl 2004a). Einige dieser Fehler bzw. Phänomene (ob es sich wirklich um Fehler handelt, diskutieren wir später) lassen sich aber am besten im Lichte des Forschungsprogramms erläutern, das Kahneman und Tversky in den 1970er Jahren entwickelten, um Fehler im statistischen Schließen – wie den Basisratenfehler – zu erklären: das Heuristics-and-Biases-Programm (Gilovich et al. 2002; Kahneman et al. 1982; Tversky und Kahneman 1974).

Heuristiken und Verzerrungen (*heuristics and biases*)

Die Grundidee des **Heuristics-and-Biases-Programms** besteht darin, dass Menschen beim Urteilen bzw. statistischen Schließen auf gewisse Daumenregeln bzw. **Heuristiken** (*heuristics*) zurückgreifen, die zu systematischen *Fehlern* oder *Täuschungen* (*biases*) führen können. Später wurde diese Annahme unter dem Begriff *Attributersetzung* (*attribute substitution*) zusammengefasst (z. B. Kahneman und Frederick 2004). Die Idee ist, dass Menschen die schwierige Originalfrage (z. B. „Wie wahrscheinlich ist X?") spontan durch eine leichtere Frage ersetzen (z. B. „Wie typisch ist X?" oder „Wie leicht vorstellbar ist X?"), die deswegen leichter ist, weil eine Heuristik eine intuitive Antwort liefert. Im Wesentlichen wurden hierfür drei heuristische Prinzipien vorgeschlagen: *Repräsentativität*, *Verfügbarkeit* und *Verankerung*. Wir stellen diese im Folgenden kurz vor und skizzieren die zentralen empirischen Befunde (ausführlichere Darstellungen z. B. in Teigen 2004; Reber 2004; Mussweiler et al. 2004).

Repräsentativität Wahrscheinlichkeitsurteile aufgrund von Repräsentativität (*representativeness*) entstehen dadurch, dass Wahrscheinlichkeit anhand von Ähnlichkeit oder Typikalität beurteilt wird (Kahneman und Tversky 1972b): Je typischer ein Ereignis für die Population ist, aus der es stammen soll, desto wahrscheinlicher erscheint es. Dabei bleibt aber mitunter die Basisrate unberücksichtigt, d. h., wie oft das Ereignis, dessen Wahrscheinlichkeit zu schätzen ist, a priori überhaupt zu erwarten ist oder vorkommt. Kahneman und Tversky (1973) demonstrierten dieses Prinzip anhand des folgenden Experiments: Eine erste Gruppe von Versuchspersonen schätzte, wie viele Studierende verschiedene Fächer belegen. Die Zahl der Informatikstudierenden wurde beispielsweise als relativ gering eingeschätzt (7 %), während die Zahl der Sozialwissenschaftler deutlich höher eingeschätzt wurde (17 %) – was für die damalige Zeit (um 1970) nicht unrealistisch ist. Eine zweite Gruppe von Versuchspersonen bekam nun eine Personenbeschreibung von „Tom W." vorgelegt, in der dieser als intelligent, aber eher unkreativ, ordentlich und detailverliebt beschrieben wurde. Er schreibe Texte eher langweilig und mit gelegentlichen Science-Fiction-Allüren. Er sei tendenziell gefühlskalt und habe wenig Freude daran, mit anderen Menschen in Kontakt zu treten. Diese zweite Gruppe von Versuchspersonen sollte nun beurteilen, wie *typisch* Tom W. für einen Studierenden der verschiedenen Fächer sei. Er wurde als besonders typisch für einen Informatiker und besonders untypisch für einen Sozialwissenschaftler eingeschätzt. Einer dritten Gruppe von Versuchspersonen wurde ebenfalls die Beschreibung von Tom W. vorgelegt, und sie sollte die verschiedenen Fächer danach in eine Rangfolge bringen, mit welcher *Wahrscheinlichkeit* Tom ein Studierender dieser verschiedenen Fächer sei. Die beobachteten Ränge entsprachen dabei genau den Typikalitätsschätzungen der zweiten Versuchspersonengruppe (Informatik erhielt den höchsten Wahrscheinlichkeitsrang und Sozialwissenschaften den niedrigsten), zeigten aber keinerlei Zusammenhang zu den allgemeinen Häufigkeitsschätzungen der ersten Versuchspersonengruppe. Scheinbar wurden die Basisraten (wie häufig bestimmte Fächer generell studiert wurden) zugunsten der Typikalität der Beschreibung ignoriert. Dies ist deswegen besonders erstaunlich, weil die gleichen Versuchspersonen (in der dritten Gruppe) Personenbeschreibungen wie die von Tom W. als allgemein wenig diagnostisch für das gewählte Studienfach einschätzten. Mit dem Prinzip Repräsentativität wurde auch erklärt, warum Menschen beispielsweise Stichprobengrößen unzureichend berücksichtigen oder Zufallsmerkmale falsch einschätzen (Gilovich et al. 1985; Oskarsson et al. 2009).

Ein weiterer Fehler, der auf Repräsentativität zurückgeführt wurde, ist der *Konjunktionsfehler*, dessen Demonstration viele empirische Untersuchungen und einige Debatten nach sich zog. Die Konjunktionsregel in der Wahrscheinlichkeitstheorie besagt, dass die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens zweier Ereignisse nicht größer sein kann als die Auftretenswahrscheinlichkeit jedes einzelnen Ereignisses. Mit einem viel beachteten Szenario, das heute als das *Linda-Problem* bekannt ist, zeigten Tversky und Kahneman (1983), dass Versuchspersonen diese Regel zugunsten von Typikalität verletzen. Sie legten den Versuchspersonen die folgende Beschreibung einer jungen Frau vor:

Linda ist 31 Jahre alt, Single, freimütig und sehr intelligent. Sie hat einen Abschluss in Philosophie. Als Studentin hat sie sich intensiv mit Fragen der Diskriminierung und der sozialen Gerechtigkeit befasst und auch an Anti-Kernkraft-Demonstrationen teilgenommen.

Danach erhielten Versuchspersonen einige Aussagen über Linda, unter denen auch die Folgenden waren:

a. Linda ist in der Frauenbewegung aktiv.
b. Linda ist Bankangestellte.
c. Linda ist Bankangestellte und in der Frauenbewegung aktiv.

Sie sollten alle Aussagen nach ihrer Wahrscheinlichkeit in eine Rangfolge bringen. Es zeigte sich nicht nur, dass die meisten Versuchspersonen Aussage a für wahrscheinlicher hielten als Aussage b – was plausibel ist, da die Beschreibung eher zu einer prototypischen Feministin als zu einer Bankangestellten passt –, sondern auch, dass sie Aussage c für wahrscheinlicher hielten als Aussage b. Dies verletzt jedoch die Konjunktionsregel, da das gemeinsame Eintreten von Aussage a und b (wie es in Aussage c vorliegt) nicht wahrscheinlicher sein kann als die Einzelereignisse. Einfacher ausgedrückt: Bankangestellte, die in der Frauenbewegung aktiv sind (Aussage c), sind eine Teilmenge aller Bankangestellten (Aussage b) –, können also unmöglich häufiger sein. Tversky und Kahneman (1983) erklären den Konjunktionsfehler damit, dass die Beschreibung repräsentativer für die Population in Aussage c ist als für die Population in Aussage b und Versuchspersonen dieser Typikalität folgen, ohne zu berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit von Aussage c kleiner als diejenige von Aussage b sein muss.

In den Folgejahren wurde das Linda-Problem immer wieder untersucht und der Konjunktionsfehler verschiedentlich angezweifelt. So argumentierten einige Forscher, der Fehler trete nur deswegen auf, weil nach Wahrscheinlichkeiten gefragt werde statt nach Häufigkeiten (Gigerenzer und Hoffrage 1995). Der Begriff „wahrscheinlich" werde oft eher wie „möglich" oder „plausibel" interpretiert, sodass die Konjunktionsregel letztlich die unzutreffende Norm darstelle (Gigerenzer 1996). Tatsächlich fanden einige Untersuchungen eine deutliche Reduktion des Konjunktionsfehlers, wenn Versuchspersonen nach Häufigkeiten statt nach

Wahrscheinlichkeiten gefragt wurden (Fiedler 1988; Hertwig und Gigerenzer 1999). Andere fanden aber, dass Häufigkeitsformate per se den Fehler nicht nennenswert reduzierten (Kahneman und Tversky 1996; Mellers et al. 2001); vielmehr muss Versuchspersonen sehr explizit klargemacht werden, dass die „und"-Verknüpfung (in Aussage c) als Konjunktion gemeint ist, damit Fehlurteile kaum noch vorkommen (Hertwig et al. 2008a; Mellers et al. 2001).

Verfügbarkeit Verfügbarkeit (*availability*) beschreibt nach Tversky und Kahneman (1973) die Leichtigkeit, mit der Ereignisse aus dem Gedächtnis abgerufen werden können, oder wie leicht vorstellbar sie sind. Je verfügbarer ein Ereignis ist, desto wahrscheinlicher erscheint es. In einem ihrer Experimente zur Demonstration von Verfügbarkeit ließen die Autoren ihre Versuchspersonen für fünf verschiedene Buchstaben einschätzen, ob ein zufällig ausgewähltes Wort der englischen Sprache diesen Buchstaben mit größerer Wahrscheinlichkeit an erster oder an dritter Stelle aufweisen würde. Obwohl für alle Buchstaben galt, dass Wörter mit diesen Buchstaben an dritter Stelle deutlich häufiger vorkommen, hielt es die Mehrheit der Versuchspersonen für wesentlich wahrscheinlicher, diese Buchstaben in zufällig gewählten Wörtern an erster Stelle vorzufinden. Tversky und Kahneman (1973) erklären dies damit, dass das Wortgedächtnis nach Anfangsbuchstaben organisiert ist und es insofern leichter fällt, Wörter mit einem bestimmen Anfangsbuchstaben als Wörter mit diesem Buchstaben an dritter Stelle zu generieren. Während einige Forscher diese Befunde replizieren konnten (z. B. Wänke et al. 1995), haben andere allerdings keine Effekte von Verfügbarkeit auf Häufigkeitsurteile nachgewiesen (Sedlmeier et al. 1998).

In einem konzeptuell ähnlichen Experiment gaben Tversky und Kahneman (1973) Versuchspersonen auditiv Listen mit Namen vor. Darunter waren berühmte, gut erinnerbare Namen und weniger berühmte Namen. Die eine Liste enthielt 19 Namen berühmter Frauen und 20 Namen weniger berühmter Männer. Eine andere Liste enthielt umgekehrt 19 Namen berühmter Männer und 20 Namen weniger berühmter Frauen. Das Geschlecht war immer eindeutig anhand des Vornamens zu erkennen. Nach Darbietung einer der Listen sollten Versuchspersonen beurteilen, ob insgesamt mehr männliche oder mehr weibliche Namen in der gehörten Liste vorgekommen waren. Fast alle Versuchspersonen hielten Namen desjenigen Geschlechts retrospektiv für häufiger, von dem zwar weniger, aber berühmte Namen dargeboten worden waren. Dies kann damit erklärt werden, dass die berühmten Namen leichter abzurufen und somit besser verfügbar waren (tatsächlich bestätigte sich dies empirisch in einer weiteren Versuchspersonengruppe, die lediglich möglichst viele der gehörten Namen reproduzieren sollte) und die Urteile sich auf diese Verfügbarkeit stützten.

Anhand dieses Verfügbarkeitsprinzips – und theoretischer Erweiterungen dieser Idee – wird eine ganze Reihe weiterer Phänomene erklärt. So überschätzen Menschen beispielsweise die Wahrscheinlichkeit seltener Todesursachen, wenn diese in den Medien häufiger Erwähnung finden (z. B. Tornados) und damit „verfügbarer" sind, und unterschätzen die Wahrscheinlichkeit häufigerer Todesursachen, die selten Erwähnung finden (z. B. Diabetes) und somit weniger verfügbar sind (Combs und Slovic 1979; Lichtenstein et al. 1978). In anderen Studien schrieben Versuchspersonen sich selbst bestimmte Eigenschaften (z. B. Durchsetzungsstärke) *weniger* zu, wenn sie zuvor aufgefordert worden waren, zwölf autobiografische Beispiele für entsprechendes Verhalten (zwölf Situationen, in denen sie durchsetzungsstark gewesen waren) zu erinnern, als wenn sie nur sechs solche Beispiele generieren sollten (Schwarz et al. 1991). Auch dies ist kompatibel mit dem Verfügbarkeitsprinzip: Da es schwieriger ist, zwölf Beispiele zu erinnern, war Evidenz der eigenen Durchsetzungsstärke weniger „verfügbar", weshalb Versuchspersonen sich diese Eigenschaft weniger zuschrieben.

In jüngerer Zeit ist das Verfügbarkeitsprinzip verschiedentlich interpretiert, konkretisiert und erweitert worden. Die wohl prominenteste Erweiterung ist das Konzept der Verarbeitungsflüssigkeit (*fluency*), die allgemein die Leichtigkeit eines Prozesses beschreibt und als Erklärung für eine ganze Reihe von Phänomenen dient (Alter und Oppenheimer 2009; Unkelbach und Greifeneder 2013). So werden beispielsweise Aussagen eher für wahr gehalten, die leichter lesbar sind (Reber und Schwarz 1999) oder aufgrund von Wiederholung leichter verarbeitet werden können (Begg et al. 1992; Dechêne et al. 2010). Es gibt viele weitere Beispiele für den Einfluss von Verarbeitungsflüssigkeit (Alter und Oppenheimer 2009; Unkelbach und Greifeneder 2013) und auch einige Hinweise, dass es im Allgemeinen eine gute Idee ist, sich auf solche „kognitiven Gefühle" (Greifeneder et al. 2011) zu verlassen – so kann die Verarbeitungsflüssigkeit in bestimmten Umwelten durchaus Vorhersagewert besitzen (Herzog und Hertwig 2013).

Verankerung Das Prinzip der Verankerung und Anpassung (*anchoring and adjustment*) bezieht sich allgemein auf die Einschätzung numerischer Größen. Die Idee von Tversky und Kahneman (1974) bestand darin, dass Schätzungen bei einem Startwert – dem Anker – beginnen und dann in Richtung der finalen Antwort angepasst werden. Diese Anpassung ist allerdings unzureichend, sodass Schätzungen nahe an dem Anker verhaftet bleiben. In einer Demonstration ließen Tversky und Kahneman (1974) eine Gruppe von Versuchspersonen unter Zeitdruck die Lösung der Multiplikationsaufgabe $8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1$ schätzen; eine andere Gruppe schätzte die Lösung für $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8$. Obschon diese natürlich äquivalent sind und die gleiche Lösung haben (nämlich 40.320), fielen die Schätzungen stark unterschiedlich aus: Die erste Gruppe schätzte im Median 2250, während die zweite Gruppe im Median 512 schätzte. Die Erklärung besteht darin, dass das nach Ablauf der erlaubten Zeit erreichte Zwischenergebnis als Anker diente (von dem aus extrapoliert wurde) und der niedrigere Anker (in der aufsteigenden Reihe) somit eine niedrigere finale Schätzung nach sich zog.

Ähnliche Befunde zeigen sich auch dann, wenn die Anker offensichtlich uninformativ sind. So ließen Tversky und Kahneman (1974) ihre Versuchspersonen zunächst schätzen, ob der Anteil afrikanischer Nationen in der UN größer oder kleiner sei als eine Zufallszahl, die zuvor anhand eines Glücksrades bestimmt wurde. Diese Zufallszahl war entweder 10 oder 65 und diente als nichtinformativer Anker. Danach sollten Versuchspersonen

den Anteil afrikanischer Nationen in der UN absolut schätzen. Hatten sie zuvor den hohen Anker (65) gesehen, lag ihre mittlere Schätzung bei 45 %. Hatten sie dagegen den niedrigeren Anker (10) gesehen, lag ihre Schätzung bei 25 %. Dieser Unterschied in den Schätzungen wird als Ankereffekt bezeichnet und ist in ähnlichen Aufgaben verschiedentlich repliziert worden (Chapman und Johnson 2002; Mussweiler et al. 2004).

Tatsächlich sind Ankereffekte sehr robust und lassen sich nur bedingt reduzieren. So zeigen beispielsweise die Befunde von Strack und Mussweiler (1997), dass Anker nicht zwingend plausibel sein müssen: In einer ihrer Studien schätzten Versuchspersonen das Jahr, in dem Einstein zum ersten Mal die USA besuchte. Vorher sollten sie angeben, ob dies vor oder nach einem bestimmten Jahr gewesen war – dieses Jahr diente als Anker. Der Ankereffekt (eine niedrigere Schätzung, wenn Versuchspersonen zuvor den niedrigeren Anker beurteilt hatten) zeigte sich gleichermaßen für die plausiblen Anker 1905 und 1939 wie für die nichtplausiblen Anker 1215 und 1992. Auch explizite Warnungen vor dem Ankereffekt oder monetäre Anreize reduzieren den Ankereffekt nicht nachweislich (Wilson et al. 1996).

Verankerung ist als Erklärungskonzept für eine ganze Reihe an Phänomenen herangezogen worden, die die Fehleinschätzung numerischer Größen beinhalten (Übersicht in Chapman und Johnson 2002; Mussweiler et al. 2004). Ein besonders prominentes Phänomen, ist der *Rückschaufehler* (*hindsight bias*), den Fischhoff (1975) zum ersten Mal demonstrierte und der seither Fokus zahlloser Untersuchungen gewesen ist (Übersicht z. B. in Blank et al. 2007; Christensen-Szalanski und Willham 1991; Pohl 2004b): In einem häufig verwendeten Paradigma (Pohl 2007) erhalten Versuchspersonen *Almanach*-Fragen (z. B. „Wie lang ist der Rhein?“) und geben ihre Schätzungen ab. Nach einem gewissen Zeitintervall (z. B. einer Woche) erhalten sie die korrekte Antwort für manche der Fragen (z. B. „Der Rhein ist 1.239 km lang“) und werden dann gebeten, sich an ihre ursprüngliche Schätzung zu erinnern und diese wiederzugeben. Es zeigt sich dabei, dass die Erinnerungen durchschnittlich in Richtung der inzwischen gelernten faktisch korrekten Antwort ausfallen. Versuchspersonen reproduzieren also nicht ihre ursprüngliche Antwort, sondern geben eine neue, die typischerweise zwischen der ursprünglichen Antwort und der faktisch korrekten Antwort liegt. Das Verankerungsprinzip erklärt den Rückschaufehler dadurch, dass die neu gelernte faktisch korrekte Antwort als Anker dient und unzureichend in Richtung der Originalantwort angepasst wird oder ankerkonsistente Informationen im Gedächtnis verfügbarer macht (Strack und Mussweiler 1997). Bis heute werden mitunter sehr verschiedene Erklärungsansätze für den Rückschaufehler diskutiert (Blank et al. 2007; Pohl 2004b).

Kontroverse

Das Heuristics-and-Biases-Forschungsprogramm hatte großen Einfluss in der Urteils- und Entscheidungsforschung und hat auch auf angrenzende Disziplinen wie Marketing und Ökonomie, Rechtswissenschaften oder Medizin ausgestrahlt. Die Probleme der Menschen mit Wahrscheinlichkeiten sind für die Strukturmodelle natürlich direkt relevant, da diese Wahrscheinlichkeiten als zentrale Elemente enthalten. Allerdings sind sowohl die empirisch beobachteten Fehler (*biases*) als auch die zur Erklärung vorgeschlagenen Heuristiken nicht unumstritten geblieben. Speziell Gigerenzer (1991; 1996) kritisierte das Heuristics-and-Biases-Forschungsprogramm scharf und stützte sich dabei auf zwei zentrale Argumente. Zum einen kritisierte er, dass die vorgeschlagenen Heuristiken vage seien und lediglich Post-hoc-Erklärungen für beobachtete Phänomene darstellten. Ohne konkrete Prozessannahmen und -definitionen bleibe offen, wann genau etwas beispielsweise verfügbar oder repräsentativ sei, und insofern hätten die Heuristiken wenig Vorhersagekraft. Tatsächlich haben auch andere Forscher argumentiert, dass man die beobachteten Phänomene nicht zwingend auf inhärent verzerrte kognitive Prozesse zurückführen muss; so lassen sich viele beispielsweise alternativ durch nichtoptimale Informationsstichproben erklären (Fiedler 2000).

Weiterhin stellte Gigerenzer (1991; 1996) die zugrunde liegenden normativen Modelle (wie Logik oder Wahrscheinlichkeitstheorie) infrage. Ziel eines adaptiven Organismus sei nicht das Einhalten abstrakter formaler Regeln (im Sinne von Kohärenz), sondern erfolgreiches Handeln in einer bestimmten Umwelt (im Sinne von Korrespondenz). Viele der beobachteten Phänomene – wie beispielsweise die typischen Antworten in der Linda-Aufgabe – seien insofern auch keine Fehler (Messer und Griggs 1993). Man habe lediglich einen ungeeigneten Maßstab zur Beurteilung des Verhaltens angelegt und könne zudem zeigen, dass einige der „Fehler“ nur in ganz bestimmten Aufgaben oder Formaten auftreten (Chase et al. 1998).

Tatsächlich besteht eine anhaltende Debatte darüber, ob menschliches Urteilen und Entscheiden häufig irrational ist (Dawes 2001) oder dies nur so scheint, bedingt durch den Vergleich mit „unangemessenen“ normativen Modellen (Übersicht über die Rationalitätskontroverse z. B. in Stanovich und West 2000). McClelland und Bolger (1994, S. 455) brachten die konträren Sichtweisen treffend auf den Punkt: „[t]he pessimists believe that biases are in people – the optimists believe that biases are in research.“ Diese Kontroverse über die Irrationalität menschlichen Urteilens und Entscheidens ist bis heute nicht beigelegt. Da aber gerade die Frage nach dem angemessenen normativen Modell bzw. dem zugrunde liegenden Kriterium für Rationalität (Kohärenz vs. Korrespondenz) letztlich auch nicht final beantwortet werden kann, ist die Rationalitätsdebatte gewissermaßen künstlich. Zudem muss man berücksichtigen, dass Kahneman und Tversky (1996) mit ihrem Heuristics-and-Biases-Forschungsprogramm nicht das Ziel verfolgten, menschliche Irrationalität zu propagieren. Schon früh machten Tversky und Kahneman (1974, S. 1124) explizit, dass Fehler als Folge von heuristischen Prozessen eher die Ausnahme als die Regel sein dürften: „In general, these heuristics are quite useful, but sometimes they lead to severe and systematic errors.“ Letztlich kann man den Begriff „Bias“ oder „kognitive Täuschungen“ in Anlehnung an die Wahrnehmungsforschung verstehen (Newell 2005): Die Wahrnehmung – die zweifellos meist sehr effizient und fehlerfrei abläuft – „täuscht sich“ in bestimmten Situationen, z. B. bei der Figur von Ponzo (► Kap. 2). Die genannten „Heuristiken“ sind psychologische Prinzipien, die Erklärungen für sowohl das normale Funktionieren als auch die Abweichungen unter bestimmten Bedingungen liefern sollen.

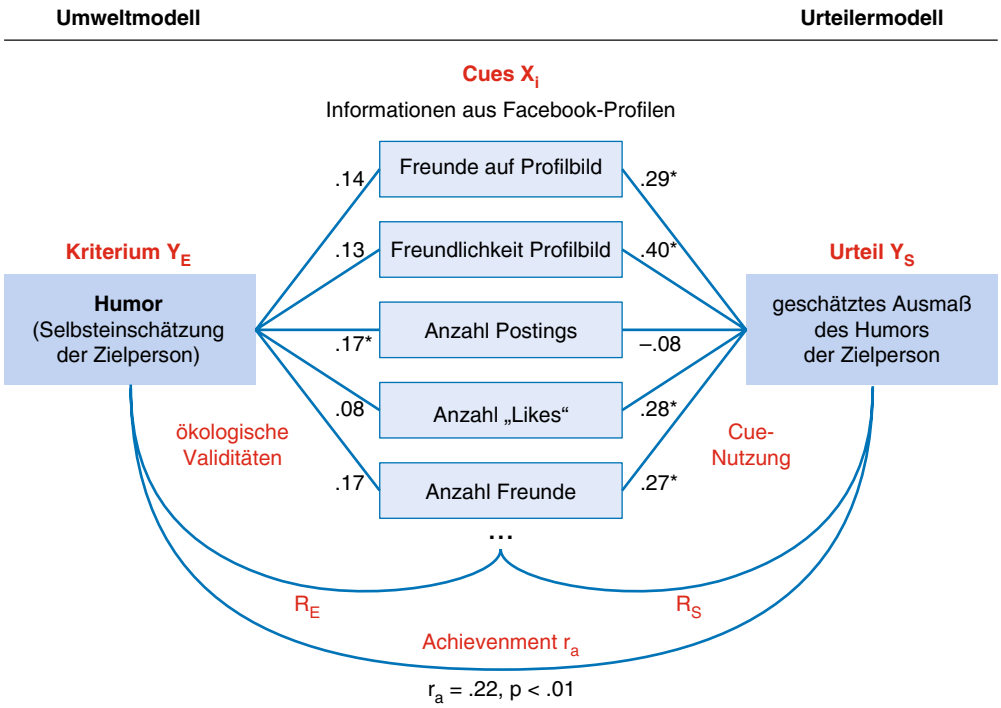


Abb. 17.7 Das Linsenmodell anhand eines Beispiels von Pennington und Hall (2014). 35 Urteiler schätzten die Humororientierung von 100 ihnen unbekannten Zielpersonen ein, wozu ihnen nur deren Facebook-Profile zur Verfügung standen. Daraus extrahierten die Autoren der Studie 53 Cues (hier nur ausschnittsweise wiedergegeben). Die Humororientierung der Zielpersonen wurde von diesen mittels Fragebogen (Selbstauskunft) erfasst. Leider berichten die Autoren keine Werte für R_E und R_S (linearer Zusammenhang der Cues mit dem Kriterium respektive den Urteilen), aber vor allem ein recht geringer Wert von R_E dürfte für das nur mäßige Achievement r_a (Korrelation der Urteile mit den Kriteriumswerten) verantwortlich sein

17.3.2 Ein umfassendes Rahmenmodell des Urteilens

Wahrscheinlichkeiten spielen eine wichtige Rolle für riskante Entscheidungen, weshalb das Heuristics-and-Biases-Programm statistisches Urteilen in den Vordergrund gestellt und psychologische Ideen dazu formuliert hat. Der Philosoph John Locke (1690/1997) hat Urteilen generell als Aktivität „im Zwielicht der Wahrscheinlichkeit“ bezeichnet, wenn definitive Information nicht vorhanden ist. Wenn wir z. B. aus dem Fenster schauen, um abzuschätzen, wie das heutige Wetter wird, sind die Vorhersagen nicht perfekt, aber vermutlich besser als der Zufall. Welche Informationen nutzen wir, und wie beeinflussen sie unsere Urteile? Wie können wir das empirisch untersuchen?

Der österreichisch-amerikanische Psychologe Egon Brunswik (1903–1955) begründete eine sehr einflussreiche allgemeine Charakterisierung des Urteilsprozesses, die als **Linsenmodell** bekannt geworden ist und von ihm zur Untersuchung der Wahrnehmung entwickelt wurde. So ist uns die wahre Größe eines entfernten Objekts z. B. nicht direkt zugänglich, sondern das Wahrnehmungssystem *erschließt* diese aus verschiedenen Hinweisreizen (*cues*), die Auskunft über die Entfernung des Objekts geben (▶ Kap. 2). Brunswiks Schüler Kenneth Hammond (1955) erkannte, dass diese logische Struktur für beliebige Urteilskriterien zutrifft, z. B. klinische Diagnosen, Wahrscheinlichkeitsurteile, Vorhersagen und Lügendetektion. Das in Abb. 17.7 dargestellte Linsenmodell veranschaulicht die Idee anhand einer aktuellen Studie von Pennington und Hall (2014), in der die „Humororientierung“ unbekannter Zielpersonen aus deren Facebook-Profilen geschätzt werden sollte. Die allgemeine Idee des Linsenmodells ist, dass einem Urteilenden das Urteilskriterium Y_E der Umwelt (linke Seite der Linse, hier: die Humororientierung der Zielperson) nicht direkt zugänglich ist. Es muss vielmehr aus Cues X_i erschlossen werden, die damit in Zusammenhang stehen (die eigentliche „Linse“, z. B. die Anzahl der Freunde oder „Likes“ im Facebook-Profil). Diese Cues sagen das Kriterium aber nicht perfekt vorher, sondern stehen nur statistisch damit in Zusammenhang. Die Stärke des Zusammenhangs zwischen einem Cue und dem Kriterium wird als *ökologische Validität* des Cue bezeichnet und kann z. B. als Korrelation oder als Beta-Gewicht einer linearen Regression gemessen werden, sofern eine Stichprobe von Urteilsobjekten mit bekannten Kriteriums- und Cue-Werten vorliegt. Die linke Seite der Linse beschreibt somit, wie gut ein zu beurteilendes Kriterium insgesamt durch die gewählten Cues linear vorhergesagt werden kann (gemessen durch die multiple Korrelation R_E; ▶ Zur Vertiefung 17.5) und wie viel jeder einzelne Cue dazu beiträgt (ökologische Validität des Cue).

Die rechte Seite der Linse ist dagegen ein psychologisches Modell des Beobachters: Es ermittelt, wie stark die Urteile Y_S von den einzelnen Cues beeinflusst werden. Auch diese Einflüsse können als Korrelationen oder Beta-Gewichte gemessen werden und werden als Cue-Nutzung (*cue utilization*) bezeichnet. Sie ermitteln demnach, wie stark jeder Cue für die Urteile des Individuums zurate gezogen wird und damit die subjektive Wichtigkeit dieses Cue.

Die Stärke dieses Rahmenmodells liegt auf der Hand: Es kann nicht nur ermittelt werden, wie stark der Urteiler die Cues gewichtet, sondern diese Gewichtung kann direkt mit den ökologischen Validitäten (also den optimalen Gewichten für diese Umwelt) verglichen werden. Dies ermöglicht es zu erfassen, welchen Cues die Urteiler zu viel oder zu wenig Aufmerksamkeit schenken, um gezielte Trainingsmaßnahmen einzuleiten.

Ein weiteres konkretes Beispiel für dieses hier nur abstrakt beschriebene Vorgehen ist die Studie von Fiedler und Walka (1993) zur *Lügendetektion*, in der Urteiler den Wahrheitsgehalt von Aussagen beurteilen sollten. Dazu erstellten die Autoren 40 kurze Videosequenzen, in denen zu beurteilende Zielpersonen entweder

Zur Vertiefung 17.5

Lineare Gleichungen, multiple lineare Regression und Linsenmodellgleichung

Lineare Gleichung
Eine lineare Gleichung stellt eine formale Beziehung zwischen einer *abhängigen Variablen Y* und einer bis mehreren (*n*) *unabhängigen Variablen* X_i her. Die allgemeine Form einer linearen Gleichung lautet:

$$Y = B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \ldots + B_n \cdot X_n + B_0$$
$$= \left(\sum_{i=1}^{n} B_i \cdot X_i \right) + B_0.$$

Die Koeffizienten B_i sind die Gewichte, mit denen jede der unabhängigen Variablen X_i in den Wert von *Y* eingeht, und B_0 ist der Wert von *Y*, wenn alle X_i den Wert 0 haben (*y*-Achsenabschnitt am Nullpunkt). Die Variablen X_i gehen unabhängig voneinander in die Summe ein.

Multiple lineare Regression
Eine multiple lineare Regression ist ein statistisches Verfahren, das für einen Datensatz mit bekannten Werten der X_i und *Y* die Koeffizienten B_0 und B_i ermittelt (schätzt), die den gesamten Datensatz mittels dieser Gleichung am besten beschreiben (z. B. Sedlmeier und Renkewitz 2013). Sie eignet sich demnach als Methode zur Analyse des Linsenmodells, um die ökologischen Validitäten (Umweltmodell) und die Cue-Nutzungen (Urteilermodell) zu bestimmen. Die multiple Korrelation *R* als Ergebnis einer Regression misst den Zusammenhang der abhängigen Variablen mit allen Prädiktoren X_i.

Linsenmodellgleichung
Eine Analyse mithilfe des Linsenmodells liefert viele Informationen. Insbesondere Hammond et al. (1964) und Tucker (1964) haben durch ihre Formulierung der Linsenmodellgleichung weitere Analysemöglichkeiten eröffnet. Die Korrelation zwischen den wahren Werten Y_E und den Urteilen Y_S wird als Achievement (r_a) bezeichnet und misst die Gesamtgüte der Urteile im Sinne der Übereinstimmung mit den wahren Werten des Kriteriums. Diese hängt ab von der Vorhersagbarkeit des Kriteriums in der Umwelt, gemessen durch seine multiple Korrelation mit den Cues (R_E), der multiplen Korrelation der Cues mit den Urteilen (R_S), auch als Konsistenz der Urteile bezeichnet und letztlich dem Agreement, das ist die Übereinstimmung der Cue-Verwendungen mit den ökologischen Validitäten. Die Passung (Agreement oder auch Match genannt) wird bei Tucker (1964) als *G* bezeichnet und ist die Korrelation der vorhergesagten Werte von Urteilen bzw. Kriterien durch die jeweils geschätzten Regressionsgleichungen. Seine aus den Grundannahmen des Linsenmodells abgeleitete Gleichung lautet:

$$r_a = G R_E R_S + C \sqrt{1 - R_E^2} \sqrt{1 - R_S^2}.$$

Der Term *C* ist hier ein technischer Term, der aus der Korrelation der Regressionsresiduen errechnet wird. Man sieht leicht am ersten Summanden der Gleichung, dass für eine sehr hohe Gesamtleistung (Achievement r_a) sowohl eine hohe Vorhersagbarkeit der Umwelt (R_E) als auch eine hohe Konsistenz des Urteilers (R_S) und eine hohe Übereinstimmung zwischen Umweltmodell und Urteilermodell (*G*) gegeben sein müssen. Schlechte Leistungen können also auf verschiedenen Fehlerquellen beruhen, die man anhand der Gleichung identifizieren kann.

Im Beispiel von Pennington und Hall (2014) ist das Achievement r_a also die Korrelation der selbst eingeschätzten Humororientierung durch die Urheber der Facebook-Profile mit den Beurteilungen durch die Beobachter. R_E ist die Vorhersagbarkeit der selbst eingeschätzten Humororientierung aus den Cues, die aus den Facebook-Profilen extrahiert wurden. R_S misst die Konsistenz, mit der die Urteiler Humor aus den Cues erschließen. *G* ist das Maß für die Übereinstimmung der „objektiven" Cue-Gewichte und der Cue-Nutzung.

gelogene oder wahre Schilderungen von Ereignissen erzählten. Neutrale Beobachter ermittelten danach das Ausmaß, in dem bestimmte nonverbale Cues in den Videos vorhanden waren, z. B. „künstliches Lächeln", „starre Kopfhaltung", „Selbstberührungen" und „erhöhte Stimmlage". (Die Beobachter waren blind für die Versuchsbedingung, d. h., sie wussten nicht, ob ein Video eine wahre oder eine gelogene Geschichte enthielt.) Die Urteilenden schließlich sahen die Videos und beurteilten die Glaubwürdigkeit jeder der präsentierten Geschichten. Zwei Versuchsgruppen unterschieden sich darin, ob ihnen vorher mitgeteilt wurde, auf welche Cues sie achten sollten oder nicht. Eine dritte Gruppe erhielt zusätzlich zu dieser Information auch noch Feedback nach jedem Urteil. Eine *Analyse der Aufgabenumwelt* (Regression des Wahrheitsstatus auf die nonverbalen Cues) zeigte, dass diese eine recht gute Lügendetektion erlaubten (adjustierte multiple Korrelation $R_{adj} = .83$). Eine analoge *Analyse der Urteile* in den drei Gruppen zeigte dagegen, dass die uninformierte Gruppe diese hilfreichen Cues in ihren Urteilen nicht verwendeten ($R_{adj} = 0.00$), während die beiden informierten Gruppen dies taten (jeweils $R_{adj} = .57$). Korreliert man die ermittelten ökologischen Validitäten und Cue-Verwendungen in den drei Gruppen als Maß für die Übereinstimmung des Urteilermodells mit der Umwelt, so gab es kaum Übereinstimmung in der uninformierten Gruppe ($r = .08$), aber deutlich höhere Übereinstimmung in der informierten Gruppe ($r = .67$) und noch höhere in der informierten Gruppe mit Feedback ($r = .90$). Tatsächlich war die uninformierte Gruppe auch am schlechtesten in der Unterscheidung gelogener von wahren Geschichten. In Psychologie übersetzt heißt dies alles, dass die uninformierten Personen offenbar nicht auf die relevanten Cues achteten, wie die mangelnde Passung zwischen Umweltmodell und Cue-Verwendung zeigt. Das führte auch zu weniger Erfolg bei der Lügendetektion. Eine simple Information über die relevanten Cues führte dagegen zu besseren Leistungen und zu einer höheren Übereinstimmung zwischen Umwelt und Cue-Nutzung, besonders wenn sie mit Feedback gepaart war.

Obwohl eine Linsenmodellanalyse also potenziell viele Aspekte zu untersuchen erlaubt, sind schwerpunktmäßig vor allem die *Akkuratheit* menschlicher Urteile (im Sinne des Achievement) sowie das *Urteilermodell* (im Sinne der Cue-Nutzung) im Forschungsfokus gewesen. Zu beiden Themen wollen wir die Befundlage jeweils zusammenfassend schildern.

Die Akkuratheit von Urteilen – Eine heiße Debatte ohne große Konsequenzen

Sollte man die Vorhersage, ob ein Sexualstraftäter rückfällig wird, einem Expertenteam aus Psychiatern und Psychologen überlassen, das den Straftäter in einem Behandlungsprogramm ausgiebig beobachten konnte? Oder sollte man lieber einer linearen Gleichung vertrauen, die unterschiedliche Prädiktoren (Anzahl vorheriger Straftaten, Alter, IQ, einen Persönlichkeitsfragebogen) gewichtet und verrechnet? Nach einer Vergleichsstudie von Hall (1988) ist die Antwort klar: Während die Prognosen der Glei-

chung zu 92 % korrekt waren, kam das Expertenteam knapp über das Zufallsniveau mit 53 %. (Die Zahlen sind aus der Publikation exemplarisch für die Kategorie „erneute sexuelle Straftaten gegen Erwachsene“ aus Treffern und korrekten Zurückweisungen rückgerechnet; Hall 1988, S. 774.) Dabei standen den Experten zusätzlich zu ihren Beobachtungen die „objektiven“ Prädiktoren ebenfalls zur Verfügung. Ähnliche Ergebnisse zugunsten mathematischer Modelle ergaben sich für so unterschiedliche Bereiche wie medizinische Diagnosen verschiedenster Art, Prognosen von Selbstmordversuchen, akademischen oder beruflichen Erfolg, Verkaufszahlen und vieles andere mehr.

Schon im Jahr 1954 publizierte Paul E. Meehl ein aufsehenerregendes Buch, das von vielen Psychologen als Nestbeschmutzung angesehen wurde: Darin zeigte er anhand von 20 Studien, dass sogenannte *klinische Urteile* in der Psychologie (damit bezeichnet er Expertenurteile generell) besser durch ein statistisches Modell gefällt werden sollten als durch menschliche Urteiler, selbst wenn es sich um Experten handelt. In Termini des Linsenmodells heißt das, dass das Achievement r_a fast immer deutlich geringer ausfällt als die Vorhersagbarkeit des Kriteriums aus den Cues R_E. Empörte Kritiker verurteilten die Verwendung „mechanischer statistischer Methoden“ im klinischen Urteil, da sie dem Einzelfall nicht gerecht würden. Tatsächlich hat aber eine Fülle von nachfolgenden Untersuchungen auch in anderen Urteilsdomänen als der Psychologie (z. B. Finanzmarkt, Medizin, Ökonomie) den grundsätzlichen Befund Meehls bestätigt. Zum Beispiel trugen Grove et al. (2000) 136 Studien zusammen und fanden, dass in 64 Studien das statistische Modell klar besser war als die Expertenurteile; in weiteren 64 Studien wurde bei wohlwollender Betrachtung ein Gleichstand attestiert, und nur in acht Studien waren die Experten besser in den Vorhersagen als eine lineare Gleichung. Hastie und Dawes (2001, S. 62f.) schlussfolgern: „Whenever possible, human judges should be replaced by simple linear models.“ Die Unterlegenheit von Expertenurteilen gegenüber statistischen Modellen kann nach 60 Jahren Diskussion als gesichertes Faktum gelten, das aber erstaunlich wenig Einfluss auf die gängige Praxis und die allgemeine Expertengläubigkeit hatte. Einschränkend muss lediglich festgehalten werden, dass die Anwendung statistischer Modelle eine ausreichend große Stichprobe von Fällen zur Erstellung des Modells voraussetzt.

Was sind nun aber die Gründe für das schlechte Abschneiden der menschlichen Urteiler? Dawes et al. (1989) nennen als wichtigste mögliche Gründe eine fehlende Passung (G) zwischen Umwelt- und Urteilermodell aufgrund schlechter Lernbedingungen sowie eine mangelnde Konsistenz der Urteiler ($R_S < 1$). Tatsächlich zeigen mehrere Überblicksarbeiten und Metaanalysen, dass die Urteiler keine perfekte Konsistenz aufweisen (Brehmer und Brehmer 1988; Karelaia und Hogarth 2008; Kaufmann et al. 2013). Das heißt, die Probanden kommen bei mehrmaliger Konfrontation mit demselben Cue-Muster bzw. Urteilsobjekt nicht immer zu demselben Urteil. Hier hat ein „mechanisches statistisches Vorgehen“ natürlich den Vorteil, dass es diese unsystematischen Fehler nicht begeht. Man kann dies mit der sogenannten Bootstrapping-Methode zeigen: Ermittelt man die Cue-Verwendungskoeffizienten aus den Urteilen eines Experten (rechte Seite des Linsenmodells) und verwendet diese Gewichte wieder zur Vorhersage des Kriteriums, dann eliminiert man die Inkonsistenz. Tatsächlich korrelieren diese „idealen“ Urteile einer Person meist höher mit dem Kriterium als ihre tatsächlichen Urteile (Karelaia und Hogarth 2008; Kaufmann et al. 2013).

Der Urteilsprozess

Newell et al. (2007b) identifizieren vier Probleme, die ein Urteiler typischerweise lösen muss:

1. Er muss die relevante Cue-Information identifizieren („Welche Informationen sind relevant für meine Wettervorhersage?“).
2. Er muss sich diese Informationen beschaffen (aus dem Fenster sehen, Wetterbericht googeln).
3. Er muss die Information integrieren bzw. kombinieren (z. B. positiven Wetterbericht gegen wolkigen Himmel abwägen).
4. Er sollte aus Feedback lernen („Kann ich dem Wetterbericht mehr trauen als meiner Himmelsbeobachtung?“).

Die Urteilerseite des Linsenmodells ist potentiell dazu geeignet, neben der Akkuratheit auch andere psychologische Aspekte des Urteilens zu untersuchen, wie z. B. die Konsistenz, die relative Cue-Verwendung oder die Passung G. Solche Regressionsanalysen werden als Strategieerfassung (*policy capturing*) bezeichnet und sind zur Untersuchung der oben genannten Aspekte verwendet worden. Mit der Informationsbeschaffung und -integration werden wir uns im Abschnitt 17.4 beschäftigen.

Identifizieren relevanter Information und Lernen aus Feedback Zur Untersuchung der Teilprozesse wird häufig die experimentelle Prozedur Multiple-Cue Probability Learning (MCPL; ▶ Zur Vertiefung 17.6) verwendet. Hier präsentiert der Versuchsleiter Cue-Informationen, die die Versuchsperson zur Vorhersage eines Kriteriums nutzen kann. Über viele Urteilsdurchgänge hinweg erhält die Versuchsperson dann jeweils Feedback über den wahren Kriteriumswert und kann so ihre Urteilsstrategie anpassen.

Zum Beispiel verwendete Klayman (1988) im MCPL-Paradigma eine abstrakte geometrische Aufgabe, in der die Versuchspersonen die Bewegungsdistanz eines Punktes auf dem Computerbildschirm vorhersagen sollten. Diese hing von der Größe, der Form, der Lage und der relativen Distanz zu einer geometrischen Figur sowie weiteren Cues im Display ab. Nur Größe und Form wurden explizit als Cues genannt, die anderen waren „implizit“ und mussten aus dem Feedback gelernt werden. Da die künstliche Umweltstruktur vom Experimentator generiert wurde, konnte keine der Versuchspersonen Vorwissen über die ökologischen Validitäten der Cues haben. Klayman (1988) fand, dass die Urteile während einer sehr langen Trainingsphase besser wurden und auch die impliziten Cues zunehmend als relevant entdeckt wurden, was sich in der über die Lernphase wachsenden Cue-Verwendung ausdrückte. Der Lernprozess fiel noch erfolgreicher aus, wenn die Versuchspersonen aktiv experimentieren konnten, d. h., sie platzierten die geometrischen Figuren selbst auf dem Bildschirm und beobachteten das Feedback (Experiment 2). Dieser Erfolg des „Hypothesentestens“ spricht dafür, dass die Versuchspersonen versuchen, ein *mentales Modell* der Aufgabe zu konstruieren. Das ist auch kompatibel mit Befunden, die zeigen, dass die *se-*

Zur Vertiefung 17.6

Multiple-Cue Probability Learning

Das Grundprinzip des MCPL besteht darin, der Versuchsperson Cue-Informationen darzubieten, mit denen sie ein Kriterium vorhersagen/schätzen soll. Dabei weiß die Versuchsperson zunächst nicht, wie der Zusammenhang zwischen Cues und Kriterium ist. Sie erhält aber nach jeder Schätzung Feedback über den wahren Kriteriumswert und kann so im Prinzip über viele Durchgänge hinweg die ökologischen Validitäten der Cues erlernen. Der Forscher kann beliebige Umweltstrukturen realisieren und deren Auswirkung auf das Cue-Lernen ermitteln.

Ein einfaches Beispiel ist die abstrakte *Wettervorhersageaufgabe* von Knowlton et al. (1994): In jedem Durchgang sahen die Versuchspersonen eine bis vier unterschiedliche Spielkarten und sollten vorhersagen, ob „Regen" oder „Sonne" für dieses Muster wahrscheinlicher ist. Nach jeder Vorhersage erhielten die Versuchspersonen Feedback über den „wahren" Ausgang. Knowlton et al. (1994) verglichen Amnestiker und Kontrollprobanden und stellten gleich gute Lernerfolge in den ersten 50 Durchgängen fest, später wurden die Amnestiker aber von den gesunden Probanden überholt. Auch fielen explizite Urteile der Amnestiker über die ökologische Validität der einzelnen Cues (Karten) schlechter aus als die der gesunden Probanden. Knowlton et al. (1994) interpretierten das als Beleg für die Beteiligung eines impliziten und eines expliziten Lernprozesses. Der implizite steht beiden Gruppen zur Verfügung, der explizite ist bei den Amnestikern jedoch beeinträchtigt (kritisch dazu vgl. Newell et al. 2007b).

Als experimentelle Methode ist MCPL genauso flexibel auf verschiedenste Inhalte anwendbar wie das Linsenmodell als theoretischer Rahmen. Weitere Beispiele inhaltlicher Einkleidung zeigt ◘ Tab. 17.7.

◘ **Tab. 17.7** Beispiele für Urteilskriterien und Cues, die in MCPL-Aufgaben verwendet wurden

Urteilskriterium	Cues	Studie
Wettervorhersage (Regen vs. Sonne)	Abstrakte Symbole auf Karten	Knowlton et al. (1994)
Schwere einer Erkrankung	Symptome	Gluck und Bower (1988), Persson und Rieskamp (2009)
Giftigkeit hypothetischer Käfer	Beinlänge, Rückenfärbung, Fühlergröße, Mundwerkzeuge etc.	Juslin et al. (2003); Bergert und Nosofsky (2007)
CO_2-Ausstoß von Unternehmen	Transportmittel, Verpackung; Energieart etc.	Platzer und Bröder (2013)

mantische Einkleidung der Aufgabe den Lernerfolg beeinflusst: Legen die Bezeichnungen der Cues eine plausible Verbindung mit dem Kriterium nahe, werden sie leichter gelernt als neutral bezeichnete Cues oder gar unplausible Verbindungen (Adelman 1981; Miller 1971; Muchinsky und Dudycha 1975). Auch Vorannahmen über *kausale* Zusammenhänge zwischen Cues und Kriterien beeinflussen den Lernerfolg (Lagnado und Sloman 2004; Hagmayer 2010).

Bezüglich des Lernens durch Feedback kam Brehmer (1980) in einer Übersichtsarbeit zu der Schlussfolgerung, dass dieses sehr ineffizient ist und nur bei recht einfachen Umwelten sowie langen Serien von Lerndurchgängen funktioniert. Deutlich bessere Ergebnisse erzielt man mit sogenanntem *kognitiven Feedback*, bei dem nicht nur der Kriteriumswert zurückgemeldet wird, sondern zusätzliche Informationen über die Struktur der Aufgabe, z. B. die Richtung der Cue-Kriterium-Zusammenhänge, oder die Abweichungen zwischen ökologischen Validitäten und Cue-Verwendung (Balzer et al. 1989).

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass MCPL-Studien Auskunft darüber geben, wie Expertise erworben wird: Versuchspersonen lernen aus Feedback, aber eher langsam und nur in wenig komplexen Umwelten. Werden sie aber mit einem sinnvollen mentalen Modell der Aufgabe versehen (semantische Einkleidung, kausale Hypothesen, kognitives Feedback), erfolgt das Lernen deutlich effizienter. Zu bedenken ist jedoch, dass in einer MCPL-Studie ideale Bedingungen für das Lernen herrschen, die für reale Urteile oft nicht gegeben sind. So erhält ein Personalmanager typischerweise kein Feedback über den Erfolg abgelehnter Bewerber oder ein Arzt kein Feedback über die Korrektheit seiner Diagnose. Hogarth (2001) spricht hier von „bösartigen" Umwelten, die das Lernen optimaler Cue-Nutzung erschweren.

Integration der Information Gemäß einer Übersicht der Forschung aus drei Jahrzehnten konstatieren Brehmer und Brehmer (1988) folgende generalisierbaren Ergebnisse aus Policy-Capturing-Studien:

- Ein lineares Modell beschreibt die Urteile typischerweise sehr gut (R_S ist hoch).
- Die Urteiler sind nicht perfekt konsistent ($R_S < 1$).
- Es gibt große interindividuelle Unterschiede in fast allen Variablen (Anzahl und Gewichtung verwendeter Cues, Achievement und Konsistenz).

Die gute Passung eines linearen Modells ist vielfach als Zeichen für **kompensatorisches** Urteilen angesehen worden (Brehmer 1994; Einhorn et al. 1979). Kompensatorisch sind Urteilsstrategien dann, wenn z. B. schlechte Werte auf einem Cue durch gute Werte auf anderen Cues ausgeglichen (kompensiert) werden können. Wir mögen einen Bewerber für einen Arbeitsplatz beispielsweise als geeignet beurteilen, wenn er zwar schlechte Schulzeugnisse hat, aber über viel Erfahrung verfügt und fließend eine Fremdsprache spricht. Von **nichtkompensatorischen** Urteilen und Entscheidungen spricht man dagegen, wenn der Einfluss eines Cue nicht durch andere Cues überboten werden kann. Die kompensatorische Verrechnung und Gewichtung von Cues ist Bestandteil einer linearen Gleichung, und es liegt nahe,

deren gute Passung als Indikator kompensatorischen Urteilens zu sehen (vgl. aber die Kritik von Bröder 2000a). Ob Menschen eher kompensatorisch oder nichtkompensatorisch entscheiden, wird uns in ▶ Abschn. 17.4 weiter beschäftigen.

Zudem zeigt die gute Passung des linearen Modells, dass zusätzliche nichtlineare Zusammenhänge oder Interaktionen zwischen Cues in den Urteilen kaum eine Rolle spielen und die Versuchspersonen sich auf eine lineare Verrechnung beschränken. Dementsprechend sind Umwelten mit nichtlinearen Cue-Kriterium-Zusammenhängen auch deutlich schwerer zu lernen (Juslin et al. 2003; Karelaia und Hogarth 2008). Die Anzahl der verwendeten Cues schwankt zwischen Untersuchungen und innerhalb von Studien auch zwischen Versuchspersonen. Mit der Anzahl relevanter Cues reduziert sich die Konsistenz der Urteile (Karelaia und Hogarth 2008), was auf die höhere kognitive Belastung bei der Verarbeitung größerer Informationsmengen zurückzuführen sein mag.

▪ Kritische Würdigung

Das Linsenmodell ist als Rahmenkonzeption des Urteilens äußerst nützlich, und die damit verbundenen regressionsanalytischen Auswertungsmethoden erfassen interessante psychologische Aspekte (Achievement, Passung, Cue-Verwendung). Dadurch können psychologische Einflüsse auf Teile des Urteilsprozesses empirisch untersucht werden. Die oben genannten Befunde zeigen, wie die Methoden fruchtbar sowohl im Labor (MCPL-Paradigma) als auch in angewandten Kontexten (Analyse von Expertenurteilen) eingesetzt werden können. Menschen identifizieren demnach relevante Cues und lernen durch kognitives Feedback, wenn dieses die Ausbildung eines adäquaten mentalen Modells begünstigt. Dies gilt allerdings nur für Umwelten, die sich durch lineare Zusammenhänge zwischen Cues und Kriterien gut beschreiben lassen.

Zur guten Passung des linearen Modells konstatiert Brehmer (1994, S. 137) allerdings etwas enttäuscht: „Despite the wealth of studies showing that such models fit judgement data quite well, there has, however, been little progress in our theoretical understanding of the psychological processes that produce these data." Schon Hoffman (1960) hatte festgestellt, dass lineare Gleichungen den Urteilsprozess nur „paramorph" abbilden, d. h., sie beschreiben den formalen Zusammenhang zwischen Cues und Urteilen, ohne jedoch die „dahinter" liegenden Verarbeitungsprozesse genauer zu spezifizieren. In der Analyse einzelner Komponenten – wie Passung und Cue-Verwendung – gehen paramorphe Modelle zwar über die in ▶ Abschn. 17.2 behandelten Strukturmodelle hinaus, einzelne Verarbeitungsprozesse wie Gedächtnisabruf oder Aufmerksamkeitslenkung bleiben aber ausgespart. Diese Prozesse sind Gegenstand der Prozessmodelle, die wir in ▶ Abschn. 17.4 genauer beschreiben.

17.4 Kognitive Prozessmodelle des Urteilens und Entscheidens

17.4.1 Was ist ein Prozessmodell?

Das Linsenmodell bildet ab, welche Cues in Urteilen genutzt werden, und erlaubt die Untersuchung verschiedener psychologischer Variablen. Die in ▶ Abschn. 17.3.1 vorgestellten Heuristiken formulieren psychologische Prinzipien wie „Repräsentativität" und „Verfügbarkeit", die Urteile beeinflussen. Beide Ansätze stellen nützliche Beschreibungen und Erklärungen zur Verfügung, ohne jedoch den zugrunde liegenden kognitiven Prozess im Detail zu beschreiben – so bleibt beispielsweise im Linsenmodell offen, *wie* Urteilende zu einer bestimmten Cue-Nutzung kommen. Gigerenzer (1996) hat die Heuristiken des Heuristics-and-Biases-Programms als zu vage für eine wissenschaftliche Erklärung der Phänomene kritisiert. Er plädiert für falsifizierbare Prozessmodelle, die genauere Annahmen über die Suche nach Information, deren Repräsentation im Gedächtnis (▶ Kap. 12) und deren Integration beinhalten.

Eine einheitliche Definition von **Prozessmodellen** scheint es bislang nicht zu geben, aber die folgende Charakterisierung scheint uns für die meisten aktuellen Ansätze zuzutreffen: Einen *kognitiven Prozess* definieren wir hier als einen Schritt in der Informationsverarbeitung, z. B. die Wahrnehmung, Encodierung, Speicherung, den Abruf, die Transformation oder Integration von Information. Beispiele haben wir mit den von Johnson und Payne (1985) postulierten elementaren Informationsverarbeitungsprozessen in ◘ Tab. 17.1 bereits genannt. Natürlich kann man solche „Prozesse" anhand noch kleinerer Teilprozesse (z. B. neuronale) beschreiben! Die Detailliertheit eines Prozessmodells hängt von der Zielsetzung ab, mit der ich es verwende. Ein Prozessmodell beschreibt Hypothesen über Verarbeitungsschritte und deren Zusammenwirken. Dabei generiert es günstigstenfalls auch neue empirische Vorhersagen, z. B. über Reaktionszeiten, die Aufmerksamkeitslenkung oder die Reihenfolge von Suchvorgängen. Zudem sind viele (aber nicht alle) Prozessmodelle in einer formalen Sprache beschreibbar, d. h., sie sind als mathematische Modelle oder Computerprogramme implementiert.

17.4.2 Der adaptive Entscheider und seine „Werkzeugkiste"

Menschliches Entscheidungs- und Urteilsverhalten wird von vielen Faktoren beeinflusst, z. B. der Komplexität des Problems (▶ Kap. 16), der zur Verfügung stehenden Zeit, der Motivation (▶ Kap. 8) und vieles mehr (s. unten). Eine sehr einflussreiche Idee zur Erklärung dieser Verhaltensvariabilität ist, dass uns eine Reihe verschiedener Strategien zur Verfügung stehen, aus denen wir die jeweils angemessenste wählen (z. B. Beach und Mitchell 1978; Svenson 1979). Die Strategien können optimal sein in dem Sinn, dass sie zur „besten" Lösung aufgrund der gegebenen Information führen. Solche Strategien verarbeiten alle verfügbare Information und sind somit informationsreich und komplex. Es gibt aber auch heuristische Strategien, die den Entscheidungsprozess vereinfachen, indem sie vermeintlich unwichtigere Information ignorieren oder die Informationsintegration vereinfachen.

▪ Kompensatorische Entscheidungsstrategien

Wir illustrieren dies anhand der inzwischen „klassischen" Städtevergleichsaufgabe (Gigerenzer und Goldstein 1996): „Welche Stadt hat mehr Einwohner: Freiburg oder Kiel?" (Dies ist eine Inferenz- bzw. Urteilsaufgabe, aber analoge Überlegungen kön-

Tab. 17.8 Cue-Werte und Cue-Validitäten (Stand: 2005) für den Städtevergleich. Die Validitäten sind hier die bedingten Wahrscheinlichkeiten, dass der Cue in die richtige Richtung zeigt, wenn er differenziert. (Bezogen auf alle Städte aus dem Datensatz von Gigerenzer und Goldstein 1996)

Cue	Ökologische Validität	Kiel	Freiburg
Intercity-Bahnhof	.83	+	+
Erstliga-Fußballmannschaft	.79	–	+
Landeshauptstadt	.75	+	–
Universität	.74	+	+
Gewichtete Summe*		.83 + 0 + .75 + .74 = 2.32	.83 + .79 + 0 + .74 = 2.36
Ungewichtete Summe		1 + 0 + 1 + 1 = 3	1 + 1 + 0 + 1 = 3

* Wenn die Validität wie bei Gigerenzer und Goldstein (1996) als bedingte Wahrscheinlichkeit einer korrekten Antwort definiert ist, sollten die Gewichte durch v-.50 korrigiert werden, damit Cues ohne Vorhersagekraft (v = .50) kein Gewicht erhalten. Die entsprechend korrigierten gewichteten Summen im Beispiel sind somit
Kiel: .33 + 0 + .25 + .24 = .82
Freiburg: .33 + .29 + 0 + .24 = .86

nen auch für Präferenzentscheidungen angestellt werden; Payne et al. 1993.) Wenn Sie die Antwort nicht wissen, ziehen Sie vermutlich Cue-Wissen zurate, das Sie über die beiden Städte haben, beispielsweise, dass Freiburg einen Fußballclub in der ersten Bundesliga hat (Spielzeit 2014/2015), Kiel dagegen nicht. Kiel ist aber eine Landeshauptstadt, Freiburg nicht. Beide Städte haben Universitäten und Bahnhöfe mit Intercity-Anschluss. Diese Cues haben bestimmte *ökologischen Validitäten*, d. h., sie sprechen unterschiedlich stark für die Einwohnerzahl einer Stadt. Nehmen wir an, Sie kennen die Validitäten; dann kann die Urteilssituation wie in Tab. 17.8 repräsentiert werden.

Eine *gewichtete additive Regel* (*weighted additive rule*, WADD) wird häufig als optimal angesehen: WADD gewichtet jeden Cue mit seiner Validität und bildet für jede Option die gewichtete Summe über die Cues; die Option mit der höheren gewichteten Summe wird gewählt. „Optimal" ist dieses Vorgehen nur, wenn es sich bei den Validitätsmaßen um Regressionsgewichte handelt und die Cues unkorreliert sind. Approximativ wird WADD aber auch oft als quasirationale Strategie angesehen, wenn diese Bedingungen nicht streng erfüllt sind. Es werden alle potenziell entscheidungsrelevanten Informationen berücksichtigt. Als Prozessmodell beinhaltet WADD eine *Suchregel* („Suche nach Cue- und Validitätsinformation"), eine *Stoppregel* („Suche, bis alle Informationen gefunden sind") und eine *Entscheidungsregel* („Wähle die Option mit der höheren gewichteten Summe"). Die so charakterisierte WADD-Regel sagt Wahlen und die Suchrichtung für Cues vorher (optionsweise = Suche von Cues innerhalb jeder Option). Sie ist prinzipiell kompensatorisch, da negative Werte auf einem Cue durch positive Werte auf anderen Cues „überstimmt" werden können. Sie ist aber auch als psychologisch nicht plausibel charakterisiert worden, weil sie volle Informiertheit und beliebige Zeit zur Informationssuche und -integration voraussetzt (Gigerenzer und Goldstein 1996).

Gegenüber dieser quasioptimalen Strategie sind diverse Vereinfachungen möglich. Sogenannte *heuristische Strategien* oder *Heuristiken* reduzieren den Informations- und Verarbeitungsbedarf. Eine vereinfachte kompensatorische Strategie ist die *Gleichgewichtungsregel* (*equal weights rule*, EQW), bei der die Cue-Werte pro Option einfach aufsummiert werden, ohne sie unterschiedlich zu gewichten. Im Beispiel sprechen je drei Cues für jede Option, sodass die Gleichgewichtungsregel raten müsste. Wie WADD ist auch die Gleichgewichtungsregel kompensatorisch und nutzt alle Informationen über Cue-Werte, sie ist aber hinsichtlich der Informationsintegration einfacher.

Beide genannten Strategien sind analog auch für Präferenzentscheidungen definiert. Bei Lotterien entsprechen die Outcomes den Cue-Werten und die Wahrscheinlichkeiten den Validitäten. Bei Multi-Attribut-Entscheidungen entsprechen die Nutzenwerte der Attribute den Cue-Werten und subjektive Wichtigkeiten der Attribute den Cue-Validitäten.

Nichtkompensatorische Entscheidungsstrategien

Nichtkompensatorische Regeln zeichnen sich dadurch aus, dass sie Teile der potenziell relevanten Cue- bzw. Attributinformation ignorieren. Für Präferenzentscheidungen sind viele Regeln beschrieben worden (umfassende Aufzählung in Svenson 1979). Wir beschränken uns hier auf zwei viel diskutierte Heuristiken, die von Gigerenzer et al. (1999) vorgeschlagen wurden: die *Rekognitionsheuristik* und die *Take-the-Best-Heuristik* (TTB-Heuristik). Beide sind der Darstellung in Gigerenzer und Goldstein (1996) folgend in Abb. 17.8 veranschaulicht.

Die Rekognitionsheuristik nutzt einen sehr einfachen Cue, nämlich die *Wiedererkennung* der Optionen. Wenn man Versuchspersonen fragte, welche von zwei englischen Städten, z. B. Birmingham oder Stockport, mehr Einwohner habe, würden die meisten wohl „Birmingham" antworten, obwohl sie von Stockport noch nie gehört haben. Goldstein und Gigerenzer (2002) würden sogar argumentieren, dass Menschen dies tun, gerade *weil* sie von Stockport noch nie gehört haben, von Birmingham aber schon. Die Autoren beschreiben dies als ökologisch rationale Strategie, weil die Wahrscheinlichkeit der Rekognition eines Stadtnamens hoch mit ihrer Größe korreliert ist. Je größer eine Stadt ist, desto häufiger wird sie vermutlich in verschiedensten Medien genannt (*ökologische Korrelation*), und diese Nennungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Wiedererkennung (*Ersatzkorrelation*). Es resultiert eine hohe Validität der Wiedererkennung für die Beurteilung der Einwohnerzahl (Abb. 17.9). Tatsächlich ist dies in vielen anderen Urteilsumwelten – wie Flusslängen oder Berghö-

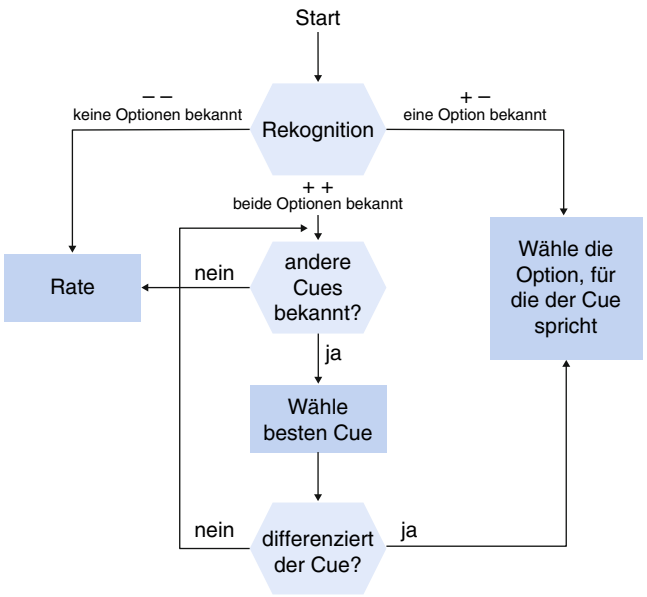


Abb. 17.8 Ablaufschema der Rekognitionsheuristik und der Take-the-Best-Heuristik. (In Anlehnung an Gigerenzer und Goldstein 1996)

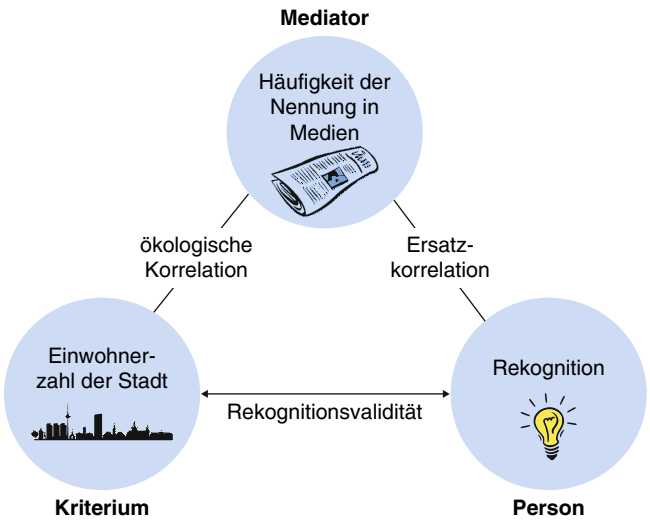


Abb. 17.9 Begründung für die hohe Validität der Rekognition in der Städtevergleichsaufgabe. (Nach Goldstein und Gigerenzer 2002)

hen (Pohl 2006), dem Erfolg von Sportlern, Musikern und Firmen (Hertwig et al. 2008b) oder der Prävalenz von Infektionskrankheiten (Pachur und Hertwig 2006) – ebenso der Fall.

Goldstein und Gigerenzer (2002, S. 88) postulieren, dass in Umwelten mit Rekognitionsvalidität über Zufallsniveau keine weitere Information gesucht wird, sofern ein bekanntes und ein unbekanntes Objekt vorliegen (für die unbekannte Option liegt ohnehin per definitionem keine Cue-Information vor). Im Fall zweier unbekannter Objekte (Stockford oder Hudderfield) muss ohnehin geraten werden. Insofern ist die Rekognitionsheuristik strikt nonkompensatorisch und extrem einfach (*frugal*) in ihrem Informationsbedarf, da sie neben der Wiedererkennung kein weiteres Wissen nutzt.

Im Unterschied zur Rekognitionsheuristik basiert TTB auf Cue-Wissen, das aktiviert wird, wenn beide Optionen bekannt sind (der Rekognitions-Cue also nicht differenziert) wie in unserem Beispiel Freiburg vs. Kiel. Beide Städtenamen dürften den meisten deutschen Lesern bekannt sein. Anders als die kompensatorischen Strategien sucht TTB nicht nach allen Informationen. Ein TTB-Verwender folgt der *Suchregel*, Cues in der Reihenfolge ihrer Validität abzurufen. Die *Stoppregel* besagt, dass die Suche abgebrochen wird, sobald ein differenzierender Cue gefunden ist; die *Entscheidungsregel* nimmt die Option, die der Cue favorisiert. Im Beispiel aus Tab. 17.8 würde ein TTB-Verwender zunächst prüfen, welche der Städte einen IC-Anschluss haben (validester Cue). Dieser Cue differenziert nicht, und der nächstbeste muss inspiziert werden (Erstligamannschaft). Hier kann Freiburg in der aktuellen Spielzeit 2014/2015 punkten, Kiel jedoch nicht. Die Informationssuche wird abgebrochen und „Freiburg" gewählt.

Gigerenzer et al. (1999) und andere haben noch weitere einfache Heuristiken vorgeschlagen, für die unterschiedlich viel und unterschiedlich positive empirische Evidenz vorliegt. Am meisten Forschung liegt zu TTB und auch zur Rekognitionsheuristik (▶ Zur Vertiefung 17.7) vor, und für beide gibt es gemischt positive Evidenz: Das heißt, beide Heuristiken scheinen unter bestimmten Bedingungen mindestens von einem beachtlichen Anteil der Versuchspersonen verwendet zu werden (▶ Abschn. 17.4.4). Dagegen ließ sich für z. B. für QuickEst – eine Strategie zur Einschätzung von quantitativen Größen – bei experimentellen Tests bislang keine Evidenz finden (Hausmann et al. 2007; von Helversen und Rieskamp 2008). Auch zur Prioritätsheuristik für Risikoentscheidungen (Brandstätter et al. 2006) liegt einige negative Evidenz vor (z. B. Birnbaum 2008; Fiedler 2010; Glöckner und Betsch 2008a; Hilbig 2008; Rieskamp 2008). Auch einige zentrale Annahmen der *Fluency-Heuristik* (Schooler und Hertwig 2005), die Urteile anhand der Geschwindigkeit der Rekognition fällt, wurden empirisch widerlegt (Hilbig 2010; Hilbig et al. 2011). Für wieder andere Strategien, wie die *Minimalist-Heuristik*, die Cues nicht nach Validität, sondern zufällig auswählt, liegen bislang keine empirischen Untersuchungen vor.

Ein großer Teil der Forschung hat sich auf kompensatorisches vs. nichtkompensatorisches Entscheiden konzentriert. Darüber wird in ▶ Abschn. 17.4.4 mehr berichtet. In neuerer Zeit sind jedoch auch andere kognitive Modelle vorgeschlagen worden, die wir zuvor kurz charakterisieren wollen.

17.4.3 Andere kognitive Mechanismen

Die bislang in diesem Abschnitt berichteten Strategien und Heuristiken sind insofern Prozessmodelle, als sie relativ detaillierte Aussagen über die einzelnen Verarbeitungsschritte machen, die zwischen Aufgabenstellung und Wahl postuliert werden. Häufig erlauben diese Prozessannahmen dann nicht nur empirische Vorhersagen über die letztlich gewählte Option, sondern auch über andere Aspekte des Verhaltens, z. B. die Suchrichtung und -menge in einer MouseLab-Informationstafel oder über Reaktionszeiten für verschiedene Entscheidungsdurchgänge. Zum Beispiel sagt TTB für Entscheidungen aus dem Gedächtnis umso längere Reaktionszeiten vorher, je niedriger der beste differenzierende Cue in der Hierarchie verfügbarer Cues steht, da in diesem Fall mehr Cues abgerufen werden müssen. Aus den

Zur Vertiefung 17.7

Forschung zur Rekognitionsheuristik

Die Hypothese, dass Menschen die Rekognitionsheuristik nutzen, wenn sie ökologisch valide ist, hat eine starke Kontroverse ausgelöst und viel Forschung angeregt, was sich in alleine drei Sonderheften der Zeitschrift *Judgment and Decision Making* in den Jahrgängen 2010 und 2011 zu dieser Heuristik zeigt. Verwenden Menschen wirklich ihre eigene Wiedererkennung als Cue für Urteile? Und tun sie dies nichtkompenstatorisch bzw. unter Ignorierung weiterer Informationen?

Erste Untersuchungen zeigten, dass Urteiler tatsächlich sehr häufig (in bis zu 90 % aller möglichen Fälle) das wiedererkannte von zwei Objekten wählten (sofern nur eines bekannt war), wie es die Rekognitionsheuristik vorhersagt (z. B. Goldstein und Gigerenzer 2002). Dies ist jedoch undiagnostisch, da die Berücksichtigung weiterer Cue-Information (über das bekannte Objekt) meist zu denselben Vorhersagen führen würde (Hilbig 2010). Strengere Tests stellten die nichtkompensatorische Verwendung der Rekognitionsheuristik wiederholt infrage. Oppenheimer (2003) ließ Versuchspersonen zwischen unbekannten chinesischen Städten (erfundene Namen) und kleinen bekannten Städten wählen und fand, dass die Versuchspersonen nicht der Rekognitionsheuristik folgten. Hilbig und Pohl (2008) zeigten, dass der Anteil mit der Rekoginitionsheuristik kompatibler Wahlen für korrekte Antworten *höher* war – und solche Wahlen mit kürzeren Reaktionszeiten einhergehen (Hilbig und Pohl 2009) – als für falsche Antworten. Dies impliziert, dass der Rekognition-Cue nicht allein ausschlaggebend gewesen sein kann, wie von der Rekognitionsheuristik postuliert. Auch die explizite Verfügbarkeit weiterer Cue-Information beeinflusste die Wahlen in mehreren Studien (z. B. Bröder und Eichler 2006; Glöckner und Bröder 2014; Newell und Fernandez 2006; Pachur et al. 2008; Richter und Späth 2006). Die zweite Frage nach der nichtkompensatorischen Anwendung der Rekognitionsheuristik – im Sinne einer generellen alleinigen Berücksichtigung des Rekognitions-Cue – muss demnach wohl für viele Versuchspersonen verneint werden (Hilbig et al. 2010; Hilbig und Richter 2011): Wenn zusätzliche Cue-Information zur Verfügung steht, wird sie nicht grundsätzlich ignoriert.

Die Frage nach der Verwendung des Rekognitions-Cue in Urteilen kann dagegen bejaht werden: Er hatte in allen Untersuchungen einen großen Einfluss auf die Wahlen, wenn er valide war. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, handelt es sich bei diesem Cue doch nicht um einen objektiven Hinweisreiz in der Umwelt, sondern um eine *metakognitive* Information, die zudem adaptiv verwendet wird (nämlich nur, wenn sie valide ist; Gigerenzer und Goldstein 2011; Hilbig et al. 2010; Pohl 2006). Dies zeigt, wie flexibel Menschen jede nützliche Informationen für Urteile nutzen.

kompensatorischen Strategien folgt diese Vorhersage nicht, da sie ohnehin alle Cues abrufen. Tatsächlich ist inzwischen mehrfach gezeigt worden, dass die jeweiligen Reaktionszeitvorhersagen für Personen zutrafen, die aufgrund ihrer getroffenen Wahlen einer der Strategien zugeordnet wurden, woduch die Prozessannahmen gestützt werden (Bröder und Gaissmaier 2007; Khader et al. 2011; Renkewitz und Jahn 2012). Keine der vorgeschlagenen Heuristiken entspringt aber etablierten kognitiven Theorien (so war beispielsweise die Rekognitionsheuristik lange vollkommen losgelöst von Modellen zum Rekognitionsgedächtnis (▶ Kap. 12); Castela et al. 2014; Dougherty et al. 2008; Erdfelder et al. 2011; Pleskac 2007), die für andere Anwendungsbereiche vorgeschlagen wurden. Dies ist anders für die drei folgenden Modellklassen, die wir kurz vorstellen wollen und die aus anderen Bereichen der Kognitiven Psychologie übernommen wurden.

Exemplarbasiertes Urteilen

Die oben genannten Strategien formulieren *Regeln*, wie die einzelnen Cues gesucht und kombiniert werden. Dafür ist es aber für die Versuchsperson je nach Strategie notwendig, die Richtung des Zusammenhangs zwischen Cue und Kriterium sowie die Cue-Validitäten zu wissen. Diese sind aber möglicherweise nicht immer bekannt. Stellen Sie sich z. B. vor, Sie sind ein Insektenforscher und kennen eine Reihe tropischer Käfer sowie den Grad ihrer Giftigkeit. Manche sind sehr giftig, andere weniger, wieder andere gar nicht. Darüber hinaus unterscheiden sich die Käfer in Merkmalen wie Farbe, Körperform, Größe etc., ohne dass Sie die systematischen Zusammenhänge dieser Merkmale mit dem Merkmal „Giftigkeit" kennen. Wenn Sie nun einen neuen Käfer entdecken und seine Giftigkeit einschätzen sollen, werden Sie vermutlich aufgrund seiner Ähnlichkeit mit bereits bekannten giftigen Käfern urteilen. Ist sie hoch, dann sind Sie vorsichtig, ist sie gering (der Käfer ähnelt eher den ungiftigen), dann sind Sie unbesorgter.

Juslin et al. (2003) postulierten, dass Urteile oft nicht auf einzelnen Cues, sondern auf der Ähnlichkeit zwischen zu beurteilenden und schon bekannten Cue-Mustern beruht. Sie übernahmen die in der Kategorisierungsforschung erfolgreichen **Exemplarmodelle** zur Beschreibung des Urteilsprozesses (▶ Kap. 11). Diese Modelle nehmen an, dass wir die Merkmale (Cues) früher gelernter Exemplare zusammen mit ihren Kriteriumswerten im Langzeitgedächtnis abspeichern. Sollen wir ein neues Objekt beurteilen, so vergleichen wir sein Merkmalsmuster mit allen gespeicherten und bilden ein Urteil, das dem ähnlichkeitsgewichteten Mittelwert der gespeicherten Kriteriumswerte entspricht. Einfacher ausgedrückt: Das Urteil ähnelt am stärksten den Kriteriumswerten der besonders ähnlichen Exemplare im Gedächtnis. Die Theorie ist inklusive der Definition von Ähnlichkeit mathematisch formuliert (Medin und Schaffer 1978; Juslin und Persson 2002). Wichtig ist, dass sich der angenommene Mechanismus grundlegend von den regelbasierten Strategien unterscheidet, da im Prinzip keine spezifischen Zusammenhänge zwischen Cues und Kriterien bekannt sein müssen.

Karlsson et al. (2008) fassen die Ergebnisse ihres Forschungprogramms zusammen und kommen zu dem Schluss, dass regelbasiertes Entscheiden für die meisten Versuchspersonen der Standard ist, dass sie aber auf ähnlichkeitsbasiertes Entscheiden ausweichen müssen, wenn das Lernen einer Regel schwierig wird, z. B. bei nichtlinearen Zusammenhängen zwischen Cues und Kriterium.

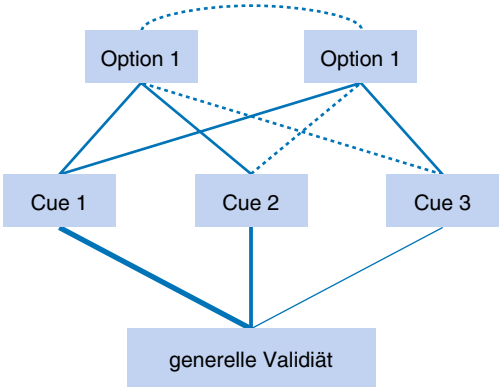
Andererseits liegen aber auch überzeugende empirische Hinweise vor, dass Ähnlichkeit zu bereits bekannten Exemplaren das Urteil beeinflusst, selbst wenn eine zuverlässige Regel zur Verfügung steht (Hahn et al. 2010) oder Ähnlichkeit die Urteilsgüte gar vermindert. Von Helversen et al. (2014) zeigten in einem Experiment mit „gemorphten" Gesichtern, dass die Ähnlichkeit von Bewerbern zu früheren Kandidaten in einer hypothetischen Personalauswahl das Urteil entsprechend färbte.

Kohärenznetzwerke

Glöckner und Betsch (2008b) postulieren, dass beim Entscheiden Prozesse aktiviert werden, die eine möglichst *kohärente* mentale

Abb. 17.10 Repräsentation einer Entscheidungsaufgabe in einem Kohärenznetzwerk

Validiät	Option 1	Option 2
Cue 1 (.90)	+	+
Cue 2 (.75)	+	–
Cue 3 (.60)	–	+



Repräsentation des Problems konstruieren. Dies entspricht etwa dem, was die Gestaltpsychologen als „gute Gestalt" bezeichnen, also eine weitgehend widerspruchsfreie Sicht der Entscheidungssituation (▶ Kap. 2 und 16). Dazu werden konflikthafte Cue-Informationen abgewertet und kohärente aufgewertet, bis eine Option als dominierende hervorgeht. Dieser Prozess wird auch als *parallel constraint satisfaction* (PCS) bezeichnet und läuft weitgehend automatisch ab. Er lässt sich als „intuitives" Entscheiden verstehen. Diese Idee unterscheidet sich fundamental von der Annahme deliberativer (bewusst abwägender) sequenzieller Strategien wie TTB und bietet eine mögliche Erklärung, wie Menschen sehr schnell und ohne großen Aufwand zu Wahlen kommen können, die komplexen Strategien wie WADD entsprechen. Glöckner und Betsch (2008b) präzisierten ihre Theorie zudem in einem mathematischen Netzwerkmodell, das an neuronale Netzwerkmodelle aus anderen Bereichen der kognitiven Psychologie angelehnt ist. Abb. 17.10 illustriert die Idee anhand eines einfachen Beispiels mit zwei Optionen und drei Cues. Die Cue-Muster sind in der Tabelle dargestellt, die Cues sind in der Rangfolge ihrer Validitäten eingetragen. Durchgehende Linien sind aktivierende Verbindungen, gestrichelte Linien sind hemmende Verbindungen. Man sieht, dass Cue 1 für beide Optionen spricht, während Cue 2 Option 1 aktiviert, aber Option 2 hemmt. Mit Cue 3 ist es umgekehrt. Cue 2 und 3 widersprechen sich demnach. Die Dicke der Linien vom Startknoten repräsentiert die Validität der Cues und somit das Ausmaß an Aktivierung, die ein Cue erhält.

Wird nun eine Entscheidungsaufgabe wie in Abb. 17.10 präsentiert, fließt hypothetische Aktivierung proportional zur Validität zu den einzelnen Cues. Diese geben die Aktivierung („Energie") entlang der Verbindungen zu den Optionen weiter, die dadurch ebenfalls aktiviert oder gehemmt werden. Zwischen den Optionen besteht eine hemmende Verbindung, sodass ein initial entstehender Aktivierungsunterschied verstärkt wird. Wichtig ist, dass von den Optionen Aktivierung wieder zurück zu den Cues fließt, deren Aktivierung dann ebenfalls verändert wird. Im Beispiel würde dies darin resultieren, dass der wahrgenommene Validitätsunterschied zwischen Cue 2 und Cue 3 mit der Zeit vergrößert wird, da Cue 2 eine Aufwertung erfährt, Cue 3 aber eine Abwertung. Aktivierung fließt so lange durch das Netzwerk, bis dieses einen stabilen Zustand „minimaler Energie" erreicht hat. Der Endzustand ist dann durch Aktivierungswerte aller Optionen und Cues gekennzeichnet.

Im Unterschied zu den oben beschriebenen Regeln wird die Cue-Information nicht sequenziell verarbeitet, sondern alle Informationen werden parallel in einem dynamischen Prozess verändert. Diesen kann man im Computer simulieren und daraus Vorhersagen über Reaktionszeiten (Wie lange braucht das Netzwerk bis zum Ruhepunkt?) und Konfidenzurteile (Wie unterschiedlich ist die Endaktivierung der Optionen?) generieren, die sich in einigen Experimenten empirisch bestätigen ließen (Glöckner et al. 2014). Darüber hinaus kann man erstaunliche neue Vorhersagen generieren:

1. Unter bestimmten Umständen ist es möglich, dass *mehr* vorhandene Informaion zu *kürzeren* Entscheidungszeiten führt, nämlich dann, wenn die zusätzliche Information die Kohärenz insgesamt erhöht (s. u. „Paradoxer Effekt der Informationsmenge").
2. Die wahrgenommene Validität von Cues sollte sich während des Entscheidungsprozesses ändern können.

Für beide Vorhersagen haben sich empirische Belege finden lassen (Glöckner und Betsch 2012; Glöckner et al. 2010).

Evidenzakkumulierung

Inspiriert durch Theorien aus dem Bereich der Wahnehmung sind verschiedene Prozessmodelle vorgeschlagen worden, die annehmen, dass Urteilen und Entscheiden als eine Art Wettlauf zwischen den Optionen verstanden werden kann (Busemeyer und Townsend 1993; Lee und Cummins 2004). Die Idee ist, dass Evidenz für die Optionen (beispielsweise Cues oder Outcomes von Lotterien) so lange gesucht und aufaddiert (akkumuliert) wird, bis eine von beiden Optionen die Evidenzschwelle (sozusagen die Ziellinie des Wettlaufs) zuerst überschreitet. Genau diese Evidenzschwelle – die man auch als Ausmaß gewünschter Urteilssicherheit (*desired level of confidence*; Hausmann und Läge 2008) verstehen kann – ist der zentrale Aspekt solcher Modelle, denn sie erlaubt es, die Adaptivität des Entscheidens mit nur *einem* Prozess zu beschreiben, ohne dass ein „Wechsel der Strategie" angenommen werden müsste: Ist die Schwelle hoch, z. B. weil die Entscheidung wichtig ist oder Akkuratheit im Vordergrund steht, wird viel Evidenz gesucht und integriert, bevor eine Entscheidung fällt. Das Ergebnis wird also eher mit kompensatorischen bzw. optimalen Strategien vergleichbar sein. Ist die Schwelle dagegen niedrig, z. B. aufgrund von geringer Motivation oder hohem Zeitdruck, reicht schon wenig Evidenz aus, um die Schwelle zu überschreiten, und Wahlen werden eher denen von einfacheren nonkompensatorischen Strategien entsprechen. Evidenzakkumulierungsmodelle erlauben dementsprechend auch Vorhersagen über Reaktionszei-

ten: je niedriger die Evidenzschwelle oder je größer der Evidenzunterschied, desto schneller die Entscheidung. Eine Verkürzung der Reaktionszeiten mit wachsendem Unterschied zwischen Optionen ist empirisch konsistent bestätigt worden (Birnbaum und Jou 1990; Busemeyer und Townsend 1993; Moyer und Bayer 1976; Pohl und Hilbig 2012).

17.4.4 Welche Faktoren bestimmen die Art des Entscheidungsprozesses?

Im vorhergehenden Abschnitt haben wir eine Fülle von verschiedenen Strategien, Heuristiken und Prozessen beschrieben, die als Mechanismen für Urteile und Entscheidungen postuliert wurden. Für jedes dieser Modelle gibt es empirische Evidenz, die nahelegt, dass es Urteile in manchen Situationen beschreibt. Gigerenzer et al. (1999) haben die Metapher der **adaptiven Werkzeugkiste** (*adaptive toolbox*) geprägt, um zu beschreiben, dass der urteilenden Person viele Heuristiken zur Verfügung stehen, aus denen sie die beste auswählen kann. *Wie entscheiden Menschen aber, welche Heuristik, welche Strategie oder welchen Prozess sie anwenden sollen?* Ohne eine Antwort auf diese Frage bleibt eine Werkzeugistenmetapher als Theorie unbefriedigend, da sie wenige Vorhersagen erlaubt: „the adaptive toolbox [...] has to go beyond the truism that many heuristics can explain many behaviors" (Fiedler 2010, S. 7).

Mechanismen wie Evidenzakkumulierung, *parallel constraint satisfaction* oder Exemplargedächtnis sind unabhängig von der Idee einer „Werkzeugkiste" oder sogar als explizite Gegenentwürfe formuliert worden, die anstatt verschiedener regelbasierter Strategien jeweils nur einen Mechanismus des Urteilens annehmen. Es scheint sich aber anzudeuten, dass auch diese Prozesse eher einen Teil der kognitiven Ausstattung darstellen, der neben den sequenziellen Heuristiken wie WADD oder TTB existiert (Karlsson et al. 2008; Söllner et al. 2013). Insofern ist eine spannende Forschungsfrage, welche Art von Prozessen in welchen Situationen verwendet wird bzw. greift.

Die Idee einer Strategiensammlung ist die historisch älteste, daher beziehen sich viele Arbeiten auf die Wahl zwischen „Strategien", z. B. TTB oder WADD. Wir werden aber auch Befunde referieren, die auf die Auswahl zwischen sequenziellen Strategien und anderen Mechanismen (Exemplaren, *parallel constraint satisfaction*) eingehen.

Strategiewahl aufgrund einer Kosten-Nutzen-Analyse

Beach und Mitchell (1978) haben vorgeschlagen, dass die Wahl einer Strategie auf einer Abwägung von Kosten und Nutzen der verfügbaren Strategien beruht. Der *Nutzen* einer Strategie ist das Ausmaß, in dem sie eine relativ zu den Zielen gute Entscheidung oder ein akkurates Urteil ermöglicht. Was sind aber die Kosten? Zu den *Kosten* zählt der kognitive Aufwand, der mit der Ausführung der Strategie verbunden ist, sowie die Zeit, die für Informationsbeschaffung und -verarbeitung investiert werden muss (Opportunitätskosten). Die Annahme ist, dass höherer Nutzen auch mit einem höheren Preis erkauft werden muss: Aufwendigere Strategien sollten demnach bessere Ergebnisse liefern als einfache Heuristiken. Chu und Spires (2003) zeigten, dass die subjektive Wahrnehmung von Kosten und Nutzen bei verschiedenen Strategien genau diesem Muster folgt: Einfachere nichtkompensatorische Strategien wurden als weniger akkurat beurteilt als komplexe kompensatorische Strategien. Wie kann aber die Komplexität von Strategien gemessen werden? Johnson und Payne (1985) nutzten das Konzept der elementaren Informationsverarbeitungsprozesse (◘ Tab. 17.1). Für jedes Entscheidungsproblem kann man auszählen, wie viele elementare Informationsverarbeitungsprozesse eine Strategie (z. B. WADD, EQW oder TTB) benötigt. Verwendet man die Zahl der benötigten elementaren Informationsverarbeitungsprozesse als Maß der kognitiven Kosten, dann zeigt sich, dass nichtkompensatorische Strategien deutlich sparsamer und daher vermutlich schneller sind als kompensatorische Strategien. Gigerenzer und Goldstein (1996) bezeichnen sie daher auch als schnell und sparsam (*fast and frugal*). Gigerenzer et al. (1999) betonen jedoch die hohe Akkuratheit einfacher Heuristiken in bestimmten Umwelten (▶ Zur Vertiefung 17.8) und postulieren daher, dass die Einsparung kognitiver Kosten durch einfache Heuristiken den nur geringen Verlust an Nutzen bei Weitem überwiegt.

Empirische Untersuchungen zur Strategiewahl und Adaptivität

Viele klassische Untersuchungen zum Kosten-Nutzen-Ansatz konzentrieren sich auf die sequenziellen kompensatorischen und nichtkompensatorischen Strategien in Entscheidung und Urteil. Als Untersuchungsmethode wurden häufig *Process-Tracing-Techniken* eingesetzt (▶ Abschn. 17.1), die Parameter der Informationssuche erfassen: Wie viel Information wird angefordert? Wie häufig/lange werden die validesten relativ zu den wenig validen Cues betrachtet? Ist die Suchrichtung optionsweise oder Cue-weise? Diese Variablen sollen Auskunft über die verwendete Strategie liefern. Folgende Einflussvariablen wurden im Rahmen des Kosten-Nutzen-Ansatzes untersucht:

- *Zeitdruck:* Wenn weniger Zeit zur Verfügung steht, erhöht dies die relativen Kosten jedes Informationsverarbeitungsschrittes, wodurch einfache Heuristiken an Attraktivität gewinnen sollten. In einer frühen Studie verwendete Wright (1974) die Urteilerseite des Linsenmodells zur Analyse von Urteilen über hypothetische Autos, die durch fünf Attribute beschrieben waren. Unter Zeitdruck beachteten die Versuchspersonen weniger Attribute (und fokussierten stärker auf die negativen). Mehrere Process-Tracing-Studien haben seitdem gezeigt, dass unter Zeitdruck typischerweise weniger Informationen angefordert werden, dass die wichtigsten Cues stärker relativ zu den unwichtigeren beachtet werden und dass die Suche eher attributweise verläuft (z. B. Payne et al. 1988; Rieskamp und Hoffrage 2008). Dies wird als vermehrte Anwendung nichtkompensatorischer Heuristiken interpretiert. Auch jenseits von Effekten auf die Informationssuche führt Zeitdruck offenbar zu vermehrten Verwendung einfacher Strategien, beispielsweise der Rekognitionsheuristik (Hilbig et al. 2012; Pachur und Hertwig 2006).
- *Komplexität der Aufgabe:* Wenn die Anzahl der Attribute und/oder Optionen steigt, steigen die Kosten kompensatorischer Strategien im Sinne von elementaren Informationsverarbeitungsprozessen deutlich schneller als die

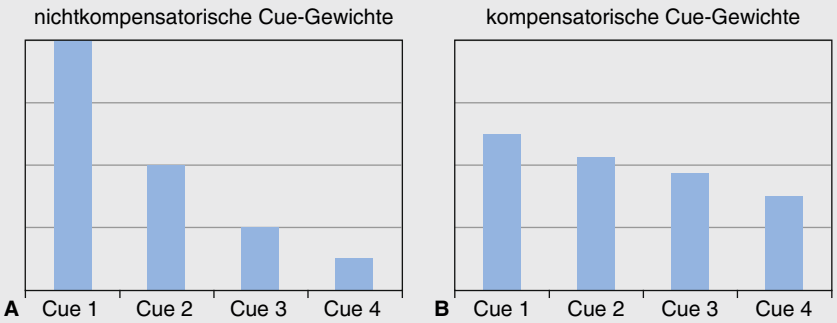
Zur Vertiefung 17.8

Machen einfache Heuristiken uns schlau?

Gigerenzer et al. (1999) haben mit dem Buch *Simple Heuristics that Make us Smart* den Begriff der Heuristik rehabilitiert und demonstriert, dass einfache Heuristiken wie TTB bemerkenswert akkurat sein können. Gigerenzer und Goldstein (1996) zeigten mit Computersimulationen, dass TTB in der Städtevergleichsaufgabe nahezu ebenso gute Entscheidungen traf wie optimal gewichtete lineare Modelle, obwohl TTB sehr viel weniger Information benötigt und verarbeitet. Czerlinski et al. (1999) demonstrierten dies auch für 20 andere Urteilsbereiche.

Im Bereich von Präferenzentscheidungen sind solche Computersimulationen von Thorngate (1980) sowie Johnson und Payne (1985; vgl. auch Payne et al. 1993) in großem Umfang durchgeführt worden. Johnson und Payne (1985) variierten Aspekte der Aufgabenumwelt, z. B. die Varianz der Wahrscheinlichkeiten verschiedener Gewinne in Lotterien. War diese hoch, dann war eine sparsame nichtkompensatorische Regel analog zu TTB nahezu optimal. Bei einer geringen Varianz der Wahrscheinlichkeiten wurde dagegen eine EQW-Heuristik besser, weshalb die Autoren folgern: „First, [...] heuristics [...] can approximate the accuracy of normative rules with substantial savings in effort. Second, no single heuristic will do well across all contexts" (S. 408). Ebenso zeigen Hogarth und Karelaia (2007), dass Heuristiken wie TTB in ganz bestimmten Umwelten – besonders solchen, in denen Cue-Validitäten sehr unterschiedlich ausfallen – erfolgreich sind, während optimal gewichtete lineare Modelle in anderen Umwelten überlegen sind (◘ Abb. 17.11).

Die Antwort auf die Eingangsfrage lautet demnach: Ja, einfache Heuristiken machen uns schlau, wenn wir sie passend einsetzen. Die systematische formale Untersuchung von Umweltmerkmalen, die bestimmte Heuristiken begünstigen, wird als Forschungsprogramm der *ökolgischen Rationalität* bezeichnet (Todd et al. 2012). Die empirische Frage, ob Menschen einfache Heuristiken auch adäquat auswählen, ist die Frage nach deren *Adaptivität*.



◘ **Abb. 17.11** Wenn die ökologischen Validitäten nichtkompensatorisch sind (**A**), dann kann die Summe der Gewichte nachfolgender Cues einen valideren Cue nicht „übertrumpfen", und eine TTB-Strategie ist genauso gut wie eine optimal gewichtete WADD-Strategie. Je ähnlicher sich die Validitäten werden, desto schlechter wird TTB relativ zu kompensatorischen Strategien (**B**). (Martignon und Hoffrage 2002)

nichtkompensatorischer Strategien. Entsprechend werden vereinfachende Heuristiken vermehrt bei hoher Komplexität angewandt (z. B. Billings und Marcus 1983; Onken et al. 1985).

- *Explizite Informationskosten:* Bröder (2000b) sowie Newell und Shanks (2003) variierten die Kosten der Informationsbeschaffung in einem Börsenspiel, bei dem Aktien ausgewählt werden konnten. Dazu konnten Informationen über die hypothetischen Unternehmen gekauft werden (Vgl. ◘ Abb. 17.2). Höhere Kosten reduzierten die gekaufte Informationsmenge und führten zu mehr Wahlen im Einklang mit einfachen Heuristiken.
- *Auszahlungsstruktur der Umwelt:* Wenn die Cue-Validitäten eher gleichförmig sind (◘ Abb. 17.11B), ist die Akkuratheit einer kompensatorischen Strategie höher als die von TTB. Unterscheiden sich die Gewichte aber stark oder sind sie gar nichtkompensatorisch (◘ Abb. 17.11A), dann wird die Akkuratheit von TTB besser (Hogarth und Karelaia 2007). Versuchspersonen scheinen sich adaptiv an diese Umweltstrukturen anzupassen und Cues entsprechend unterschiedlich zu gewichten. Dies ist als adaptiver Strategiewechsel interpretiert worden (Bröder 2003; Mata et al. 2007), aber auch Netzwerkmodelle mit *parallel constraint satisfaction* können dies innerhalb eines einzigen Entscheidungsmechanismus erklären, ohne einen Wechsel der Strategie anzunehmen (Glöckner et al. 2014).
- *Verarbeitungskosten durch Gedächtnisabruf:* In Laborstudien wird dem Entscheider die relevante Information im Prinzip leicht verfügbar gemacht. Besonders wenn alle Informationen gut strukturiert und ohne künstliche Kosten durch sequenzielle Informationssuche (wie im MouseLab) vorliegen, zeigt sich ein sehr hoher Anteil an kompensatorischen Entscheidungen gemäß Evidenzakkumulations- und Kohärenznetzwerkmodellen und praktisch keine Verwendung von TTB (Glöckner und Betsch 2008b; Hilbig und Moshagen 2014). Im Alltag allerdings müssen wir Cue-Information häufig aus dem Gedächtnis hervorkramen („Hat Peter mir dieses oder das andere Smartphone empfohlen?"). Es wurde vermutet, dass ein solcher Gedächtnisabruf kognitive Kosten verursacht. Um dies zu prüfen, ließen Bröder und Schiffer (2003) Versuchspersonen in einem Kriminalspiel Vergleichsurteile darüber abgeben, welcher Verdächtige mit höherer Wahrscheinlichkeit der Täter ist. Dazu mussten sie Cue-Information (Indizien) aus dem Gedächtnis abrufen, die sie vorher auswendig gelernt hatten. Tatsächlich zeigte sich ein hoher Anteil von TTB-Verwendern. Erleichtert man gezielt die Zugänglichkeit von Cue-Informationen im Gedächtnis, so erhöht man wieder den Anteil kompensatorischer Entscheider (Platzer und Bröder 2012; Platzer et al. 2014). Diese und andere Befunde (Jahn et al. 2007; Khader et al. 2011; 2013) legen nahe, dass der Gedächtnisabruf Kosten verursacht und dass diese die

Wahl der Entscheidungsstrategie beeinflussen. Allgemeiner ausgedrückt: Je leichter verfügbar Informationen sind, desto eher werden sie in Entscheidungen integriert.

- *Exemplarbasiertes Entscheiden:* Neben den regelbasierten Strategien gibt es den in ▶ Abschn. 17.4.3 beschriebenen ähnlichkeitsbasierten Urteilsmechanismus, der auf dem Vergleich mit im Gedächtnis gespeicherten Exemplaren beruht. Ein solcher Mechanismus kann erstens nicht extrapolieren und ist zweitens weniger genau und reliabel als eine Regel, daher weniger akkurat. Karlsson et al. (2008) stellen fest, dass Menschen regelbasiertes Entscheiden bevorzugen und nur zu ähnlichkeitsbasierten Mechanismen greifen, wenn das Lernen der Zusammenhänge zwischen Cues und Kriterien schwierig ist. Dies gilt z. B. bei hoher Gedächtnisbelastung, wenn die Richtung des Zusammenhangs zwischen Cue und Kriterium unklar ist (Platzer und Bröder 2013) oder für nichtlineare Zusammenhänge zwischen Cues und Kriterium (Juslin et al. 2003). Hoffmann et al. (2014) replizierten den Befund, dass Versuchspersonen vermehrt zu exemplarbasierten Strategien griffen, wenn der Zusammenhang zwischen Cues und Kriterium nichtlinear war. Darüber hinaus wählten Personen mit gutem episodischen Gedächtnis eher eine Strategie, die auf Exemplare im Gedächtnis zurückgreift, und sie urteilten auch akkurater als Personen mit weniger gutem Gedächtnis. Offenbar wählen Personen die Strategie also auch nach ihren Fähigkeiten. Dies ist ebenfalls mit einem Kosten-Nutzen-Modell vereinbar, wenn man annimmt, dass eine hohe Fähigkeit in Bezug auf eine kognitive Leistung (hier: Langzeitgedächtnis) die kognitiven Kosten derselben senkt.

Die genannte Forschung zur Wahl von Entscheidungsstrategien zeigt zwei wesentliche Erkenntnisse: Menschen passen ihr Entscheidungsverhalten den Erfordernissen der Situation an, und diese Anpassung ist im Sinne des Kosten-Nutzen-Modells häufig adaptiv. Eine Ausnahme sind maladaptive *Routineeffekte*, wenn sich die Umwelt plötzlich ändert. Dann ist die Neuanpassung des Verhaltens deutlich verzögert, sofern schon eine Strategie eingeübt wurde (Betsch und Haberstroh 2005; Bröder und Schiffer 2006). In jedem Fall hat sich Beach und Mitchell's (1978) Idee als fruchtbar erwiesen, da sie viel Forschung angeregt hat und viele Befunde damit vereinbar sind.

Probleme des Kosten-Nutzen-Ansatzes und Alternativen

Wenngleich sich der Kosten-Nutzen-Ansatz demnach als fruchtbar zur Erklärung und Vorhersage der Strategiewahl erwiesen hat, sollen ein paar Probleme und Alternativen kurz genannt werden.

Scheinbar „paradoxe" Effekte der Verarbeitungskapazität Je mehr Verarbeitungskapazität einer Person zur Verfügung steht, umso geringer sollten die relativen kognitiven Kosten sein. Es sollte einer Person dann leichter fallen, komplexere kompensatorische Strategien anzuwenden. Es zeigte sich aber in Experimenten mit einem hypothetischen Börsenspiel, dass Versuchspersonen *vermehrt* einfache Strategien anwendeten, je intelligenter sie waren und wenn sie *keine* zusätzliche kognitive Belastung (simultane zweite Aufgabe) hatten (zusammenfassend Bröder und Newell 2008). Dies war in Umwelten der Fall, in denen TTB gegenüber WADD die bessere Strategie darstellte. Es scheint also, dass nicht die *Ausführung* der Strategien hohe Kosten verursacht, sondern die adaptive *Wahl* der Strategie.

Paradoxer Effekt der Informationsmenge Glöckner und Betsch (2008c) ließen ihre Versuchspersonen zwischen verschiedenen Verkäufern einer Ware wählen mit dem Ziel, die beste Qualität zu erhalten. Die Urteile von Testern (Cues) konnten in einer offenen Matrix eingesehen werden. Erstaunlicherweise wurde die große Mehrzahl der Versuchspersonen selbst unter Zeitdruck als Verwender einer kompensatorischen WADD-Strategie klassifiziert, und sie brauchten deutlich kürzer für die Urteile als nach der expliziten Instruktion, eine WADD-Strategie zu verwenden. Wie ist das möglich? Glöckner und Betsch (2008c) argumentieren, dass die Integration der Cue-Information typischerweise *automatisch* und parallel erfolgt, wobei sie das in ▶ Abschn. 17.4.3 vorgestellte Netzwerkmodell als Mechanismus vorschlagen. Wir erinnern uns, dass sich Aktivierung in diesem Netzwerk automatisch ausbreitet, bis das Netz in einem stabilen Zustand ist, wobei es eine kohärente Interpretation der Entscheidungssituation erreicht. Bei expliziter Aufforderung, eine WADD-Strategie anzuwenden, müssen die Informationen dagegen kontrolliert und sequenziell verarbeitet werden. Im Normalfall jedoch verursache die Integration der Information keine Kosten. In einer neueren Arbeit zeigten Glöckner und Betsch (2012) sogar, dass das Hinzufügen von Information zu schnelleren Entscheidungen führte, sofern die zugefügte Information die Konsistenz der Information erhöhte. In diesem Fall braucht das Netzwerk weniger Zeit bis zum stabilen Zustand, während jede in elementaren Informationsverarbeitungsprozessen formulierte Strategie mehr Schritte benötigen würde. Mit diesen Ergebnissen wird quasi die gesamte Logik des Kosten-Nutzen-Ansatzes hinterfragt. Wie lässt sich dies mit den vorher berichteten Ergebnissen in Einklang bringen?

Glöckner und Betsch (2008c) argumentieren, dass unterschiedliche experimentelle Untersuchungen nicht hinreichend zwischen *Informationssuche* und *Informationsintegration* unterschieden hätten. Die Suche ist selbstverständlich von Zeitbeschränkungen und expliziten oder impliziten (z. B. Gedächtnisabruf) Kosten betroffen. In der Tat replizierten die Autoren den Befund, dass bei einem geschlossenen MouseLab mit sequenzieller Informationssuche erhöhter Zeitdruck zu mehr nichtkompensatorischen Strategien führt. Ist aber alle Information offen sichtbar, so ist die Integrationsfähigkeit nicht strikt begrenzt.

Insofern widersprechen die Befunde einem Kosten-Nutzen-Ansatz nicht, wenn man annimmt, dass (1) die Kosten bei der Informationsbeschaffung entstehen und nicht bei der Informationsintegration und dass (2) die Inforationsintegration automatisch erfolgen kann. Generell bleibt aber das Problem, dass Informationssuche und -integration notwendigerweise konfundiert sind: Hat man aufgrund hoher Kosten nur einen Cue gesucht, *muss* das Ergebnis der Informationsintegration wie TTB-Nutzung aussehen, auch wenn der Prozess eigentlich kompensatorisch ist. Insofern stimmt die Argumentation von Glöckner und Betsch (2008c), dass nur Situationen mit vollständig vorliegen-

der, schnell verfügbarer Information Aufschluss über Integrationsprozesse erlauben, und in genau diesen Situationen spricht die Empirie vorwiegend für kompensatorische Entscheidungen und gegen TTB (z. B. Glöckner und Betsch 2008c; Glöckner et al. 2014; Hilbig und Moshagen 2014; Söllner et al. 2013).

Kalkulieren Menschen Kosten und Nutzen von Strategien? Die scheinbar paradoxen Effekte kognitiver Kapazität suggerieren, dass der Auswahlprozess der Strategien (nicht die Strategien selbst) „Kosten" im Sinne der Beanspruchung von Ressourcen verursachen. Dies passt zu der Idee, dass Menschen die Kosten und den Nutzen bewusst abwägen. Rieskamp (2008) hat argumentiert, dass Menschen diese bewusste Kalkulation nicht vornehmen, sondern die Wahl der adäquaten Strategie schrittweise lernen. Er reanalysierte z. B. eine Studie von Newell und Shanks (2003), in der schon durch die Instruktion hätte klar sein müssen, dass durch die hohen Informationskosten eine TTB-Strategie deutlich besser abschneiden müsste als eine WADD-Strategie. Dennoch begannen die Versuchspersonen mit einer Präferenz für WADD, die sie aber über das Experiment hinweg aufgrund von Feedback schrittweise der adäquateren Strategie anpassten. Die Lerntheorie der Strategiewahl (*strategy selection learning theory,* SSL) fußt auf dem Prinzip des operanten Konditionierens bzw. Verstärkungslernens (▶ Kap. 10) und ist als präzises mathematisches Modell formuliert. Mit der Theorie ließen sich publizierte Datensätze neu interpretieren, und sie wurde durch gezielte Experimente getestet (Rieskamp und Otto 2006).

Nimmt man an, dass die wahrgenommene Verstärkungsmenge in einem Entscheidungsdurchgang dem Gewinn abzüglich der Kosten entspricht, so kann mit der Lerntheorie der Strategiewahl erklärt werden, dass Menschen letztlich adaptiv die Strategie wählen, die den besten Kosten-Nutzen-Kompromiss darstellt. Insofern können die oben genannten Befunde auch durch Verstärkungslernen erklärt werden. Die wichtige Neuerung ist jedoch, dass die Annahme einer bewussten Kalkulation aufgegeben wird und die Theorie der Tatsache Rechnung trägt, dass Versuchspersonen im Laufe eines Experiments besser werden.

▪ Das Problem der Werkzeugkiste

Mit der Idee der Werkzeugkiste (*toolbox*) kann der Flexibilität des Entscheidungsverhaltens Rechnung getragen werden. Zudem haben die vorgeschlagenen Heuristiken den Vorteil, in den einzelnen Verarbeitungsschritten (elementare Informationsverarbeitungsprozesse oder Such-, Stopp- und Entscheidungsregel) relativ präzise formuliert zu sein. Durch die Annahmen über die Prozesse werden zudem oft weitere empirische Größen wie Entscheidungszeiten vorhergesagt.

Als wissenschaftliche Theorie birgt die Werkzeugkistenmetapher aber ein Problem, das als Strategiewucherung bezeichnet wurde (*strategy sprawl*; Scheibehenne et al. 2013). Falls man Verhalten beobachtet, das mit den bisherigen Werkzeugen nicht erklärbar ist, stellen sich folgende Fragen: Ab wann muss eine neue Heuristik oder ein neuer Mechanismus postuliert werden? Was zählt als eine sinnvolle neue Heuristik? Die Zahl der Strategien ist nicht prinzipiell begrenzt, sodass man sich für jedes neue beobachtete Verhalten im Nachhinein eine passende Heuristik zurechtlegen könnte, die das Verhalten erklärt. Der Kognitionspsychologe Steven Pinker (1997, S. 282) schrieb dazu pointiert: „in psychology, invoking ‚strategies' to explain funny data is the last refuge of the clueless." Ohne die Angabe von klaren Richtlinien, wie die kognitiven Werkzeuge aussehen können und wann neue postuliert werden müssen, ist die Metapher selbst nicht empirisch prüfbar. Es gibt Autoren (z. B. Newell 2005), die deshalb anstreben, einen einheitlichen Mechanismus zu formulieren, sozusagen ein adjustierbares Allzweckwerkzeug. Die oben skizzierten Evidenzakkumulations- und Kohärenznetzwerkmodelle sind Beispiele für solche Theorien, die einen einheitlichen Mechnismus für alle Urteile und Entscheidungen annehmen. Ob dies erfolgreich sein und ob es gelingen kann, Multi-Strategie-Modelle im Sinne einer Werkzeugkiste empirisch überzeugend von Ansätzen mit nur einem Entscheidungsmechanismus abzugrenzen, muss weitere Forschung zeigen. Uns scheint es jedenfalls wichtig zu sein, dabei konzeptuell klar zwischen *Informationsbeschaffung* und *Informationsintegration* zu trennen.

17.4.5 Abschließende Bemerkungen

Die Beschreibung und Erklärung von Urteilen und Entscheidungen mittels Prozessmodellen hat sich als äußerst fruchtbar für die Entscheidungspsychologie erwiesen. Die Formulierung spezifischer Annahmen über die Repräsentation, Suche und weitere Verarbeitung von Informationen hat (1) neue Untersuchungstechniken generiert, (2) eine Fülle neuer Hypothesen und Befunde zutage gefördert und (3) die Sprache der Entscheidungspsychologie deutlich kompatibler mit der Theoriesprache anderer Bereiche der Kognitiven Psychologie gemacht. Dadurch wird es auch deutlich einfacher, die Entscheidungspsychologie in unser Wissen von kognitiven Strukturen einzubetten und darauf zu beziehen. Darin ist der große theoretische Wert dieser Entwicklung zu sehen.

Wir möchten aber davor warnen, kognitive Prozessmodelle deshalb zu bevorzugen, weil sie vermeintlich „realere" Vorgänge abbilden. Diese Rhetorik ist bei vielen Befürwortern der Modellklasse nämlich explizit oder zwischen den Zeilen zu erkennen. Wir halten eine solche Sichtweise wissenschaftstheoretisch für naiv: Auch Prozesse in Prozessmodellen sind *Konstrukte* innerhalb von Theorien, genau wie z. B. die Nutzenfunktion in der Theorie des erwarteten Nutzens ein Konstrukt ist. Prozessmodelle sind also nicht per se besser als Strukturmodelle, sondern sie sind es nur insoweit, als sie (derzeit!) mehr Phänomene vorhersagen und erklären können sowie eine Fülle neuer prüfbarer Hypothesen generieren helfen.

17.5 Anwendungsbeispiele

Allein durch die Breite des Begriffs „Entscheidung" ergeben sich viele Anwendungen der Grundlagenforschung, von denen wir hier nur drei Beispiele nennen.

▪ „Nudge"

Warum befürworten 85 % der Amerikaner Organspenden, aber nur 28 % besitzen einen Organspendeausweis? Warum sind in

Österreich, Belgien, Frankreich, Ungarn, Polen und Portugal jeweils mehr als 95 % der Bevölkerung potenzielle Organspender, während es in Dänemark, Großbritannien und Deutschland jeweils weniger als 20 % der Bevölkerung sind? Diese krassen Unterschiede zwischen europäischen Ländern dürften kaum auf unterschiedlichen Kulturen oder Lebensbedingungen beruhen. In einer ebenso einfachen wie genialen Untersuchung zeigten Johnson und Goldstein (2003), dass diese Unterschiede einfach darauf beruhen, dass man in den letztgenannten Ländern der Transplantation seiner Organe im Todesfalle aktiv zustimmen muss, während man in den erstgenannten Ländern widersprechen muss, falls man das nicht wünscht. Wohlgemerkt: In *allen* genannten Ländern steht den Bürgern die Entscheidung vollkommen frei. Offenbar orientieren sich Menschen (aus vielen möglichen von Johnson und Goldstein diskutierten Gründen) an einer *Vorgabe*. Diese Tendenz lässt sich auf vielfältige Art nutzen, um erwünschtes Verhalten durch einen kleinen „Stupser" (*nudge*) zu fördern, ohne dass dazu Verbote oder Gebote nötig sind, die die Wahlfreiheit einschränken würden (viele weitere Beispiele für erfolgreiches Design von Vorgaben in Thaler und Sunstein 2008).

Entscheidungsanalyse

Die Entscheidungsanalyse dient vor allem Unternehmen oder politischen Entscheidungsträgern dazu, die Handlungsoptionen zu identifizieren, die den erwarteten Nutzen maximieren. Es geht also darum, eine möglichst optimale Entscheidung im Sinne des Modells des erwarteten Nutzens zu treffen. Dazu ist es oft nötig, die Ziele zunächst einmal zu definieren und in eine Hierarchie zu bringen. Verschiedene Verfahren können eingesetzt werden, um möglichen Konsequenzen subjektive Nutzenwerte zuzuordnen, das Entscheidungsproblem zu strukturieren, Zielhierarchien zu entwickeln oder Wahrscheinlichkeiten von Konsequenzen abzuschätzen. Diese Techniken werden beispielsweise von spezialisierten Unternehmensberatungen angeboten und helfen dem Klienten, das Entscheidungsproblem sowie die eigenen Präferenzen transparent zu machen (eng am normativen Modell orientierter guter Einblick über Verfahren der Entscheidungsanalyse in Eisenführ et al. 2010).

Risikokommunikation

Einige der – in ▶ Abschn. 17.3.1 skizzierten – typischen Fehler beim statistischen Schließen bzw. Umgang mit Wahrscheinlichkeiten lassen sich durch die Wahl geeigneter Informationsformate deutlich reduzieren. Wie oben dargestellt kann beispielsweise die Präsentation von Häufigkeiten statt Wahrscheinlichkeiten (z. B. „Eine von 100 Frauen ist von Brustkrebs betroffen") Biases wie den Basisratenfehler oder den Konjunktionsfehler reduzieren (Fiedler 1988; Gigerenzer und Hoffrage 1995; Hertwig und Gigerenzer 1999). Solche Erkenntnisse sind besonders im Bereich der medizinischen Risikokommunikation erfolgreich eingesetzt worden, um Experten und Laien ein besseres Verständnis von Risiken zu vermitteln (z. B. Galesic et al. 2009; Gigerenzer und Edwards 2003; Visschers et al. 2009). Somit kann eine bessere Abwägung, beispielsweise der Wahrscheinlichkeit schwerer Nebenwirkungen gegenüber der Risikoreduktion durch eine Behandlung oder ein Screening, gelingen. Somit kann auch die Wahrnehmung von Vorgehensweisen, die wenig Risikoreduktion bringen, aber ernsthafte Nebenwirkungen haben, verändert werden. Beispiele hierfür sind Mammografiescreenings oder Gebärmutterhalskrebsprävention durch HPV-Impfung. Ein Themenheft der *Zeitschrift für Gesundheitspsychologie* (2003, 11(3)) bietet hierzu einige Einblicke. Viele aktuelle Informationen zum Thema Risikokommunikation sowie weiterführende Literaturhinweise finden sich auf der Webseite des Harding-Zentrums für Risikokompetenz (▶ https://www.harding-center.mpg.de/de).

17.6 Ausblick

Wir haben in diesem Kapitel eine Fülle von Modellvorstellungen und Methoden kennengelernt, um die faszinierenden Vorgänge beim menschlichen Urteilen und Entscheiden beschreiben und erklären zu können. Vor dem Hintergrund der historischen Entfaltung der Entscheidungspsychologie haben wir die Entwicklung von normativ geprägten Strukturmodellen über psychologisch inspirierte Theorien hin zu Prozessmodellen nachvollzogen. Jede dieser Betrachtungsebenen lieferte wertvolle Erkenntnisse über die Natur des Entscheidungsprozesses.

Zwei relativ prominente Themen der Entscheidungspsychologie haben wir dagegen kaum behandelt, worauf wir hier kurz eingehen wollen: *Rationalität* und *Zwei-Prozess-Modelle*.

Seit Beginn der psychologischen Entscheidungsforschung ist das tatsächliche Verhalten von Menschen mit den Vorgaben normativer Modelle verglichen worden, und Abweichungen davon wurden als Zeichen der fehlenden menschlichen Rationalität gedeutet. Dies hatte eine „Jagd nach kognitiven Fehlern" (Fiedler 1993, S. 7) zur Folge, in der die vermeintliche menschliche Irrationalität ausgelotet wurde. Wie in ▶ Abschn. 17.3.1 beschrieben, ist diese Sichtweise kritisiert worden, da zumindest einige der Biases rational reinterpretiert werden können, wenn man annimmt, dass Versuchspersonen die Aufgabenstellungen gelegentlich anders verstehen, als vom Experimentator intendiert. Für andere Phänomene ist diese wohlwollende Neuinterpretation nur schwer möglich (z. B. manche Framing-Effekte). Wir halten pauschale Schlussfolgerungen über menschliche Rationalität nicht für zielführend: Selbstverständlich besitzen Menschen rationale Kompetenzen, und manchmal handeln sie irrational. Interessanter als die pauschal geführte Rationalitätsdebatte scheint uns die Untersuchung, welche Faktoren rationales oder irrationales Entscheiden jeweils begünstigen. Daher haben wir uns hier auf die psychologischen Prozesse beschränkt, ohne stark auf deren Bewertung einzugehen (weiterführend z. B. Stanovich 2010).

Die Diskrepanz zwischen manchmal rationalem und manchmal scheinbar irrationalem Handeln hat eine Reihe von sogenannten *Zwei-Prozess-* oder *Zwei-System-Modellen* (Überblick in Evans 2008) hervorgebracht, die unter verschiedenen Bezeichnungen meist ein intuitives oder automatisches von einem rationalen deliberat-abwägenden System unterscheiden. Die einzelnen theoretischen Vorschläge unterscheiden sich darin, wie diese Systeme zusammenwirken sollen, gemeinsam ist ihnen jedoch, dass das automatische System oft für Fehler verantwortlich gemacht wird, während das deliberate System die rationale Kompetenz abbilden soll. Obwohl diese Einteilung plausibel scheint und

die Diskrepanzen zwischen rationalem und irrationalem Verhalten scheinbar „erklärt", haben wir diesen Modellen hier nicht viel Aufmerksamkeit geschenkt. Die Erklärungskraft erscheint uns derzeit recht begrenzt, da oft lediglich eine Zuordnung beobachteter Resultate zu „System 1" oder „System 2" erfolgt, ohne echte Vorhersagen leisten zu können. Zudem haben Glöckner und Witteman (2010) demonstriert, dass alleine die Kategorie der „automatischen" oder „intuitiven" Verarbeitung eine Vielzahl verschiedener Prozesse umfasst, die alles andere als einheitlich sind und zudem oft rationales Verhalten approximieren. Zielführender als eine Kategorisierung von Verhalten in bestimmte Systeme erscheint uns daher die genauere Spezifikation kognitiver Prozessmodelle, um Verhalten zu erklären und das Problem eines Zirkelschlusses zu vermeiden.

Die Urteils- und Entscheidungsforschung hat in den letzten Jahren einen Aufschwung erlebt, der mit einer verstärkt kognitiven Orientierung einhergegangen ist: Man interessiert sich nun stärker für die hinter den Entscheidungen stehenden Prozesse der Informationsverarbeitung und die Anknüpfung an klassisch kognitive Themenbereiche wie Wahrnehmung (▶ Kap. 2 und 5) oder Gedächtnis (Weber und Johnson 2009; ▶ Kap. 12). Dieser Trend wird vermutlich anhalten, und neue empirische Methoden zur Analyse von Entscheidungsverhalten werden laufend entwickelt. Beispielsweise lassen sich aus der Geschwindigkeit und der Krümmung des Weges, mit der eine Person die Computermaus bei der Auswahl einer Option steuert, Rückschlüsse auf den Entscheidungskonflikt ziehen (Koop und Johnson 2013). Auch werden aktuell – auf Basis der Aufzeichnung von Blickbewegungen – Aufmerksamkeitsprozesse in Entscheidungsmodelle integriert, um das oben skizzierte Zusammenspiel von Informationssuche und -integration besser abbilden zu können (Krajbich et al. 2010; Krajbich und Rangel 2011).

Neben solchen methodischen Entwicklungen fällt zudem auf, dass die Modelle und Herangehensweisen der Entscheidungsforschung auch zunehmend auf andere Forschungsbereiche ausstrahlen (und umgekehrt). Inhaltliche Anknüpfungspunkte zu anderen Disziplinen finden sich dabei besonders mit der Verhaltensökonomie, beispielsweise bei der Untersuchung von Kooperationsverhalten (z. B. Vlaev und Chater 2006) oder ethisch-moralischen Entscheidungen (z. B. Bazerman und Gino 2012).

Wie in anderen Bereichen der Allgemeinen Psychologie ist auch zu erwarten, dass die Erforschung der neuronalen Grundlagen von Entscheidungen an Bedeutung und Umfang gewinnt. Dieser Forschungsbereich ist unter dem Etikett „Neuroökonomie" bekannt geworden, auch wenn er im Wesentlichen auf Paradigmen zurückgreift, die in der Psychologie entwickelt wurden. Wichtig für eine sinnvolle Erforschung der neuronalen Grundlagen erscheint uns die Ausformulierung detaillierter Modelle des Entscheidungsprozesses, sodass gezielt nach neuronalen Korrelaten der angenommenen Teilprozesse gesucht werden kann (eindrucksvolles Beispiel in Khader et al. 2011). Der Erfolg dieser Forschungsrichtung wird sich letztlich daran messen lassen müssen, inwieweit hierdurch ein Erkenntniszuwachs im Sinne kritischer Theorietestung gelungen ist und ob letztlich menschliches Erleben und Verhalten besser erklärt und vorhergesagt werden kann. Ein Reduktionismus auf immer feiner auflösende Betrachtungsebenen allein kann nicht das Ziel sein.

17.7 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Beim Urteilen und Entscheiden sind meist verschiedene Merkmale bzw. Attribute (z. B. Ereigniswahrscheinlichkeiten und Konsequenzen) gleichzeitig zu berücksichtigen.
- Entscheidungen können schwierig sein, weil (1) die Konsequenzen und/oder deren Eintrittswahrscheinlichkeiten unbekannt sind, weil (2) Zielkonflikte vorliegen und/oder weil (3) sehr viele Informationen zu berücksichtigen sind.
- Die Theorie des erwarteten Nutzens ist eine normative Theorie des Entscheidens unter Risiko, deren Axiome als Maßstab rationalen Entscheidens angesehen werden. Es sollte demnach die Option gewählt werden, deren mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichteter Nutzen der Konsequenzen maximal ist.
- Zahlreiche Abweichungen menschlichen Verhaltens von den Axiomen der Theorie des erwarteten Nutzens haben Modifikationen nötig gemacht, um eine deskriptive Theorie des Entscheidens unter Risiko zu entwickeln. Die Prospect-Theorie behält die Grundannahme der Kombination (subjektiver) Wahrscheinlichkeits- und Nutzenfunktionen bei, erklärt aber durch spezielle Annahmen über deren Form sowie eines variablen Referenzpunktes viele Verhaltensphänomene, die die Theorie des erwarteten Nutzens nicht erklären kann (z. B. Framing-Effekte).
- Auch die Forschung zum statistischen Urteilen bzw. Beurteilen von Wahrscheinlichkeiten hat viele vermeintliche Fehler demonstriert, die auf die Verwendung vereinfachender Heuristiken (Daumenregeln) zurückgeführt wurden. Die bekanntesten Heuristiken dieser Forschungstradition von Daniel Kahneman und Amos Tversky sind die Repräsentativitäts-, Verfügbarkeits- und die Ankerheuristik.
- Ein umfassendes Rahmenmodell menschlichen Urteilens hat Egon Brunswik (1903–1955) mit dem Linsenmodell vorgestellt. Danach wird ein nicht direkt beobachtbares Urteilskriterium aus statistisch damit assoziierten Hinweisen (Cues) erschlossen. Die auf Regressionsrechnung basierende Linsenmodellgleichung erlaubt es, sowohl die Umweltstruktur als auch viele Aspekte des Urteilsprozesses (Anzahl und relative Wichtigkeit verwendeter Cues, Akkuratheit und Konsistenz der Urteile etc.) zu analysieren.
- Die Theorie des erwarteten Nutzens, die Prospect-Theorie, Urteilsheuristiken und das Linsenmodell liefern keine oder nur grobe Beschreibungen der kognitiven Prozesse, die Urteile und Entscheidungen ermöglichen. Kognitive Prozessmodelle greifen demgegenüber auf Konzepte der Kognitionspsychologie wie „elementare Informationsverarbeitungsprozesse" zurück, um z. B. die Informationssuche und -integration genau zu charakterisieren.
- Der hier derzeit dominierende Ansatz ist die Annahme einer Sammlung verschiedener Heuristiken und Strategien („Werkzeugkiste"), aus der Menschen situationsangemessen auswählen. Wie diese Auswahl stattfindet, ist kaum geklärt. Viele empirische Befunde sind vereinbar mit der Annahme,

dass die Kosten der Strategieausführung gegen ihre Akkuratheit abgewogen werden. Aber auch operantes Lernen ist als Mechanismus vorgeschlagen worden.

- Eine einflussreiche Erkenntnis ist, dass auch heuristische Strategien, welche einen Teil der Information ignorieren, erstaunlich akkurat sein können, wenn sie auf bestimmte passende Umweltstrukturen treffen („ökologische Rationalität").
- Ein Problem der Werkzeugkistenmetapher ist, dass die Zahl der potenziell denkbaren Strategien nicht begrenzt und der Ansatz daher nicht falsifizierbar ist.
- Neben den sequenziellen Strategien der Werkzeugkistenmetapher (oder teils als Alternativen dazu) sind andere kognitive Mechanismen zur Erklärung von Urteilen vorgeschlagen worden, die zum Teil erfolgreich neue Vorhersagen erlauben, z. B. Exemplarmodelle, Kohärenznetzwerke und Evidenzakkumulierungsmodelle.
- Der theoretische Vorteil von Netzwerk- und Akkumulierungsmodellen liegt darin, dass sie nur einen (flexiblen) Mechanismus annehmen und sich somit das Falsifizierbarkeitsproblem von Multi-Strategie-Ansätzen in geringerem Maße stellt. Gleichwohl lösen sie das Strategiewahlproblem aber nicht, da sie (derzeit) nicht spezifizieren, wie die Parameter dieses Prozesses (z. B. Evidenzschwellen) bestimmt werden.

Schlüsselbegriffe

Adaptive Werkzeugkiste (*adaptive toolbox*) Eine prominente theoretische Metapher in der Entscheidungsforschung, die besagt, dass Menschen über verschiedene Urteils- oder Entscheidungsstrategien verfügen, die sich meist in ihrer Akkuratheit aber auch ihren (kognitiven) Kosten unterscheiden.

Attribut (*attribute*) Merkmal einer Entscheidungsoption, das entscheidungsrelevant im Hinblick auf die Ziele der entscheidenden Person ist und entsprechendes Gewicht erhält.

Attributgewicht (*attribute weight*) Subjektives Gewicht, mit dem ein Attribut einer Option die Entscheidung oder das Urteil des Individuums beeinflusst. Das absolute Attributgewicht bestimmt sich durch die Wichtigkeit des damit verbundenen Ziels (z. B. der Preis als Attribut hinsichtlich des Ziels, Geld zu sparen). Das relative Attributgewicht in einer spezifischen Entscheidung kann auch bei hoher absoluter Wichtigkeit gering sein, wenn die Optionen sich nur geringfügig (z. B. im Preis) unterscheiden.

Bayes-Theorem (*Bayes' theorem*) Aus den Axiomen der Wahrscheinlichkeitstheorie abgeleitetes Prinzip zur Bestimmung einer bedingten Wahrscheinlichkeit $p(A|B)$, wenn $p(B)$, $p(\text{nicht} - B)$ und $p(B|A)$ bekannt sind. Typischerweise beurteilt man damit die Wahrscheinlichkeit einer Hypothese im Lichte bestimmter Daten $p(H|D)$, wenn die A-priori-Wahrscheinlichkeit der Hypothese $p(H)$ (und damit auch $p(\text{nicht-H})$) sowie die Wahrscheinlichkeit der Daten unter der Hypothese $p(D|H)$ zur Verfügung stehen.

Deskriptive Sichtweise (*descriptive view*) Die deskriptive Sichtweise fokussiert darauf, wie Urteile oder Entscheidungen *tatsächlich* aussehen. Diese Herangehensweise ist daher in der Psychologie gängiger als die normative Sichtweise (s. dort).

Elementare Informationsverarbeitungsprozesse (*elementary information process*) Ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung von Prozessmodellen in der Entscheidungsforschung war die Definition einzelner kognitiver Verarbeitungsschritte (z. B. zwei Werte vergleichen), die elementare Informationsverarbeitungsprozesse genannt werden und anhand derer sich viele sequenzielle Entscheidungsstrategien exakt beschreiben lassen.

Erwartungswert (*expected value*) Der Erwartungswert einer Entscheidungsoption – klassischerweise einer Lotterie – ist definiert als die Summe aller möglichen Konsequenzen multipliziert mit ihren jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeiten.

Exemplarmodelle (*exemplar models*) Basieren auf der Annahme, dass Instanzen von zu beurteilenden Objekten bei früheren Gelegenheiten zusammen mit dem Kriteriumswert abgespeichert wurden. Ein neues Urteilsobjekt wird dann aufgrund seiner Ähnlichkeit zu den gespeicherten Instanzen beurteilt. Die Modelle sind meist mathematisch präzise formuliert.

Framing-Effekt (*framing effect*) Empirischer Befund, dass die unterschiedliche Formulierung/Präsentation von identischen Konsequenzen (als scheinbare Gewinne oder Verluste) das Urteils- und Entscheidungsverhalten beeinflussen.

Heuristics-and-Biases-Forschungsprogramm (*heuristics-and-biases program*) Sammelbegriff für das von Daniel Kahneman und Amos Tversky begründete Forschungsprogramm, das viele Abweichungen von normativen Entscheidungsmodellen demonstriert und mittels heuristischer Verarbeitungsprinzipien (z. B. Verfügbarkeit, Repräsentativität, Verankerung) erklärt hat.

Heuristik (*heuristic*) Wörtlich „Finderegel", ist ein regelbasiertes Verfahren, das nur begrenzt Informationen nutzt oder deren Integration vereinfacht und (nur) unter bestimmten Bedingungen zu einem guten Ergebnis gelangen kann.

Kohärenz (*coherence*) Kohärenz und Korrespondenz (s. dort) sind Kriterien, die herangezogen werden können, um die Rationalität von Urteilen und Entscheidungen einzuschätzen. Das Kriterium der Kohärenz fordert dabei vorwiegend innere Widerspruchsfreiheit und ist meist an ein normatives Modell angelehnt.

Kohärenznetzwerke (*coherence networks*) Netzwerke, die Entscheidungen als das Herstellen einer widerspruchsfreien Interpretation der Entscheidungssituation auffassen. Der zentrale Prozess ist dabei das Aufwerten kohärenter und Abwerten konflikthafter Informationen.

Kompensatorische Entscheidungsstrategien ***(compensatory decision strategies)*** Kompensatorische Entscheidungsstrategien zeichnen sich dadurch aus, dass Attribute sich gegenseitig ausgleichen oder überstimmen können. So können beispielsweise positive Werte auf manchen Attributen negative Werte auf anderen Attributen ausgleichen.

Konsequenz ***(consequence, outcome)*** Mögliches Ergebnis der Wahl bei einer riskanten Entscheidung. Die Konsequenz hängt nicht nur von der gewählten Option ab, sondern auch von nicht kontrollierbaren Ereignissen, die das Ergebnis mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten beeinflussen (z. B. Wetter).

Korrespondenz ***(correspondence)*** Im Gegensatz zum Kohärenzkriterium (s. dort) fordert das Korrespondenzkriterium, dass Urteile oder Entscheidungen mit den realen Zuständen der Welt oder den Fakten übereinstimmen sollen.

Linsenmodell ***(lens model)*** Allgemeines Rahmenmodell zur Beschreibung und Analyse des Urteilsprozesses. Die Urteilsdimension ist nicht direkt, sondern nur durch Hinweisreize (Cues) erschließbar. Das Linsenmodell beschreibt sowohl den Zusammenhang des Urteilskriteriums mit den Cues als auch die Verwendung der Cues durch die urteilende Person und ermöglicht so die Ermittlung verschiedener Kenngrößen wie Achievement, Passung zwischen Urteiler- und Umweltmodell sowie der Konsistenz des Urteilers.

Nichtkompensatorische Entscheidungsstrategien ***(non-compensatory decision strategies)*** Im Gegensatz zu den kompensatorischen Strategien (s. dort) erlauben nichtkompensatorische Strategien bei Attributen keine Ausgleichsmöglichkeit – meist deswegen, weil sie nur auf einige wenige Attribute fokussieren und andere ignorieren.

Normative Sichtweise ***(normative view)*** Im Gegensatz zur deskriptiven Sichtweise (s. dort) definiert ein normatives Modell, wie optimale Urteile oder Entscheidungen aussehen *sollten*, was meist aus mathematischen und/oder ökonomischen Theorien hergeleitet wird.

Option ***(option)*** Eine zur Wahl stehende (Handlungs-)Alternative.

Prospect-Theorie ***(prospect theory)*** Erweiterung der Theorie des erwarteten Nutzens, um behaviorale Abweichungen davon erklären zu können (z. B. Framing-Effekte, Risikoaversion und Risikoneigung). Gewinne und Verluste werden nicht absolut, sondern relativ zu einem subjektiven Referenzpunkt (Anspruchsniveau) definiert; eine spezielle Gewichtungsfunktion für Wahrscheinlichkeiten soll die Übergewichtung kleiner und die Untergewichtung großer Wahrscheinlichkeiten erklären. Eine der einflussreichsten und erfolgreichsten Theorien der riskanten Wahl.

Prozessmodell ***(process model)*** Modell, das die hypothetischen kognitiven Verarbeitungsschritte beim Urteilen und Entscheiden spezifiziert.

Theorie des erwarteten Nutzens ***(expected utility theory)*** Normatives Prinzip der Maximierung des erwarteten Nutzens bei riskanten Entscheidungen. Es wird angenommen, dass die Nutzenwerte aller Konsequenzen mit ihren jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeiten multipliziert und aufsummiert werden. Die Option mit der größten gewichteten Summe wird gewählt.

Weiterführende Literatur

Baron, J. (2008). *Thinking and Deciding* (4. Aufl.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. (Umfassende Behandlung insbesondere der Strukturmodelle und psychologisch inspirierten Modelle mit Fokus auf der Rationalitätsdebatte.)

Dawes, R. M. (2001). *Everyday Irrationality. How Pseudo-Scientists, Lunatics, and the Rest of us systematically fail to think rationally*. Boulder, CO: Westview Press. (Extremer Vertreter einer Position in der Rationalitätsdebatte mit einer Fülle von empirischen – und unterhaltsamen – Beispielen.)

Eisenführ, F., Weber, M., & Langer, T. (2010). *Rational Decision Making* (3. Auflage). Berlin ; London: Springer. (Aus der normativen Perspektive geschriebenes Buch, das Verfahren der Entscheidungsanalyse behandelt.)

Evans, J. S. B. T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 255–278. (Eine aktuelle Übersicht verschiedener Zwei-Prozess-Modelle des Entscheidens, die in diesem Kapitel nicht behandelt wurden.)

Gigerenzer, G., Todd, P. M., & the ABC Research Group. (1999). *Simple heuristics that make us smart*. New York, NY, US: Oxford University Press. (Inzwischen ein „Klassiker", mit dem die ABC Research Group die Forschung zur ökologischen Rationalität einfacher Heuristiken angestoßen hat; vgl. auch das Nachfolgewerk von Todd et al. 2012.)

Glimcher, P. W., & Fehr, E. (Hrsg.). (2013). *Neuroeconomics: Decision making and the brain (2nd ed.)*. San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press. (Einführung in das noch neue Forschungsgebiet der neuronalen Grundlagen von Entscheidungen.)

Hardman, D. (2009). *Judgment and decision making: Psychological perspectives*. Malden; Leicester, England: Blackwell Publishing. (Breite Sammlung von Themen der Urteils- und Entscheidungsforschung, aktuelle Empirie, oft mit Anwendungsbezug.)

Jungermann, H., Pfister, H.-R., & Fischer, K. (2010). *Die Psychologie der Entscheidung: Eine Einführung (3. Auflage)* (Auflage: 3. Aufl. 2010.). Heidelberg,: Spektrum Akademischer Verlag. (Umfassendstes deutschsprachiges Lehrbuch der Entscheidungsforschung.)

Koehler, D. J., & Harvey, N. (Hrsg.). (2004). *Blackwell handbook of judgment and decision making*. Malden, MA: Blackwell Publishing Ltd. (Breiter Sammelband mit einführenden Beiträgen aus sehr unterschiedlichen theoretischen Perspektiven.)

Newell, B. R., Lagnado, D. A., & Shanks, D. R. (2007). *Straight choices: The psychology of decision making*. New York, NY: Psychology Press. (Urteils- und Entscheidungspsychologie aus kognitiver Perspektive.)

Stanovich, K. E. (2010). *Decision Making and Rationality in the Modern World*. New York: Oxford University Press, USA.

(Ausgewogene Diskussion von Rationalität und Irrationalität in Urteilen und Entscheidungen.)

Webseiten

- http://www.sjdm.org/ – Homepage der Society for Judgment and Decision Making.
- http://eadm.eu/ – Homepage der European Association for Decision Making.
- http://www.decisionsciencenews.com/ – Breite Sammlung interessanter Neuigkeiten aus verschiedenen Bereichen der Entscheidungsforschung, herausgegeben von Daniel Goldstein.

Literatur

Adelman, L. (1981). The influence of formal, substantive, and contextual task properties on the relative effectiveness of different forms of feedback in multiple-cue probability learning tasks. *Organizational Behavior und Human Performance*, *27*, 423–442.

Allais, M. (1953). Le comportement de l'homme rationnel devant le risque: Critique des postulats et axioms de l'e'cole americaine [Rational man's behavior in face of risk: Critique of the American School's postulates and axioms]. *Econometrica*, *21*, 503–546.

Alter, A. L., & Oppenheimer, D. M. (2009). Uniting the tribes of fluency to form a metacognitive nation. *Personality and Social Psychology Review*, *13*, 219–235.

Balzer, W. K., Doherty, M. E., & O'Connor, R. (1989). Effects of cognitive feedback on performance. *Psychological Bulletin*, *106*, 410–433.

Bar-Hillel, M. (1980). The base-rate fallacy in probability judgments. *Acta Psychologica*, *44*, 211–233.

Barbey, A. K., & Sloman, S. A. (2007). Base-rate respect: From ecological rationality to dual processes. *Behavioral und Brain Sciences*, *30*, 241–297.

Baron, J. (2004). Normative models of judgment and decision making. In D. J. Koehler, & N. Harvey (Hrsg.), *Blackwell handbook of judgment and decision making* (S. 19–36). Malden: Blackwell Publishing.

Baron, J. (2008). *Thinking and deciding* (4. Aufl.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Barron, G., & Erev, I. (2003). Small feedback-based decisions and their limited correspondence to description-based decisions. *Journal of Behavioral Decision Making*, *16*, 215–233.

Bazerman, M. H., & Gino, F. (2012). Behavioral ethics: Toward a deeper understanding of moral judgment and dishonesty. *Annual Review of Law and Social Science*, *8*, 85–104.

Beach, L. R., & Mitchell, T. R. (1978). A contingency model for the selection of decision strategies. *Academy of Management Review*, *3*, 439–449.

Bechara, A., & Damasio, A. R. (2005). The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision. *Games and Economic Behavior*, *52*, 336–372.

Begg, I. M., Anas, A., & Farinacci, S. (1992). Dissociation of processes in belief: Source recollection, statement familiarity, and the illusion of truth. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*, 446–458.

Bell, D. E. (1985). Disappointment in decision making under uncertainty. *Operations Research*, *33*, 1–27.

Bergert, F. B., & Nosofsky, R. M. (2007). A response-time approach to comparing generalized rational and take-the-best models of decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *33*, 107–129.

Betsch, T., & Haberstroh, S. (Hrsg.). (2005). *The routines of decision making*. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Betsch, T., Funke, J., & Plessner, H. (2011). *Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen*. Berlin: Springer.

Billings, R. S., & Marcus, S. A. (1983). Measures of compensatory and noncompensatory models of decision behavior: Process tracing versus policy capturing. *Organizational Behavior und Human Performance*, *31*(3), 331–352.

Birnbaum, M. H. (2004). Causes of Allais common consequence paradoxes: An experimental dissection. *Journal of Mathematical Psychology*, *48*, 87–106. doi:10.1016/j.jmp.2004.01.001.

Birnbaum, M. H. (2008). Evaluation of the priority heuristic as a descriptive model of risky decision making: Comment on Brandstätter, Gigerenzer, and Hertwig (2006). *Psychological Review*, *115*, 253–260. doi:10.1037/0033-295X.115.1.253.

Birnbaum, M. H. (2011). Testing mixture models of transitive preference: Comment on Regenwetter, Dana, and Davis-Stober (2011). *Psychological Review*, *118*, 675–683.

Birnbaum, M. H., & Jou, J.-W. (1990). A theory of comparative response times and „difference" judgments. *Cognitive Psychology*, *22*, 184–210.

Blank, H., Musch, J., & Pohl, R. F. (2007). Hindsight bias: On being wise after the event. *Social Cognition*, *25*, 1–9.

Brandstätter, E., Gigerenzer, G., & Hertwig, R. (2006). Making choices without trade-offs: The priority heuristic. *Psychological Review*, *113*, 409–432. doi:10.1037/0033-295X.113.2.409.

Brehmer, B. (1980). In one word: Not from experience. *Acta Psychologica*, *45*, 223–241.

Brehmer, B. (1994). The psychology of linear judgement models. *Acta Psychologica*, *87*, 137–154.

Brehmer, A., & Brehmer, B. (1988). What have we learned about human judgment from thirty years of policy capturing? In B. Brehmer, & C. R. B. Joyce (Hrsg.), *Human judgment: The SJT view* (S. 75–114). Oxford, England: North-Holland.

Brehmer, B., & Joyce, C. R. B. (Hrsg.). (1988). *Human judgment: The SJT view*. Oxford, England: North-Holland.

Bröder, A. (2000a). A methodological comment on behavioral decision research. *Psychologische Beiträge*, *42*, 645–662.

Bröder, A. (2000b). Assessing the empirical validity of the „Take-the-best" heuristic as a model of human probabilistic inference. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *26*(5), 1332–1346.

Bröder, A. (2003). Decision making with the „adaptive toolbox": Influence of environmental structure, intelligence, and working memory load. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*, 611–625.

Bröder, A. (2005). *Entscheiden mit der „adaptiven Werkzeugkiste": Ein empirisches Forschungsprogramm*. Lengerich: Pabst.

Bröder, & Eichler, A. (2006). The use of recognition information and additional cues in inferences from memory. *Acta Psychologica*, *121*, 275–284.

Bröder, A., & Gaissmaier, W. (2007). Sequential processing of cues in memory-based multiattribute decisions. *Psychonomic Bulletin und Review*, *14*, 895–900.

Bröder, A., & Newell, B. R. (2008). Challenging some common beliefs: Empirical work within the adaptive toolbox metaphor. *Judgment and Decision Making*, *3*, 205–214.

Bröder, A., & Schiffer, S. (2003). Take The Best versus simultaneous feature matching: Probabilistic inferences from memory and effects of representation format. *Journal of Experimental Psychology: General*, *132*, 277–293.

Bröder, A., & Schiffer, S. (2006). Adaptive flexibility and maladaptive routines in selecting fast and frugal decision strategies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 904–918.

Brunswik, E. (1952). *The conceptual framework of psychology. (Int. Encycl. unified Sci., v. 1, no. 10.)*. Oxford, England: Univ. Chicago Press.

Brunswik, E. (1955). Representative design and probabilistic theory in a functional psychology. *Psychological Review*, *62*, 193–217.

Budescu, D. V., & Weiss, W. (1987). Reflection of transitive and intransitive preferences: A test of prospect theory. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *39*, 184–202.

Busemeyer, J. R., & Townsend, J. T. (1993). Decision field theory: A dynamic-cognitive approach to decision making in an uncertain environment. *Psychological Review*, *100*, 432–459. doi:10.1037/0033-295X.100.3.432.

Camilleri, A. R., & Newell, B. R. (2011). When and why rare events are underweighted: A direct comparison of the sampling, partial feedback, full feedback and description choice paradigms. *Psychonomic Bulletin und Review*, *18*, 377–384. doi:10.3758/s13423-010-0040-2.

Casscells, W., Schoenberger, A., & Graboys, T. B. (1978). Interpretation by physicians of clinical laboratory results. *The New England Journal of Medicine*, *299*, 999–1001.

Castela, M., Kellen, D., Erdfelder, E., & Hilbig, B. E. (2014). The impact of subjective recognition experiences on recognition heuristic use: A multinomial processing tree approach. *Psychonomic Bulletin und Review*, *21*, 1131–1138.

Chapman, G. B., & Johnson, E. J. (2002). Incorporating the irrelevant: Anchors in judgments of belief and value. In T. Gilovich, D. Griffin, & D. Kahneman (Hrsg.), *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment* (S. 120–138). New York, NY: Cambridge University Press.

Chase, V. M., Hertwig, R., & Gigerenzer, G. (1998). Visions of rationality. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 206–214. doi:10.1016/S1364-6613%2898%2901179-6.

Christensen-Szalanski, J. J., & Willham, C. F. (1991). The hindsight bias: A meta-analysis. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *48*, 147–168.

Chu, P. C., & Spires, E. E. (2003). Perceptions of accuracy and effort of decision strategies. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *91*(2), 203–214.

Cohen, M., Jaffray, J.-Y., & Saïd, T. (1987). Experimental comparison of individual behavior under risk and under uncertainty for gains and for losses. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *39*, 1–22.

Combs, B., & Slovic, P. (1979). Newspaper coverage of causes of death. *Journalism Quarterly*, *56*, 837–849.

Czerlinski, J., Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1999). How good are simple heuristics? In *Simple heuristics that make us smart* (S. 97–118). New York, NY: Oxford University Press.

Dawes, R. M. (2001). *Everyday irrationality. How pseudo-scientists, lunatics, and the rest of us systematically fail to think rationally*. Boulder, CO: Westview Press.

Dawes, R. M., Faust, D., & Meehl, P. E. (1989). Clinical versus actuarial judgment. *Science*, *243*, 1668–1674.

Dechêne, A., Stahl, C., Hansen, J., & Wänke, M. (2010). The truth about the truth: A meta-analytic review of the Truth Effect. *Personality and Social Psychology Review*, *14*, 238–257.

Dougherty, M. R., Franco-Watkins, A. M., & Thomas, R. (2008). Psychological plausibility of the theory of Probabilistic Mental Models and the Fast and Frugal Heuristics. *Psychological Review*, *115*, 199–213.

Eddy, D. M. (1982). Probabilistic reasoning in clinical medicine: Problems and opportunities. In D. Kahneman, & P. Slovic Tversky et al. (Hrsg.), *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases* (S. 249–267). New York: Cambridge University Press.

Edwards, W. (1954). The theory of decision making. *Psychological Bulletin*, *51*(4), 380–417.

Einhorn, H. J., Kleinmuntz, D. N., & Kleinmuntz, B. (1979). Linear regression and process-tracing models of judgment. *Psychological Review*, *86*, 465–485.

Eisenführ, F., Weber, M., & Langer, T. (2010). *Rational Decision Making*. Berlin, London: Springer.

Erdfelder, E., Küpper-Tetzel, C. E., & Mattern, S. D. (2011). Threshold models of recognition and the recognition heuristic. *Judgment and Decision Making*, *6*, 7–22.

Ettlin, F., Bröder, A. und Henninger, M. (2015). A new task format for investigating information search and organization in multi-attribute decisions. *Behavior Research Methods. 47*, 506–518.

Evans, J. S. B. T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 255–278.

Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Duncker und Humblot.

Fiedler, K. (1988). The dependence of the conjunction fallacy on subtle linguistic factors. *Psychological Research*, *50*, 123–129.

Fiedler, K. (1993). Kognitive Täuschungen: Faszination eines modernen Forschungsprogramms. In W. Hell, K. Fiedler, & G. Gigenzer (Hrsg.), *Kognitive Täuschungen. Fehl-Leistungen und Mechanismen des Urteilens, Denkens und Erinnerns* (S. 7–12). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Fiedler, K. (2000). Beware of samples! A cognitive-ecological sampling approach to judgment biases. *Psychological Review*, *107*, 659–676.

Fiedler, K. (2010). How to study cognitive decision algorithms: The case of the priority heuristic. *Judgment and Decision Making*, *5*, 21–32.

Fiedler, K., & Walka, I. (1993). Training lie detectors to use nonverbal cues instead of global heuristics. *Human Communication Research*, *20*(2), 199–223.

Fischhoff, B. (1975). Hindsight is not equal to foresight: The effect of outcome knowledge on judgment under uncertainty. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *1*, 288–299.

Galesic, M., Garcia-Retamero, R., & Gigerenzer, G. (2009). Using icon arrays to communicate medical risks: Overcoming low numeracy. *Health Psychology*, *28*, 210–216.

Gigerenzer, G. (1991). How to make cognitive illusions disappear: Beyond „heuristics and biases". In W. Stroebe, & M. Hewstone (Hrsg.), *European Review of Social Psychology* (Bd. 2, S. 83–115). Chichester: Wiley.

Gigerenzer, G. (1996). On narrow norms and vague heuristics: A reply to Kahneman and Tversky. *Psychological Review*, *103*, 592–596.

Gigerenzer, G., & Edwards, A. (2003). Simple tools for understanding risks: From innumeracy to insight. *British Medical Journal*, *327*, 741–744.

Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way: Models of bounded rationality. *Psychological Review*, *103*, 650–669.

Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (2011). The recognition heuristic: A decade of research. *Judgment and Decision Making*, *6*, 100–121.

Gigerenzer, G., & Hoffrage, U. (1995). How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats. *Psychological Review*, *102*, 684–704.

Gigerenzer, G., Todd, P. M., & Todd (1999). *Simple heuristics that make us smart*. New York, NY: Oxford University Press.

Gilovich, T., Vallone, R., & Tversky, A. (1985). The hot hand in basketball: On the misperception of random sequences. *Cognitive Psychology*, *17*, 295–314.

Gilovich, T., Griffin, D., & Kahneman, D. (Hrsg.). (2002). *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Glöckner, A., & Betsch, T. (2008a). Do people make decisions under risk based on ignorance? An empirical test of the priority heuristic against cumulative prospect theory. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *107*, 75–95.

Glöckner, A., & Betsch, T. (2008b). Modeling option and strategy choices with connectionist networks: Towards an integrative model of automatic and deliberate decision making. *Judgment and Decision Making*, *3*, 215–228.

Glöckner, A., & Betsch, T. (2008c). Multiple-reason decision making based on automatic processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, und Cognition*, *34*, 1055–1075.

Glöckner, A., & Betsch, T. (2012). Decisions beyond boundaries: When more information is processed faster than less. *Acta Psychologica*, *139*, 532–542.

Glöckner, & Bröder, A. (2014). Cognitive integration of recognition information and additional cues in memory-based decisions. *Judgment and Decision Making*, *9*(1), 35–50.

Glöckner, A., Hilbig, B. E., Henninger, F, & Fiedler, S. (2016). The reversed Description-Experience gap: disentangling sources of presentation format effects in risky choice. *Journal of Experimental Psychology: General*, *145*, 486–508.

Glöckner, A., & Witteman, C. (2010). Beyond dual-process models: A categorisation of processes underlying intuitive judgement and decision making. *Thinking und Reasoning*, *16*, 1–25.

Glöckner, A., Betsch, T., & Shindler, N. (2010). Coherence shifts in probabilistic inference tasks. *Journal of Behavioral Decision Making*, *23*, 439–462.

Glöckner, A., Hilbig, B. E., & Jekel, M. (2014). What is adaptive about adaptive decision making? A parallel constraint satisfaction account. *Cognition*, *133*, 641–666.

Gluck, M. A., & Bower, G. H. (1988). Evaluating an adaptive network model of human learning. *Journal of Memory and Language*, *27*(2), 166–195.

Goldstein, D. G., & Gigerenzer, G. (2002). Models of ecological rationality: The recognition heuristic. *Psychological Review*, *109*, 75–90.

Goldstein, W. M., & Hogarth, R. M. (1997). Judgment and decision research: Some historical context. In W. M. Goldstein, & R. M. Hogarth (Hrsg.), *Research on judgment and decision making: Currents, connections, and controversies* (S. 3–65). New York, NY US: Cambridge University Press.

Greifeneder, R., Bless, H., & Pham, M. T. (2011). When do people rely on affective and cognitive feelings in judgment? A review. *Personality and Social Psychology Review*, *15*, 107–141. doi:10.1177/1088868310367640.

Grove, W. M., Zald, D. H., Lebow, B. S., Snitz, B. E., & Nelson, C. (2000). Clinical versus mechanical prediction: A meta-analysis. *Psychological Assessment*, *12*, 19–30.

Hagmayer, Y. (2010). Investigating causal intuitions. In A. Glöckner, & C. Witteman (Hrsg.), *Foundations for tracing intuition: Challenges and methods* (S. 160–178). New York, NY, US: Psychology Press.

Hahn, U., Prat-Sala, M., Pothos, E. M., & Brumby, D. P. (2010). Exemplar similarity and rule application. *Cognition*, *114*, 1–18.

Hall, G. C. N. (1988). Criminal behavior as a function of clinical and actuarial variables in a sexual offender population. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, *56*, 773–775.
Hammond, K. R. (1955). Probabilistic functioning and the clinical method. *Psychological Review*, *62*, 255–262.
Hammond, K. R., Hursch, C. J., & Todd, F. J. (1964). Analyzing the components of clinical inference. *Psychological Review*, *71*(6), 438–456.
Hammond, P. J. (1997). Rationality in economics. *Rivista Internazionale di Scienze Sociali*, *105*, 247–288.
Hardman, D. (2009). *Judgment and decision making: Psychological perspectives*. Blackwell Publishing: Malden, Leicester, England.
Hastie, R., & Dawes, R. M. (2001). *Rational choice in an uncertain world: The psychology of judgment and decision making*. Thousand Oaks, CA US: Sage Publications.
Hausmann, & Läge, D. (2008). Sequential evidence accumulation in decision making: The individual desired level of confidence can explain the extent of information acquisition. *Judgment and Decision Making*, *3*, 229–243.
Hausmann, D., Läge, D., Pohl, R. F., & Bröder, A. (2007). Testing quickEst: No evidence for the quick-estimation heuristic. *European Journal of Cognitive Psychology*, *19*, 446–456.
Helversen, B. von, & Rieskamp, J. (2008). The mapping model: A cognitive theory of quantitative estimation. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*, 73–96.
Helversen, B. von, Herzog, S. M., & Rieskamp, J. (2014). Haunted by a doppelgänger: Irrelevant facial similarity affects rule-based judgments. *Experimental Psychology*, *61*, 12–22.
Hertwig, R., & Gigerenzer, G. (1999). The conjunction fallacy revisited: How intelligent inferences look like reasoning errors. *Journal of Behavioral Decision Making*, *12*, 275–306.
Hertwig, R., Barron, G., Weber, E. U., & Erev, I. (2004). Decisions from experience and the effect of rare events in Risky Choice. *Psychological Science*, *15*, 534–539.
Hertwig, R., Benz, B., & Krauss, S. (2008a). The conjunction fallacy and the many meanings of and. *Cognition*, *108*, 740–753.
Hertwig, R., Herzog, S. M., Schooler, L. J., & Reimer, T. (2008b). Fluency Heuristic: A model of how the mind exploits a by-product of information retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, und Cognition*, *34*, 1191–1206.
Herzog, S. M., & Hertwig, R. (2013). The ecological validity of fluency. In C. Unkelbach, & R. Greifeneder (Hrsg.), *The experience of thinking: How feelings from mental processes influence cognition and behavior* (S. 190–219). London: Psychology Press.
Hilbig, B. E. (2008). One-reason decision making in risky choice? A closer look at the priority heuristic. *Judgment and Decision Making*, *3*, 457–462.
Hilbig, B. E. (2010). Reconsidering „evidence" for fast-and-frugal heuristics. *Psychonomic Bulletin und Review*, *17*, 923–930.
Hilbig, B. E., & Glöckner, A. (2011). Yes, they can! Appropriate weighting of small probabilities as a function of information acquisition. *Acta Psychologica*, *138*, 390–396.
Hilbig, B. E., & Moshagen, M. (2014). Generalized outcome-based strategy classification: Comparing deterministic and probabilistic choice models. *Psychonomic Bulletin und Review*, *21*, 1431–1443.
Hilbig, B. E., & Pohl, R. F. (2008). Recognizing users of the recognition heuristic. *Experimental Psychology*, *55*, 394–401.
Hilbig, B. E., & Pohl, R. F. (2009). Ignorance- versus evidence-based decision making: A decision time analysis of the recognition heuristic. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *35*, 1296–1305. doi:10.1037/a0016565.
Hilbig, B. E., & Richter, T. (2011). Homo heuristicus outnumbered: Comment on Gigerenzer and Brighton (2009). *Topics in Cognitive Science*, *3*, 187–196.
Hilbig, B. E., Erdfelder, E., & Pohl, R. F. (2010). One-reason decision-making unveiled: A measurement model of the recognition heuristic. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, und Cognition*, *36*, 123–134.
Hilbig, B. E., Erdfelder, E., & Pohl, R. F. (2011). Fluent, fast, and frugal? A formal model evaluation of the interplay between memory, fluency, and comparative judgments. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, und Cognition*, *37*, 827–839.
Hilbig, B. E., Erdfelder, E., & Pohl, R. F. (2012). A matter of time: Antecedents of one-reason decision making based on recognition. *Acta Psychologica*, *141*, 9–16.
Hoffman, P. J. (1960). The paramorphic representation of clinical judgment. *Psychological Bulletin*, *57*, 116–131.
Hoffmann, J. A., Helversen, B. von, & Rieskamp, J. (2014). Pillars of judgment: How memory abilities affect performance in rule-based and exemplar-based judgments. *Journal of Experimental Psychology: General*, *143*, 2242–2261.
Hoffrage, U., & Gigerenzer, G. (1998). Using natural frequencies to improve diagnostic inferences. *Academic Medicine*, *73*, 538–540.
Hogarth, R. M. (2001). *Educating intuition*. Chicago, IL US: University of Chicago Press.
Hogarth, R. M., & Karelaia, N. (2007). Heuristic and linear models of judgment: Matching rules and environments. *Psychological Review*, *114*, 733–758.
Hohleiter, V. (2014). Fährunglück vor Südkorea – Taucher bergen mehr als 100 Leichen aus gesunkener Fähre. Tagesspiegel. http://www.tagesspiegel.de/weltspiegel/faehrunglueck-vor-suedkorea-taucher-bergen-mehr-als-100-leichen-aus-gesunkener-faehre/9786464.html. Zugegriffen: 22. April 2014
Hsee, C. (1996). The evaluability hypothesis: An explanation for preference reversals between joint and separate evaluations of alternatives. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *67*(3), 247–257.
Huber, J., Payne, J. W., & Puto, C. (1982). Adding asymmetrically dominated alternatives: Violations of regularity and the similarity hypothesis. *Journal of Consumer Research*, *9*(1), 90–98.
Huber, O. (1980). The influence of some task variables on cognitive operations in an information-processing decision model. *Acta Psychologica*, *45*, 187–196.
Huber, O. (1982). *Entscheiden als Problemlösen*. Bern: Huber.
Jahn, G., Renkewitz, F., & Kunze, S. (2007). Heuristics in multi-attribute decision making: Effects of representation format. In D. S. McNamara, & G. Trafton (Hrsg.), *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 383–388). Mawah, NJ: Erlbaum.
Jensen, N. E. (1967). An introduction to Bernoullian utility theory: I. Utility functions. *The Swedish Journal of Economics*, *69*, 163–183.
Jerger, J. (1992). *Das St. Petersburg-Paradoxon*. WiSt-Wirtschaftswissenschaftliches Studium. (S. 407–410).
Johnson, E. J., & Goldstein, D. (2003). Do defaults save lives? *Science*, *302*(5649), 1338–1339.
Johnson, E. J., & Payne, J. W. (1985). Effort and accuracy in choice. *Management Science*, *31*, 395–414.
Juslin, P., & Persson, M. (2002). PROBabilities from EXemplars (PROBEX): A „lazy" algorithm for probabilistic inference from generic knowledge. *Cognitive Science*, *26*(5), 563–607.
Juslin, P., Olsson, H., & Olsson, A.-C. (2003). Exemplar effects in categorization and multiple-cue judgment. *Journal of Experimental Psychology: General*, *132*, 133–156.
Kahneman, D., & Frederick, S. (2004). Attribute substitution in intuitive judgment. In M. Augier, & J. G. March (Hrsg.), *Models of a man: Essays in memory of Herbert A. Simon* (S. 411–432). Cambridge, MA: MIT Press.
Kahneman, D., & Tversky, A. (1972a). On prediction and judgment. *ORI Research Monographs*, *12*, 430–454.
Kahneman, D., & Tversky, A. (1972b). Subjective probability: A judgment of representativeness. *Cognitive Psychology*, *3*, 430–454.
Kahneman, D., & Tversky, A. (1973). On the psychology of prediction. *Psychological Review*, *80*, 237–251.
Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, *47*, 263–292.
Kahneman, D., & Tversky, A. (1996). On the reality of cognitive illusions. *Psychological Review*, *103*, 582–591. doi:10.1037/0033-295X.103.3.582.
Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. New York: Cambridge University Press.
Kahneman, D., Knetsch, J. L., & Thaler, R. H. (1990). Experimental tests of the endowment effect and the Coase theorem. *Journal of Political Economy*, *98*, 1325–1348.
Kahneman, D., Knetsch, J. L., & Thaler, R. H. (1991). Anomalies: The endowment effect, loss aversion, and status-quo bias. *Journal of Economic Perspectives*, *5*(1), 193–206.

Karelaia, N., & Hogarth, R. M. (2008). Determinants of linear judgment: A meta-analysis of lens model studies. *Psychological Bulletin*, *134*, 404–426. doi:10.1037/0033-2909.134.3.404.

Karlsson, L., Juslin, P., & Olsson, H. (2008). Exemplar-based inference in multi-attribute decision making: Contingent, not automatic, strategy shifts? *Judgment and Decision Making*, *3*, 244–260.

Kaufmann, E., Reips, U.-D., & Wittmann, W. (2013). A critical meta-analysis of lens model studies in human judgment and decision-making. *PLoS ONE*, *8*(12), e83528.

Khader, P. H., Pachur, T., Meier, S., Bien, S., Jost, K., & Rösler, F. (2011). Memory-based decision-making with heuristics: Evidence for a controlled activation of memory representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 3540–3554.

Khader, P. H., Pachur, T., & Jost, K. (2013). Automatic activation of attribute knowledge in heuristic inference from memory. *Psychonomic Bulletin und Review*, *20*, 372–377.

Klayman, J. (1988). Cue discovery in probabilistic environments: Uncertainty and experimentation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *14*(2), 317–330.

Klein, G. (2008). Naturalistic decision making. *Human Factors*, *50*, 456–460.

Knowlton, B. J., Squire, L. R., & Gluck, M. A. (1994). Probabilistic classification learning in amnesia. *Learning und Memory*, *1*, 106–120.

Koehler, J. J. (1996). The base rate fallacy reconsidered: Descriptive, normative, and methodological challenges. *Behavioral und Brain Sciences*, *19*, 1–53.

Koop, G. J., & Johnson, J. G. (2013). The response dynamics of preferential choice. *Cognitive Psychology*, *67*, 151–185.

Krajbich, I., & Rangel, A. (2011). Multialternative drift-diffusion model predicts the relationship between visual fixations and choice in value-based decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*, 13852–13857.

Krajbich, I., Armel, C., & Rangel, A. (2010). Visual fixations and the computation and comparison of value in simple choice. *Nature Neuroscience*, *13*, 1292–1298.

Lagnado, D. A., & Sloman, S. (2004). The advantage of timely intervention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*(4), 856–876.

Lee, M. D., & Cummins, T. D. (2004). Evidence accumulation in decision making: Unifying the „take the best" and the „rational" models. *Psychonomic Bulletin und Review*, *11*, 343–352.

Lichtenstein, S., & Slovic, P. (1971). Reversals of preference between bids and choices in gambling decisions. *Journal of Experimental Psychology*, *89*(1), 46–55.

Lichtenstein, S., Slovic, P., Fischhoff, B., Layman, M., & Combs, B. (1978). Judged frequency of lethal events. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *4*, 551–578.

List, J. A. (2002). Preference reversals of a different kind: The „more is less" phenomenon. *American Economic Review*, *92*(5), 1636–1643.

Locke, J. (1997). *An Essay Concerning Human Understanding*. London: Penguin Classics. 1690, revised edition

Loomes, G., & Sugden, R. (1986). Disappointment and dynamic consistency in choice under uncertainty. *Review of Economic Studies*, *53*, 271–282.

Loomes, G., & Sugden, R. (1987). Testing for regret and disappointment in choice under uncertainty. *The Economic Journal*, *97*, 118–129.

Loomes, G., & Sugden, R. (1998). Testing different stochastic specifications of Risky Choice. *Economica*, *65*, 581–598.

Loomes, G., Starmer, C., & Sugden, R. (1991). Observing violations of transitivity by experimental methods. *Econometrica*, *59*, 425–439. doi:10.2307/2938263.

MacCrimmon, K. R., & Larsson, S. (1979). Utility theory: Axioms versus 'paradoxes. In M. Allais, & O. Hagen (Hrsg.), *Expected utility and the Allais paradox* (S. 333–409). Dordrecht: NL: Reidel Publishing.

Martignon, L., & Hoffrage, U. (2002). Fast, frugal, and fit: Simple heuristics for paired comparison. *Theory and Decision*, *52*, 29–71.

Mata, R., Schooler, L. J., & Rieskamp, J. (2007). The aging decision maker: Cognitive aging and the adaptive selection of decision strategies. *Psychology and Aging*, *22*(4), 796–810.

McClelland, A. G. R., & Bolger, F. (1994). The calibration of subjective probability: Theories and models 1980–94. In G. Wright, & P. Ayton (Hrsg.), *Subjective probability* (S. 453–482). Oxford, England: John Wiley und Sons.

Medin, D. L., & Schaffer, M. M. (1978). Context theory of classification learning. *Psychological Review*, *85*, 207–238.

Meehl, P. E. (1954). *Clinical versus statistical prediction: A theoretical analysis and a review of the evidence*. Minneapolis, MN, US: University of Minnesota Press.

Mellers, B. A., & Biagini, K. (1994). Similarity and choice. *Psychological Review*, *101*, 505–518.

Mellers, B. A., Schwartz, A., Ho, K., & Ritov, I. (1997). Decision affect theory: Emotional reactions to the outcomes of risky options. *Psychological Science*, *8*, 423–429.

Mellers, B., Hertwig, R., & Kahneman, D. (2001). Do frequency representations eliminate conjunction effects? An exercise in adversarial collaboration. *Psychological Science*, *12*, 269–275.

Messer, W. S., & Griggs, R. A. (1993). Another look at Linda. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *31*, 193–196.

Miller, P. M. (1971). Do labels mislead? A multiple cue study, within the framework of brunswik's probabilistic functionalism. *Organizational Behavior and Human Performance*, *6*, 480–500. doi:10.1016/0030-5073(71)90029-8.

Moyer, R. S., & Bayer, R. H. (1976). Mental comparison and the symbolic distance effect. *Cognitive Psychology*, *8*, 228–246. doi:10.1016/0010-0285(76)90025-6.

Muchinsky, P. M., & Dudycha, A. L. (1975). Human inference behavior in abstract and meaningful environments. *Organizational Behavior und Human Performance*, *13*(3), 377–391.

Mussweiler, T., Englich, B., & Strack, F. (2004). Anchoring effect. In *Cognitive illusions: A handbook on fallacies and biases in thinking, judgement and memory* (S. 183–200). Hove, UK: Psychology Press.

Neumann, J. von, & Morgenstern, O. (1947). *Theory of games and economic behavior*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Newell, B. R. (2005). Re-visions of rationality? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 11–15. doi:10.1016/j.tics.2004.11.005.

Newell, B. R., & Fernandez, D. (2006). On the binary quality of recognition and the inconsequentially of further knowledge: Two critical tests of the recognition heuristic. *Journal of Behavioral Decision Making*, *19*, 333–346.

Newell, B. R., & Shanks, D. R. (2003). Take the best or look at the rest? Factors influencing „one-reason" decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*, 53–65.

Newell, B. R., Lagnado, D. A., & Shanks, D. R. (2007a). *Straight choices: The psychology of decision making*. New York, NY: Psychology Press.

Newell, B. R., Lagnado, D. A., & Shanks, D. R. (2007b). Challenging the role of implicit processes in probabilistic category learning. *Psychonomic Bulletin und Review*, *14*, 505–511.

Onken, J., Hastie, R., & Revelle, W. (1985). Individual differences in the use of simplification strategies in a complex decision-making task. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *11*(1), 14–27.

Oppenheimer, D. M. (2003). Not so fast! (and not so frugal!): Rethinking the recognition heuristic. *Cognition*, *90*, B1–B9.

Oskarsson, A. T., Van Boven, L., McClelland, G. H., & Hastie, R. (2009). What's next? Judging sequences of binary events. *Psychological Bulletin*, *135*, 262–285.

Over, D. (2004). Rationality and the normative/descriptive distinction. In D. J. Koehler, & N. Harvey (Hrsg.), *Blackwell handbook of judgment and decision making* (S. 3–18). Malden: Blackwell Publishing.

Pachur, T., & Bröder, A. (2013). Judgment: a cognitive processing perspective. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, *4*(6), 665–681. doi:10.1002/wcs.1259.

Pachur, T., & Hertwig, R. (2006). On the psychology of the recognition heuristic: Retrieval primacy as a key determinant of its use. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 983–1002. doi:10.1037/0278-7393.32.5.983.

Pachur, T., Bröder, A., & Marewski, J. (2008). The recognition heuristic in memory-based inference: Is recognition a non-compensatory cue? *Journal of Behavioral Decision Making*, *21*, 183–210.

Payne, J. W. (1982). Contingent decision behavior. *Psychological Bulletin*, *92*, 382–402.

Payne, J. W., Bettman, J. R., & Johnson, E. J. (1988). Adaptive strategy selection in decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *14*, 534–552.

Payne, J. W., Bettman, J. R., & Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. New York, NY: Cambridge University Press.

Pennington, N., & Hall, J. A. (2014). An analysis of humor orientation on Facebook: A lens model approach. *Humor: International Journal of Humor Research*, *27*, 1–21.

Persson, M., & Rieskamp, J. (2009). Inferences from memory: Strategy- and exemplar-based judgment models compared. *Acta Psychologica*, *130*(1), 25–37.

Pinker, S. (1997). *How the mind works*. New York, NY, US: W W Norton und Co.

Platzer, C., & Bröder, A. (2012). Most people do not ignore salient invalid cues in memory-based decisions. *Psychonomic Bulletin und Review*, *19*(4), 654–661.

Platzer, C., & Bröder, A. (2013). When the Rule is Ruled Out: Exemplars and Rules in Decisions from Memory. *Journal of Behavioral Decision Making*, *26*(5), 429–441. doi:10.1002/bdm.1776.

Platzer, C., Bröder, A., & Heck, D. W. (2014). Deciding with the eye: How the visually manipulated accessibility of information in memory influences decision behavior. *Memory & Cognition*, *42*(4), 595–608. doi:10.3758/s13421-013-0380-z.

Pleskac, T. J. (2007). A signal detection analysis of the recognition heuristic. *Psychonomic Bulletin und Review*, *14*, 379–391.

Pohl, R. F. (Hrsg.). (2004a). *Cognitive illusions: A handbook of fallacies and biases in thinking, judgement, and memory*. Hove, UK: Psychology Press.

Pohl, R. F. (2004b). Hindsight bias. In R. F. Pohl (Hrsg.), *Cognitive illusions: A handbook on fallacies and biases in thinking, judgement and memory* (S. 364–378). Hove, UK: Psychology Press.

Pohl, R. F. (2006). Empirical tests of the recognition heuristic. *Journal of Behavioral Decision Making*, *19*, 251–271. doi:10.1002/bdm.522.

Pohl, R. F. (2007). Ways to assess hindsight bias. *Social Cognition*, *25*, 14–31.

Pohl, R. F., & Hilbig, B. E. (2012). The role of subjective linear orders in probabilistic inferences. *Psychonomic Bulletin und Review*, *19*, 1178–1186.

Rakow, T., & Newell, B. R. (2010). Degrees of uncertainty: An overview and framework for future research on experience-based choice. *Journal of Behavioral Decision Making*, *23*, 1–14.

Reber, R. (2004). Availability. In R. F. Pohl (Hrsg.), *Cognitive illusions: A handbook on fallacies and biases in thinking, judgement and memory* (S. 147–166). Hove, UK: Psychology Press.

Reber, R., & Schwarz, N. (1999). Effects of perceptual fluency on judgments of truth. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, *8*, 338–342. doi:10.1006/ccog.1999.0386.

Regenwetter, M., Dana, J., & Davis-Stober, C. P. (2011). Transitivity of preferences. *Psychological Review*, *118*(1), 42–56.

Renkewitz, F., & Jahn, G. (2012). Memory indexing: A novel method for tracing memory processes in complex cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *38*, 1622–1639.

Richter, T., & Späth, P. (2006). Recognition is used as one cue among others in judgment and decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 150–162.

Rieskamp, J. (2008). The probabilistic nature of preferential choice. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*, 1446–1465. doi:10.1037/a0013646.

Rieskamp, J., & Hoffrage, U. (2008). Inferences under time pressure: How opportunity costs affect strategy selection. *Acta Psychologica*, *127*, 258–276.

Rieskamp, J., & Otto, P. E. (2006). SSL: A theory of how people learn to select strategies. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 207–236.

Russo, J. E. (2011). Eye fixations as a process trace. In M. Schulte-Mecklenbeck, A. Kühberger, & R. Ranyard (Hrsg.), *A handbook of process tracing methods for decision research: A critical review and user's guide* (S. 43–64). New York, NY, US: Psychology Press.

Savage, L. J. (1954). *The foundations of statistics*. Oxford, England: John Wiley und Sons.

Scheibehenne, B., Rieskamp, J., & Wagenmakers, E.-J. (2013). Testing adaptive toolbox models: A Bayesian hierarchical approach. *Psychological Review*, *120*, 39–64. doi:10.1037/a0030777.supp.

Schoemaker, P. J. H. (1982). The expected utility model: Its variants, purposes, evidence and limitations. *Journal of Economic Literature*, *20*, 529–563.

Schooler, L. J., & Hertwig, R. (2005). How forgetting aids heuristic inference. *Psychological Review*, *112*, 610–628. doi:10.1037/0033-295X.112.3.610.

Schulte-Mecklenbeck, M., Kühberger, A., & Ranyard, R. (Hrsg.). (2011). *A handbook of process tracing methods for decision research: A critical review and user's guide*. New York, NY, US: Psychology Press.

Schwarz, N., Bless, H., Strack, F., Klumpp, G., Rittenauer-Schatka, H., & Simons, A. (1991). Ease of retrieval as information: Another look at the availability heuristic. *Journal of Personality and Social Psychology*, *61*, 195–202.

Sedlmeier, P., & Renkewitz, F. (2013). *Forschungsmethoden und Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson.

Sedlmeier, P., Hertwig, R., & Gigerenzer, G. (1998). Are judgments of the positional frequencies of letters systematically biased due to availability? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *24*, 754–770.

Shafir, E., Simonson, I., & Tversky, A. (1993). Reason-based choice. *Cognition*, *49*, 11–36.

Simon, H. A. (1957). *Models of man; social and rational*. Oxford England: Wiley.

Simon, H. A. (1990). Invariants of human behavior. *Annual Review of Psychology*, *41*, 1–19.

Simonson, I. (1989). Choice based on reasons: The case of attraction and compromise effects. *Journal of Consumer Research*, *16*(2), 158–174. doi:10.1086/209205.

Söllner, A., Bröder, A., & Hilbig, B. E. (2013). Deliberation versus automaticity in decision making: Which presentation format features facilitate automatic decision making? *Judgment and Decision Making*, *8*, 278–298.

Speekenbrink, M., & Shanks, D. R. (2013). Decision making. In D. Reisberg (Hrsg.), *The Oxford handbook of cognitive psychology* (S. 682–703). New York, NY, US: Oxford University Press.

Stanovich, K. E. (2010). *Decision making and rationality in the modern world*. New York: Oxford University Press.

Stanovich, K. E., & West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and Brain Sciences*, *23*, 645–726. doi:10.1017/S0140525X00003435.

Starmer, C. (2000). Developments in non-expected Utility Theory: The hunt for a descriptive theory of choice under risk. *Journal of Economic Literature*, *38*, 332–382.

Starmer, C., & Sugden, R. (1991). Does the random-lottery incentive system elicit true preferences? An experimental investigation. *American Economic Review*, *81*, 971–978.

Stein, E. (1996). *Without good reason. The rationality debate in philosophy and cognitive science*. Oxford: Clarendon Press.

Strack, F., & Mussweiler, T. (1997). Explaining the enigmatic anchoring effect: Mechanisms of selective accessibility. *Journal of Personality and Social Psychology*, *73*, 437–446.

Svenson, O. (1979). Process descriptions of decision making. *Organizational Behavior und Human Performance*, *23*, 86–112.

Teigen, K. H. (2004). Judgements by representativeness. In R. F. Pohl (Hrsg.), *Cognitive illusions: A handbook on fallacies and biases in thinking, judgement and memory* (S. 165–182). Hove, UK: Psychology Press.

Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2008). *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen anstößt*. Berlin: Econ.

Thorngate, W. (1980). Efficient decision heuristics. *Behavioral Science*, *25*(3), 219–225. doi:10.1002/bs.3830250306.

Todd, P. M., Gigerenzer, G., & The ABC Research Group (2012). *Ecological rationality: Intelligence in the world*. New York: Oxford University Press.

Tucker, L. R. (1964). A suggested alternative formulation in the developments by Hursch, Hammond, and Hursch, and by Hammond, Hursch, and Todd. *Psychological Review*, *71*(6), 528–530.

Tversky, A. (1969). Intransitivity of preferences. *Psychological Review*, *76*, 31–48. doi:10.1037/h0026750.

Tversky, A. (1972). Elimination by aspects: A theory of choice. *Psychological Review*, *79*(4), 281–299. doi:10.1037/h0032955.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1973). Availability: A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive Psychology*, *5*(2), 207–232.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, *185*, 1124–1131.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, *211*, 453–458.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1982). Evidential impact of base rates. In D. Kahneman, & P. Slovic Tversky et al. (Hrsg.), *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases* (S. 153–160). New York: Cambridge University Press.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1983). Extensional versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. *Psychological Review*, *90*, 293–315.

Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, *5*, 297–323.

Tversky, A., Sattath, S., & Slovic, P. (1988). Contingent weighting in judgment and choice. *Psychological Review*, *95*(3), 371–384. doi:10.1037/0033-295X.95.3.371.

Unkelbach, C., & Greifeneder, R. (Hrsg.). (2013). *The experience of thinking: How feelings from mental processes influence cognition and behavior*. New York: Psychology Press.

Villejoubert, G., & Mandel, D. R. (2002). The inverse fallacy: An account of deviations from Bayes's theorem and the additivity principle. *Memory und Cognition*, *30*, 171–178.

Visschers, V. H. M., Meertens, R. M., Passchier, W. W. F., & Vries, N. N. K. de (2009). Probability information in risk communication: A review of the research literature. *Risk Analysis*, *29*, 267–287.

Vlaev, I., & Chater, N. (2006). Game relativity: How context influences strategic decision making. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *32*, 131–149.

Wänke, M., Schwarz, N., & Bless, H. (1995). The availability heuristic revisited: Experienced ease of retrieval in mundane frequency estimates. *Acta Psychologica*, *89*, 83–90.

Weber, E. U., & Johnson, E. J. (2009). Mindful judgment and decision making. *Annual Review of Psychology*, *60*, 53–85.

Wilson, T. D., Houston, C. E., Etling, K. M., & Brekke, N. (1996). A new look at anchoring effects: Basic anchoring and its antecedents. *Journal of Experimental Psychology: General*, *125*, 387–402.

Wright, P. (1974). The harassed decision maker: Time pressures, distractions, and the use of evidence. *Journal of Applied Psychology*, *59*, 555–561.

Handlungsplanung und -ausführung

Kapitel 18 **Planung und exekutive Kontrolle von Handlungen – 663**
Bernhard Hommel

Kapitel 19 **Motorisches Lernen – 707**
Mathias Hegele und Sandra Sülzenbrück

Kapitel 20 **Motorische Kontrolle – 749**
Jürgen Konczak

Kapitel 21 **Embodiment und Sense of Agency – 773**
Martina Rieger und Dorit Wenke

Kapitel 22 **Handlung und Wahrnehmung – 821**
Wilfried Kunde

Betrachtet man die Kapitel dieses Buches in ihrer Aneinanderreihung als die Verarbeitungsstufen des Informationsverarbeitungsprozesses, so sind wir mit dem letzten Teil nicht nur am Ende des Buches, sondern auch dort angelangt, wo klassischerweise das Ende des Informationsverarbeitungsprozesses gesehen wird: Informationsverarbeitung beginnt mit der Wahrnehmung und Selektion von Informationen, zwischendrin finden sich Einflüsse von Top-down-Prozessen wie Motivation, Gedächtnis und Denken, und am Ende stehen die Planung und Ausführung von Handlungen. Handlungen beeinflussen jedoch auch wiederum die Wahrnehmung, sodass sie gleichzeitig ein Ende und einen Anfang darstellen.

In ▶ Kap. 18 geht es um die Planung einfacher und komplexer Handlungen und Handlungssequenzen, den Einfluss von Übung sowie den gegenseitigen Einfluss verschiedener Handlungen und ihre Steuerung (exekutive Kontrolle). Danach werden in ▶ Kap. 19 Fragen des motorischen Lernens behandelt, wie wir also unsere Motorik raumzeitlich auf die handlungsrelevanten Umweltereignisse abstimmen, die unsere Sinnesorgane erfassen. Dies können kurzfristige Anpassungen relativ einfacher Bewegungen sein oder auch komplexe Bewegungsmuster, die durch länger andauernde Übung erworben werden können (z. B. der Bewegungsablauf beim Tennisaufschlag). ▶ Kap. 20 beschäftigt sich mit Fragen der Bewegungskontrolle sowie der zugrunde liegenden neuronalen Prozesse behandelt, beispielsweise, inwieweit eine Greifhandlung vom Gehirn vorprogrammiert wird und/oder ob es zwischendurch einer afferenten Rückmeldung bedarf, um das Handlungsziel zu erreichen.

Eigentlich könnte man nach diesen Kapiteln das Buch beenden – das Ende des Informationsverarbeitungsprozesses ist erreicht. Zumindest war das auch lange Zeit die vorherrschende Lehrmeinung. Dass dem nicht so ist, illustrieren die letzten beiden Kapitel dieses Buches. In ▶ Kap. 21 zu Embodiment und Sense of Agency geht es darum, wie handlungsbezogene Prozesse und körperliche Zustande und Signale kognitive Prozesse informieren. Dabei spielen handlungsbezogene Simulations- und Vorhersageprozesse eine wesentliche Rolle. Dies wird anhand von ausgewählten Bereichen – Handlungsvorstellung, Handlungsbeobachtung, Sense of Agency und handlungsbezogene Sprache – illustriert. In ▶ Kap. 22 schließt sich der Kreis zur Wahrnehmung. Hier wird deutlich, wie Handlungen die Wahrnehmung beeinflussen und dass Wahrnehmung letztendlich ein Hilfsmittel darstellt, um erfolgreiches Handeln des Individuums in der Umwelt zu gewährleisten.

Planung und exekutive Kontrolle von Handlungen

Bernhard Hommel

18.1 Einleitung – 664

18.2 Planung einfacher Handlungen – 664
18.2.1 Motorische Programme – 664
18.2.2 Programme und Parameter – 666
18.2.3 Nutzung von Vorinformationen über Handlungsmerkmale – 666
18.2.4 Programmierung von Handlungsmerkmalen – 667
18.2.5 Reprogrammierung von Handlungsmerkmalen – 667
18.2.6 Integration von Handlungsmerkmalen – 668
18.2.7 Programmierung und Spezifikation von Handlungen – 669
18.2.8 Programmierung und Initiierung von Handlungen – 672
18.2.9 Programme, Pläne und Ziele – 673

18.3 Planung von Handlungssequenzen – 674
18.3.1 Programmierung von Handlungssequenzen – 674
18.3.2 Sequenzierung von Handlungselementen – 677
18.3.3 Planung langer und geübter Handlungssequenzen – 680

18.4 Planung und Koordination multipler Handlungen – 682
18.4.1 Untersuchungsmethoden – 683
18.4.2 Aufgabenkoordination – 684
18.4.3 Reizverarbeitung und Gedächtnis – 684
18.4.4 Reiz-Reaktions-Übersetzung und Reaktionsauswahl – 686
18.4.5 Reaktionsinitiierung – 687

18.5 Wechseln zwischen Handlungen – 688
18.5.1 Untersuchungsmethoden – 689
18.5.2 Aufgabenvorbereitung – 690
18.5.3 Proaktive Effekte – 692
18.5.4 Residuale Wechselkosten – 693
18.5.5 Implementierung und Aktualisierung von Aufgabensets – 694

18.6 Anwendungsbeispiele – 695

18.7 Ausblick – 696

18.8 Weiterführende Informationen – 698

Literatur – 700

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_18

Im Blickfang

Handlungsplanung bei Schädigungen des frontalen Cortex

Die wesentlichen Funktionen kognitiver Fähigkeiten lassen sich nicht selten erst dann richtig verstehen, wenn sie aus irgendwelchen Gründen abhanden gekommen sind – sei es durch mangelnde Übung, natürliches Altern, Krankheiten oder Unfälle. Für das Verständnis der Planung und Kontrolle von Handlungen ist unter diesem Gesichtspunkt vor allem das Studium von Patienten mit Schädigungen des frontalen Cortex interessant. Wenn die Schädigung primärmotorische Areale verschont hat, sind gewöhnliche Routinetätigkeiten nicht notwendigerweise spür- oder sichtbar behindert. Dennoch wird das Verhalten oft seltsam inflexibel und umweltabhängig: Die Patienten haben z. B. Schwierigkeiten, Handlungen zu planen, Handlungsziele zu erinnern und aufrechtzuerhalten sowie zwischen verschieden Handlungen zu wechseln (Überblick z. B. bei Burgess 2000). In gewisser Weise scheint sich die Kontrolle von Handlungen in die Umwelt zu verlagern, sodass die bloße Konfrontation mit Objekten zur Ausführung entsprechender Handlungen verleitet: Manche Patienten rauchen, wenn sie auf Zigaretten stoßen; trinken, wenn sie ein Getränk sehen; und ergreifen und manipulieren Gegenstände ohne erkennbares Ziel (Lhermitte 1983). Handlungen richten sich also nicht mehr in die Zukunft, sie dienen nicht mehr künftigen, intendierten und aktiv angestrebten Ereignissen, sondern sie stellen nur noch Reaktionen auf externe Ereignisse dar.

Erst wenn wir uns vorstellen, wie es ist, in der Welt eines Frontalpatienten zu leben – reaktiv, in der Gegenwart verwurzelt, und ohne die Fähigkeit, aktiv Veränderungen der eigenen und umgebenden Bedingungen herbeizuführen –, können wir ermessen, welche Rolle Funktionen der Handlungsplanung und -kontrolle für unser tägliches Leben spielen. Sich mit Handlungsplanung zu beschäftigen, bedeutet also zu fragen, auf welche Weise wir Zustände intentional verändern können. Intendierte Veränderungen liegen zunächst notwendigerweise in der Zukunft, sodass Handlungsplanung immer in gewisser Weise projektiv ist: Künftige Zustände müssen antizipiert, vorhergesagt werden, um die zu ihrer Realisierung erforderlichen körperlichen Mittel bestimmen und möglichst optimal einsetzen zu können. Handlungsplanung basiert also auf praktikablen Visionen, auch wenn diese sich im Alltag oft nur auf die nächste Körperbewegung beziehen. Wie sie erworben und eingesetzt werden, ist das Thema dieses Kapitels.

18.1 Einleitung

In erster Annäherung lässt sich menschliches Handeln als das Ausführen zielgerichteter Bewegungen definieren – eine Definition, die weitgehend unserem Alltagsverständnis des Handlungsbegriffs entspricht. Bereits Ach (1910) hat darauf hingewiesen, dass sich die Arbeitsweise unseres kognitiven Systems durch die Entwicklung und Auswahl eines Zieles (▶ Kap. 8) grundlegend verändert. Einerseits betreffen diese Veränderungen die Verarbeitung von Umweltinformation: Zielrelevante Ereignisse werden bevorzugt verarbeitet (▶ Kap. 5) und erinnert (▶ Kap. 9), unter Umständen auch in besonderer Weise erlebt (▶ Kap. 6). Andererseits werden Handlungspläne generiert und Handlungsbereitschaften ausgebildet, sodass im Fall günstiger situativer und personbezogener Bedingungen angemessen gehandelt und reagiert werden kann. Und um diese handlungsbezogenen Vorbereitungs- und Kontrollprozesse soll es in diesem Kapitel gehen.

Wie aufwendig zielbezogene Handlungsvorbereitungen sind, hängt vom Abstraktionsgrad und der Komplexität des gesetzten Zieles ab. Während das Ziel einer einfachen Zeigehandlung durch die Selektion eines Zielortes und einer bestimmten, relativ einfachen Bewegung realisiert werden kann, erfordern Ziele wie die Zubereitung einer Tasse Kaffee bereits die Verkettung und Sequenzierung bestimmter Teilhandlungen. Noch komplexere Ziele, wie etwa die Organisation einer Urlaubsreise, erfordern zudem die Hierarchisierung verschiedener Teilhandlungen, die ihrerseits aus längeren Bewegungssequenzen bestehen, usw. Offensichtlich sind umso mehr kognitive Prozesse erforderlich, je komplexer eine Zielsetzung ist. Daher lässt sich die Frage, wie eine Handlung geplant und gesteuert wird, nicht ohne Weiteres und vor allem nicht unabhängig von der Art des zugrunde liegenden Handlungszieles beantworten.

Die Grobgliederung dieses Kapitels reflektiert die Beziehung zwischen Zielkomplexität und Planungsproblemen durch eine Dreiteilung. In ▶ Abschn. 18.2 werden allgemeine Modelle der Planung relativ einfacher Handlungen diskutiert, wie etwa das Zeigen auf einen Ort, das Drücken einer Taste oder das Bewegen eines Hebels. In ▶ Abschn. 18.3 geht es darum, wie einfache Handlungen zur Realisierung komplexerer Ziele geordnet und gekoppelt werden. ▶ Abschn. 18.4 widmet sich der Frage, ob bzw. wie mehrere Handlungen koordiniert und gleichzeitig ausgeführt werden können, und ▶ Abschn. 18.5 untersucht, wie man zwischen verschiedenen Handlungen hin und her wechseln kann. ▶ In ▶ Abschn. 18.6 finden sich einige Anwendungsbeispiele, und ▶ Abschn. 18.7 gibt einen kurzen Ausblick.

18.2 Planung einfacher Handlungen

18.2.1 Motorische Programme

In seinen Überlegungen zur Entstehung intentionaler Handlungen wies William James (1890) darauf hin, dass Handlungen sekundäre Phänomene sein müssen. Was er damit meint, hat er im folgenden Satz zusammengefasst: „if, in voluntary action properly so-called, the act must be foreseen, it follows that no creature not endowed with divinatory power can perform an act voluntarily for the first time“ (S. 487). Wenn also Handlungen aus zielgerichteten Bewegungen bestehen, dann muss man zunächst in Erfahrung gebracht haben, welches Ziel mithilfe welcher Bewegung realisiert werden kann, bevor man die Bewegung willentlich zur Zielerreichung einsetzen kann (▶ Zur Vertiefung 18.2). Intentional Handelnde müssen also eine der eigentlichen Handlung vorausgreifende „Idee“ darüber haben, was sie erreichen wollen. Technisch ausgedrückt müssen sie über handlungsleitende Repräsentationen verfügen, mit deren Hilfe sie Handlungsziele definieren und ihre eigene Motorik in zieldienlicher Weise steuern können.

In einer einflussreichen Übersichtsarbeit hat Keele (1968, S. 387) derartige handlungsleitende Repräsentationen als **mo-**

torische Programme (▶ Kap. 20) bezeichnet, die er weiter charakterisiert „as a set of muscle commands that are structured before a movement sequence begins, and that allows the entire sequence to be carried out uninfluenced by peripheral feedback". Dieser Vorschlag geht auf Beobachtungen und Überlegungen von Lashley (1951) zurück und stützt sich auf eine Reihe empirischer Untersuchungen. Für die Annahme motorischer Programme im Sinne Keeles sprechen vor allem drei Beobachtungen, die im Folgenden kurz dargestellt werden (vgl. auch Rosenbaum und Krist 1993).

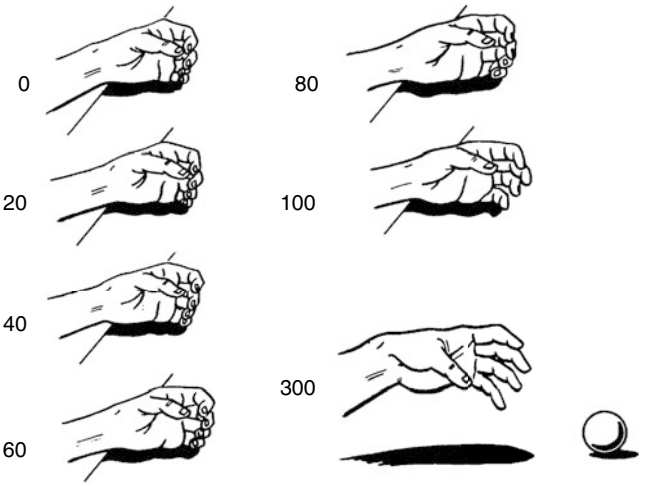
Unabhängigkeit von Rückmeldung

Beobachtungen an menschlichen Patienten und operativ lädierten Tieren weisen darauf hin, dass Handlungen auch ohne kinästhetisches, visuelles oder anderes Feedback ausgeführt werden können. So berichtete bereits Lashley (1917) von einem Kriegsverletzten, der trotz völligen Verlusts entsprechender kinästhetischer **Rückmeldung** in der Lage war, sein Bein zielgerichtet und in verschiedenen Geschwindigkeiten zu bewegen, auch mit geschlossenen Augen. Die Kontrolle dieser Handlungen war also unabhängig von externer Information und musste daher von einer internen Kontrollstruktur ad hoc organisiert worden sein. Ähnliche Leistungen sind auch von anderen bei durch Unfälle oder Krankheiten deafferenzierten Patienten berichtet worden, wie etwa beim Malen von Figuren (Rothwell et al. 1982) oder beim zeitlichen Synchronisieren eigener Fingerbewegungen mit einer vorgegebenen Reizsequenz (Aschersleben et al. 2002; Bard et al. 1992). Auch operativ deafferenzierte Affen können ohne kinästhetische Rückmeldung und ohne visuelle Kontrolle greifen, laufen, springen und klettern (Taub und Berman 1968). Die Steuerung bereits erworbener Handlungen ist also auf sensorische Rückmeldung nicht unbedingt angewiesen, sondern kann auch auf der Basis interner Information operieren. Diese interne Information wird oft als Vorwärtsmodell (z. B. Mehta und Schaal 2002) und dessen Anwendung als Steuerung (im Gegensatz zur Regelung) bezeichnet (▶ Kap. 20). Allerdings leidet die Genauigkeit von Handlungen in der Regel unter der Abwesenheit sensorischen Feedbacks, und der Erwerb neuer Handlungen ohne Information über deren Ergebnis ist schwer vorstellbar.

Antizipationseffekte

Im Verlauf einer Handlung zeigen sich nicht selten Anzeichen für die Antizipation des nächsten Handlungsschrittes – eine Beobachtung, auf die wir im Zusammenhang mit sequenziellen Handlungen noch einmal zurückkommen werden (s. auch ▶ Kap. 22). Ein alltägliches Beispiel für **Antizipationseffekte** stellt das zielgerichtete Greifen dar. Bereits vor dem Kontakt mit dem zu ergreifenden Gegenstand öffnet sich die Hand umso mehr, je größer der Gegenstand ist – auch wenn die Bewegung nicht visuell kontrolliert wird (Jeannerod 1981, 1994; ◘ Abb. 18.1). Die Hand antizipiert gewissermaßen den Gegenstand; der Verlauf des Kontakts mit dem Greifobjekt wird also bereits im Voraus und unter Einbeziehung von Wissen und Erwartungen bezüglich der Objektgröße geplant.

Ein weiteres Beispiel für Antizipation in der Handlungsplanung zeigt sich in den sogenannten **Koartikulationseffekten** beim Sprechen. Wenn wir z. B. das Phonem /t/ innerhalb eines



◘ **Abb. 18.1** Beispiel für die Antizipation der Größe eines zu ergreifenden Objekts. Die nach Videoaufnahmen gezeichneten Bilder zeigen verschiedene Bewegungsphasen von der ersten messbaren Bewegung an (0 ms) bis zur Annäherung an das Objekt nach 300 ms. Es fällt auf, dass sich Daumen und Finger bereits auf die Objektform einzustellen beginnen, noch bevor die Hand ihre Startposition verlässt. (Aus Jeannerod und Biguer 1982)

Wortes aussprechen, dann weist die Rundung unserer Lippen bereits vor Beginn der Lautäußerung auf das folgende Phonem hin, wie ein Vergleich der Folgen /t/ + /ʌ/ („ta"), /t/ + /i/ („ti") und /t/ + /u/ („tu") deutlich macht. Das Lautbild eines Phonems wird also vom nachfolgenden Phonem beeinflusst, was die zeitliche Überlappung der Planung der betreffenden Phoneme voraussetzt.

Auch die Analyse von Handlungsfehlern hat Hinweise auf Planungsprozesse ergeben (Übersichten bei Baars 1988; Norman 1981). Ein Beispiel dafür sind die nach William Archibald Spooner benannten Spoonerismen, Lautvertauschungen wie der überlieferte Ausdruck „The queer old dean" (anstelle von „The dear old queen"). Derartige Fehler können durch bestimmte Bahnungstechniken auch im Labor systematisch induziert werden (Baars 1980) und sind intensiv untersucht worden (z. B. Baars 1988). Sehr ähnliche Fehler treten auch beim Maschineschreiben auf (Grudin 1983; Rumelhart und Norman 1982), wie etwa die häufig zu beobachtende „korrekte" Verdoppelung des falschen Buchstabens (z. B. „Klaase" statt „Klasse"). Derartige Fehler zeigen den Einfluss späterer auf frühere Handlungsschritte und legen deshalb nahe, dass zumindest einige Schritte einer Handlung im Voraus geplant werden (▶ Abschn. 18.3.1).

Komplexitätseffekte

Wenn Handlungen durch antizipative Kontrollstrukturen gesteuert werden, dann sollte man erwarten, dass die Planung einer Handlung umso länger dauert, je umfangreicher und komplexer sie ist. Zwar werden wir in ▶ Abschn. 18.3.3 sehen, dass sich dies im Laufe der Übung ändern kann, aber bei ungeübten Handlungen lassen sich systematische Beziehungen zwischen Handlungskomplexität und Planungsdauer zuverlässig nachweisen. In ihrer klassischen Untersuchung zu diesem **Komplexitätseffekt** ließen Henry und Rogers (1960) Probanden Handlungen unterschiedlicher Länge und Anzahl von Teilschritten ausführen und maßen die Reaktionszeit von der Präsentation des Startsignals bis

zum Bewegungsbeginn. Wie sich herausstellte, war die Reaktionszeit umso länger, je mehr Teilschritte die Handlung enthielt, obwohl die Handlung bereits vor dem Startsignal bekannt war. Henry und Rogers erklärten diese Beobachtung damit, dass bei der Handlungsplanung Instruktionen bezüglich der einzelnen Handlungsschritte in einen motorischen Speicher transferiert werden, sodass die Planungsdauer mit der Anzahl transferierter Instruktionen ansteigt.

Diese Ergebnisse wurden in späteren, besser kontrollierten Untersuchungen vielfach bestätigt. Zum Beispiel fanden Sternberg et al. (1978; 1982; Abb. 18.10) einen linearen Anstieg der Reaktionszeit mit der Anzahl auszusprechender Silben oder anzutippender Tasten. Die von Sternberg und Mitarbeitern vorgeschlagene Erklärung ähnelt derjenigen von Henry und Rogers, fokussiert aber auf einen etwas anderen Prozess. So wird angenommen, dass die Reaktionszeiteffekte nicht den Transfer von Bewegungsinstruktionen zum motorischen Speicher widerspiegeln, sondern vielmehr die mit zunehmender Menge transferierter Elemente immer schwieriger werdende Suche nach einem bestimmten Element. Mit anderen Worten, nicht die Einspeicherung von Information könnte den Zeitbedarf erhöhen, sondern deren Entnahme und Nutzung.

18.2.2 Programme und Parameter

Keeles (1968) ursprüngliche Definition motorischer Programme ging von einer muskelspezifischen Repräsentation von Bewegungsaspekten aus und damit von einer sehr inflexiblen Kontrollstruktur. Vor allem der Erwerb von Fertigkeiten wäre bei der Verwendung von Programmen dieser Art beinahe unmöglich, würde doch die kleinste Veränderung hinsichtlich auch nur eines Muskelparameters ein neues Programm erfordern. Aus u. a. diesem Grund hat Schmidt (1975) vorgeschlagen, zwischen relativ abstrakten Invarianten eines Programms einerseits und situationsangemessen bestimmbaren **Parametern** andererseits zu unterscheiden. Fertigkeiten wären demnach in Form motorischer Schemata repräsentiert, die als feste Bestandteile (Invarianten) nur Information über relationale Beziehungen zwischen verschiedenen Handlungselementen enthalten, z. B. die relative Kraft oder die relative Dauer der verschiedenen Schritte eines Handlungstyps. Situationsbezogene Kennwerte von Handlungen (Parameter), z. B. die absolut aufgewendete Kraft oder die Gesamtdauer, würden hingegen je nach Bedarf verändert, und die Handlung würde so an die momentanen Erfordernisse angepasst. Dementsprechend könnte z. B. das Schreiben des Buchstabens A durch ein und dasselbe **motorische Schema** gesteuert und dennoch dessen Größe verändert und das Schreibgerät oder der Effektor gewechselt werden. Der Ansatz von Schmidt (1975) impliziert, dass Handlungspläne in Form von Codes von Bewegungsmerkmalen repräsentiert werden, die je nach Übungsgrad invariant und langfristig gespeichert oder variabel und flexibel codierbar sein können. Die Annahme einer merkmalsbasierten Codierung von Handlungsplänen wird auch durch neurophysiologische Befunde unterstützt. So zeigen Einzelzellableitungen an Affen, dass während der Vorbereitung auf eine Handlung bestimmte neuronale Aktivitätsänderungen einzelne Bewegungsmerkmale codieren, z. B. die Richtung (Georgopoulos 1990) der geplanten Handlung oder die aufzuwendende Kraft (Kalaska und Hyde 1985). Auch bei Menschen lassen sich mithilfe von elektro- und magnetoencephalografischen Techniken merkmalskorrelierte neuronale Aktivitäten während der Handlungsplanung nachweisen. Vor Handlungsbeginn tritt z. B. das sogenannte lateralisierte Bereitschaftspotenzial auf (Deecke et al. 1976), dessen Amplitude systematisch mit der verwendeten Hand (Osman et al. 1992), der Dauer (Vidal et al. 1991) und der Kraft der geplanten Bewegung variiert (Kutas und Donchin 1980).

18.2.3 Nutzung von Vorinformationen über Handlungsmerkmale

Um Aufschluss über die Art und Weise der Parametrisierung von Programmen zu gewinnen, bat Rosenbaum (1980) Versuchspersonen, Zeigebewegungen von zentral angeordneten Starttasten zu räumlich angeordneten Zielen auszuführen (Abb. 18.2). Vor dem eigentlichen Signalreiz, der die erforderliche Reaktion anzeigte, wurde jeweils ein Vorbereitungssignal (*movement precue*) präsentiert (vgl. auch Leonard 1958). Dieses Vorbereitungssignal enthielt Informationen über keine, eines oder mehrere Merkmale der auszuführenden Bewegung, z. B. über deren Seite (linker oder rechter Arm), Richtung (zum Körper hin oder von ihm weg) und/oder Weite (kurz oder lang).

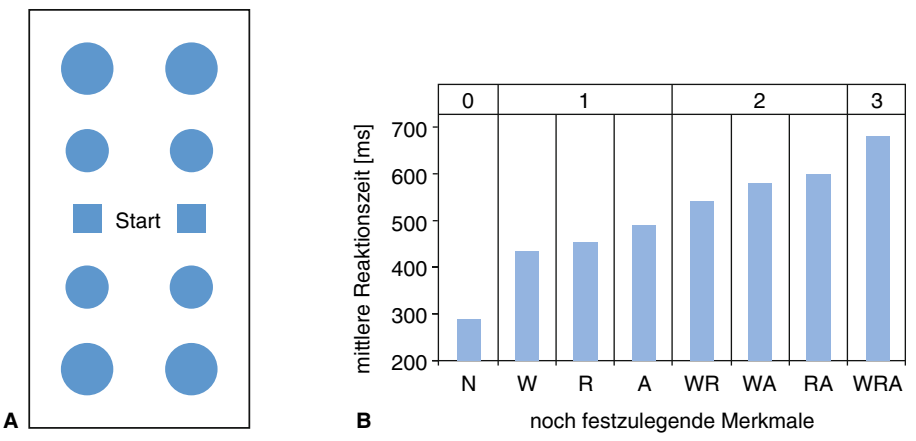


Abb. 18.2 Versuchsaufbau (**A**) und Reaktionszeiten (**B**) aus einem Experiment von Rosenbaum (1980) zur Wirkung von Vorinformation über Bewegungsdimensionen. Die Ergebnisse zeigen umso schnellere Reaktionen, je weniger Dimensionen noch unbekannt, d. h. noch festzulegen sind. *N* = keine, *W* = Weite, *R* = Richtung, *A* = Amplitude. (Modifiziert nach Rosenbaum und Krist 1993)

Je mehr Merkmale durch das Vorbereitungssignal angezeigt wurden, desto kürzer war die Reaktionszeit. Interessanterweise ergaben sich keine systematischen Hinweise auf Abhängigkeiten zwischen den vorbereiteten Dimensionen, d. h., Information über jede Dimension förderte die Vorbereitung, unabhängig davon, ob andere bzw. welche anderen Dimensionen vorab bekannt waren (◘ Abb. 18.2). Diese Beobachtung zeigt, dass die Bewegungsdimensionen nicht in einer bestimmten Reihenfolge programmiert werden müssen.

Auch wenn positive Effekte von **Vorinformation** über Handlungsaspekte darauf hinweisen, dass motorische Programme möglicherweise keine monolithischen Einheiten darstellen, sondern aus Planungselementen zusammengesetzt sind, so sind sie doch nicht ganz eindeutig zu interpretieren. Denn Vorinformation über die zu erwartenden Handlungsaspekte informiert immer auch über den zu erwartenden Reiz und die zu erwartende Reiz-Reaktions-Paarung. Wenn z. B. je zwei verschiedene Parameter für die Seite, Richtung und Weite einer Bewegung eingesetzt werden können, so entspricht dies einer Menge von acht möglichen Reaktionen, die durch Vorinformation über eine Dimension auf vier, über zwei Dimensionen auf zwei und über drei Dimensionen auf eine mögliche Alternative reduziert wird. Da die Reaktionszeit bekanntermaßen mit der Anzahl der Reaktionsalternativen systematisch zunimmt (Hick 1952; Hyman 1953), könnten positive Effekte von Vorinformationen also auch darauf zurückzuführen sein, dass sie die Unsicherheit der betreffenden Versuchsperson über den Reaktionsreiz und/oder die möglichen Handlungsalternativen reduzieren (Goodman und Kelso 1980; Proctor und Reeve 1986; Zelaznik 1978). Zur Lösung dieses Problems sind zwei Variationen von Rosenbaums Technik vorgeschlagen und erfolgreich angewandt worden, deren wesentlicher Unterschied in der Validität der gegebenen Vorinformation besteht (▶ Abschn. 18.2.4 und 18.2.5).

18.2.4 Programmierung von Handlungsmerkmalen

Eine Variante verwendet Handlungsvorinformation in einer Weise, dass stets eine bestimmte Anzahl von Reiz-Reaktions-Alternativen übrig bleibt, die sich jedoch hinsichtlich der erforderlichen Handlungsaspekte verschieden stark unterscheiden. In der Studie von Zelaznik und Hahn (1985) waren z. B. acht alternative Reaktionen möglich, die sich durch die Kombination von Bewegungsdauer, Hand und Finger ergaben: ein kurzer oder langer Tastendruck mit dem Daumen oder Zeigefinger der linken oder rechten Hand. Vor dem eigentlichen Handlungssignal erhielten die Probanden Vorinformation darüber, welche zwei Reaktionsalternativen in dem betreffenden Durchgang möglich waren. Die Beziehung zwischen den verbleibenden Alternativen bestimmte darüber, ob eine bzw. welche Handlungsdimension vorbereitet werden konnte: So erlaubte die Kombination links/Zeigefinger/kurz und links/Zeigefinger/lang die Vorbereitung der linken Hand und des Zeigefingers, nicht aber der Dauer, während die Kombination links/Zeigefinger/kurz und rechts/Daumen/lang die Vorbereitung keines der Handlungsparameter gestattete. Unter diesen Bedingungen fanden sich nur sehr geringe oder gar keine Effekte der Anzahl der bereits bekannten Handlungsparameter. Dies legt nahe, dass man bei einer überschaubaren Zahl von verbleibenden Alternativen mehr als eine Reaktion zugleich vorbereiten kann (Heuer 1986).

Insgesamt sind die Ergebnisse aus Studien zur validen Vorinformation noch recht unsystematisch und haben bislang noch nicht zu einem einheitlichen Programmierungsmodell geführt. Wir können festhalten, dass Vorinformation über die Eigenschaften einer Handlung deren Vorbereitung erleichtert und dass die Reihenfolge, in der diese Vorinformationen angeboten werden, keine Rolle spielt.

18.2.5 Reprogrammierung von Handlungsmerkmalen

Eine weitere Variante von Rosenbaums (1980) Technik der Handlungsvorinformation ist die von Rosenbaum und Kornblum (1982) entwickelte Methode der motorischen Bahnung (*priming*). Lépine et al. (1989) haben diese Methode mit der ursprünglichen Aufgabe von Rosenbaum (1980) kombiniert. Wieder wurde eine Bewegung mit der linken oder rechten Hand in verschiedene Richtungen und mit verschiedenen Weiten ausgeführt. Auch hier erschien vor dem Reaktionsreiz ein Hinweisreiz, der sich auf keine, eine, zwei oder alle drei Handlungsdimensionen bezog. Der wesentliche Unterschied zu anderen Methoden bestand allerdings darin, dass dieser Hinweisreiz die tatsächliche Handlung nur mit einer gewissen, wenn auch hohen Wahrscheinlichkeit anzeigte (65 %). Wie zu erwarten, verringerte ein valider Hinweis die Reaktionszeit; Probanden waren also schneller, wenn der Hinweisreiz die betreffende(n) Dimension(en) der tatsächlich auszuführenden Handlung korrekt vorhersagte. Interessanter waren jedoch die Bedingungen mit invaliden Hinweisreizen; hier waren die Reaktionszeiten umso länger, je mehr Dimensionen falsch angezeigt wurden. Dies legt nahe, dass die betreffenden Dimensionen reprogrammiert werden mussten, sodass das Ausmaß der Verzögerung den Aufwand der Programmierung der jeweiligen Dimension anzeigt. Dabei fiel auf, dass die Reprogrammierung der Bewegungsweite relativ wenig Aufwand zu erfordern schien.

Die unterschiedlichen Zeitbedarfe bei der Reprogrammierung verschiedener Handlungsaspekte könnten etwas mit Schmidts (1975) Differenzierung von Invarianten und Parametern motorischer Programme zu tun haben. Quinn und Sherwood (1983) ließen z. B. Probanden Hebelbewegungen von 400 ms Dauer ausführen. Bei oder kurz nach Bewegungsbeginn boten sie einen Reiz dar, der entweder eine Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit oder eine Umkehr der Bewegungsrichtung forderte. In beiden Fällen waren die Versuchspersonen in der Lage, ihre Bewegung entsprechend zu modifizieren, aber die Anpassung der Bewegungsrichtung erfolgte erheblich später als die der Geschwindigkeit. Die Autoren argumentieren, dass die Änderung der Richtung möglicherweise den Aufruf eines neuen Handlungsprogramms erfordert, während für die Modifikation der Geschwindigkeit die Veränderung eines Programmparameters ausreicht. Dies würde auch den Befund von Lépine et al.

(1989) erklären, dass die Reprogrammierung der Weite vergleichsweise wenig aufwendig zu sein scheint.

Bedauerlicherweise erlaubt auch die Unterscheidung von Programminvarianten und -parametern keine konsistente Einordnung der vorliegenden Befunde. Einerseits hat dies mit konzeptuellen Problemen zu tun: Während einige Autoren z. B. die Richtung einer Bewegung als Parameter auffassen (Roth 1988; Stelmach und Teulings 1983), nehmen andere Autoren, an, dass es sich dabei um eine Programminvariante handelt (Quinn und Sherwood 1983). Natürlich kann man nicht ausschließen, dass die Bewegungsrichtung bei manchen Bewegungsformen eine Invariante, bei anderen einen Parameter darstellt, aber solange darüber nicht a priori entschieden werden kann, sind Vorhersagen kaum möglich.

Zudem sieht sich die Unterscheidung von Programminvarianten und -parametern auch mit empirischen Problemen konfrontiert. Lee et al. (1987) fanden z. B., dass Vorinformation über die Art einer Handlung (Ergreifen eines Balles oder Drehen eines Potentiometers) und die Distanz des Zielobjekts gleich gut genutzt werden kann, obwohl doch Schmidts (1975) Konzeption zufolge die Art einer Handlung über das Handlungsprogramm, die Distanz lediglich über einen Parameterwert entscheiden sollte. Auch die Reprogrammierung des Handlungstyps nach invalidem Hinweisreiz war keineswegs aufwendiger als die der Bewegungsdistanz (Lee et al. 1987, Experiment 5).

Zusammengefasst zeigen die vorliegenden Befunde, dass Wissen über Handlungsmerkmale dazu verwendet werden kann, die entsprechenden Merkmale bereits vor Handlungsbeginn einzuplanen. Die Eigenschaften einer Handlung können getrennt und relativ unabhängig voneinander programmiert und reprogrammiert werden, auch wenn es unter bestimmten Bedingungen möglich ist, die Korrelationen zwischen Handlungseigenschaften zur Effektivierung der (Re-)Programmierung zu nutzen. Um welche Merkmale oder Merkmalsdimensionen es sich jeweils handelt, kann Auswirkungen auf den Programmierungs- und Reprogrammierungsaufwand haben, aber diese Auswirkungen scheinen gering und wenig systematisch zu sein.

18.2.6 Integration von Handlungsmerkmalen

Die bislang vorliegenden Befunde legen nahe, dass Handlungen nicht durch einheitliche, fixe Kontrollstrukturen gesteuert werden, sondern durch situativ erzeugte Koppelungen von Merkmalsrepräsentationen (Keele et al. 1990; Stoet und Hommel 1999; Wickens et al. 1994). Damit stellt sich zum einen die Frage, wie diese Merkmalsrepräsentationen eigentlich miteinander in Beziehung gesetzt werden, zumal deren neuronale Korrelate über weite Bereiche des Cortex verteilt sind (► Abschn. 18.2.2). Möglicherweise werden die zu demselben Handlungsplan gehörigen Merkmalscodes mit derselben neuronalen Signatur versehen (► Zur Vertiefung 18.1) und so in ihrem Verhalten koordiniert und in eine kohärente Struktur integriert. Tatsächlich finden sich auch in Verhaltensexperimenten Hinweise auf eine solche **Integration**.

Ein erster Hinweis ergibt sich aus der Studie von Meyer und Gordon (1985), die Prozesse der Sprachprogrammierung mithilfe der Methode der motorischen Bahnung untersuchten. Sie boten jeweils zwei Silben dar, die auf ein weiteres Signal hin in der Regel von links nach rechts zu lesen waren. In einigen Fällen forderte das Signal jedoch zur umgekehrten Lesefolge auf, was eine Verzögerung zur Folge hatte. Interessanterweise war dabei die Reaktionszeit jedoch besonders erhöht, wenn die beiden Silben phonologische Merkmale teilten, wie etwa die Stimmhaftigkeit des Endkonsonanten („up“ – „ut“ oder „ub“ – „ud“) oder der Ort der Stimmbildung beim Vokal („up“ – „ud“ oder „ut“ – „ud“). Über ähnliche Effekte berichten Yaniv et al. (1990) mit Bezug auf Silbenpaare, die denselben Vokal enthielten.

Eine mögliche Interpretation dieser Befunde besteht darin, dass Probanden zunächst die Aussprache der linken Silbe programmieren und dadurch andere, vor allem aber phonologisch ähnliche Silben inhibieren (Meyer und Gordon 1985). Davon wäre vor allem die rechte der beiden Silben betroffen und zwar umso mehr, je mehr phonologische Merkmale sie mit der linken Silbe teilt. Eine alternative Interpretation geht davon aus, dass die Programmierung nicht eine Hemmung anderer Silben, sondern die Integration der betreffenden phonologischen Merkmalscodes zum entsprechenden **Handlungsplan** zur Folge hat. Wenn daher bestimmte Codes bereits in den zur linken Silbe gehörigen Handlungsplan integriert sind, stehen sie nicht mehr ohne Weiteres zur Planung einer anderen Handlung (hier: die Aussprache der rechten Silbe) zur Verfügung (Stoet und Hommel 1999). Trotz der Unterschiede im Detail gehen also beide Hypothesen davon aus, dass die Integration einer Merkmalsrepräsentation in einen Handlungsplan negative Konsequenzen für die Planung merkmalsüberlappender Handlungen hat, dass also Handlungsplanung die betreffenden Merkmale temporär bindet.

Auch die Ergebnisse von Stoet und Hommel (1999) deuten auf Prozesse der **Merkmalsbindung** bei der Handlungsplanung hin. In dieser Studie führten Versuchspersonen jeweils zwei Reaktionen (R1 und R2) aus, die durch zwei verschiedene Reize (S1 und S2) signalisiert wurden, wobei S2 und R2 zwischen S1 und R1 auftraten (S1–S2–R2–R1). Die Merkmalsüberlappung zwischen R1 und R2 wurde durch die Seite der beteiligten Hände bzw. Füße variiert, die entweder gleich (Überlappung des räumlichen Merkmals links oder rechts) oder verschieden war (keine Merkmalsüberlappung). Wie erwartet führte Merkmalsüberlappung zur Verzögerung von R2, d. h., eine linkshändige R2 wurde z. B. später initiiert, wenn sie während bzw. nach der Planung einer links- statt rechtshändigen R1 ausgeführt werden sollte. Vergleichbare Interaktionen finden sich auch zwischen Plänen manueller und vokaler Handlungen (Fournier et al. 2010). Schließlich ließen Rosenbaum et al. (1986) Probanden die ersten zwei bis neun Buchstaben des Alphabets mit alternierender Betonung rezitieren und fanden bessere Leistungen, wenn die Anzahl der Buchstaben gerade war (z. B. AbCdAbCd …), als wenn sie ungerade war (z. B. AbCaBc …). Bei gerader Buchstabenanzahl bleibt die Zuordnung von Buchstabe bzw. Listenposition und Betonung stets konstant, während sie bei ungerader Anzahl stets variiert. Dies könnte dazu führen, dass bei ungeraden Anzahlen die Codes von Buchstaben bzw. Listenpositionen und der Beto-

nung stets rekombiniert und neu integriert werden müssen, was einen höheren Programmierungsaufwand zur Folge hat (▶ Abschn. 18.3.2).

Insgesamt sind die Befunde zur Integration von Programmelementen noch unzureichend. Erste Hinweise legen nahe, dass die Planung einer Handlung zur temporären Koppelung von Codes führt, die die Handlungsmerkmale repräsentieren und deren Realisierung steuern. Diese Einbindung von Merkmalscodes scheint deren Verfügbarkeit für die zeitlich überlappende Planung anderer Handlungen zu beeinträchtigen, sei es durch Hemmung ähnlicher Handlungen oder durch die vorübergehende Belegung der betreffenden Codes.

18.2.7 Programmierung und Spezifikation von Handlungen

Die wesentlichen Kritikpunkte an Keeles (1968) Definition motorischer Programme als muskelspezifische Repräsentationen von Handlungen betrafen den extrem hohen Speicherbedarf, den derartige Kontrollstrukturen hätten, und ihre geringe Anpassungsfähigkeit an die situativen Bedingungen (▶ Abschn. 18.2.2 und ▶ Kap. 20). Das Problem der geringen Adaptivität besteht bei näherer Betrachtung aus zwei verschiedenen Aspekten. Ein Aspekt hat mehr mit dem Erwerb motorischer Fertigkeiten zu tun. Hier lautet die (in ▶ Kap. 20 detaillierter diskutierte) Frage, welche

Zur Vertiefung 18.1

Das Bindungsproblem

Die Gehirne von Menschen und anderen höheren Spezies basieren ganz wesentlich auf dem Prinzip der verteilten Codierung. In besonderem Maße gilt dies für die Verarbeitung visueller Information, im Zuge derer die verschiedenen Merkmale visueller Reize in verschiedenen corticalen Farb-, Form- und Bewegungskarten codiert werden (DeYoe und Van Essen 1988; Treisman 1996; ▶ Kap. 2). Aber auch die Merkmale geplanter Handlungen werden in verschiedenen, merkmalsspezifischen corticalen Arealen repräsentiert (▶ Abschn. 18.2.2). Einerseits bietet eine modulare Repräsentation wahrgenommener und zu produzierender Ereignisse erhebliche evolutionäre Vorteile. Phylogenetisch erlaubt sie eine kontinuierliche Anpassung und den stetigen Ausbau des Gehirns, da einzelne Module eliminiert, hinzugefügt oder modifiziert werden können, ohne dass die gesamte Hirnstruktur vollständig umgebaut werden müsste. Ontogenetisch bedeutet sie ein hohes Maß an Toleranz gegenüber unfall- oder altersbedingten Schädigungen des Gehirns, da sich diese oft nur im Verlust von Teilfunktionen niederschlagen und nicht in einer Beeinträchtigung der gesamten corticalen Verarbeitung. Verteilte Repräsentationen bringen aber auch Probleme mit sich. Denn zur Planung und Kontrolle einer Handlung reicht es nicht mehr aus, die Codes von Merkmalen der geplanten Handlung zu bestimmen und zu aktivieren, sonst könnten zufällig aktivierte Elemente irrtümlich in die Planung einbezogen und zu verschiedenen Plänen gehörige Elemente nicht eindeutig voneinander separiert werden. Um trotz verteilter Repräsentationen kohärente Handlungspläne generieren zu können, ist daher irgendeine Art von Integration erforderlich, irgendeine Art von Bindung zusammengehöriger kognitiver bzw. corticaler Merkmalscodes (Singer 1994; 2011; Stoet und Hommel 1999). Wie könnte diese Bindung vor sich gehen?

Eine zunehmend diskutierte Idee zur Lösung des Bindungsproblems geht auf Überlegungen von Abeles (1991) und von der Malsburg (1981; 1995) zurück, die vermuten, räumlich verteilte Verbände von Neuronen könnten durch die zeitliche Synchronisation ihrer Entladungsmuster miteinander kommunizieren und so eine zeitlich organisierte, funktionale Einheit bilden (Singer 2011). Diese Überlegung ist in ◘ Abb. 18.3 schematisch dargestellt. Nehmen wir an, eine Person plant die Ausführung einer Rückwärtsbewegung mit der linken und einer Vorwärtsbewegung mit der rechten Hand. Zunächst müssen die betreffenden Merkmalscodes (linke Hand, rückwärts, rechte Hand, vorwärts) aktiviert werden, sodass die zu diesen Codes beitragenden Neurone relativ häufig feuern (◘ Abb. 18.3A). Diese erhöhte Feuerrate allein ist jedoch kein hinreichendes Kriterium, um zu entscheiden, welche Merkmale zusammengehören, ob also z. B. die Vorwärtsbewegung von der linken oder der rechten Hand ausgeführt werden soll. Um die zusammengehörigen Merkmale zu binden, könnte die Aktivität der entsprechenden Neurone synchronisiert werden, wie in ◘ Abb. 18.3B skizziert.

Hinweise auf neuronale Synchronisation gibt es u. a. durch Einzelzellableitungen an Affen und Katzen (Überblick bei Engel et al. 1997; MacKay 1997). In Affen fanden z. B. Sanes und Donoghue (1993) vor der Initiierung von Finger- oder Handbewegung synchronisierte Aktivität von Neuronen an verschiedenen, zum Teil über 7 mm entfernten Orten des primärmotorischen und prämotorischen Cortex. Ebenfalls in Affen beobachteten Murthy und Fetz (1992; 1996) handlungskorrelierte Synchronisation zwischen motorischen und somatosensorischen Arealen über Distanzen von bis zu 20 mm hinweg. In Katzen fanden Roelfsema et al. (1997) sogar Synchronisation zwischen Neuronen des visuellen und des parietalen Cortex einerseits und Neuronen des parietalen und des motorischen Cortex andererseits.

Die Überlegung, derartige Befunde vom Tier auf den Menschen zu übertragen, hat sich vor allem aus einer Beobachtung hinsichtlich des zeitlichen Musters neuronaler Synchronisation ergeben. Die in Tierstudien berichteten zeitlichen Koppelungen verteilter Neuronenpopulationen gehen nämlich stets mit Oszillationen der neuronalen Aktivität im Beta- (14–30 Hz) und/oder Gammabereich (30–80 Hz) einher (Überblick bei MacKay 1997), und gleichartige Oszillationen lassen sich unter vergleichbaren Bedingungen auch im Menschen mittels elektrophysiologischer Methoden nachweisen (Überblick bei Tallon-Baudry und Bertrand 1999). Pfurtscheller et al. (1994) maßen z. B. im 56-Kanal-EEG Gammaoszillationen unmittelbar vor Beginn von Bewegungen mit dem linken oder rechten Zeigefinger, der rechten Zehe oder der Zunge, und zwar jeweils genau am Ort der Repräsentation der betreffenden Bewegung im primären somatosensorischen Cortex (für eine partielle Replikation im MEG vgl. Salenius et al. 1996).

Vermutlich entsprechen die bislang beim Menschen beobachteten Synchronisationsphänomene verschiedenen kognitiven bzw. neurophysiologischen Funktionen. Einerseits tritt neuronale Synchronisation relativ konsistent zwischen den für die Planung einer Handlung verantwortlichen Arealen auf. Diese für Handlungsplanung wahrscheinlich bedeutsamste Art der Synchronisation ist an die **Handlungsinitiierung** gebunden und geht ihr unmittelbar voraus. Bei schnellen, ballistischen Bewegungen endet die Synchronisierung bei Bewegungsbeginn (Pfurtscheller et al. 1994; Salenius et al. 1996), bei langsamen, geführten Bewegungen kann sie auch noch während der Bewegung auftreten (Kristeva-Feige et al. 1993; Salenius et al. 1996). Andererseits ist zeitliche Synchronisation auch zwischen zentralmotorischen Strukturen und peripheren Muskelgruppen beobachtet worden (Brown et al. 1998; Salenius et al. 1996), was wahrscheinlich eher etwas mit dem Transport motorischer Kommandos an ausführende Effektoren zu tun hat. Schließlich könnte eine dritte Art von Synchronisationsphänomenen, vor allem Oszillationen im Betabereich, mit der allgemeinen Vorbereitung des motorischen Systems für Bewegungsplanung in Verbindung stehen (Kristeva-Feige et al. 1993).

Zur Vertiefung 18.1 (*Fortsetzung*)

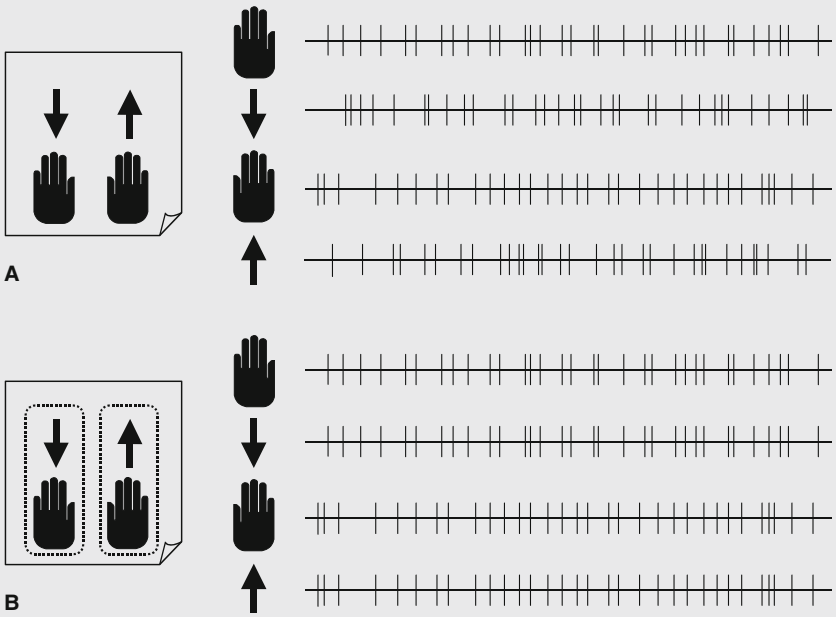


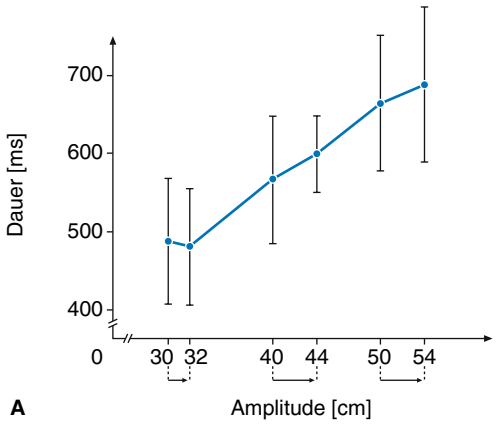
Abb. 18.3 Die Logik der Merkmalsbindung durch neuronale Synchronisation. Das Beispiel zeigt die Planung einer Rückwärtsbewegung mit der linken und einer Vorwärtsbewegung mit der rechten Hand. **A** Ohne Synchronisation aktiviert die Planung der Hände und der Bewegungsrichtungen entsprechende Zellpopulationen, d. h., die involvierten Zellen zeigen eine erhöhte Feuerrate. Die Verteilung der Spikes erlaubt jedoch keinen Schluss darauf, welche Hand welche Bewegung ausführen soll. **B** Die Synchronisation der Feuerraten zu demselben Plan gehöriger Zellen (s. erste und zweite bzw. dritte und vierte Zeile) erlaubt die Bindung der betreffenden Handlungsmerkmale

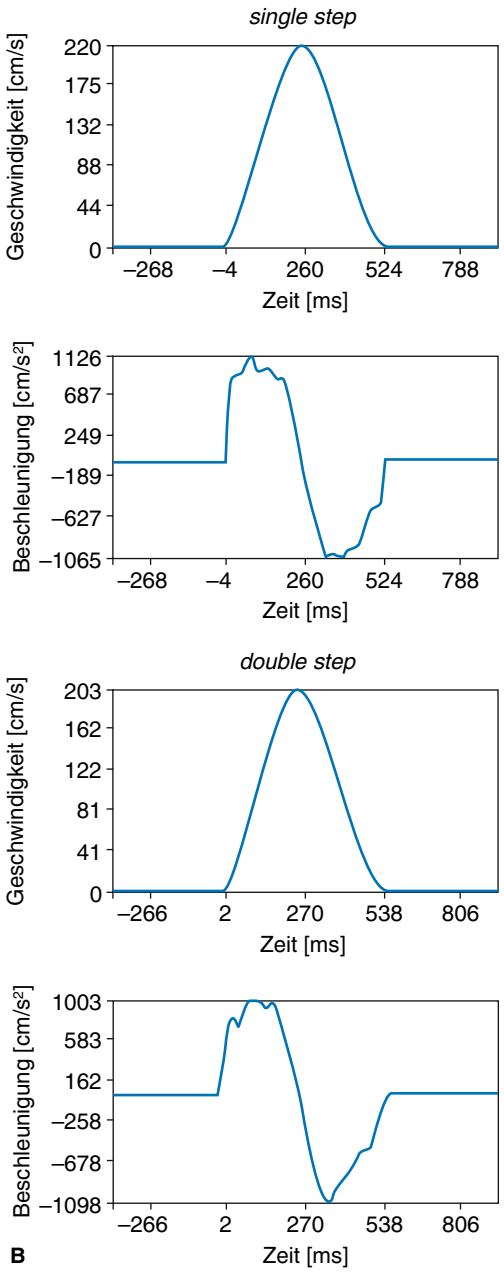
Teile einer aktuell verwendeten motorischen Kontrollstruktur eigentlich langfristig erworben und gespeichert werden. Diese Frage war es, die Schmidt (1975) mithilfe seines Schemakonzepts lösen wollte. Der andere Aspekt betrifft die aktuelle Kontrolle von Handlungen. Um eine Handlung zu realisieren, müssen natürlich ihre Merkmale bestimmt werden, wie die Richtung, Distanz und Geschwindigkeit einer Handbewegung. Das erfordert jedoch nicht notwendigerweise, dass alle Merkmale auch explizit und im Zuge der zentralen Planung spezifiziert, sozusagen einprogrammiert, werden. Einige Merkmale von Bewegungen ergeben sich z. B. implizit durch die Beschränkungen der menschlichen Anatomie und der Körpermechanik (▶ Kap. 20). Andere Merkmale werden zwar flexibel und situationsbezogen festgelegt, aber die Festlegung erfolgt nicht durch den eigentlichen Handlungsplan, sondern durch Umweltinformation.

Ein illustratives Beispiel für das Wechselspiel interner Programmierung und externer Spezifizierung bei einer einfachen Handbewegung stellen sogenannte Double-Step-Experimente dar. In einem solchen Experiment von Prablanc und Pélisson (1990) bestand die Aufgabe der Probanden z. B. darin, ihre Hand von einer Startposition zu einer durch ein Licht angezeigten Zielposition in einer Entfernung von 30, 40 oder 50 cm zu bewegen. Die Bewegung konnte bei voller Sicht auf Hand und Ziel geplant werden; die Sicht auf die Hand war jedoch verwehrt, sobald die Bewegung begann. In einigen wenigen Durchgängen wurde das Bewegungsziel durch die Verschiebung des betreffenden Lichtes noch nach Beginn der Bewegung verändert, z. B. von 30 auf 32 cm, von 40 auf 44 cm oder von 50 auf 54 cm Entfernung vom Startort. Durch einen Trick waren die Probanden nicht in der Lage, diese Verschiebung zu sehen: Sie geschah nämlich während einer Augenbewegung. Wie Abb. 18.4A zeigt, waren die Bewegungen bei Verschiebung des Zielortes entsprechend verlängert, die veränderte Zielposition wurde also noch während der Bewegung einbezogen und die Hand korrekt zum neuen Ziel bewegt. Wenn diese Korrektur durch eine zumindest partielle Reprogrammierung erreicht worden wäre, sollte sich dies in den Bewegungs- bzw. Geschwindigkeitsprofilen niedergeschlagen haben, d. h., die Bewegung sollte kurz unterbrochen, korrigiert und dann wieder aufgenommen worden sein. In Abb. 18.4B ist jedoch keinerlei Indiz für eine derartige Unterbrechung zu finden. Tatsächlich sind die Bewegungsprofile in den Durchgängen mit und ohne Zielverschiebung praktisch identisch. Daher ist es unwahrscheinlich, dass die Korrektur der Bewegung eine Reprogrammierung erforderte.

Befunde wie die von Prablanc und Pélisson (1990) legen nahe, dass nicht alle Handlungsmerkmale zu einem festen Bestandteil eines zentral erstellten Handlungsprogramms werden müssen. Vielmehr scheint es möglich, die Programmierung auf die wesentlichen Aspekte einer Handlung zu beschränken und damit die Bewegung nur ungefähr bzw. nur vorläufig zu bestimmen. Die nähere Ausgestaltung der Bewegungsdetails und die Anpassung der Handlung an die gegenwärtigen situativen Bedingungen können hingegen untergeordneten sensomotorischen Schleifen überlassen werden (Heuer 1981; Hommel 2010; Jeannerod 1984). Die eigentliche Programmierung einer Handlung wäre demnach nicht (notwendigerweise) vollständig und daher auch nicht (notwendigerweise) muskelspezifisch; vielmehr würde sie vor allem diejenigen Handlungsparameter festlegen, die für die Erreichung der intendierten Handlung kritisch sind. Die weitere Spezifikation der erforderlichen Bewegung(en) obläge hingegen in gewisser Weise der Umwelt.

Dieses Konzept der verteilten Verantwortlichkeit von zentralen (in diesem Fall *open-loop*) und mehr peripheren (in diesem Fall *closed-loop*) Mechanismen bzw. von handelnder Person und äußerem Handlungskontext ist konsistent mit einer Reihe weiterer Beobachtungen. Sakkadische Augenbewegungen bestehen z. B. aus einer ersten ballistischen Phase, die das Auge in die Nähe des Zieles bringt, gefolgt von einer Korrektursakkade, die





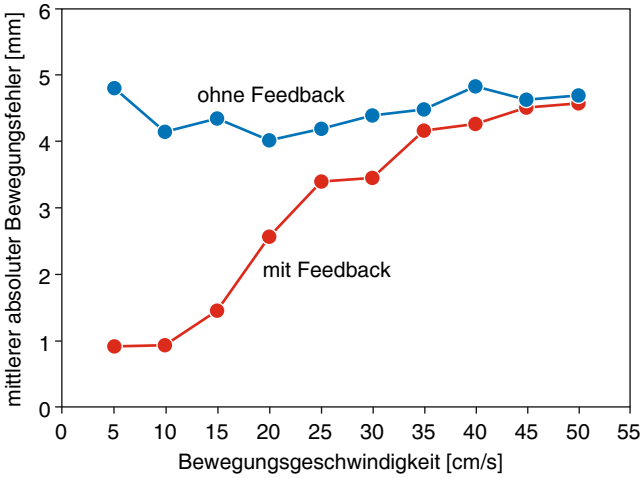


Abb. 18.5 Bewegungsfehler in der Studie von Woodworth (1899) als Funktion der Bewegungsgeschwindigkeit für Bedingungen mit und ohne Feedback. Ohne Feedback hat die Schnelligkeit keinen Einfluss auf die Leistung; mit Feedback ist die Leistung umso besser, je langsamer die Bewegung ausgeführt wird. (Modifiziert nach Woodworth 1899)

die Retina letztlich exakt auf das Ziel ausrichtet. Verschwindet das Zielobjekt jedoch bei Handlungsbeginn, bleibt die Korrektursakkade aus (Prablanc und Jeannerod 1975); sie kann also nicht bereits vor Beginn der Bewegung programmiert worden sein. Ganz ähnlich bestehen zumindest schnelle Zeige- und Greifbewegungen aus einer ballistischen Transportphase, deren Verlauf weitgehend unabhängig von der Verfügbarkeit visueller und propriozeptiver Information ist, und einer Annäherungs- bzw. Manipulationsphase, die ganz wesentlich von visueller oder propriozeptiver Information abhängt (Jeannerod 1984; 1994; Woodworth 1899). Dies legt nahe, dass die erste, grobe Orientierung dieser Handlungen vorprogrammiert ist und die Feinanpassung erst während der Bewegung auf Basis aktueller Umweltinformation erfolgt.

In Übereinstimmung damit ist die erste Transportphase von Zielbewegungen nur dann unabhängig von der Verfügbarkeit visuellen Feedbacks, wenn die Bewegung sehr schnell ausgeführt wird. So ließ Woodworth (1899) in einer der ersten psychomotorischen Untersuchungen überhaupt Versuchspersonen einen Stift zwischen einer linken und rechten Ziellinie hin und her bewegen. Der Takt wurde dabei von einem Metronom vorgegeben, und die Probanden hatten ihre Augen entweder offen oder geschlossen. Wie Abb. 18.5 zeigt, waren die Leistungen bei schnellen Bewegungen in beiden Bedingungen gleich gut, während langsame Bewegungen von der Verfügbarkeit visueller Information profitierten. Vergleichbare Befunde wurden später auch von Keele und Posner (1968) berichtet, die Zielbewegungen verschiedener

Abb. 18.4 Ergebnisse aus dem Double-Step-Experiment von Prablanc und Pélisson (1990). **A** Die Bewegungsdauern variieren systematisch mit der tatsächlichen Amplitude; bei nachträglich veränderten Zielpositionen gehen die Bewegungen also zur veränderten, nicht zur ursprünglichen Zielposition. **B** Die Bewegungsprofile für Durchgänge ohne (*single step*) und mit (*double step*) veränderter Zielposition unterscheiden sich nicht; es gibt keine Hinweise für eine Unterbrechung zur Anpassung an die Zielveränderung. (Aus Prablanc und Pélisson 1990).

Dauer mit und ohne Raumbeleuchtung ausführen ließen (Übersicht und kritische Diskussion in Spijkers 1993).

Handlungsprogramme sind also nicht notwendigerweise starre, vollständig im Voraus festgelegte Kontrollstrukturen, wie die ursprüngliche Definition von Keele (1968) nahelegt. Wenn überhaupt, dann trifft diese Definition nur für sehr einfache, sehr schnell ausgeführte Bewegungen in einer vorhersagbaren, unveränderlichen Umgebung zu. Im Normalfall scheinen jedoch nur relativ abstrakte Handlungseigenschaften fixiert und vorprogrammiert zu werden, und dies dürften vor allem diejenigen Eigenschaften sein, die sich auf die eigentliche Funktion der Handlung beziehen. Vor allem räumliche Handlungsmerkmale sind hingegen auch noch nach dem Beginn einer Handlung veränderbar. Diese Arbeitsteilung hat verschiedene Vorteile. Erstens verringert sich der vor der Handlung erforderliche Programmierungsaufwand, sodass die Handlung schneller initiiert werden kann. Zweitens müssen nicht alle situativen Bedingungen vorausgesehen und nicht alle Handlungseigenschaften im Voraus festgelegt werden, was die Flexibilität der Handlung erhöht.

Ein dritter Vorteil könnte mit der Arbeitsteilung von ventralen und dorsalen visuellen Informationskanälen zusammenhängen. Wie in ▶ Kap. 2 und 22 diskutiert, haben eine Reihe von Arbeiten recht unterschiedliche Eigenschaften von zwei visuomotorischen Verarbeitungspfaden aufgedeckt: einem dorsalen Pfad, der die primären visuellen und motorischen Cortices über den posteroparietalen Cortex verbindet, und einem ventralen Pfad, der durch den inferotemporalen Cortex verläuft (Ungerleider und Mishkin 1982). Der dorsale Pfad versorgt motorische Strukturen vor allem (z. B. Mishkin et al. 1983), aber wahrscheinlich nicht nur (Milner und Goodale 1995) mit räumlicher, handlungsbezogener Information, während der ventrale Pfad vor allem der Codierung von Objektinformation dient. Eine Reihe von Untersuchungen legt nahe, dass manuellen Handlungen andere, zuverlässigere Informationen über räumliche Eigenschaften von Zielorten und Objekten zur Verfügung stehen als verbalen Urteilen (Aglioti et al. 1995; Bridgeman et al. 1981). Allerdings stehen diese Informationen nur online, zur sofortigen Verwertung zur Verfügung (z. B. Bridgeman 2002; Rossetti und Régnier 1995). Mit Bezug auf die Unterscheidung zwischen ventralen und dorsalen Verarbeitungspfaden wäre nun folgende Zuordnung denkbar: Dorsal vermittelte Information könnte zwar pur und sehr präzise, aber nur kurzlebig, ventral verarbeitete Information dagegen kognitiv hochintegriert und (unter Umständen daher) langlebig sein (Milner und Goodale 1995; Rossetti und Pisella 2002). Wenn dem so ist, dann wäre zeitlich gesehen dorsale Information für die (in der Regel langwierigere) Planung einer Handlung zu kurzlebig, sodass die Planung vor allem auf ventrale Information zurückgreifen sollte. Da letztere jedoch unter Umständen zu unpräzise für die exakte Steuerung einer Handlung sein dürfte, liegt es nahe, nur die wesentlichen Aspekte der intendierten Handlung festzulegen und die Feinanpassung während der Ausführung durch dorsale Information besorgen zu lassen. Bislang ist dies jedoch nur eine, noch näher zu untersuchende, Möglichkeit. Tatsächlich werden die bislang vorliegenden Dissoziationen von Leistungen verbaler Urteile und manueller Handlungen noch kontrovers diskutiert, und ihre Beziehung zur Unterscheidung ventraler und dorsaler Verarbeitungspfade ist noch nicht vollständig geklärt (Überblick bei McIntosh und Schenk 2009; Rossetti und Pisella 2002).

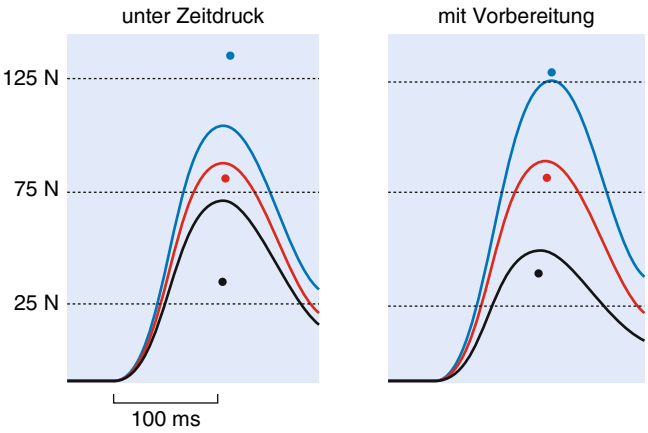


Abb. 18.6 Anzuzielende Maximalkräfte (*Punkte*) und tatsächlich aufgebrachte Kräfte (*Linien*) in Newton aus der Studie von Ghez et al. (1990). Bei der Instruktion, erst nach ausreichender Vorbereitung zu reagieren (*rechtes Diagramm*), werden die drei Zielkräfte sehr genau reproduziert, d. h., die maximal aufgebrachte Kraft korrespondiert gut mit dem definierten Kraftziel. Unter Zeitdruck (*linkes Diagramm*) streuen die tatsächlichen Kräfte hingegen nur wenig um die mittlere der drei möglichen Kräfte. (Aus Ghez et al. 1990).

18.2.8 Programmierung und Initiierung von Handlungen

Die Metapher der motorischen Programmierung legt nahe, dass ein Handlungsprogramm zunächst erstellt und nach Abschluss der Programmierung motorisch implementiert wird. Die Initiierung einer Handlung wäre demnach in zeitlicher Hinsicht abhängig von ihrer Programmierung. Wie erörtert handelt es sich jedoch bei Handlungsprogrammen nicht um vollständig fixierte Strukturen und bei der Handlungsplanung nicht um einen zeitlich exakt begrenzbaren Prozess – Handlungspläne entfalten sich gewissermaßen in der Zeit. Tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass Handlungen vor Abschluss ihrer Programmierung initiiert werden können und daher die Initiierung einer Handlung nicht vom Abschluss ihrer Programmierung abhängen kann.

Ghez et al. (1990) untersuchten z. B. isometrische Ellenbogenbewegungen, wobei die erforderliche Kraft in drei Stufen variierte und durch einen visuellen Reiz angezeigt wurde. Bei ausreichend Zeit für die Bewegungsplanung konnten alle Kräfte mit vergleichbarer Genauigkeit produziert werden (Abb. 18.6, *rechts*). Unter Zeitdruck stellten sich jedoch deutliche Assimilationseffekte ein, d. h., die Unterschiede zwischen den Kräften wurden deutlich geringer und konvergierten auf die mittlere Kraft (Abb. 18.6, *links*). Die Autoren vermuten, dass die Probanden in dieser Bedingung zunächst stets eine Bewegung mit mittlerer Kraft planten und den Kraftparameter anschließend nach Maßgabe des präsentierten Reizes verringerten bzw. erhöhten. Dieser Prozess war bei sehr früher Initiierung der Bewegung wahrscheinlich noch nicht abgeschlossen, sodass die tatsächlich gemessenen Bewegungskräfte nur eine Art Schnappschuss eines kontinuierlichen Anpassungsprozesses darstellten.

Diese Überlegung passt zu Beobachtungen von Van Sonderen und Denier van der Gon (1991), in deren Studie Probanden zielgerichtete Armbewegungen ausführten. Wie bei anderen Double-Step-Experimenten (s. oben) wurde der Zielreiz in einigen Durchgängen kurz nach der Darbietung an einen anderen Ort verschoben. Die Zielgenauigkeit bei verschobenen Zielen hing dabei systematisch von der Reaktionszeit ab: Je später eine Bewegung initiiert wurde, desto wahrscheinlicher zielte der erste Bewegungsteil bereits auf den neuen Zielort. Aber auch in Durchgängen ohne Zielverschiebung variierte die Bewegungsrichtung mit der Reaktionszeit. Dies legt nahe, dass die Probanden auch hier einen (allerdings interindividuell variablen) „Standardparameter" eingestellt hatten, um ihn nach der Reizverarbeitung kontinuierlich in Richtung des tatsächlichen Zieles zu modifizieren.

Diese Befunde sprechen für die zeitliche Unabhängigkeit von Handlungsprogrammierung und -initiierung, was wiederum nahelegt, dass Programmierung und Initiierung auch unabhängig gesteuert werden. Dieselbe Schlussfolgerung ergibt sich auch aus Beobachtungen, dass **Handlungssequenzen** initiiert werden können, bevor alle Sequenzelemente programmiert worden sind (▶ Abschn. 18.3.3), und dass in Doppelaufgabenexperimenten die Planung und die Initiierung von Handlungen dissoziierbare Effekte aufweisen (▶ Abschn. 18.4.5).

Ein relativ einfaches, aber vielversprechendes Modell der Initiierung von Handlungsplänen ist von Bullock und Grossberg (1988; vgl. auch Rosenbaum 1987) vorgeschlagen worden. Diesem Modell zufolge wird die Initiierung durch ein intern generiertes Go-Signal festgelegt, das drei wichtige Eigenschaften hat:

1. Es ist unspezifisch und hängt somit nicht von der Art der vorbereiteten Handlung ab; es triggert gewissermaßen „blind" den jeweils vorbereiteten Handlungsplan.
2. Es ist zeitlich unabhängig von der Handlungsplanung und ihrer Fortschritte; Go-Signale können daher in verschiedenen Planungsphasen generiert werden.
3. Es handelt sich bei Go-Signalen nicht um diskrete Ereignisse; sie bauen sich vielmehr über die Zeit kontinuierlich auf.

18.2.9 Programme, Pläne und Ziele

Im Lichte der bislang vorliegenden Ergebnisse zur Planung von Handlungen ist die an die Computersteuerung angelehnte Rede von motorischen Programmen nicht unbedingt falsch – schließlich können Computerprogramme durch Parametrisierung recht flexibel gestaltet werden –, aber doch oft eher irreführend. Einerseits scheinen Handlungspläne weniger motorisch zu sein, als die muskelbezogene Definition von Keele (1968) nahelegt. Andererseits entspricht das Konzept eines Programms als einer fertig zu stellenden, zu kompilierenden und dann zu implementierenden autonomen Kontrollstruktur in zu geringem Maße den Beobachtungen einer zielgerichteten, kontinuierlichen, zunächst abstrakten und dann zunehmend spezifischer werdenden Handlungsplanung, die sowohl verteilt repräsentierte Merkmalscodes als auch ergänzende, aktuelle Umweltinformation adaptiv integriert. Dementsprechend gelangt z. B. Shaffer (1991, S. 372) zu einer ganz anderen Definition des (dazu eigentlich nicht mehr recht passenden) Begriffs eines motorischen Programms als „a cognitive representation of the goal structure of an intended action". Daneben sind eine Reihe anderer Begriffe und Konzepte diskutiert worden, die jeweils auf eine mehr externe, umwelt- und damit zielbezogene Rekonstruktion von Handlungsplanung aus sind. Vor allem aber ist zu fragen, mithilfe welcher Codes Handlungen geplant werden, wie sie entstehen und was sie repräsentieren.

In für seine Zeit ungewöhnlich detaillierter Weise ist diese Frage von Lotze (1852) behandelt worden. Es war seine Überzeugung, dass motorische Akte in gewisser Weise nicht direkt willentlich erzeugt werden können, weil das motorische System und seine Logik dem Willen grundsätzlich nicht zugänglich sind. Wohl aber ist es möglich, die Beziehung zwischen mentalen Ausgangsbedingungen und motorischen Akten zu studieren, sozusagen die Input-Output-Relationen der motorischen Black Box. Das Wissen darüber kann dann verwendet werden, um die Motorik indirekt zu steuern: Man „überredet" das motorische System, bestimmte, intendierte Akte zu erzeugen, indem man diejenigen Ausgangsbedingungen herstellt, auf die das System gewöhnlich mit genau diesen Akten reagiert.

Harless (1861) ging ähnlichen Überlegungen nach, fokussierte aber mehr auf den eigentlichen Lernprozess, d. h. auf den Erwerb intentionalen Handelns. Wie Lotze ging er davon aus, dass das motorische System zunächst nicht direkt kontrollierbar ist, sondern z. B. in der frühen Kindheit zufällige oder reflexhafte Muster generiert. Er postulierte aber einen automatischen Lernmechanismus, der die gerade aktiven motorischen Muster mit den Codes wahrgenommener Bewegungseffekte (*feedback*) verknüpft. Mit der Erfahrung stabilisieren sich diese Assoziationen und können dann gewissermaßen in der Zeit umgekehrt und „rückwärts" eingesetzt werden: Man aktiviert den Code des **Handlungseffekts**, der seinerseits das assoziierte motorische Muster aktiviert und damit den (nun) gewünschten Handlungseffekt hervorbringt. Kognitive Repräsentationen von erst Bewegungs-, dann Handlungseffekten dienen also der indirekten Kontrolle der mit ihnen verknüpften motorischen Aktivität als mentale Repräsentanten (*mental cues*) der durch sie erzeugbaren Bewegungen (James 1890).

Diese Denkfigur stellt die Basis für das vor allem durch James (1890) popularisierte **ideomotorische Prinzip** dar, das nach einer langen Zeit der Vergessenheit erst kürzlich wieder als Grundlage für Modelle der intentionalen Handlungskontrolle entdeckt wurde (Greenwald 1970; Hoffmann 1993; Hommel 2009; Hommel et al. 2001; Prinz 1987; s. auch ▶ Kap. 22). Tatsächlich werden neue, zunächst arbiträre Effekte von Bewegungen bereits von Säuglingen erlernt und zur Steuerung explorativen Verhaltens eingesetzt (▶ Zur Vertiefung 18.2). Auch Erwachsene erwerben Merkmale neuer Handlungseffekte automatisch, d. h., auch wenn diese eigentlich völlig irrelevant sind. Wenn Probanden z. B. die Erfahrung gemacht haben, dass bestimmte Tasten kontingent hohe und niedrige Töne erzeugen, dann drücken sie beim späteren Hören der Tonhöhen die vorher damit assoziierten Tasten automatisch schneller (Hommel 1996a) und mit höherer Wahrscheinlichkeit (Elsner und Hommel 2001). Wie PET- und fMRI-Studien zeigen, aktiviert die bloße Wahrnehmung eines gerade erworbenen Handlungseffekts Bereiche des kaudalen supplementär-motorischen Cortex, eines Areals mit

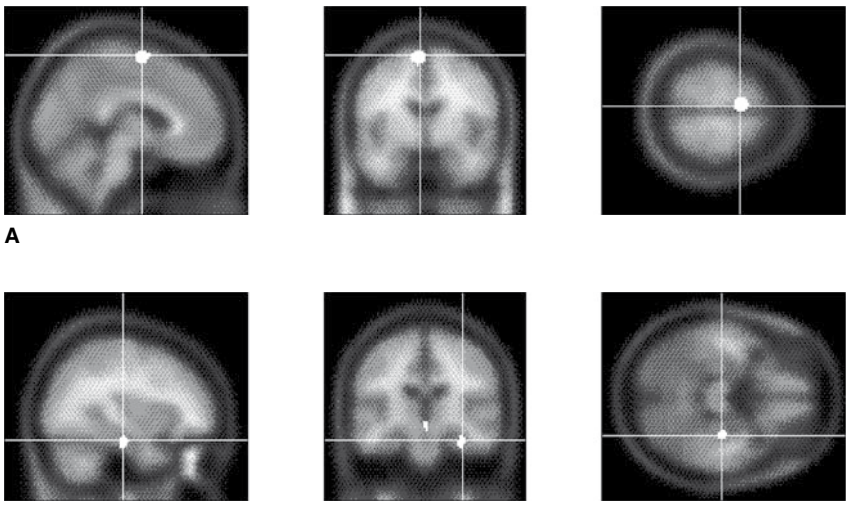


Abb. 18.7 Hirnaktivität bei der Darbietung zuvor erworbener Handlungseffekte aus der Studie von Elsner et al. 2002. Zunächst führten Versuchspersonen manuelle Tastendrücke aus, die Töne (d. h. Handlungseffekte) einer bestimmten Höhe hervorriefen. Dann wurden sie einem PET-Scan unterzogen, während sie passiv Sequenzen mit verschiedenen Anteilen von zuvor erworbenen Handlungseffekttönen und anderen, neutralen Tönen zuhörten. Je größer der Anteil zuvor handlungsbezogener Töne war, desto stärker war die gemessene Aktivität im supplementär-motorischen Areal (**A**) und im rechten Hippocampus (**B**)

einer zentralen Rolle bei der Planung intendierter Handlungen (Elsner et al. 2002; Melcher et al. 2008; Abb. 18.7). Mithilfe von fMRI konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Vorbereitung einer manuellen Handlung Hirnregionen aktiviert, die der Wahrnehmung menschlicher Hände dienen, während die Vorbereitung einer Gesichtsbewegung Hirnregionen aktiviert, die der Wahrnehmung von Gesichtern dienen (Kühn et al. 2011). Mit anderen Worten, die Vorbereitung einer Handlung geht mit der Aktivierung von Repräsentation ihrer sensorischen Konsequenzen einher.

Diese Beobachtungen belegen, dass sich Handlungsplanung tatsächlich – ganz im Sinne des ideomotorischen Prinzips – der Codes von Handlungseffekten bedient. Diese Codes codieren einerseits perzeptive Merkmale, die mithilfe eines bestimmten motorischen Musters erzeugt werden können, andererseits sind die mit diesen motorischen Mustern assoziiert und repräsentieren diese in gewisser Hinsicht. Mit anderen Worten, wir planen Handlungen, indem wir eine antizipative Vorstellung darüber entwickeln, welche Effekte wir mit ihnen erreichen wollen. In Übereinstimmung damit aktiviert bereits die Vorstellung einer Bewegung nicht nur solche sensorische Areale, die an der Verarbeitung von Bewegungsfeedback beteiligt sind, sondern auch den prämotorischen Cortex und den supplementär-motorischen Cortex (Decety et al. 1994; Jeannerod 1994). Und selbst die Beobachtung von Handlungen (d. h. ihrer sensorischen Effekte) kann zu motorischer Aktivität und zur Aktivierung derjenigen Muskeln führen, die man selbst bei der Ausführung der betreffenden Handlung gebrauchen würde (Fadiga et al. 1995; s. auch ▶ Kap. 21).

Eine wichtige Implikation dieser Überlegungen besteht darin, dass Handlungen nicht in Begriffen proximaler Muskelaktivität, sondern mit Blick auf ihre distalen Effekte geplant werden: Die Planung beginnt also mit dem Ziel und nicht dem Weg. Die Planung einer Handlung nicht von den motorischen Möglichkeiten, sondern von den intentionalen Bedürfnissen her zu organisieren, räumt dem Handlungsziel eine wesentliche, strukturbildende Rolle ein. Diese Funktion von Handlungszielen wurde vor allem von Miller et al. (1960) ausgearbeitet und in viele neuere Ansätze übernommen (z. B. Gallistel 1980; Hoffmann 1993; MacNeilage 1970; Prinz 1997; Rosenbaum et al. 1995). Bei Unterschieden in Detail und Erklärungsniveau ist die grundlegende Idee doch stets dieselbe, nämlich dass der Ablauf der Handlungsplanung (vom Ziel zur Bewegung) ihren späteren Verlauf (durch Bewegung zum Ziel) umkehrt.

18.3 Planung von Handlungssequenzen

Der vorhergehende Abschnitt hat die Planung sehr einfacher, oft weitgehend ballistischer Handlungen behandelt, wie das Drücken einer Taste, das Aussprechen einer Silbe, das Blicken in eine bestimmte Richtung, das Zeigen auf einen Ort oder das Ergreifen eines Gegenstands. Handlungselemente dieser Art sind die ersten, die ein heranwachsendes Kind zu beherrschen lernt, und auch im Alltag von Erwachsenen sind sie allenthalben anzutreffen. Diese Handlungselemente sind sozusagen die Bausteine unseres Handelns. Und doch sind es nur Bausteine, denn alltägliches Handeln ist in vielerlei Hinsicht komplexer (de Kleijn et al. 2014). Tatsächlich reihen wir nicht bloß willkürlich Element an Element, sondern führen kohärente, oft hochgeübte Handlungssequenzen aus, wie bei der Einnahme des Frühstücks, dem Gang zur Arbeit, dem Zubereiten eines Gerichts oder dem Besuch eines Konzerts. Bereits beim Aussprechen eines Wortes oder gar Satzes stellt sich eine ganze Reihe von Kontrollproblemen, die beim Ausführen einzelner Handlungselemente nicht auftreten. Um diese Kontrollprobleme, also um die Sequenzierung von Handlungen in der Zeit, geht es in diesem Abschnitt.

18.3.1 Programmierung von Handlungssequenzen

Die wichtigste Frage bezüglich der Programmierung von Handlungssequenzen muss zunächst einmal lauten, ob überhaupt mehr als ein Teilschritt einer Handlung vor deren Beginn geplant wird. Alternativ wäre denkbar, dass Handelnde ihren eigenen Handlungen immer nur „einen Schritt voraus" sind, Handlungselemente also immer erst dann planen, wenn der vorausgegan-

gene Schritt fertig programmiert, vielleicht sogar ausgeführt ist. Einerseits ist es sicher möglich, Beispiele für eine derart schrittweise *Programmierungsstrategie* zu finden, vor allem wenn die Programmierung sehr aufwendig und der Erfolg einzelner Handlungsschritte sehr ungewiss ist, wie etwa beim Erwerb des Skifahrens. Andererseits gibt es zahlreiche Hinweise für eine mehr „vorausschauende" Planungsstrategie, die zeigen, dass Menschen durchaus in der Lage sind, längere Handlungssequenzen bereits vor Beginn des ersten Handlungselements zu planen.

▪ Unabhängigkeit von Rückmeldung

Die schrittweise Kontrolle von Handlungssequenzen würde voraussetzen, dass z. B. das visuelle oder kinästhetische Feedback einer Teilbewegung genutzt wird, um die folgende Teilbewegung auszulösen (▶ Abschn. 18.3.2). Die Verarbeitung solchen Feedbacks erfordert jedoch Zeit, möglicherweise mehr Zeit, als bei manchen Bewegungen zur Initiierung des nächsten Elements zur Verfügung steht (Lashley 1951) – man denke nur an die Aussprache eines aus mehreren Phonemen bestehenden Wortes oder das Solo eines Schlagzeugers. Nehmen wir z. B. Tastendrucksequenzen, die Versuchspersonen mit Geschwindigkeiten von bis zu

Zur Vertiefung 18.2

Entwicklung der Handlungskontrolle

Die sowohl persönliche als auch soziale Bedeutung der Fähigkeit, intentionale Handlungen ausführen zu können, wird beim Beobachten eines kleinen Kindes und seiner Entwicklungsfortschritte besonders deutlich. Während früh nach der Geburt Augen und Gliedmaßen noch unkoordiniert, rast- und ziellos erscheinen, reichen schon wenige Wochen und Monate, um den neuen Erdenbürger als interessiertes, wollendes Individuum zu erleben, das eigenen Bedürfnissen in zunehmend differenzierter und effektiver Weise Ausdruck zu verleihen und aktiv nachzugehen vermag. Dabei gibt es zunächst viel zu lernen, denn wie kann man schon zu Beginn seines Lebens wissen, was man wie erreichen kann, welche Gliedmaßen wie bewegt sein wollen?

Was handlungsrelevante Information und ihren Erwerb betrifft, sind schon Säuglinge recht aufnahme- und lernfähig. Eine klassische Methode zur Untersuchung solcher Lernprozesse besteht darin, die Kinder mit neuen Handlungseffekten zu konfrontieren. Wie in ◘ Abb. 18.8 gezeigt, wird z. B. ein Fuß mit einem Band umwickelt, dessen anderes Ende entweder mit einem elastischen Stab (◘ Abb. 18.8A) oder mit einem über dem Bett angebrachten Mobile (◘ Abb. 18.8B) verbunden wird (z. B. Rovee und Rovee 1969). In der Mobilegruppe können die Kinder also systematisch neue Ereignisse kreieren, indem sie das Mobile mithilfe ihres Fußes in Bewegung versetzen. In anderen Untersuchungen erhielten die Kinder der Versuchsgruppe Gelegenheit, ein Mobile durch Druck auf ihr Kopfkissen zu bewegen, während die Mobilebewegungen in der Kontrollgruppe zufällig waren und nicht von Bewegungen der Kinder abhingen (Watson und Ramey 1972). In wieder anderen Untersuchungen konnten Säuglinge die Höhe eines Tones (Rochat und Striano 1999) oder die Darbietungsqualität eines Filmes (Kalnins und Bruner 1973) durch verschieden starken Druck auf einen Schnuller manipulieren.

In Versuchen dieser Art sind die Kinder in den Versuchsgruppen mit handlungsabhängigem Feedback oft aktiver, was aber darauf zurückzuführen sein könnte, dass sich das handlungsabhängige Ereignis öfter oder stärker einstellt. Interessanterweise lässt sich aber auch eine Art handlungsbezogenes Wiedererkennen nachweisen: Wenn die Kinder nach einer Zeit wieder mit dem Mobile konfrontiert werden, zeigen sie überzufällig häufig das zuvor damit assoziierte Verhalten – dies bereits im Alter von zwei Monaten (Watson und Ramey 1972) und sogar noch nach zwei oder mehr Tagen (Butler und Rovee-Collier 1989; Fagen et al. 1976). Die Kinder erwerben also durch die Erfahrung der Kontingenz von Bewegungen und Ereignissen eine bilaterale Assoziation zwischen deren kognitiven Repräsentationen, sodass die spätere Aktivierung der Ereignisrepräsentation auch die zuvor damit einhergegangene Bewegung „in Erinnerung ruft" – ganz wie das ideomotorische Prinzip erwarten lässt (▶ Abschn. 18.2.9). Diese Assoziationen bilden gewissermaßen die Datenbasis, mit deren Hilfe dann Bewegungen nach Maßgabe ihrer Effekte und deren momentaner Wünschbarkeit ausgewählt werden können.

Während der Erwerb von Bewegungs-Effekt-Beziehungen schon bald nach der Geburt (und vielleicht früher) einsetzt, ist das Verhalten der Säuglinge zunächst aber oft reaktiv bzw. reizgetrieben. Sie sind sehr wohl in der Lage, zu erwartende Handlungseffekte vorherzusagen (und sind überrascht, wenn diese nicht eintreten), aber sie benutzen die Repräsentation erworbener Handlungseffekte noch nicht, um ihre Handlungen zielgerichtet zu steuern (Verschoor et al. 2013). Mit ungefähr sieben bis zehn Monaten setzt ein nächster Entwicklungsschub ein, durch den die Kinder sehr viel besser als vorher in der Lage sind, bei manuellen Handlungen kontraproduktive Greif- und Vermeidungsreflexe zu unterdrücken (Diamond 1990) und interferierende, alternative Handlungsziele vorübergehend auszublenden (Diamond und Gilbert 1989). Auch das Verhalten in Piagets A-nicht-B-Aufgabe wird deutlich besser. In dieser Aufgabe werden die Kinder zunächst dafür belohnt auf ein Objekt zu reagieren (z. B. dieses zu ergreifen), das an einem Ort A versteckt ist. Nach einer Zeit wird das Objekt wieder an Ort A versteckt, dann aber sichtbar zu einem anderen Ort B gebracht. Junge Kinder haben erhebliche Probleme mit dieser Aufgabe und suchen oft zuerst an Ort A, vor allem wenn zwischen dem Verstecken an B und der Reaktion einige Sekunden vergehen. Im Alter von sieben bis zwölf Monaten nimmt die Lösungswahrscheinlichkeit jedoch dramatisch zu, und die zeitliche Toleranz steigt erheblich an (Diamond 1985). Auch vorher erworbene Handlungseffekte können nun für die Planung zielgerichteter Handlungen eingesetzt werden (Verschoor et al. 2010). Dieser Entwicklungssprung könnte etwas mit der Reifung des mutmaßlich für derartige Aufgaben wichtigen (prä-)frontalen Cortex zu tun haben. Zum einen scheitern nämlich auch Affen mit Läsionen im dorsolateralen präfrontalen Cortex oft an der A-nicht-B-Aufgabe (Diamond und Goldman-Rakic 1986), und zum anderen erreicht die metabolische Aktivität im menschlichen frontalen Cortex erst im Lebensalter von acht bis zwölf Monaten erwachsenenähnliche Ausmaße (Chugani 1994).

Ein weiterer wichtiger Schritt für die Entwicklung der Handlungskontrolle findet mit ungefähr fünf bis sechs Jahren statt. Während jüngere Kinder oft nicht in der Lage sind, in Anwesenheit einer sofort verfügbaren, aber kleinen Belohnung auf eine bevorzugte oder größere Belohnung zu warten, haben Kinder ab fünf bis sechs Jahren kaum noch Probleme damit (Mischel und Mischel 1983). Im Unterschied zu jüngeren Kindern haben Fünf- bis Sechsjährige auch erheblich weniger Schwierigkeiten, ihre Handlungen in Go/NoGo-Aufgaben zu unterdrücken (Livesey und Morgan 1991; Luria 1961), zwischen verschiedenen Reiz-Reaktions-Regeln hin und her zu wechseln (Zelazo et al. 1995), reizinkompatible Reaktionen auszuführen (Gerstadt et al. 1994) und irrelevante Handlungstendenzen zu unterdrücken (Eenshuistra et al. 2004). Ähnliche Probleme bei der Handlungskontrolle wie die unter Fünfjährigen zeigen auch Patienten mit Läsionen im Frontalhirn (z. B. Décary und Richer 1995; Drewe 1975; Luria 1966; Perret 1974), was auch bei diesem Entwicklungsschritt eine Beziehung zur corticalen, vor allem frontocorticalen Reifung nahelegt.

Zur Vertiefung 18.2 (*Fortsetzung*)

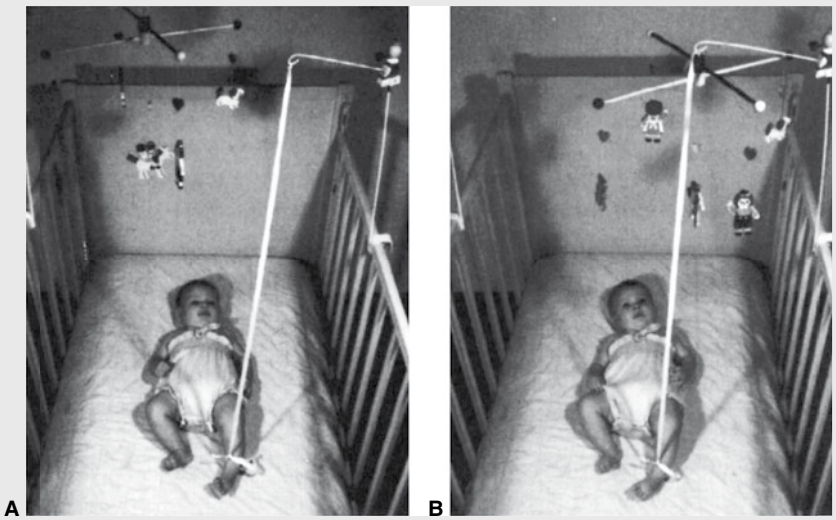


Abb. 18.8 Typische Versuchsanordnung in Studien zum Erwerb von Handlungseffekten bei Kleinkindern. In Bedingung (**A**) haben die Fußbewegungen des Kindes keine weiteren Effekte, während das Kind in Bedingung (**B**) die Bewegungen des Mobiles durch Fußbewegungen kontrollieren kann. (Aus: Rovee-Collier et al. 1980, S. 1159–1161. © 1980, American Association for the Advancement of Science)

100 ms pro Tastendruck ausführen können (Sternberg et al. 1978). Legt man Keeles und Posners (1968) Schätzung von 190–260 ms für die Verarbeitung visuellen Feedbacks zugrunde, so können die einzelnen Elemente solcher Sequenzen unmöglich von visuellem Feedback des vorangegangenen Elements initiiert worden sein.

Als konkretes Beispiel kann die Untersuchung von Gentner et al. (1980) dienen, in der die Bewegungen geübter Sekretärinnen beim Schreibmaschineschreiben aufgezeichnet wurden. Abb. 18.9 zeigt den Zeitpunkt der Initiierung und die Dauer einzelner, gefilmter Fingerbewegungen beim Schreiben der Phrase „an epic". Besonders auffällig ist hier, dass die zur Taste „i" gehörende Bewegung beginnt, noch bevor die Tasten der drei vorangehenden Zeichen („__ep") gedrückt worden sind. Zumindest diese Bewegung kann also nicht vom Vorliegen des Feedbacks der Vorgängerelemente abhängig gewesen sein. Auch wenn das Argument der Feedbackunabhängigkeit in diesem Beispiel sehr plausibel ist und oft zur Unterstützung von Programmierungstheorien herangezogen wurde, so wird es doch in vielen Fällen überschätzt. So ist nicht auszuschließen, dass Feedback schneller verarbeitet wird als von Keele und Posner (1968) angenommen; Sequenzelemente könnten durch Feedback von früheren, nicht nur den unmittelbar vorauslaufenden Elementen initiiert werden; und die Initiierung könnte auf der Basis antizipierten, nicht unbedingt tatsächlichen Feedbacks erfolgen (▶ Abschn. 18.3.2). Im Zusammenhang mit Handlungssequenzen sind also die Argumente für Feedbackunabhängigkeit nicht ganz so zwingend wie in Bezug auf einfache, ballistische Handlungen (▶ Abschn. 18.2.1).

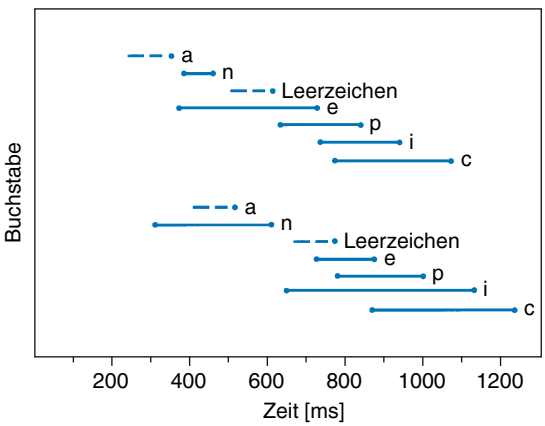


Abb. 18.9 Zwei Beispiele für Beginn und Dauer der Fingerbewegungen beim maschinellen Schreiben der Phrase „an epic" aus der Studie von Gentner et al. (1980). Es fällt auf, dass die Reihenfolge, in der die Fingerbewegungen beginnen, nicht immer die Reihenfolge der Buchstaben widerspiegelt. (Aus Rosenbaum 1991)

Antizipationseffekte und Reihenfolgefehler

Für die Vorausplanung von mehr als einem Element einer Handlungssequenz spricht die Beobachtung von Antizipationseffekten, also Einflüssen späterer Elemente einer Sequenz auf frühere. Beim Maschineschreiben hängt z. B. die zur Produktion von Buchstabenfolgen benötigte Zeit in erheblichen Maße von dem Wort ab, innerhalb dessen sie vorkommen (z. B. Terzuolo und Viviani 1980). Auch **Reihenfolgefehler**, die vor allem bei der vokalen und manuellen Wort- und Satzproduktion intensiv untersucht wurden (Fromkin 1980), lassen auf die Antizipation späterer Elemente einer Sequenz schließen. Innerhalb einzelner Worte treten vor allem Buchstabenvertauschungen auf, z. B. „bootfall" statt „football" beim Sprechen (Garrett 1982) oder „ignroe" statt „ignore" beim Schreibmaschineschreiben (Shaffer 1975). Aber auch Buchstaben nachfolgender Worte können Fehler induzieren, z. B. „speer bill" statt „spill beer" (Dell 1986), und selbst über mehrere Worte hinweg sind Einflüsse möglich, wie in den Sätzen „You hissed all my mystery lectures" (Potter 1980) oder „Writing a mother to my letter" (Dell 1986). Die letzten beiden Beispiele verdeutlichen, dass die syntaktische Struktur der Sequenz trotz der semantischen Fehler durchaus korrekt sein kann. Die Sprechplanung ist in diesen Fällen also keineswegs völlig gescheitert, vielmehr besteht das Problem in der Zuordnung von Sequenzelementen zu syntaktisch definierten Sequenzpositionen (▶ Abschn. 18.3.2). Derartige Probleme können nur auftreten, wenn der jeweilige Satz im Voraus geplant und alle erforderlichen Elemente vor Beginn der Satzproduktion spezifiziert wurden.

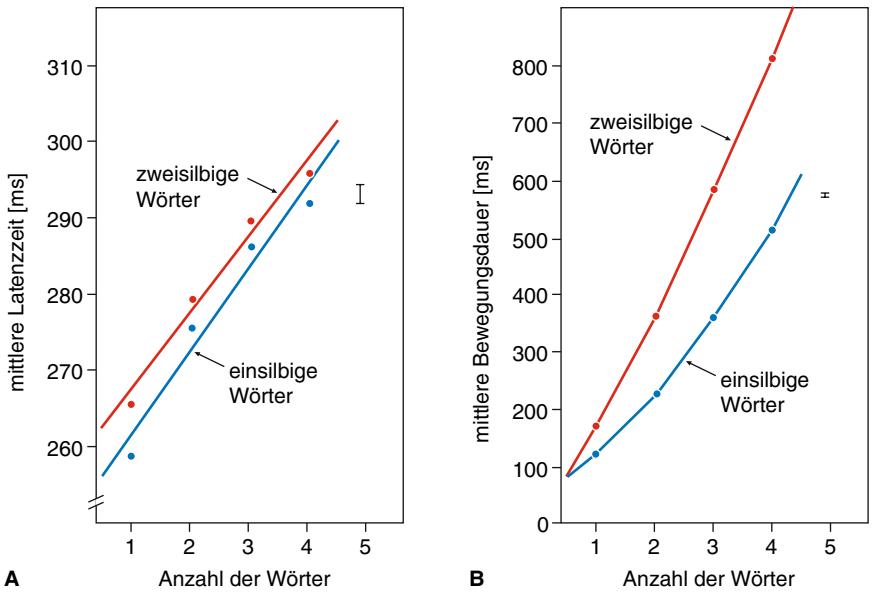


Abb. 18.10 Reaktionszeiten (**A**) und Bewegungsdauern (**B**) aus der Untersuchung von Sternberg et al. (1978) für die verbale Produktion verschieden langer Sequenzen ein- und zweisilbiger Wörter. Charakteristisch ist vor allem der systematische Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Silbenzahl und zunehmender Sequenzlänge

Komplexitätseffekte

Wenn ein Handlungsschritt im Voraus geplant wird, sollte dies eine bestimmte, messbare Zeit dauern. Falls tatsächlich mehrere Elemente einer Handlungssequenz im Voraus geplant werden, so lässt dies erwarten, dass die für die Planung einer Sequenz erforderliche Zeit mit der Sequenzlänge zunimmt (▶ Abschn. 18.2.1). In der Tat haben viele Untersuchungen über derartige Zusammenhänge berichtet. Zum Beispiel steigt die für die Initiierung einer Handlungssequenz benötigte Reaktionszeit mit der Anzahl auszusprechender Silben (Eriksen et al. 1970; Sternberg et al. 1978; Abb. 18.10), zu drückender Tasten (Sternberg et al. 1978), von Handbewegungen (Fischman 1984; Harrington und Haaland 1987; Henry und Rogers 1960) und von willkürlichen Augenbewegungen (Inhoff 1986).

Für die Vorausplanung von Handlungssequenzen spricht auch die Abhängigkeit der Reaktionszeit von der Position und Anzahl noch festzulegender Handlungselemente. Rosenbaum et al. (1984) ließen Versuchspersonen z. B. Sequenzen von zwei oder drei Tastendrücken ausführen. In jedem Durchgang signalisierte ein Reiz, welche von zwei möglichen Sequenzen auszuführen waren. Diese beiden Sequenzen unterschieden sich nur in einem Element, dessen Position variiert wurde. Die Reaktionszeit für die Initiierung der Sequenz war umso länger, je weiter vorn in der Sequenz sich das unterscheidende Element befand. Dies legt nahe, dass die sich jeweils vor dem kritischen Element befindlichen Elemente vorausgeplant wurden, sodass bei Darbietung des Signalreizes nur noch die restlichen Elemente (vom kritischen Element an) geplant werden mussten.

18.3.2 Sequenzierung von Handlungselementen

Wenn Handlungssequenzen nicht durch externe Reize gesteuert und die Repräsentationen von mehr als einem Sequenzelement bereits vor der Initiierung einer Sequenz aktiviert werden, resultiert daraus ein Sequenzierungsproblem. Nehmen wir an, ein geübter, deutschsprachiger Sprecher möchte den Begriff WORT aussprechen (in den Beispielen dieses Abschnitts beziehen sich Begriffe in Großbuchstaben auf Reize bzw. Reizrepräsentationen und Begriffe in Anführungsstrichen auf verbale Handlungen bzw. deren Repräsentationen). Plausiblerweise haben sich durch Übung Assoziationen zwischen der Repräsentation des Begriffs mit Codes der Buchstaben W, O, R und T bzw. der entsprechenden phonologischen Lautmuster gebildet, sodass die Aktivierung der Begriffsrepräsentation mittelbar auch zur Aktivierung der Codes der auszusprechenden Lautmuster führt. Was aber hindert nun die Person, statt „wort“ die Lautfolge „trow“ oder „orwt“ zu produzieren? Wie wird sichergestellt, dass (jedenfalls im Normalfall) die aktivierten Handlungselemente in der korrekten Reihenfolge ausgesprochen werden?

Zur Beantwortung dieser Frage sind eine Reihe von Überlegungen und Modellen vorgeschlagen worden, deren basale Logik im Folgenden dargestellt wird. In der Literatur sind diese Überlegungen in der Regel im Sinne sich ausschließender Alternativen diskutiert worden, was zu der etwas unübersichtlichen Befundlage in diesem Bereich beigetragen haben mag. Jüngere Untersuchungen legen hingegen nahe, dass die Art und Weise der Programmierung von Handlungssequenzen aufgaben- und übungsspezifisch ist, sodass unter Umständen verschiedene Modelle für verschiedene Situationen und Bedingungen gültig sind.

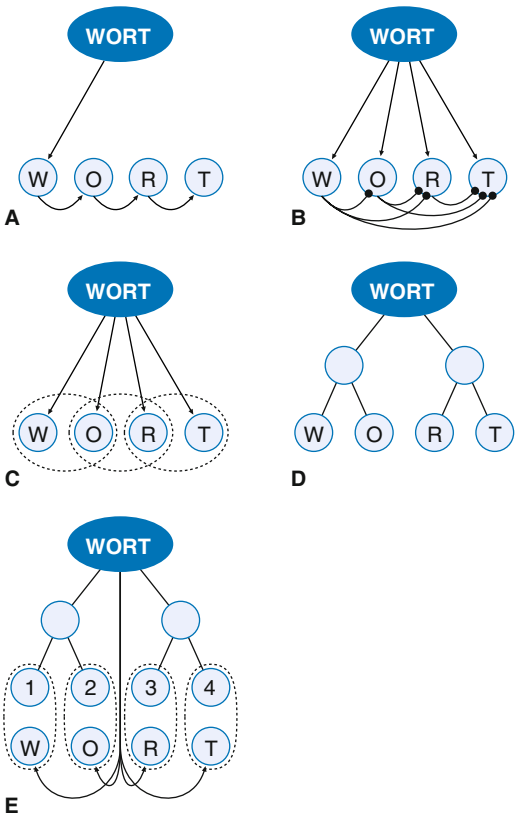
Verkettung von Handlungselementen

Frühe Modelle der Planung und Kontrolle von Handlungssequenzen gingen davon aus, dass die produzierte Abfolge von Handlungselementen durch eine entsprechende Abfolge interner Aktivierungen gesteuert wird. Den Überlegungen von James (1890) zufolge initiiert die interne Repräsentation eines Reizes den jeweils assoziierten Handlungsschritt, und sobald dessen Ausführung wahrgenommen worden ist, wird Aktivierung an die Repräsentation desjenigen Reizes weitergeleitet, der mit dem folgenden Handlungsschritt assoziiert ist. Beim Erwerb der Aussprache des Wortes WORT wird also zunächst jeder einzelne Buchstabe in einen entsprechenden Laut übersetzt, so-

dass die Sprechhandlung als Abfolge von Reiz-Reaktions-Paaren (W → „w“, O → „o“, R → „r“, T → „t“) beschrieben werden kann. Durch Wiederholung der Reizsequenz und der entsprechenden Lautsequenz werden jedoch direkte Assoziationen zwischen den Repräsentationen angrenzender Reizpaare gestiftet (W → O, O → R, R → T), die bei Eintreffen von Feedback über eine Reaktion auf den momentanen Reiz wirksam werden und so die Repräsentation des folgenden Reizes und die entsprechende Reaktion aktivieren. Die Kontrolle durch externe Reize wird also im Verlauf von Übung durch interne, repräsentationsbezogene Kontrolle ersetzt, wie in ◘ Abb. 18.11A skizziert.

Diese allgemeine Idee der Sequenzkontrolle ist verschiedentlich verfeinert, modifiziert und erweitert worden, um Kritikpunkten zu begegnen. Münsterberg (1889) argumentierte, dass die eine Sequenz steuernden Assoziationen nicht zwischen Reizrepräsentationen, sondern zwischen motorischen (Teil-) Programmen bestehen; die Elemente in ◘ Abb. 18.11A stünden demnach für motorische Muster. Gäbe es Assoziationen zwischen Reizrepräsentationen, so lautet das Argument, stünde keine Information über die korrekte Reihenfolge zur Verfügung, denn Assoziationen seien ja bilateral (ein Problem, das James durch das Postulat einseitig gerichteter Assoziationen vermied). Inwiefern und weswegen dieses Problem allerdings auf der motorischen Seite nicht besteht, wurde von Münsterberg nicht behandelt. Allerdings zeigt sein Ansatz, dass Verkettungsmodelle nicht notwendigerweise der Annahme bedürfen, dass Feedback vorangehender Sequenzelemente Einfluss auf die Handlungssteuerung hat. Tatsächlich muss die Weitergabe von Aktivierung zwischen verketteten Elementen einer Sequenz nicht unbedingt auf Eintreffen solchen Feedbacks warten, wie James annahm, sondern könnte nach einer festgelegten Verzögerung, auf der Basis antizipierten Feedbacks (Greenwald 1970; Hoffmann et al. 2001) oder durch Feedback von früheren als den unmittelbar vorangehenden Elementen erfolgen (Rosenbaum 1991). Belege für die Unabhängigkeit der Kontrolle von Handlungssequenzen von sensorischem Feedback sind also weniger kritisch für den Erfolg von Verkettungsmodellen als vielfach angenommen.

Ein weiteres Problem von James' Version des Verkettungsmodells besteht in dessen fehlender Zielgerichtetheit: Einmal angefangen, führt man eine Sequenz zu Ende, ohne eine Repräsentation der Funktion, des eigentlichen Zieles der Handlungssequenz zu besitzen. Hull (1931) begegnete diesem Mangel durch zwei Annahmen (Greenwald 1970). Erstens postulierte er, dass eine Sequenz durchgängig von motivationalen Zuständen (*drives*) begleitet und mit ihnen assoziiert sein kann, sodass diese Zustände in gewisser Weise den Hintergrund der Handlung repräsentieren. Zweitens vermutete er, dass der letzte, zielführende Handlungsschritt schon bei Ausführung früherer Schritte teilweise aktiviert sein könnte (*fractional anticipatory goal response*), sodass Teile seiner sensorischen Effekte (d. h. Repräsentationen von Aspekten des wahrgenommenen Handlungszieles) die Ausführung der Sequenz begleiten und mit ihr assoziiert werden. Mit anderen Worten, Repräsentationen des Grundes, des Zieles und letztlich auch des Ablaufs einer Handlungssequenz könnten deren Ausführung begleiten und zu ihrer Kontrolle beitragen – eine Erwägung, die auch in modernen Modellen eine zentrale Rolle spielt.



◘ **Abb. 18.11** Grundstrukturen der Modelle zur Planung sequenzieller Handlungen. **A** Lineare Verkettung. **B** Parallele Aktivierung und Vorwärtsinhibition. **C** Integration des lokalen Kontexts. **D** Hierarchische Planung. **E** Episodische Bindung von Bewegungselementen an hierarchisch organisierte Syntax

Der Ansatz von Hull (1931) geht davon aus, dass Teile des finalen Elements der Repräsentation einer Handlungskette bereits aktiviert sein können, bevor sie sozusagen „an der Reihe“ sind. Nun legen aber Beobachtungen von Antizipationseffekten (▶ Abschn. 18.3.1) nahe, dass neben dem letzten auch andere Elemente einer Sequenz vor deren Beginn aktiviert sein können. Die Planung der Lautsequenz „wort“ sollte also die Aktivierung der Codes aller vier betroffenen Laute bereits vor Sequenzbeginn umfassen, was der durchaus eleganten Annahme widerspricht, zeitliche Ordnung könne (allein) durch die sequenzielle Weitergabe von Aktivierung hergestellt werden. Auch Effekte der Komplexität einer Sequenz auf ihre Initiierungszeit (▶ Abschn. 18.3.1) sind unvereinbar mit der Annahme, Sequenzelemente würden Schritt für Schritt geplant. Eine mögliche Lösung für dieses Problem ist von Estes (1972) vorgeschlagen worden. Wie in ◘ Abb. 18.11B dargestellt, geht er vom Ineinandergreifen zweier Mechanismen aus: Erstens werden zur Vorbereitung einer Sequenz alle ihre Elemente parallel voraktiviert, was Kontext- und Antizipationseffekte und Vertauschungen erklärt. Zweitens wird jedoch gleichzeitig eine Art Vorwärts-Inhibitionsstruktur angelegt, nach der jedes Element alle ihm nachfolgenden Elemente hemmt. Zunächst führt diese Struktur dazu, dass das erste Element am meisten aktiviert ist und als Erstes zur Ausführung gelangt. Sobald das geschieht, so lautet die Annahme, hemmt es sich selbst, sodass das zweite Element am meisten aktiviert ist und ausgeführt wird usw. Die Überlegungen von Estes (1972)

wurden von Rumelhart und Norman (1982) weitergeführt und in ein recht umfassendes Modell des Schreibmaschineschreibens integriert. Dennoch bleibt eine Reihe von Fragen offen, z. B. wie eine derartige Inhibitionsstruktur erworben und implementiert wird (Rosenbaum 1991; ▶ Kap. 10).

Zusammenfassend lässt sich einerseits schlussfolgern, dass Verkettungsmodelle nicht alle Aspekte der Sequenzplanung hinreichend und korrekt erfassen und daher keine allgemeine Erklärung darstellen können. Andererseits muss das nicht heißen, dass es keine Phänomene gibt, die durch solche Modelle adäquat beschrieben würden. Ein gutes Beispiel wird von Greenwald (1970) erörtert. Nehmen wir an, eine Person lernt ein Gedicht auswendig und wird dann gebeten, die *n*te Zeile zu zitieren. Sehr wahrscheinlich nimmt die Reaktionszeit dafür mit der Größe von *n* (also mit der Position der Zeile im Gedicht) zu, was dafür spricht, dass die Repräsentation eines bestimmten Elements nur durch das mentale Durchgehen der Sequenz aufgefunden werden kann. Auch ist unwahrscheinlich, dass ein Sprecher vor Beginn der Rezitierung von Homers *Ilias* erst sämtliche Strophen intern aktivieren muss oder dazu überhaupt in der Lage ist. Wahrscheinlich ist hingegen, dass Verkettungsmodelle bestimmte Aspekte der Planung relativ langer und hochgeübter Handlungssequenzen recht gut abbilden (▶ Abschn. 18.3.3), auf andere Handlungen hingegen weniger gut anwendbar sind.

Integration von Handlungselementen

Eine der Basisannahmen von Verkettungsmodellen der Sequenzplanung besteht darin, dass die Elemente einer kognitiv repräsentierten Sequenz an sich unabhängig bleiben und nur durch Assoziationen mit anderen, nachfolgenden Elementen verbunden sind. Dies stellt insofern ein Problem dar, als Assoziationen nicht unabhängig von Kontexten existieren können. Wären z. B. die Codes der Laute „o“, „r“ und „t“ nur in der in ◘ Abb. 18.11A dargestellten Weise assoziiert, so wäre es zwar möglich, „ort“ zu sagen, nicht aber „rot“ oder „traube“ – eine offensichtlich unzutreffende Vorhersage. Welche Codes mit welchen anderen Codes in welcher Weise assoziiert sind, kann nicht invariant sein, sondern muss also von der Aufgabe und dem Handlungsziel abhängen.

Einen Beitrag zur Lösung dieses Problems stellt die Überlegung von Hull (1931) dar, Repräsentationen von Motivation und Ziel mit der repräsentierten Handlungssequenz zu verknüpfen, da dies den resultierenden Handlungsplan kontextsensitiv gestaltet. Durch die Einbeziehung von Information über interne und externe situative Bedingungen werden so die Codes von Sequenzen gewissermaßen situativ gefärbt und damit von andersartigen Kombinationen derselben Codes unterscheidbar.

Einen etwas anderen Ansatz mit demselben Ziel verfolgte Schwarz (1933) in seinen Untersuchungen zur lernabhängigen kognitiven Repräsentation von Handlungssequenzen. Er nahm an, dass die Codes einzelner Handlungselemente durch Übung zu funktionalen Einheiten verschmelzen – eine Art Gestaltbildung in der Handlungsplanung. Die Bildung solcher Einheiten lässt sich auch im Alltag leicht beobachten, wenn z. B. beim geübten Autofahrer alle mit demselben Unterziel (z. B. Gang einlegen) ausgeführten Teilbewegungen so flüssig miteinander verbunden werden, dass sie für Handelnde und Beobachter praktisch nicht mehr separierbar sind. Besonders offensichtlich ist diese Einheitsbildung beim Schreiben von Buchstaben: So verlängert die Komplexität der geplanten Bewegung die Planungszeit beim Schreiben von unbekannten, arbiträren Symbolen, nicht aber von bekannten Buchstaben (Hulstijn und van Galen 1988). Dies legt nahe, dass ganze Buchstaben die beim Handschreiben effektive Planungseinheit darstellen und nicht die sie konstituierenden Linien bzw. Teilbewegungen (Teulings et al. 1986).

Auch der Vorschlag von Wickelgren (1969) geht von einer Art Einheitsbildung aus. Seine in ◘ Abb. 18.11C skizzierte Grundidee besteht darin, dass Elemente von Sequenzen nicht kontextunabhängig repräsentiert sind, sondern Informationen über vorauslaufende und nachfolgende Elemente enthalten. Die Lautfolge „wort“ wäre also nicht durch eine Reihe abstrakter Codes, sondern durch jeweils dreiwertige Repräsentationen vertreten {#wo, wor, ort, rt#}, sodass dieselben Laute in anderen Sequenzen separat darstellbar sind, wie etwa in „rot“ {#ro, rot, ot#} und „traube“ {#tr, tra, rau, aub, ube, be#}.

Abschließend lassen sich Integrationsansätze nicht unabhängig von der betreffenden Aufgabe und weiteren theoretischen Annahmen bewerten. Sicher lösen sie nicht alle wesentlichen Probleme der Planung von Handlungssequenzen (Rosenbaum 1991). Denn obwohl kontextspezifische Repräsentationen die separate Codierung verschiedener Kombinationen derselben Sequenzelemente erlauben, können sie nicht erklären, wieso man trotz der Gleichheit der ersten Lautrepräsentation statt „wort“ {#wo, wor, ort, rt#} nicht „wolga“ {#wo, wol, olg, lga, ga#} sagt. Auch bleibt unklar, wie derart episodisch codierte Repräsentationen den Erwerb allgemeiner Lautbildungsregeln ermöglichen. Andererseits bedeuten diese theoretischen Unzulänglichkeiten nicht unbedingt, dass die Idee einer kontextspezifischen, relationalen Codierung an sich falsch wäre. In veränderter Form findet sie sich dann auch in Modellen der hierarchischen Sequenzplanung wieder (s. unten).

Hierarchische Kontrolle

In einer Studie von Rosenbaum et al. (1983) führten ungeübte Versuchspersonen schnelle Folgen von Fingerbewegungen aus, wobei u. a. die für die Initiierung jeder einzelnen Bewegung erforderliche Zeit gemessen wurde. ◘ Abb. 18.12A zeigt die Ergebnisse für die Abfolge linker Mittelfinger → rechter Mittelfinger → linker Mittelfinger → rechter Mittelfinger → linker Zeigefinger → rechter Zeigefinger → linker Zeigefinger → rechter Zeigefinger (M → m → M → m → Z → z → Z → z). Offensichtlich folgen diese Reaktionszeiten einem bestimmten Muster das, wie weitere Ergebnisse zeigten, weniger von den einzelnen Fingerbewegungen abhing als von der Art und Weise, in der sie kombiniert waren. Um dieses Muster zu erklären, griffen die Autoren Überlegungen von Povel und Collard (1982) auf, die vergleichbare Musterbildungen bei der verbalen Produktion von Ziffernfolgen beobachtet hatten. Die von Greeno und Simon (1974) eingeführte Grundidee besteht darin, dass Sequenzen in hierarchisch strukturierte, binäre Entscheidungsbäume übersetzt und durch das (Online-)Auslesen dieser Strukturen kontrolliert werden. Dementsprechend könnte das in ◘ Abb. 18.12A gezeigte Reaktionszeitmuster durch das Durchlaufen des in ◘ Abb. 18.12 skizzierten Entscheidungsbaumes zustande gekommen sein. Eine entsprechende Anwendung dieses Modells auf unser WORT-Beispiel findet sich in ◘ Abb. 18.11D.

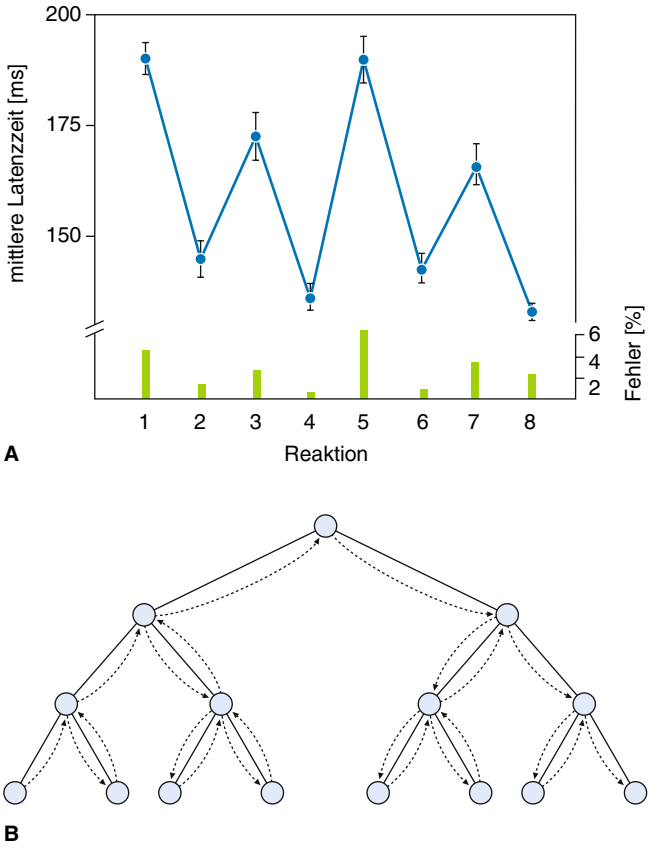


Abb. 18.12 **A** Latenzzeiten für die Initiierung des ersten bis achten Elements einer sequenziellen Handlung aus der Untersuchung von Rosenbaum et al. (1983). **B** Von Rosenbaum et al. vorgeschlagener Planungsstrukturbaum zur Erklärung des Latenzzeitmusters. (Aus Rosenbaum et al. 1983)

Auf den ersten Blick scheint das Konzept der hierarchischen Handlungsplanung nicht wesentlich über die Idee der Integration in Untereinheiten (s. unten) hinauszugehen – auch wenn die situationsspezifische Markierung durch abstrakte „Knoten" in der Regel mehr semantisch als episodisch gedacht wird und auch wenn ohne die Einführung verschiedener Ebenen schwieriger zu erklären wäre, warum z. B. im Experiment von Rosenbaum et al. (1993) der Übergang z → Z schneller realisiert werden kann als m → Z. Allerdings räumt die explizite Unterscheidung von Sequenzelementen und einer ihre Abfolge steuernden syntaktischen Struktur einige sehr interessante Möglichkeiten ein (vgl. auch Dell et al. 1997; MacKay 1987). So fanden z. B. Zießler et al. (1988) fördernde Effekte von Vorinformation über die Struktur einer Handlung – ob sie etwa einen Finger oder Handwechsel an einer bestimmten Sequenzposition erforderte –, auch wenn die Bewegungselemente selbst noch unbekannt waren. Offenbar waren die Probanden also in der Lage, strukturelle Handlungsaspekte unabhängig von ihrem Inhalt vorauszuplanen. Auch Semjen und Gottsdanker (1991) fanden Hinweise darauf, dass Übergänge zwischen kräftigen und weniger kräftigen Fingerbewegungen geplant werden konnten, noch bevor die Richtung der Übergänge (Erhöhung oder Verminderung der Kraft) feststand.

Diese Befunde erlauben die Vermutung, dass sich inhaltliche und syntaktische Eigenschaften einer Handlung unabhängig voneinander planen lassen. Das setzt voraus, dass die Repräsentationen von Sequenzelementen und ihrer Abfolge unabhängig voneinander existieren. Natürlich kann es sein, dass syntaktische Information zum Abruf der Elemente einer Handlung verwendet wird, was vor allem bei sehr langen Sequenzen (z. B. beim Aufsagen der *Ilias*) wahrscheinlich sein dürfte. Aber prinzipiell scheint es möglich, dieselbe Sequenzinformation für die Steuerung von mehr als einer bestimmten Sequenz zu verwenden, was den Erwerb generalisierbarer Regeln erlaubt (z. B. beim Erwerb einer Sprache oder eines Verhaltenscodex). Mit anderen Worten, Repräsentationen der Reihenfolge von Handlungselementen können flexibel an solche Repräsentationen gebunden werden, die diese Elemente spezifizieren (Abb. 18.11E). Ob die mögliche Existenz generalisierender Regeln und syntaktischer Strukturen allerdings die Annahme hierarchischer Repräsentationsformate erzwingt, kann bezweifelt werden. Wie jüngere Simulationsstudien belegen, können hierarchisch beschreibbare Alltagshandlungen, z. B. das Zubereiten einer Tasse Kaffee, auch durchaus von Handlungsprogrammen erzeugt werden, die *heterarchisch* organisiert, d. h. mit einer „flachen" Hierarchie ausgestattet sind (Botvinick und Plaut 2004; Kachergis et al. 2014).

18.3.3 Planung langer und geübter Handlungssequenzen

Die Befunde zur Planung von Handlungssequenzen belegen, dass vor der Initiierung einer Sequenz mehr als nur ihr Anfangsglied geplant werden kann. Je länger eine Handlungssequenz ist, desto unplausibler mutet jedoch die Idee an, wirklich alle Sequenzelemente würden von Beginn an bereitgestellt und in eine Art Arbeitsspeicher geladen. Wenn dem so wäre, und wenn diese Vorbereitung tatsächlich kontinuierlich mit Komplexität und Umfang der geplanten Handlung stiege, so wäre es in endlicher Zeit kaum möglich, den täglichen Weg zur Arbeit oder eine Urlaubsreise anzutreten oder mit dem Spielen einer Symphonie zu beginnen.

Tatsächlich haben bereits Klapp und Wyatt (1976) in einer Übersicht früherer Befunde beobachtet, dass schon bei der Planung kürzerer verbaler Handlungen die Reaktionszeit mit der Anzahl auszusprechender Silben zwar kontinuierlich, aber nicht linear zunimmt, dass also die Zunahme der Planungszeit pro Element bei längeren Sequenzen immer geringer wird. Auch bei Handbewegungssequenzen steigt die Planungszeit nur bis zum zweiten Element (Harrington und Haaland 1987), und Rosenbaum et al. (1987) fanden bei längeren, manuellen Sequenzen sogar eine Reduktion der absoluten Planungszeit mit zunehmender Komplexität. Eine Vielzahl weiterer Beobachtungen gehen in dieselbe Richtung (s. unten), was nahelegt, dass komplexere Handlungen begonnen werden (können), noch bevor ihre Planung vollständig abgeschlossen ist. Die Initiierung setzt den Abschluss der Planung also keineswegs voraus.

Das schließt die Vorausplanung späterer Sequenzelemente keineswegs aus. Vielmehr scheint sich die Planung nur zeitlich zu verschieben und statt vor der Initiierung einer Sequenz während ihrer Ausführung zu geschehen (Online- bzw. kaskadische Programmierung). Verschiedene Faktoren scheinen darüber zu entscheiden, ob bzw. welche Elemente einer Handlungssequenz

vor Bewegungsbeginn geplant werden und wann die Planung einen mehr kaskadenförmigen Verlauf nimmt (s. unten). Zusammengenommen kann angenommen werden, dass die Elemente einer Sequenz umso wahrscheinlicher vollständig vorbereitet werden, je kürzer und ungeübter die Sequenz ist, und je schneller die entsprechenden Bewegungen ausgeführt werden können und sollen. Zeitlich verteilte, mit der Ausführung überlappende Planung herrscht hingegen vor, wenn die Sequenz lang ist und/oder aus langsamen, zeitlich erstreckten Bewegungsabschnitten besteht, und wenn die handelnde Person geübt ist und nicht unter Zeitdruck steht.

▪ Sequenzlänge

Die Tatsache, dass frühere Untersuchungen oft über recht lineare Zunahmen der Initiierungszeit für eine Sequenz mit der Anzahl ihrer Elemente berichten konnten (▶ Abschn. 18.3.1), hängt vermutlich damit zusammen, dass dort in der Regel relativ kurze Tastendruck- oder Sprechsequenzen studiert wurden. Erst die Einbeziehung auch längerer Sequenzen hat deutlich gemacht, dass es Grenzen der Handlungsvorbereitung gibt. Diese Grenzen sind in der Regel sehr eng; die Schätzungen variieren zwischen ein bis zwei Elementen bei geübten, langsamen (z. B. Harrington und Haaland 1987; Teulings et al. 1986) und bis zu sechs bei schnellen Bewegungen (z. B. Monsell 1986). Bei langen Sequenzen findet sich, wenn überhaupt, ein nur sehr geringer Anstieg der Initiierungszeit mit der Anzahl der Elemente (z. B. Garcia-Colera und Semjen 1988), zumindest bei Sequenzen mit mehr als zwei bis drei Elementen (Garcia-Colera und Semjen 1987; Rosenbaum et al. 1987).

Die geringen Effekte der Elementzahl bei längeren Sequenzen könnten zum einen damit zusammenhängen, dass derartige Sequenzen bessere Möglichkeiten zur Organisation der Elemente bieten. Bei der Planung längerer Tastendrucksequenzen beim Schreibmaschineschreiben steigt z. B. die Initiierungszeit nur dann linear mit der Elementzahl, wenn die Elemente willkürlich gruppiert sind, nicht aber, wenn die Abfolge systematische Wiederholungen enthält und so (mutmaßlich) die Bildung von Untereinheiten erlaubt (Kornbrot 1989). Auch die Beobachtung, dass beim Handschreiben die Initiierungszeit mehr von der Kongruenz zwischen den zu schreibenden Buchstaben und nicht zwischen den in ihnen enthaltenen Linien abhängt (Teulings et al. 1983), spricht für eine entscheidende Rolle der Organisation der Planungseinheiten. Es wäre daher möglich, dass der Anstieg der Initiierungszeit pro Element in den Fällen gering ist, in denen mehrere Elemente zu Untereinheiten (*chunks*) zusammengefasst werden, was wiederum den Planungsaufwand (d. h. die Zahl effektiver Elemente) vermindert. Alternativ dazu – oder in Verbindung damit – liegt es nahe, dass die Vorausplanung mit zunehmender Sequenzlänge derart langsam und fehleranfällig wird, dass Handelnde ab einer bestimmten Länge absichtlich von der Vorausplanung absehen und sich, falls vorhanden, eher auf durch Übung erworbene Assoziationen verlassen (s. unten).

▪ Bewegungsdauer

Sehr enge Beziehungen zwischen Initiierungszeit und Sequenzlänge sind vor allem beim Tippen willkürlicher Tastenfolgen und beim Aussprechen willkürlicher Silbenfolgen festgestellt worden (z. B. Klapp und Wyatt 1976; Monsell 1986; Sternberg et al. 1978). In beiden Fällen handelt es sich um sehr schnell ausführbare Handlungen, was zu der Systematizität der Befunde beigetragen zu haben scheint. Jedenfalls sind die Ergebnisse wesentlich weniger systematisch und die Sequenzlängenfunktionen weit weniger linear, wenn es um langsame Bewegungen geht, wie etwa manuelle Zielbewegungen (van Donkelaar und Franks 1991; Harrington und Haaland 1987; Sideaway 1994) oder Handschreiben (Teulings et al. 1986). Auch im Prinzip schnell ausführbare Bewegungsfolgen produzieren kaum nennenswerte Sequenzlängeneffekte, wenn sie nicht unter Zeitdruck ausgeführt werden (s. unten). Daher ist anzunehmen, dass Sequenzen vor allem dann vorausgeplant werden, wenn während der Ausführung eines Elements zu wenig Zeit zur Verfügung steht, um das Folgende zu planen, was bei langsamen Bewegungen nicht der Fall ist.

▪ Übungsgrad

Es gibt eine Reihe von Hinweisen darauf, dass sich die Art und Weise der Handlungsplanung mit zunehmender Übung qualitativ verändert. Zum einen hat sich gezeigt, dass die Planungszeit von Sequenzen mit bekannten, hochgeübten Elementen nicht wesentlich durch die Sequenzlänge bestimmt wird. So findet sich z. B. beim Handschreiben ein deutlicher Längeneffekt für die Planung von sinnlosen Zeichen, nicht aber von Buchstaben (Hulstijn und van Galen 1983; Teulings et al. 1986), und die Kosten für die Reprogrammierung falsch vorbereiteter Buchstabensequenzen sind sehr gering (Stelmach et al. 1984). Zum anderen ließen sich durch Training auch zunächst systematische Längeneffekte bei der Planung arbiträrer Bewegungsfolgen drastisch reduzieren oder eliminieren (Fischman und Lim 1991; Klapp und Wyatt 1976; Verwey 1994).

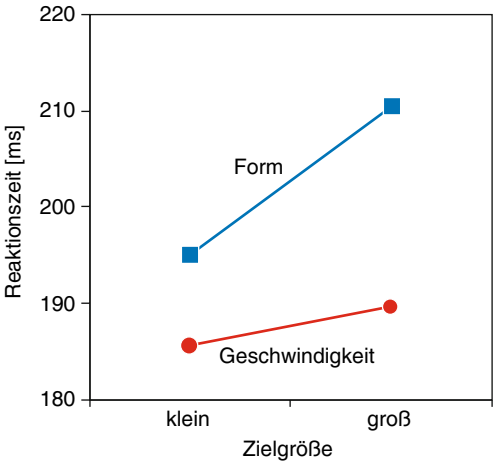
Interessanterweise wirkt sich Training weit weniger auf die Ausführungsdauer des ersten als auf die der folgenden Elemente aus (Portier und van Galen 1992; Portier et al. 1990). Dies lässt auf eine übungsbedingte, zeitliche Verschiebung der Planung der nichtinitialen Elemente schließen: Während bei Übungsbeginn noch alle Elemente vor Bewegungsbeginn geplant werden, trifft dies später unter Umständen nur noch für das erste Element zu; die folgenden Elemente werden hingegen während der Ausführung des ersten Elements geplant (Garcia-Colera und Semjen 1988; Portier et al. 1990). Dies stimmt mit der Beobachtung überein, dass beim Erwerb des Schreibmaschineschreibens die einzelnen Fingerbewegungen durch Training immer mehr zeitlich überlappen (Gentner 1983).

Offenkundig verändert sich die Planung von Sequenzen mit der Übung und scheint sich zeitlich mehr zu verteilen. Wie dies im Detail geschieht, ist allerdings noch weitgehend ungeklärt. Eine naheliegende Frage ist in diesem Zusammenhang, in welchem Sinn eine geübte Handlungssequenz noch programmiert werden muss. Solange eine Sequenz neu und ungewohnt ist, sind eine Reihe von Problemen zu lösen, vor allem welche Elemente (das *Aktivierungsproblem*) in welcher Reihenfolge (das *Sequenzierungsproblem*) zur Ausführung gebracht werden. Sind diese Probleme jedoch einmal gelöst worden, würde es eigentlich reichen, diese Lösung beim nächsten Mal abzurufen, anstatt sie neu zu berechnen. In diesem Sinne haben Rosenbaum et al.

(1992a; Rosenbaum et al. 1995) argumentiert, dass übungsbedingte Veränderungen in der Handlungsplanung durch einen Übergang von der eigentlichen Programmierung einer Handlung zum Abruf eines mehr oder weniger fertigen Programms charakterisiert sind – eine Überlegung, die in ähnlichen Zusammenhängen u. a. auch von Lewin (1922) und Logan (1988) erwogen wurde. Das Resultat könnte in einer Kontrollstruktur bestehen, die sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzt, wie einer direkten (◘ Abb. 18.11A) oder hierarchisch verschachtelten (◘ Abb. 18.11D) Verkettung von Sequenzelementen, die gleichzeitig durch eine gemeinsame episodische Markierung (▶ Abschn. 18.3.2) sozusagen zusammengehalten werden. Mit anderen Worten, es wäre durchaus denkbar, dass die bislang vorgebrachten Mechanismen der Handlungsplanung keine sich ausschließenden Alternativen darstellen, sondern je nach Übungsgrad in unterschiedlicher Weise zusammenwirken, um die Handlungsplanung zu effektivieren.

Strategien

Neben Faktoren der Aufgabe und der Übung hängen die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß der Vorausplanung von Handlungsaspekten auch von den Intentionen der handelnden Person ab. Semjen und Garcia-Colera (1986) fanden z. B. die übliche Zunahme der Initiierungszeit von Fingertippsequenzen mit der Sequenzlänge nur dann, wenn die angestrebte Produktionsrate (d. h. die Ausführungsgeschwindigkeit) sehr hoch, nicht aber, wenn sie niedrig war. Ganz ähnlich bat Sideaway (1994) seine Probanden, bestimmte Zielobjekte mit einem in der Hand gehaltenen Stab zu treffen und dabei entweder eine kontinuierliche, geschmeidige Bewegung zu produzieren oder – in einer anderen Sitzung – die Bewegung möglichst schnell zu initiieren. Die *Forminstruktion* führte zu einem signifikanten Komplexitäts- bzw. Schwierigkeitseffekt, d. h., Bewegungen wurden später initiiert, wenn das zu treffende Objekt kleiner war (◘ Abb. 18.13). Bei der *Geschwindigkeitsinstruktion* war dieser Effekt dagegen nicht zu beobachten, was nahelegt, dass die Probanden das Ausmaß der Vorausplanung intentional kontrollieren konnten. In Übereinstimmung damit beobachteten auch van Donkelaar und Franks (1991) Effekte der Sequenzlänge nur dann, wenn die Probanden gehalten waren, die Bewegungen so schnell wie möglich auszuführen.



◘ **Abb. 18.13** Reaktionszeiten für Bewegungen zu großen und kleinen Zielobjekten in der Studie von Sideaway (1994). Unter der Instruktion, eine möglichst geschmeidige Bewegung auszuführen, hängt die Reaktionszeit von der Zielgröße ab. Unter der Instruktion, möglichst schnell zu reagieren, tritt dieser Effekt nicht auf

18.4 Planung und Koordination multipler Handlungen

Die bisherigen Abschnitte befassten sich allesamt mit Handlungen, die unter – in gewisser Hinsicht – idealen Bedingungen ausgeführt werden konnten, d. h. unter übersichtlich gestalteten Reizbedingungen, zum Teil nach ausgiebiger Vorbereitung und vor allem ohne Konkurrenz durch andere Aktivitäten. Derart ideale Bedingungen erlauben zwar die systematische Analyse auch subtiler psychologischer Prozesse, aber sie entsprechen kaum den alltäglichen Bedingungen, unter denen Handelnde agieren. So werden Handlungen im Alltag selten isoliert ausgeführt, sondern sie überlappen mit anderen Tätigkeiten: Wir denken, während wir gehen, reden, während wir Auto fahren, telefonieren, während wir fernsehen, und vieles mehr. Damit stellt sich die Frage, ob bzw. inwiefern sich zeitlich überlappende Handlungen gegenseitig beeinträchtigen (z. B. mobil telefonieren während des Autofahrens) und wie solche Handlungskonglomerate gesteuert und koordiniert werden.

Zunächst einmal müssen wir fragen, ob Menschen überhaupt in der Lage sind, mehr als eine Handlung zur gleichen Zeit auszuführen. Diese Frage wirft eine Reihe weiterer, konzeptueller Fragen auf, vor allem was als *eine* Handlung und was als *gleichzeitig* zählt. Nehmen wir als Beispiel eine Person, die redet, während sie geht. Wenn man auch akzeptieren kann, dass sowohl Reden als auch Gehen intentionale Handlungen darstellen, so ist doch nicht selbstverständlich, dass die Kombination beider Handlungen als Zweifachhandlung zu gelten hat und nicht etwa als eine integrierte, wenn auch komplexe Handlung. Völlig auflösen lässt sich dieses Problem nur empirisch, nicht konzeptuell, denn prinzipiell ist ja beides möglich. In psychologischen Untersuchungen werden derartige Interpretationsprobleme in der Regel dahingehend vermieden, dass arbiträre, oft wechselnde Kombinationen einzelner Handlungen verwendet werden.

Das zweite allgemeine Problem – die Frage der Gleichzeitigkeit – ist noch schwieriger zu lösen. Auf einer abstrakten, grobkörnigen Analyseebene ist offensichtlich, dass Menschen in dem Sinne mehrere Dinge zugleich tun können, als eine zweite Handlung begonnen werden kann, noch bevor eine gerade andauernde beendet wird. Allerdings wäre es möglich, dass diese scheinbare Gleichzeitigkeit durch sehr schnelle Wechsel zwischen den Aufgaben nur auf der Performanzebene erreicht und in gewissem Sinne nur vorgetäuscht wird. Ein Beispiel dafür sind seriell arbeitende Computer, die das parallele Ablaufen von Anwendungen durch sehr schnelle Wechsel zwischen ihnen vorgaukeln. Wenn dieses Beispiel auch auf die Koordination menschlicher Handlungen zuträfe, sollte die gleichzeitige Ausführung messbare Kosten verursachen, die Leistung sollte also schlechter als bei separater Ausführung sein.

Tatsächlich lassen sich eine ganze Reihe von Leistungsverschlechterungen unter Mehrfachaufgabenbedingungen nach-

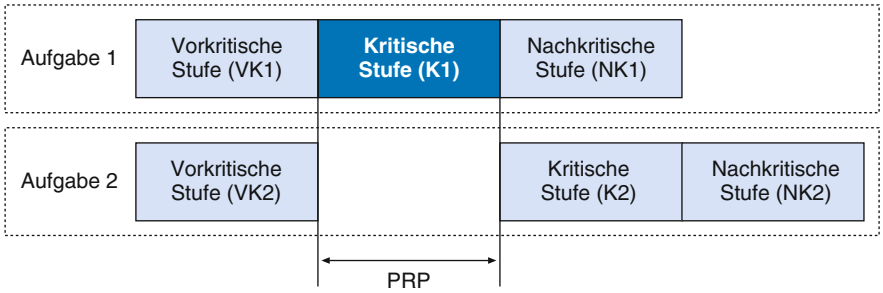


Abb. 18.14 Die Logik der Locus-of-Slack-Methode. Die Verarbeitungsstufen werden aufgeteilt in (prinzipiell beliebig viele) vorkritische Stufen – die dem hypothetischen Verarbeitungsengpass vorangehen –, kritische Stufen – die den Verarbeitungsengpass repräsentieren – und nachkritische Stufen – die dem Verarbeitungsengpass folgen. Parallele Verarbeitung ist mit Ausnahme der kritischen Stufen für alle Stufen möglich; bei Überlappung muss die zweite kritische Stufe auf den Abschluss der ersten warten. *PRP* = Psychologische Refraktärperiode

weisen. Wie bereits in ▶ Kap. 5 dargestellt, ist es schwer bis unmöglich, mehr als einen Ort gleichzeitig zu beachten bzw. mehr als einen Reiz zu einer Zeit für die weitere Verarbeitung auszuwählen. Mehrfachaufgaben beeinträchtigen aber auch die Selektion und Kontrolle motorischer Aktivitäten, um die es im vorliegenden Kapitel gehen soll. Dabei lassen sich *unspezifische* und *spezifische* Effekte unterscheiden.

18.4.1 Untersuchungsmethoden

Mehrfachhandlungen sind aus den unterschiedlichsten Gründen eingesetzt und untersucht worden –sowohl als *Untersuchungsgegenstand* als auch als *Untersuchungsmittel* (▶ Kap. 5). Im Zusammenhang mit motorischen Handlungen werden in der Regel zwei verschiedene Methoden angewandt. Bei der einen Methode führen Probanden eine bestimmte Aufgabe einmal in Isolation und einmal in Kombination mit einer anderen Aufgabe aus. Die Fragen können dann lauten, ob die Leistung in der kritischen Aufgabe gleich bleibt oder sich in der Kombinationsbedingung verschlechtert, ob dies vom Übungsgrad abhängt, ob die Art der Zweitaufgabe eine Rolle spielt oder ob die Beziehung zwischen beiden Aufgaben von Belang ist. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass mit dem Kontrast von Einzel- und Doppelbedingung eine Reihe von Variablen konfundiert sind. Denn im Vergleich zur Einzelbedingung müssen Probanden in Doppelbedingungen mehr instruktionsbezogene Information im Gedächtnis behalten, sich auf die Wahrnehmung von mehr Reizen und die Ausführung von mehr Reaktionen vorbereiten, und sie könnten sich z. B. mehr motiviert oder stärker überfordert fühlen, sodass eventuelle Leistungsdefizite schwer zu interpretieren sind. Allerdings bleibt die Möglichkeit, die Auswirkungen der Art verschiedener Zweitaufgaben auf die erste zu ermitteln.

Bei der anderen Methode werden in jedem Durchgang zwei Aufgaben bearbeitet, deren zeitliche Überlappung jedoch variiert. In der Regel werden die zwei erforderlichen Reaktionen (R1 und R2) durch zwei verschiedene Reize signalisiert (S1 und S2), wobei das Intervall zwischen der Darbietung von S1 und S2 (SOA, *stimulus onset asynchrony*) systematisch manipuliert wird. Wenn die SOA kurz ist, S1 und S2 also dicht hintereinander erscheinen, überlappen beide Aufgaben sehr stark und bilden so eine echte Doppelaufgabensituation. Wenn die SOA hingegen lang ist, sodass S2 unter Umständen sogar erst nach Ausführung von R1 erscheint, handelt es sich hingegen eher um eine Einzelaufgabensituation – wobei Gedächtnisbelastung, Motivation und Emotion aber konstant gehalten und daher nicht konfundiert sind! Die zentrale Frage lautet demnach, ob die Leistung in den Aufgaben, vor allem die in Aufgabe 2, von der zeitlichen Überlappung, also der SOA abhängt. Wenn dem so ist, so wird seit Telford (1931) häufig von einer **Psychologischen Refraktärperiode** (PRP) gesprochen.

Der Begriff der PRP drückt die Idee aus, das kognitive System wiese eine Art Flaschenhals auf, einen strukturellen **Engpass**, der zu einem Zeitpunkt nur die zu einer Aufgabe gehörigen Prozesse zulässt. Um diesen Engpass genauer im Verarbeitungsablauf lokalisieren zu können, wird häufig die Locus-of-Slack-(LOS-)Logik angewandt (Pashler und Johnston 1989; Schweickert 1978), einer speziellen Weiterentwicklung von Sternbergs (1969) additiver Faktorenmethode. Die Grundüberlegung ist in Abb. 18.14 skizziert. Für die Bearbeitung jeder Aufgabe sind eine Reihe von Verarbeitungsstufen erforderlich, die sich entweder vor dem Engpass (vorkritische Stufe/n VK1 und VK2) oder nach dem Engpass (nachkritische Stufe/n NK1 und NK2) befinden oder aber diesen Engpass darstellen (kritische Stufe/n K1 und K2). Während des Ablaufs von vor- oder nachkritischen Stufen einer Aufgabe können beliebige Stufen der anderen Aufgabe durchlaufen werden, nur die kritischen Stufen schließen sich gegenseitig aus, können also nicht gleichzeitig ablaufen. Wenn daher Aufgabe 1 K1 erreicht, kann K2 nicht ablaufen, d. h., es gibt eine Verzögerung, deren Dauer von K1 abhängt: die PRP.

Um nun den Typ und die Funktion von kritischen Stufen näher zu bestimmen, schlägt die LOS-Methode vor, die Dauer aller möglichen, hypothetischen Stufen systematisch zu variieren, und hält für die Ergebnisse recht diagnostische Vorhersagen bereit (Pashler 1994a; Pashler und Johnston 1989). Die ersten beiden der vier interessantesten Vorhersagen betreffen Manipulationen von Aufgabe 1:

1. Die Verlängerung sollte sowohl von VK1 als auch von K1 beide Aufgaben in gleichem Maße verzögern, denn damit werden Beginn und Ende von sowohl K1 als auch K2 gleichermaßen hinausgeschoben.
2. Die Verlängerung sollte sich von NK1 nur auf Aufgabe 1, nicht aber auf Aufgabe 2 auswirken, denn der Beginn von K2 hängt vom Ende von K1, nicht vom Ende von NK1 ab.

Zwei weitere Vorhersagen betreffen Aufgabe 2:

3. Die Verlängerung von VK2 sollte sich umso weniger auf Aufgabe 2 auswirken, je stärker die beiden Aufgaben überlappen. Wenn Aufgabe 2 ohnehin warten muss, bis K1 erledigt ist, sollte es keine Rolle spielen, ob Aufgabe 2 sozusagen völlig untätig ist oder noch an VK2 arbeitet; die Verlängerung von

VK2 kann also durch effektivere Nutzung der durch K1 verursachten Totzeit zum Teil oder völlig kompensiert werden.

4. Verlängerungen von K2 und NK2 sollten schließlich zu einer Verzögerung von Aufgabe 2, nicht aber von Aufgabe 1 führen, denn Beginn und Ablauf von NK1 sollen ja vom Ablauf anderer Stufen unabhängig sein.

Diese LOS-Methode hat vielfach zur Untersuchung von PRP-Effekten Verwendung gefunden, und die vorliegenden Ergebnisse ergeben tatsächlich ein relativ eindeutiges Bild, das sowohl der Auswahl von Reaktionen als auch ihrer Initiierung einen ausgeprägten Engpasscharakter zuweist. Aber auch die Selektion, Encodierung und der Abruf von Information können zu einem Engpass führen. Andere Verarbeitungsstufen hingegen können zwar durchaus auch wechselseitig interferieren, aber sie blockieren sich nicht vollständig.

Sowohl die PRP-Aufgabe mit SOA-Variation als auch die klassische Methode des Einzel- versus Doppelaufgabenvergleichs werden in vielen Bereichen der Kognitionspsychologie eingesetzt, um z. B. den Aufmerksamkeitsbedarf von Reizverarbeitungsprozessen (▶ Kap. 5) oder beim Erwerb sequenzieller Strukturen (▶ Kap. 10) zu ermitteln, um Komponenten des Arbeitsgedächtnisses inhaltlich zu charakterisieren (▶ Kap. 12) und Interaktionen zwischen Wahrnehmung und Handlungsplanung zu diagnostizieren (▶ Kap. 22). Das Ziel dieses Kapitels besteht keineswegs darin, einen vollständigen oder auch nur repräsentativen Überblick über diese Literatur zu geben, sondern es konzentriert sich auf die spezifischen Kontrollprobleme, die bei der überlappenden Steuerung mehrerer Handlungen entstehen.

18.4.2 Aufgabenkoordination

Wenn mehr als eine Handlung zu einer Zeit ausgeführt wird, können eine ganze Reihe von recht spezifischen Interaktionen und Interferenzen zwischen den für die jeweiligen Handlungen zuständigen Prozesse entstehen, die in den folgenden Abschnitten angerissen werden. Darüber hinaus entstehen jedoch auch allgemeinere Anforderungen an die Handlungskontrolle, denn die betreffenden Handlungen wollen vorbereitet, koordiniert und ihrer Relevanz entsprechend gewichtet sein.

Ausgiebig untersucht worden ist die Frage, ob bzw. wie flexibel Handelnde ihre mentalen Ressourcen auf überlappende Handlungen verteilen können. Dabei werden Probanden gebeten, zwei Aufgaben auszuführen, und instruiert oder dafür belohnt, ihre Aufmerksamkeit in einem Verhältnis auf die beiden Aufgaben zu verteilen (z. B. 70:30, 50:50 oder 30:70). Derartige Manipulationen sind tatsächlich recht effektiv, d. h., die in den beiden Aufgaben ermittelte, relative Performanz spiegelt die jeweilige Instruktion oder Belohnungsstruktur gut wider (Übersicht bei Gopher und Sanders 1984; Wickens 1984). Dies ist dahingehend interpretiert worden, dass Menschen mentale Ressourcen strategisch allozieren. Einige Autoren gingen dabei von einer zum Teil variablen Menge mentaler Energie aus, die flexibel für verschiedenste kognitive Aktivitäten eingesetzt werden kann (Kahneman 1973; Navon und Gopher 1979). Spätere, weitergehende Ansätze haben verschiedene Arten von Ressourcen unterschieden, z. B. Aktivierung und Arousal (Sanders 1983), bzw. Klassifikationssysteme für Ressourcen vorgeschlagen, z. B. hinsichtlich der Reizmodalität (auditiv oder visuell), der internen Codierung (visuell oder verbal) und der Reaktionsmodalität (manuell oder verbal) (Wickens 1980; 1984). Vor allem der Ansatz von Wickens leistet gute Dienste, um die Schwierigkeit alltäglicher Aufgabenkombinationen abzuschätzen und mögliche Probleme am Arbeitsplatz vorherzusehen (z. B. Sarno und Wickens 1995; Wickens und Liu 1988).

Zum Verständnis der bei Mehrfachaufgaben eingesetzten Kontrollmechanismen haben Ressourcenmodelle allerdings kaum etwas beigetragen (Neumann 1987; Pashler 1994a; 1994b). In der Regel sind die vorgeschlagenen prozessspezifischen Annahmen zu vage, um konkrete Vorhersagen für experimentelle Analyse zu generieren. So bleibt offen, welche Prozesse von Manipulationen der Aufgabenwichtigkeit betroffen sind und wie ihre Effektivität durch die Erhöhung mentaler Energie gesteigert werden kann.

Eine interessante Beobachtung in Bezug auf die Kontrolle von Mehrfachaufgaben ist die, dass die Leistung für die jeweils priorisierte Aufgabe unter Doppelaufgabenbedingungen oft nur unwesentlich schlechter ist als unter Einzelaufgabenbedingungen (z. B. Fagot und Pashler 1992; Holender 1980). Zudem interagieren Effekte der Aufgabenkomplexität, d. h. des mutmaßlichen Kontrollaufwands, nicht mit der Belastung des Arbeitsgedächtnisses (Logan 1978; 1980). Diese Beobachtungen legen nahe, dass die Kontrolle von Mehrfachhandlungen entweder keine zusätzlichen kognitiven Kosten verursacht oder bereits vor Erscheinen des ersten Reizes erledigt wird. So wäre denkbar, dass bereits bei der Vorbereitung auf eine oder mehrere Aufgaben die Repräsentationen der möglichen Reize mit ihren entsprechenden Handlungsplänen assoziiert werden, sodass bei Erscheinen des Reizes die korrekte Handlung direkt und automatisch aufgerufen wird (Hommel 1998a; 2000a; 2000b; Logan 1980; 1988) – ähnlich wie bei Aufgaben zum prospektiven Gedächtnis zu beobachten (▶ Kap. 9). Die eigentliche Koordination verschiedener Aufgaben könnte damit durch die Implementation eines Aufgabensets vorweggenommen werden und müsste die tatsächliche Ausführung nicht mehr belasten. Für diese Annahme spricht die Beobachtung von paralleler, automatischer Reiz-Reaktions-Übersetzung in Doppelaufgaben.

18.4.3 Reizverarbeitung und Gedächtnis

Die meisten Handlungen beziehen sich in irgendeiner Weise auf Reizereignisse, sei es zu ihrer Initiierung, zur Kontrolle und Anpassung ihres Ablaufs oder zur Bewertung ihrer Ergebnisse. Demzufolge müssen bei der Ausführung von mehr als einer Handlung auch mehr Reizereignisse verarbeitet werden, z. B. die Verkehrssituation und die Reaktionen des Kommunikationspartners beim Auto fahrenden Handybenutzer. Dies kann in vielen Fällen die Leistung verschlechtern. So ist aus Untersuchungen zur Aufmerksamkeit bekannt, dass z. B. die Anwesenheit irrelevanter visueller Reize (Distraktoren) die Entdeckung und Identifikation eines gesuchten Reizes erheblich verzögert (z. B. Eriksen und Eriksen 1974; Treisman und Gelade 1980; Wolfe et al. 1989; Yantis 2000; ▶ Kap. 5).

Distraktoren lenken nicht nur die Aufmerksamkeit ab, sondern können unter bestimmten Umständen mit ihnen assoziierte Handlungen aktivieren, die mit der eigentlich auszuführenden Handlung konfligieren (Coles et al. 1985; Eriksen et al. 1985; St. James 1990). Dies lässt Wechselwirkungen zwischen Aufgaben insbesondere unter Umständen erwarten, in denen die zu einer Handlung gehörigen Reize Signalcharakter für andere, zeitgleich auszuführende Handlungen haben. Dieses Muster ist tatsächlich beobachtet worden. In der Studie von Navon und Miller (1987) suchten Versuchspersonen z. B. in diagonal präsentierten Wortpaaren sowohl nach Vornamen als auch (in der jeweils anderen Diagonale) nach Städtenamen. Wenn Distraktoren in der einen Aufgabe Zielreizen für die andere Aufgabe entsprachen oder semantisch ähnlich waren (also z. B. ein Städtename in der Vornamen-Diagonalen), waren die Reaktionszeiten verzögert. In einer Untersuchung von Hirst und Kalmar (1987) hörten Probanden gleichzeitig je zwei Sequenzen gesprochener Wörter, Buchstaben oder Zahlen, die hinsichtlich bestimmter Kriterien zu überprüfen waren. Die Darbietung erfolgte über einen Kopfhörer, sodass die beiden Ohren verschiedene Sequenzen hörten. Die Leistung war am schlechtesten, wenn das Material in beiden Sequenzen dasselbe war, d. h., wenn die Reize des einen Lautstromes auch zur jeweils „gegenüberliegenden" Aufgabe passten. Ähnliche Interaktionen zeigten sich auch in den Untersuchungen von Eriksen et al. (1986) und von Dutta et al. (1995).

Neben einer Mehr- und unter Umständen Überbelastung der Aufmerksamkeit können sich Mehrfachaufgaben auch auf die weitere Reizverarbeitung auswirken. Jolicœur und Dell'Aqua (1998) baten z. B. Versuchspersonen in Aufgabe 1, kurzzeitig dargebotene Buchstaben zu registrieren und später ohne Zeitdruck zu berichten, und in Aufgabe 2, eine binäre Wahlreaktion auf Töne auszuführen. Abb. 18.15 zeigt die Ergebnisse in der sekundären Reaktionszeitaufgabe in Abhängigkeit von der SOA (dem Buchstaben-Ton-Intervall) und der Anzahl dargebotener Buchstaben sowie die Ergebnisse einer Kontrollbedingung, in der Aufgabe 1 nicht ausgeführt wurde („ignorieren"). Es ist leicht zu sehen, dass die Reaktionszeiten umso mehr anstiegen, je stärker die beiden Aufgaben zeitlich überlappten, und je mehr Buchstaben zu berichten waren. Der LOS-Logik zufolge sind also bereits das Registrieren und kurzzeitige Behalten sehr einfacher Reize mit einem Verarbeitungsengpass (kritische Stufe) verbunden, der die parallele Auswahl der zur Zweitaufgabe gehörigen Reaktion verhindert. Jolicœur et al. (2002) haben eine Reihe weiterer Experimente durchgeführt, die diese Schlussfolgerung bestätigen. So leidet z. B. die Leistung beim Bericht dargebotener Buchstaben in der Zweitaufgabe unter einer gleichzeitig erforderlichen Reaktionsauswahl in der Erstaufgabe (Jolicœur et al. 2000).

Neben der Einspeicherung von Information in das Kurzzeitgedächtnis scheint auch der Abruf von Information einen effektiven Verarbeitungsengpass darzustellen. Jolicœur (1999) kombinierte z. B. eine Wahlreaktionsaufgabe (Tastendruck auf einen Ton) mit einer Gedächtnissuchaufgabe, in der Probanden beurteilten, ob ein dargebotener Reiz in einem vor dem Durchgang gezeigten, memorierten Reizset enthalten ist oder nicht. Ein typisches Ergebnis derartiger Aufgaben besteht darin, dass die Reaktionszeit mit zunehmender Größe des Reizsets ansteigt (Setgrößeneffekt). Wenn die Tonaufgabe als Erst- und die Gedächtnissuchaufgabe als Zweitaufgabe ausgeführt wurden, war das Ausmaß des Setgrößeneffekts unabhängig von der SOA. Nach der LOS-Logik (Vorhersage 3; s. oben) bedeutet dies, dass die Gedächtnissuche eine kritische Stufe darstellt, die nicht vor der Reaktionsselektion in Aufgabe 1 beginnen kann. Entsprechend war bei einem Tausch der Aufgaben die Wahlreaktion umso stärker verzögert, je größer das Gedächtnisset in Aufgabe 1 war (Vorhersage 1; s. oben).

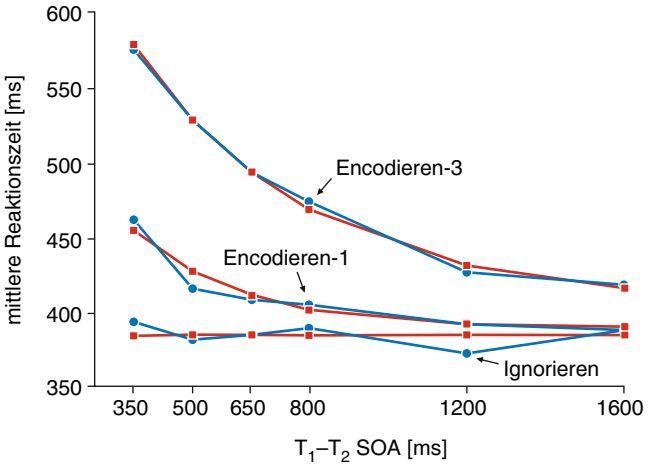


Abb. 18.15 Reaktionszeiten für Aufgabe 2 aus der Untersuchung von Jolicœur und Dell'Aqua (1998) als Funktion der zeitlichen Überlappung mit Aufgabe 1 (SOA) und der Art der Aufgabe 1. Wenn der zuerst dargebotene Reiz nicht behalten werden muss („ignorieren"), ist die Leistung in der Zweitaufgabe nicht von der SOA und der Anzahl der dargebotenen Buchstaben abhängig. Muss er jedoch behalten werden („encodieren"), steigt die Reaktionszeit mit dem Ausmaß der Überlappung und der Anzahl der zu behaltenden Buchstaben an. (Aus Jolicœur et al. 2000)

Nicht nur der Abruf von Information aus dem Kurzzeitgedächtnis stellt einen Engpass dar, auch der Abruf aus dem Langzeitgedächtnis. Carrier und Pashler (1995) ließen z. B. Probanden Wortpaare lernen und unterzogen sie dann einer **Doppelaufgabe**. Die erste Aufgabe erforderte wieder eine Wahlreaktion auf einen Ton, in der zweiten wurde jeweils ein Wortpaarling dargeboten, und die Probanden sollten das assoziierte Wort produzieren. Die Schwierigkeit des Gedächtnisabrufs wurde dadurch variiert, dass manche Wortpaare zuvor besser gelernt (d. h. öfter wiederholt) wurden als andere. Falls der Gedächtnisabruf eine un- bzw. vorkritische Verarbeitungsstufe darstellt, sollte sich die Schwierigkeit bei starker zeitlicher Überlappung der Aufgaben weniger deutlich zeigen, entsprechend der Vorhersage 3 der LOS-Methode. Dies war aber nicht der Fall, d. h., der Schwierigkeitseffekt war bei kurzer SOA so groß wie bei langer. Auch der Abruf von Information aus dem Langzeitgedächtnis repräsentiert also einen Verarbeitungsengpass. Allerdings scheint der Abruf von Reizinformation nur den gleichzeitigen Zugriff auf reaktions- oder reizbezogene Information einer anderen Kategorie zu verwehren, während auf Informationen derselben Kategorie gleichzeitig zugegriffen werden kann (Logan und Schulkind 2000; Rohrer et al. 1998).

Gedächtniseinspeicherung oder -abruf stellen also zumindest in einigen Fällen einen hartnäckigen Verarbeitungsengpass bei der parallelen Aufgabenbewältigung dar. Wie im folgenden Abschnitt erörtert, gilt dies allerdings nicht für jede Art von Abruf;

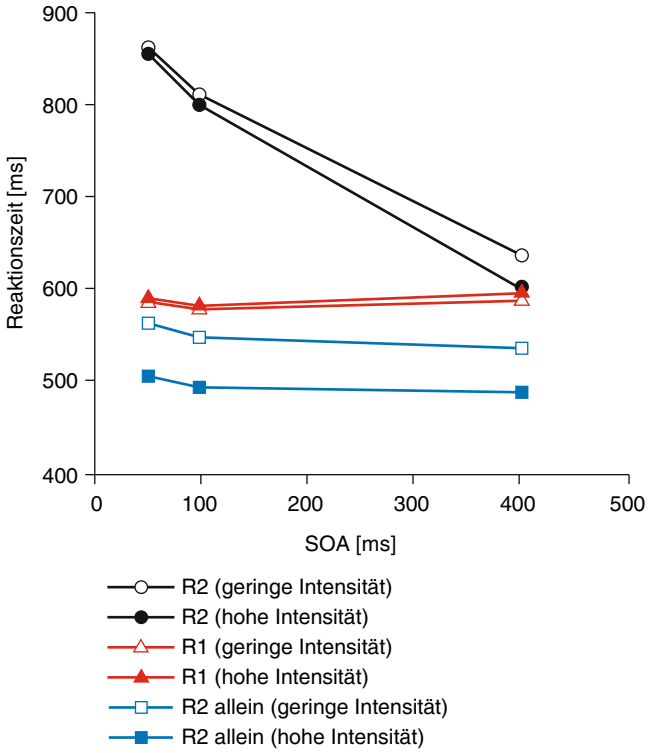
Reiz-Reaktions-Regeln können z. B. durchaus parallel abgerufen werden. Eine mögliche Erklärung dieser Widersprüche ist von Jolicœur et al. (2002) vorgeschlagen worden. So ist denkbar, dass impliziter (d. h. nicht bewusst bzw. intentional gesteuerter) Zugang zu und Gebrauch von Gedächtnisinhalten parallel erfolgen kann und keinen Engpass darstellt, während expliziter Zugriff sehr wohl die Kriterien eines Engpasses erfüllt.

18.4.4 Reiz-Reaktions-Übersetzung und Reaktionsauswahl

Schon zu Beginn der systematischen Untersuchungen zu Mehrfachhandlungen wurde vermutet, dass die Auswahl von Reaktionen einen strukturellen Engpass (*bottleneck*) darstellt, und seit Welford (1952) dominieren Response-Selection-Bottleneck-(RSB-)Modelle die PRP-Forschung (McCann und Johnston 1992; Pashler 1994a; 1998; Pashler und Johnston 1989). Zu einem gewissen Teil resultiert dies sicher aus einem Mangel an Alternativen, denn Hinweise auf reiz- und gedächtnisbezogene Effekte (▶ Abschn. 18.4.3) haben sich erst kürzlich ergeben. Darüber hinaus sind die Indizien für Engpässe bei der Initiierung von Reaktionen (▶ Abschn. 18.4.5) noch zu schwach, um damit alle vorhandenen PRP-Effekte zu erklären. Aber auch positive Unterstützung (vor allem im Sinne der LOS-Methode) hat das RSB-Modell erhalten.

Entsprechend der ersten Vorhersage des LOS-Ansatzes verlängern Manipulationen, die sich auf die Reaktionsauswahl in Aufgabe 1 auswirken, die Reaktionszeiten sowohl in Aufgabe 1 als auch in Aufgabe 2; ein Beispiel ist die Erhöhung der Zahl der Reaktionsalternativen (Karlin und Kerstenbaum 1968; Smith 1969). Entsprechend der Vorhersage 2 verlängern Manipulationen, die sich auf Stufen nach der Reaktionsauswahl in Aufgabe 1 auswirken, Aufgabe 2 nur unwesentlich; ein Beispiel ist die Erhöhung der Komplexität der in Aufgabe 1 geforderten Bewegung (Pashler und Christian 1996). Entsprechend der Vorhersage 3 verringern sich die Effekte von Manipulationen perzeptueller Prozesse in Aufgabe 2 bei kleiner SOA; ein Beispiel ist die Verringerung der Reizintensität (Pashler und Johnston 1989; ◘ Abb. 18.16). Entsprechend der Vorhersage 4 schließlich hat Erschwerung der Reaktionsauswahl in Aufgabe 2 keine Auswirkungen auf Aufgabe 1; ein Beispiel ist die Verringerung der Reiz-Reaktions-Kompatibilität (McCann und Johnston 1992).

Zusammengenommen spricht also einiges für die Annahme eines Verarbeitungsengpasses bezüglich der Auswahl von Reaktionen. Uneinigkeit bzw. Unklarheit gibt es jedoch hinsichtlich der Fragen, wie der Engpass funktionell zu beschreiben und ob er struktureller oder strategischer Natur ist. Die erste Frage hat mit einer terminologischen, zum Teil aber auch konzeptuellen Schwäche bisheriger RSB-Modelle zu tun. Schon bei der Darstellung solcher Modelle fällt auf, dass die Begriffe der **Reiz-Reaktions-Übersetzung** (*stimulus-response translation*) und Reaktionsauswahl (*response selection*) synonym gebraucht werden. Dahinter steht die in Stufenmodellen der Informationsverarbeitung verbreitete, in der Regel aber nicht explizierte Idee, dass eine Reaktion ausgewählt wird, indem Reizinformation nach einer bestimmten Regel in die entsprechende Reaktion übersetzt wird.



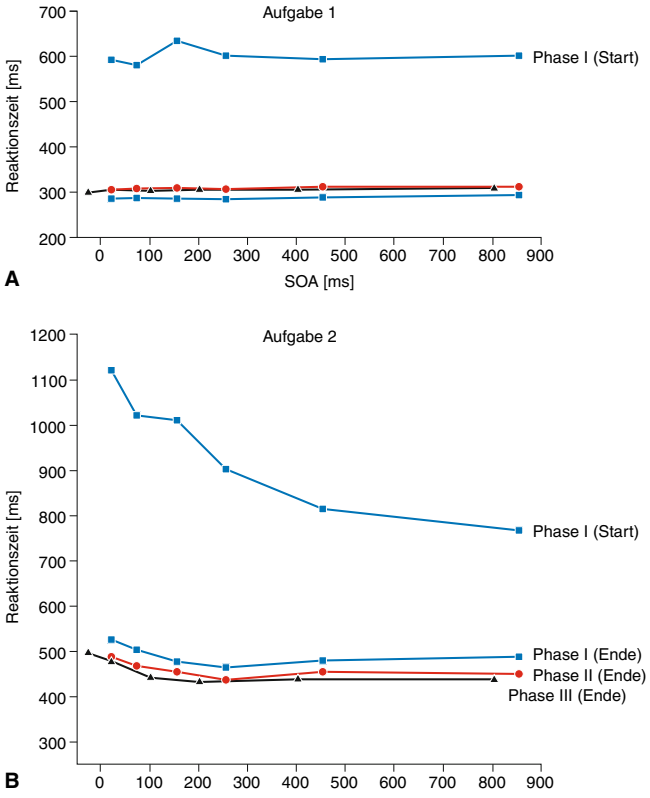
◘ **Abb. 18.16** Reaktionszeiten für die erste (R1) und zweite (R2) Reaktion eines Doppelaufgabenexperiments von Pashler und Johnston (1989), in Abhängigkeit von der zeitlichen Aufgabenüberlappung (SOA) und der Intensität (hoch, gering) des auditiven Reizes in der zweiten Aufgabe. Ebenfalls gezeigt sind die Ergebnisse für die in Isolation ausgeführte Zweitaufgabe („allein"). Das Ergebnismuster ist insofern typisch als (1) die Doppelaufgabensituation an sich die Reaktionszeit in der Zweitaufgabe unabhängig von der zeitlichen Überlappung erhöht (R2 > R2 allein); (2) die Leistung in der Zweitaufgabe systematisch mit zunehmender zeitlichen Überlappung abnimmt (SOA-Effekt auf R2); (3) die Leistung in der Erstaufgabe nicht von zeitlichen Überlappung abhängt (kein SOA-Effekt auf R1); und (4) der Effekt der Reizschwierigkeit mit zunehmender zeitlichen Überlappung abnimmt (unteradditiver Interaktion: Hoch-gering-Effekt umso kleiner, je größer die SOA)

Der PRP-Effekt ginge also auf die Unfähigkeit zurück, zwei Reize gleichzeitig in die entsprechenden Reaktionen zu übersetzen. Ein derartiger Engpass lässt sich jedoch aufgrund einiger, jüngerer Beobachtungen ausschließen. So fand Hommel (1998a), dass die erste von zwei Aufgaben schneller ausgeführt werden kann, wenn die zweite Reaktion mit dem Reiz oder der Reaktion der ersten Aufgabe kompatibel ist. Zum Beispiel wurde ein linker Tastendruck in der ersten Aufgabe schneller ausgeführt, wenn die zweite Aufgabe die verbale Reaktion „links" statt „rechts" forderte. Auch Logan und Schulkind (2000) berichten, dass die Reaktion der ersten Aufgabe schneller erfolgt, wenn sie mit der zweiten übereinstimmt. Diese Ergebnisse belegen, dass der für die zweite Reaktion relevante Reiz in die entsprechende zweite Reaktion übersetzt wird, noch bevor die Auswahl der ersten Reaktion abgeschlossen ist. Die Reiz-Reaktions-Übersetzung kann also keinen wirklichen und sicher keinen strukturellen Engpass darstellen. Dafür spricht auch die Beobachtung, dass das Ausmaß der Interaktion zwischen den Reaktionen der beiden Aufgaben vom Aufgabenkontext abhängt (Fischer und Hommel 2012), was auf einen Einschluss der Aufgabenstrategie schließen lässt (s. unten). Allerdings ist es dennoch möglich, dass die eigentliche

Reaktionsauswahl zu einem Engpass wird. Wenn nämlich die für mehrere Handlungen relevanten Reize tatsächlich parallel übersetzt werden und entsprechende Handlungsinformation aktivieren, dann könnte eine Art Zuordnungsproblem entstehen, dessen Lösung – die Integration von zusammengehörigen Handlungsmerkmalen (▶ Abschn. 18.2.6) – zeitaufwendig ist. Die Auswahl einer Handlung bestünde demnach aus zwei Phasen: der Übersetzung von Reizinformation in Codes von Reaktionsmerkmalen und der Integration dieser Merkmale in einen kohärenten Handlungsplan (Stoet und Hommel 1999), und nur die zweite Phase wäre ein wirklicher Engpass (Hommel 1998a; Netick und Klapp 1994).

Die zweite Frage, über die noch Uneinigkeit besteht, betrifft die Hartnäckigkeit des RSB-Modells. Während der klassische RSB-Ansatz von einem strukturellen, also unveränderbaren Engpass ausgeht (z. B. Welford 1952; Pashler und Johnston 1989; Pashler 1998), vertreten Meyer und Kollegen (Meyer und Kieras 1997a; 1997b; Meyer et al. 1995) die Auffassung, es handele sich um einen nur strategischen, also intentional implementierten, prinzipiell aber aufhebbaren Engpass. Das Dilemma der Probanden einer typischen Doppelaufgabe besteht nach Meyer und Mitarbeitern darin, dass diese instruiert sind, die Aufgaben in einer bestimmten Reihenfolge auszuführen und dass sie in der Regel relativ ungeübt sind. Dies legt nahe, dass PRP-Effekte eliminiert werden können, wenn man die Reihenfolge der Reaktionen freistellt und Probanden ausreichende Übung verschafft. Während frühere Übungsstudien (Karlin und Kestenbaum 1968; Van Selst und Jolicœur 1997) nur geringe Reduktionen des PRP-Effekts fanden, konnten Van Selst et al. (1999) ihn nahezu eliminieren (◘ Abb. 18.17). Ein wesentlicher Grund für den im Vergleich zu anderen Studien größeren Erfolg hängt höchstwahrscheinlich mit den verwendeten Effektoren zusammen. Während nämlich Van Selst et al. (1999) in den beiden Aufgaben verschiedene Effektoren (verbale Reaktion in Aufgabe 1, manuelle in Aufgabe 2) verwenden ließen, kamen in den vorangegangenen Studien dieselben Arten von Effektoren zum Einsatz (manuelle Reaktionen in beiden Aufgaben) – eine Bedingung, die möglicherweise Interaktionen zwischen den Reaktionen begünstigt und einen zusätzlichen Engpass bei der Reaktionsinitiierung erzeugt (De Jong 1993; ▶ Abschn. 18.4.5). Tatsächlich berichten Ruthruff et al. (2001) in einer Nachfolgeuntersuchung weit geringere Übungseffekte bei Verwendung derselben Reaktionsmodi für beide Aufgaben. Auch die Einführung von Belohnungen hatte keine großen Übungsgewinne zur Folge (Ruthruff et al. 2009).

Die bei Weitem wirksamste Methode, den Verarbeitungsengpass bei Mehrfachaufgaben zu reduzieren, besteht darin, Reiz-Reaktions-Paarungen von größter, idealerweise „ideomotorischer" Kompatibilität zu wählen, d. h. Paarungen, bei denen Reize und Reaktionen so viele Merkmale wie möglich teilen. Mithilfe derartiger Paarungen ist es einigen Autoren gelungen, die Verarbeitungsverluste bei Doppelaufgaben dramatisch zu reduzieren und in einigen Fällen sogar zu eliminieren (z. B. Greenwald 1972; 2003). Dies setzt aber besonders günstige Bedingungen voraus (Greenwald 2004) und belegt nicht notwendigerweise die vollständige Eliminierung des Engpasses (Ruthruff et al. 2001). Umgekehrt müssen aber auch Nachweise verbleibender Verarbeitungskosten von Mehrfachaufgaben nicht notwendigerweise



◘ **Abb. 18.17** Reaktionszeiten für Aufgabe 1 (**A**) und Aufgabe 2 (**B**) aus einem Übungsexperiment von Van Selst et al. (1999). Die drei Phasen beziehen sich auf den Messzeitpunkt, d. h. das Ausmaß der Übung. In Aufgabe 1 sind die Leistungen zu Beginn (Phase I, Start) relativ schlecht, pendeln sich aber schnell auf ein sehr gutes Niveau ein. Zudem sind sie unabhängig von der zeitlichen Überlappung der Aufgaben (SOA). Auch in Aufgabe 2 sind die Leistungen zunächst sehr schlecht und leiden zusätzlich sehr stark unter zeitlicher Überlappung. Am Ende der Übung ist zwar noch ein kleiner SOA-Effekt zu beobachten, aber seine Größe ist deutlich reduziert

auf einen strukturellen Engpass hinweisen: Sie könnten dadurch entstehen, dass Versuchspersonen manchmal versuchen, die Reihenfolge ihrer Reaktionen strategisch zu kontrollieren. In jedem Fall können wir festhalten, dass Verarbeitungskosten bei Doppelaufgabentätigkeiten umso geringer ausfallen, je besser Reize und Reaktionen zueinanderpassen, und je häufiger die betreffende Aufgabenkombination geübt worden ist.

18.4.5 Reaktionsinitiierung

Verschiedene Autoren haben vermutet, dass Mehrfachaufgaben neben Selektionskonflikten und Ausführungsproblemen auch Probleme bei der Implementierung bzw. Initiierung der betreffenden Handlungen (▶ Abschn. 18.2.8) aufwerfen. Logan und Burkell (1986) verwendeten z. B. eine Aufgabenvariante, in der Probanden während der Vorbereitung oder Ausführung der ersten von zwei überlappenden Reaktionen durch ein Stoppsignal aufgefordert wurden, stattdessen eine andere oder gar keine Reaktion auszuführen. Die jeweils zweite überlappende Reaktion war vor allem dann verzögert, wenn die eigentlich erforderliche Unterdrückung der ersten Reaktion nicht mehr gelang. Dies legt nahe, dass nicht allein die Planung, sondern auch die Initiierung

einer Reaktion die Ausführung anderer Reaktionen erschwert. Auch De Jong (1993) beobachtete, dass die tatsächliche Initiierung einer Reaktion die Ausführung einer anderen Reaktion stärker stört als die bloße Planung. Diese Befunde sind konsistent mit Ergebnissen von Ivry et al. (1998), die die Doppelaufgabenperformanz des Patienten J. W. nach einer Kommissurotomie (Durchtrennung des die beiden Hirnhemisphären verbindenden Corpus callosum) mit denen von gesunden Probanden verglichen. Die Reize für zwei überlappende Aufgaben wurden in verschiedenen visuellen Halbfeldern dargeboten, um so J. W. eine separate Bearbeitung der Aufgaben in den isolierten Hemisphären zu ermöglichen. Wie die Kontrollgruppe zeigte zwar auch J. W. schlechtere Leistungen bei großer zeitlicher Überlappung der Aufgaben, aber sein Leistungsprofil wies einige Besonderheiten auf. So hingen seine Reaktionen nicht von der Effektormodalität in der jeweils anderen Aufgabe ab, während Kontrollpersonen bei gleicher Modalität (manuell-manuell) größere Probleme hatten als bei verschiedenen Modalitäten (manuell-verbal). Auch die Konsistenz der Regeln für die Reiz-Reaktions-Zuordnung in den beiden Aufgaben spielte für J. W. eine geringere Rolle als für die Kontrollgruppe, vermutlich weil bei ihm die eigentliche Handlungsplanung für beide Aufgaben getrennt in verschiedenen Hemisphären stattfand. Das heißt, J. W. s Doppelaufgabenkosten können nicht auf Interferenzen während oder vor der Handlungsplanung zurückgehen, sondern müssen von einem nachfolgenden Prozess verursacht worden sein.

18.5 Wechseln zwischen Handlungen

Das erfolgreiche Management eines Haushalts oder eines Betriebs verlangt nicht nur Multitasking-Fähigkeiten (z. B. während des Kochens auch noch ein Kind beaufsichtigen), sondern auch das häufige Umschalten zwischen verschiedenen Tätigkeiten: zwischen lesen und reden, kochen und bügeln, Rad fahren und einkaufen usw. Wie regelt unser kognitives System derartige Umschaltprozesse, welche Probleme werfen sie auf, und wie sind solche Probleme zu vermeiden? Dieser Art der Handlungskontrolle wenden wir uns im Folgenden zu.

Die zur Kontrolle des **Aufgabenwechsel**s erforderlichen kognitiven Prozesse haben in den letzten Jahren zunehmend Aufmerksamkeit auf sich gezogen (Kiesel et al. 2010; Kluwe 1997; Monsell 2003; Monsell und Driver 2000), wofür wenigstens drei Gründe verantwortlich sein dürften.

1. Es handelt sich dabei um Prozesse, die nicht direkt mit basalen Aufgaben der Informationsverarbeitung zu tun haben – wie der Verarbeitung und Speicherung von Reizen oder der Auswahl und Ausführung von Reaktionen; vielmehr sorgen sie dafür, dass derartige Prozesse in einer zieldienlichen Weise interagieren (**exekutive Funktionen**). Mehr noch als basale Prozesse dienen sie also der eigentlichen Kontrolle kognitiver Aktivitäten und damit des menschlichen Handelns im weiteren Sinne und repräsentieren das, was Menschen wollen und anstreben, was ihr Studium natürlich besonders interessant macht.
2. Es stehen nunmehr experimentelle und analytische Methoden zur Verfügung stehen, die eine systematische Analyse der relativ komplexen Kontrollprozesse erlauben. Die zugrunde liegenden Techniken selbst sind durchaus schon länger bekannt, wie das bereits zu Beginn des vorigen Jahrhunderts entwickelte Aufgabenwechselparadigma (Jersild 1927; Zillig 1926). Aber erst in den letzten Jahren sind die methodischen Details und die Analysetechniken hinreichend verfeinert, validiert und einflussreich propagiert worden (z. B. Allport et al. 1994; Pashler 1994a).
3. Das Interesse von Kognitionspsychologen an der neuronalen Basis kognitiver Funktionen hat zugenommen. Während die Kartierung und das Verständnis der Funktionsweise z. B. des visuellen Cortex schon relativ weit fortgeschritten sind, haben sich die Gehirnwissenschaften in letzter Zeit vor allem solchen corticalen Regionen zugewandt, von denen wesentliche Beiträge zur Planung und Steuerung von Handlungen zu erwarten sind: dem präfrontalen und frontalen Cortex (z. B. Passingham 1993; Rabbitt 1997; Roberts et al. 1998; ◘ Abb. 18.18).

Mit dem zunehmenden Verständnis der Rolle dieser Regionen bei der gelingenden Kontrolle von Handlungen bei Gesunden und dem spezifischen Scheitern der Handlungskontrolle bei Patienten mit entsprechenden Hirnläsionen rücken bestimmte, kognitionspsychologische Fragen in den Vordergrund: Lassen sich z. B. bestimmte Hirnregionen bestimmten Funktionen bei der Handlungskontrolle eindeutig zuordnen und, wenn ja, welche psychologischen Aufgaben, Effekte oder Tests sind geeignet, corticale Defizite zu diagnostizieren (Rabbitt 1997)? Sicher ist es noch zu früh, diese Fragen eindeutig zu beantworten. Aber auch derartige Antworten können umso eher gefunden werden, je besser die kognitiven Mechanismen der Handlungskontrolle verstanden sind.

Wie in ▶ Kap. 1 und ▶ Abschn. 18.2.9 beschrieben, führt die Ausbildung oder Übernahme eines Handlungszieles zu einer zielorientierten Ausrichtung des kognitiven Systems, d. h., Wahrnehmungs- und Handlungsprozesse werden so organisiert, dass motorische Prozesse im Sinne des Zieles verlaufen und die dafür wesentliche sensorische Information erhalten (Ach 1910; Kluwe 1997; Monsell 1996). Einerseits ist es möglich, aufgrund von Verlaufsmerkmalen und Charakteristika der entstehenden Handlungen auf die Mechanismen zu schließen, denen sie ihre Entstehung verdanken, z. B. Antizipationseffekte bei Handlungssequenzen. Die Planung einzelner zielgerichteter Bewegungen oder Bewegungsfolgen lassen sich so gut analysieren. Andererseits entgeht solchen Analysen, was zu Beginn einer Aufgabe stattfindet, wie z. B. Handlungen in einem bestimmten Aufgabenkontext vorbereitet und eingeplant werden. Tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass einige der interessierenden Planungsprozesse möglicherweise schon vor Wahrnehmung des ersten Reizes und der entsprechenden Handlung abgeschlossen werden (▶ Abschn. 18.4.2). Damit aber fallen sie nicht in den untersuchten Zeitraum, der sich ja in den meisten psychologischen Experimenten auf die Zeit zwischen Reizen und Reaktionen beschränkt. Um auch diese Prozesse analysieren zu können, sind experimentelle Paradigmen entwickelt worden, die einen Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben erfordern (▶ Abschn. 18.5.1) und damit den Zeitraum zwischen der Instruktion für eine neue Aufgabe und

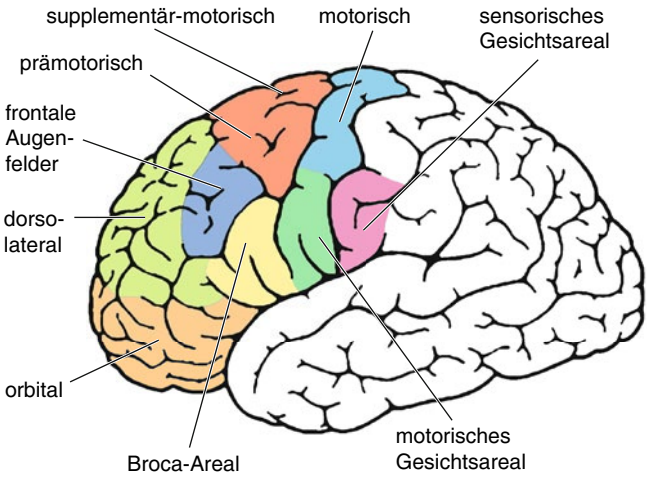


Abb. 18.18 Funktionskarte des Frontallappens im menschlichen Gehirn. (Aus Kolb und Whishaw 1990)

deren erstmaliger Ausführung in die Analyse einbeziehen. Tatsächlich lässt sich zeigen, dass ein Aufgabenwechsel nicht nur die allgemeine Leistung verschlechtert (▶ Abschn. 18.4.2), sondern sehr spezifische kognitive Kosten verursacht (▶ Abschn. 18.5.3 und 18.5.4), die wichtige Schlussfolgerungen bezüglich der für die Kontrolle und Koordination von Aufgaben verantwortlichen Mechanismen erlauben (▶ Abschn. 18.5.5).

18.5.1 Untersuchungsmethoden

Das Prinzip einer Wechselaufgabe besteht darin, die Leistungen von Probanden unter zwei Bedingungen zu vergleichen: einer, in der die vorangegangene Aufgabe dieselbe war (eine Aufgabenwiederholung), und einer, in der die vorangegangene Aufgabe eine andere war (ein Aufgabenwechsel). Zunächst liegt nahe, dies im Rahmen verschiedener Aufgabenblöcke zu tun, d. h. Probanden einmal dieselbe(n) Aufgabe(n) wieder und wieder ausführen zu lassen und ein anderes Mal dauernd zwischen zwei oder mehr Aufgaben abwechseln zu lassen (Abb. 18.19). Tatsächlich haben sich die ersten Untersuchungen zum Aufgabenwechsel dieser Methode bedient (Zillig 1926; Jersild 1927), und auch spätere Untersuchungen haben sie wieder aufgegriffen (z. B. Allport et al. 1994). Ähnlich wie der Vergleich von Einzel- und Mehrfachbedingungen in der Mehrfachaufgabenforschung (▶ Abschn. 18.4.1) hat dieses Vorgehen jedoch erhebliche Nachteile. Wenn Probanden zwischen mehreren Aufgaben wechseln, müssen sie sich mehr Instruktionen merken, könnten mehr oder weniger motiviert sein und sich z. B. schneller überfordert fühlen als in der Wiederholungsbedingung. Wenn dann eine Leistungsverschlechterung in der Wechselbedingung eintritt, ist sie daher nicht eindeutig zu interpretieren und könnte neben kognitiven auch motivationale und emotionale Ursachen haben. Außerdem erlaubt diese Methode nicht die Untersuchung einer Reihe sehr interessanter Fragen und Effekte, wie etwa die Wirkung verschieden langer Vorbereitung oder der Anzahl von Aufgabenwiederholungen vor einem Wechsel.

In jüngeren Arbeiten wurden verschiedene Verbesserungen und Erweiterungen vorgeschlagen. Rogers und Monsell (1995)

555555	22222	3
6	111111	111
44	33	66666
1111	1111	111111
22222	3333	222
555	5	55
33333	11111	3333
4	666	444444
3333	66666	33333
666	444	666
2	2	22222
11	44444	66
33	3	44444
444444	111	555555
2222	555	6
5	44	44
333333	222	1111
11111	55	22222
5555	222222	555
2	3333	5
22222	333333	333333
3333	2	11111
444	5555	5555
66	33333	2
44444	555555	2222
3	66	3333
111	2222	444
66666	444444	4
111111	22222	6666
222	6	222222
55	6666	2
222222	4	11
6666	11	33

Abb. 18.19 Typische Listenaufgabe zur Untersuchung von Aufgabenwechselkosten. Bearbeiten Sie jeweils eine der Spalten, von oben nach unten, und decken Sie die anderen Spalten ab. In der ersten Spalte lesen Sie die jeweils angezeigte Ziffer, unabhängig davon, ob bzw. wie oft sie wiederholt wird (die korrekte erste Reaktion lautet also „5"). In der zweiten Spalte benennen Sie jeweils die korrekte Anzahl der gezeigten Ziffern, unabhängig von deren Inhalt (die korrekte erste Reaktion lautet also auch hier „5"). In der dritten Spalte wechseln Sie bei jedem Reiz die Aufgabe, lesen also den ersten Reiz, benennen die Ziffernzahl des zweiten, lesen den dritten usw. Die meisten Versuchspersonen finden die zweite Spalte schwieriger als die erste, die Wechselaufgabe aber bei Weitem am schwierigsten

ließen Probanden z. B. Aufgaben nach einem festen, vorgegebenen Muster ausführen. Die relevanten Reize bestanden dabei aus Buchstaben-Zahlen-Paaren, die im Uhrzeigersinn abwechselnd im rechten oberen, rechten unteren, linken unteren und linken oberen Fenster einer Vielfeldertafel erschienen. Die eine Aufgabe erforderte eine binäre Wahlreaktion auf den Buchstaben, je nachdem, ob es sich um einen Vokal oder Konsonanten handelte. Die andere Aufgabe erforderte dagegen eine Wahlreaktion auf die jeweilige Zahl, je nachdem, ob sie gerade oder ungerade war. Der Trick bestand darin, dass Aufgaben und Fenster perfekt assoziiert waren, d. h., bei Reizen in der oberen Zeile sollte die eine Aufgabe ausgeführt werden und bei Reizen der unteren Zeile die andere. Dadurch entstanden vollständig vorhersagbare Abfolgen von Aufgabenwiederholungen und Aufgabenwechseln (AABBAABB...) in demselben Versuchsblock, sodass die Leistung für beide Arten von Übergängen ohne Konfundierungen kognitiver, motivationaler oder emotionaler Faktoren ermittelt werden konnte.

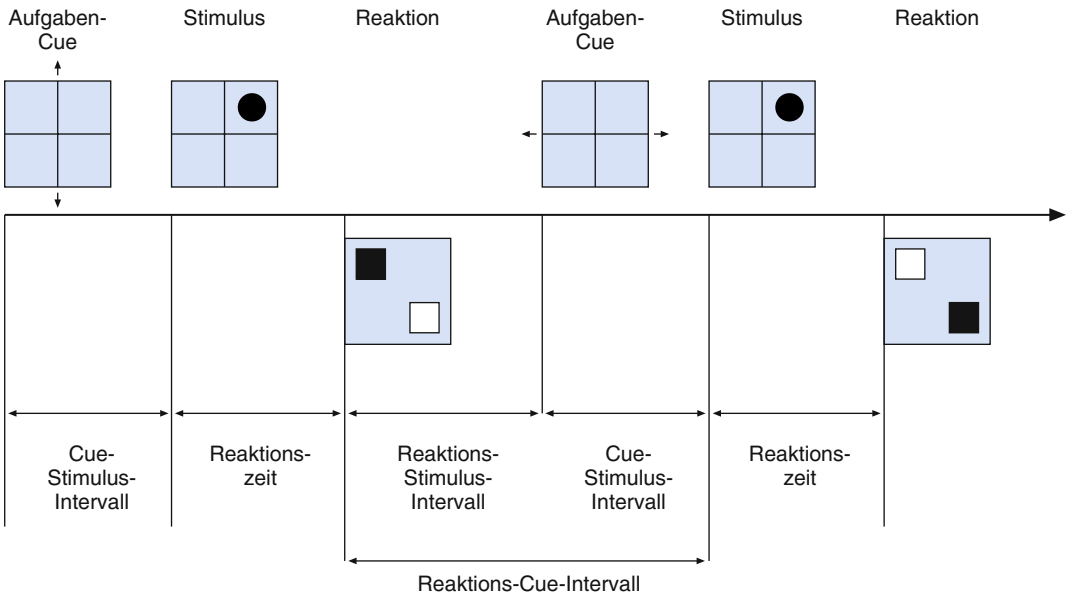


Abb. 18.20 Erklärung der in Untersuchungen zum Aufgabenwechsel relevanten Zeitintervalle am Beispiel des Designs von Meiran (1996)

Ein Nachteil dieser AABB-Methode ist der, dass die Abfolge der Aufgaben in einem Versuchsblock festliegt und nicht variiert werden kann. Auch die für die Vorbereitung einer neuen Aufgabe verfügbare Zeit (das Intervall zwischen einem Reiz bzw. der entsprechenden Reaktion und dem folgenden Reiz) kann nicht unabhängig von der seit der letzten Aufgabe vergangenen Zeit variiert werden, d. h., Vorbereitungseffekte und mögliche Nacheffekte sind konfundiert. Um diesen Problemen zu begegnen, führte Meiran (1996) **Aufgaben-Cues** (Hinweisreize) ein, die vor jedem einzelnen Durchgang die nächste Aufgabe signalisierten (vgl. auch Dixon 1981; Dixon und Just 1986).

Abb. 18.20 zeigt ein Beispiel für den Ablauf von zwei Durchgängen in der Studie von Meiran (1996). Die Probanden sahen einen Reiz im rechten oberen, rechten unteren, linken unteren und linken oberen Fenster einer Vielfeldertafel; anders als bei Rogers und Monsell (1995) war die Abfolge der Reizpositionen jedoch zufällig. Zu Beginn eines jeden Durchgangs erschien ein Aufgaben-Cue, der anzeigte, auf welche Reizeigenschaft reagiert werden sollte: auf die vertikale Position, signalisiert durch zwei nach oben und unten weisende Pfeile, oder auf die horizontale Position, signalisiert durch zwei nach links und rechts weisende Pfeile. Eine variable Zeit nach dem Cue (Cue-Stimulus-Intervall, CSI) erschien der Reiz, auf den so schnell wie möglich reagiert werden sollte (Reaktionszeit). Die Reaktion erfolgte durch Drücken der jeweils räumlich kompatiblen von zwei diagonal angeordneten Tasten. Nach der Reaktion verging wieder eine variable Zeit (Reaktions-Cue-Intervall, RCI), bevor der nächste Aufgaben-Cue präsentiert wurde. Im Unterschied zu der Methode von Rogers und Monsell (1995) lassen sich mit diesem Design RSI (Reaktions-Stimulus-Intervall) und CSI unabhängig variieren und ihre entsprechenden Effekte separieren (▶ Abschn. 18.5.2 und 18.5.3).

Eine weitere Verbesserung des Aufgabenwechseldesigns wurde von Logan und Bundesen (2003) eingeführt. Die Autoren wiesen darauf hin, dass sich auch in der Anordnung von Meiran (1996) noch eine Konfundierung verbirgt: Wenn man jede Aufgabe durch einen bestimmten Cue anzeigt, dann ist mit jedem Aufgabenwechsel auch ein Wechsel des Cues verbunden. Leistungsverschlechterungen nach einem Aufgabenwechsel könnten also in Wirklichkeit auf die Veränderung des Cue zurückzuführen sein. Um dies zu überprüfen, haben Logan und Bundesen (2003) zwei Cues pro Aufgabe verwendet und tatsächlich nachweisen können, dass die Leistungsverschlechterung in vielen Fällen wesentlich mehr mit dem Wechsel des Cue als mit dem Wechsel der Aufgabe zu tun hat.

Diese methodischen Entwicklungen und Verfeinerungen haben den Nutzen und die Attraktivität von Wechselaufgaben erheblich gesteigert, und so erfreuen sie sich höchster Beliebtheit nicht nur in kognitionspsychologischen, sondern auch entwicklungs- (z. B. Kray und Lindenberger 2000) und neuropsychologischen Studien (z. B. Fimm et al. 1994; Owen et al. 1993; Rogers et al. 1998; Stablum et al. 1994).

18.5.2 Aufgabenvorbereitung

Die wichtigste Voraussetzung für die Interpretation von Wechselaufgaben und ihrer Ergebnisse besteht in dem Nachweis, dass Menschen sich überhaupt auf Aufgaben vorbereiten. Um dies zu zeigen, bedarf es mehr als des Nachweises von **Wechselkosten**, also von schlechterer Leistung bei einem Aufgabenwechsel als bei einer Aufgabenwiederholung. Sicher könnten solche Kosten durch die Notwendigkeit entstehen, sich beim Wechsel zusätzlich vorzubereiten, sie könnten aber auch durch Nacheffekte der jeweils vorangegangen Aufgabe zustande kommen (▶ Abschn. 18.5.3). Wie also kann man eine aktive Vorbereitung belegen? Eine Möglichkeit ergibt sich aus der naheliegenden Annahme, dass die Vorbereitung Zeit benötigt und daher umso effektiver ist, je mehr Zeit für sie zur Verfügung steht. Tatsächlich sind die Wechselkosten, d. h. die Differenz der Reaktionszeiten und Fehler bei Aufgabenwechseln versus Aufgabenwiederholungen, umso kleiner, je länger das RSI ist, also die zwischen voriger Reaktion und nächstem Reiz zur Verfügung stehende Zeit (Allport et al. 1994; Rogers und Monsell 1995). Allerdings könnte

auch diese Beobachtung dadurch erklärt werden, dass die Nacheffekte vorausgehender Aufgaben (z. B. noch aktive, aber nun irreführende Reiz-Reaktions-Regeln der vorigen Aufgabe) mit der Zeit geringer werden. Wichtiger ist daher Meirans (1996) Beobachtung, dass längere Vorbereitungszeit auch dann die Wechselkosten verringert, wenn das RSI (d. h. die Summe aus RCI und CSI) konstant gehalten wird – was sich bei der Verwendung von Aufgaben-Cues dadurch erreichen lässt, dass man bei Variation des CSI die Summe von RCI und CSI konstant hält, also das RCI entsprechend anpasst. Diese Beobachtung zeigt, dass sich Wechselkosten nicht allein durch den (in manchen Fällen vielleicht zu geringen) zeitlichen Abstand zur vorherigen Aufgabe erklären lassen (▶ Abschn. 18.5.3).

Die Tatsache, dass Handelnde sich auf ihre Aufgaben bei ausreichender Zeit vorbereiten können und dies in der Regel auch tun, ist weitgehend unstrittig. Unklar ist aber noch, worin diese Vorbereitung eigentlich besteht, und so sind viele Autoren noch nicht sehr konkret in Bezug auf die angenommenen Prozesse. Drei, möglicherweise nicht ganz unabhängige Arten von Mechanismen sind etwas detaillierter diskutiert worden:

1. Die Aufgabenvorbereitung könnte sich mit dem Abruf und der Implementation der aufgabenspezifischen Regeln befassen. Rubinstein et al. (2001) zufolge wird Vorbereitungszeit zur Aktivierung einer Zielrepräsentation genutzt, die schließlich nach erfolgter Reizverarbeitung die relevanten Regeln spezifiziert. Auch Mayr und Kliegl (2000) führen Vorbereitungseffekte auf den Abruf aufgabenrelevanter Information zurück, nehmen jedoch an, dass der Abruf bereits während der Vorbereitung abgeschlossen wird. Im Einklang mit diesen Überlegungen stehen Beobachtungen, dass Wechselkosten mit der Komplexität der aufgabenrelevanten Regeln (Rubinstein et al. 2001) und der Abrufschwierigkeit aufgabenrelevanter Information (Mayr und Kliegl 2000) zunehmen.
2. Eine zweite theoretische Möglichkeit ist von Meiran (2000a; 2000b; Meiran et al. 2000) erwogen worden. Er geht davon aus, dass sowohl Reize als auch Reaktionen in einer aufgabenspezifischen Weise verarbeitet und interpretiert werden müssen, was bei einem Aufgabenwechsel eine Veränderung der Aufmerksamkeitseinstellung erfordert. Wenn z. B. ein Reiz erst hinsichtlich seiner vertikalen, dann seiner horizontalen Position beurteilt werden soll (◘ Abb. 18.20), dann muss die Aufmerksamkeit von der vertikalen zur horizontalen Dimension verschoben werden. Meiran zufolge geschieht dies nicht durch eine vollständige, diskrete Umschaltung, sondern durch eine unter Umständen nur kleine Veränderung der Gewichtung der entsprechenden Reizmerkmale (Ward 1982): Zuerst werden vertikale Merkmale stärker als horizontale gewichtet, nach dem Wechsel ist es umgekehrt. Nach Meiran kann diese Gewichtung, im Unterschied zu anderen wechselbezogenen Prozessen, unmittelbar nach Verarbeitung des Aufgaben-Cues in Angriff genommen werden und ist daher für die Vorbereitungseffekte verantwortlich (*preparatory component*). Für diese Aufmerksamkeitshypothese spricht z. B. die Beobachtung, dass der Zusammenhang von CSI und Wechselkosten bei univalenten Reizen verschwindet (Meiran 2000b), d. h. bei Reizen, denen die jeweils irrelevante, zur anderen Aufgabe gehörende Reizdimension fehlt und die daher auch ohne Aufmerksamkeitsumstellung eindeutig zu interpretieren sind.
3. Die Vorbereitungszeit könnte dazu genutzt werden, die zur jeweils vorangegangenen Aufgabe gehörige Information zu unterdrücken (▶ Abschn. 18.5.3). Ein derartiger Suppressionsmechanismus könnte den Wechsel von einer Aufgabe zur nächsten entweder maßgeblich bewerkstelligen (Allport et al. 1994) oder zumindest unterstützen (Mayr und Keele 2000), indem durch die Inhibition der für die vorangegangene Aufgabe verantwortlichen Kontrollstruktur die relative Aktivierung der nun relevanten Kontrollstruktur zunimmt und diese so die alleinige Handlungskontrolle übernehmen kann. Für diese Annahme spricht u. a. die in einigen Untersuchungen beobachtete, aufgabenspezifische Asymmetrie von Wechselkosten. Allport et al. (1994) präsentierten z. B. Stroop-Reize (Farbwörter in jeweils inkongruenter Druckfarbe), die abwechselnd gelesen (wortbezogene Reaktionen) und benannt (farbbezogene Reaktionen) werden sollten, ähnlich wie bei dem in ◘ Abb. 18.19 gezeigten Beispiel. Überraschenderweise fiel es den Probanden deutlich schwerer, zur eigentlich leichteren Leseaufgabe als zur schwereren Benennungsaufgabe zu wechseln. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass eine leichte und damit mutmaßlich dominante Aufgabe für die Ausführung einer weniger dominanten vergleichsweise stärker inhibiert werden muss, sodass sie sich langsamer wieder „erholt", wenn sie wieder an der Reihe ist. Mayr und Keele (2000) ließen Probanden zwischen drei Aufgaben in zufälliger Folge alternieren und beobachteten umso bessere Leistungen, je länger die Ausführung der nun relevanten Aufgabe zurücklag. Ihrer Interpretation zufolge ist mit dem Wechsel zu einer neuen Aufgabe eine Inhibition der alten verbunden, und die negativen Konsequenzen dieser Inhibition nehmen mit der Zeit ab. Mit anderen Worten, je länger die letzte Inhibition einer Aufgabe zurückliegt, desto schneller kann die Aufgabe wieder aktiviert werden.

Es ist offensichtlich, dass die bislang vorliegenden Erklärungen von Vorbereitungseffekten noch der weiteren Ausarbeitung bedürfen, was im Übrigen für praktisch alle Ansätze zur Erklärung von wechselbezogenen Effekten gilt (▶ Abschn. 18.5.5). Auch wenn die Erklärungen recht unterschiedlich motiviert sind, wäre es daher gut möglich, dass sie sich nicht ausschließen, sondern lediglich verschiedene Facetten der Vorbereitung beleuchten. Abrufprozesse im Sinne von Mayr und Kliegl (2000) oder Rubinstein et al. (2001) benötigen z. B. Abruf-Cues, und es ist denkbar, dass die von Meiran (2000a; 2000b) beschriebenen Aufmerksamkeitsmechanismen dazu dienen, das kognitive System auf die zielgerichtete Verarbeitung solcher, schließlich durch den Reiz gelieferter Cues vorzubereiten. In dem Maße, in dem die Repräsentationen der Abruf-Cues bzw. der für sie relevanten Merkmale inhibitorisch verknüpft sind, sollte die Aktivierung eines Sets von Merkmalen zur Unterdrückung anderer führen, was wiederum mit den Annahmen von Mayr und Keele (2000) gut vereinbar ist. Mit anderen Worten, die bislang skizzierten theoretischen Zugänge stellen möglicherweise verschiedene Komponenten eines an sich einheitlichen, aber noch auszuarbeitenden Erklärungsansatzes dar.

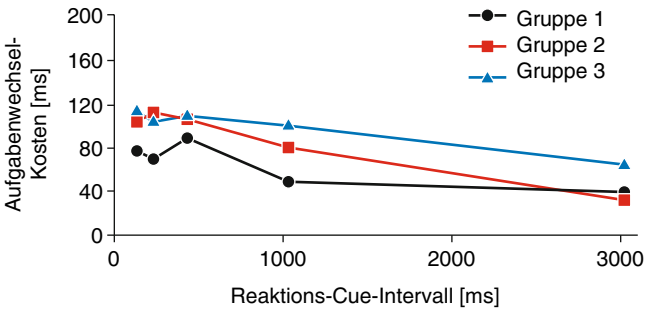
18.5.3 Proaktive Effekte

Wie bereits erläutert, sind Effekte der zwischen zwei Aufgaben vergangenen Zeit nicht notwendigerweise bzw. nicht ausschließlich auf eine aktive Vorbereitung zurückzuführen. Ähnlich wie in Gedächtnisaufgaben, wo das vorherige Lernen von Gedächtnisitems den Erwerb von nachfolgenden Items beeinträchtigt (▶ Kap. 12), könnte das Ausführen einer Aufgabe negative Auswirkungen auf spätere Aufgaben haben, z. B. durch das Okkupieren wichtiger Ressourcen – eine Art proaktive Interferenz durch Aufgabenträgheit (*task set inertia*; Allport et al. 1994). Wenn man die ebenfalls plausible Annahme hinzufügt, dass diese Nacheffekte mit der Zeit geringer werden, dann lässt sich in der Tat eine Verringerung von Wechselkosten mit zunehmendem RSI vorhersagen – so wie von Allport et al. (1994) sowie Rogers und Monsell (1995) beobachtet.

Separieren lassen sich echte Vorbereitungskosten und Proaktive Interferenz mithilfe der von Meiran (1996) eingeführten Technik des zufälligen Aufgaben-Cueing. Wenn die Aufgaben unvorhersagbar wechseln, sind Probanden auf den Aufgaben-Cue angewiesen und können sich jedenfalls in spezifischer Weise erst ab der Darbietung dieses Cue vorbereiten. Echte Vorbereitungseffekte sind also nur solche, die mit dem CSI variieren oder, genauer, mit zunehmendem CSI geringer werden. Dass diese spezifischen Effekte existieren, hat Meiran (1996) zeigen können, indem er das CSI bei konstantem RSI variierte, d. h. das RCI in genau dem Maße verringerte, in dem das CSI anstieg.

Um proaktive Effekte der jeweils vorangegangenen Aufgabe zu ermitteln, liegt es nahe, den umgekehrten Weg einzuschlagen und das RSI bei konstantem CSI zu variieren, d. h. nur das RCI zu manipulieren. Dies haben Meiran et al. (2000) getan, wobei sie das CSI konstant hielten und das RCI in verschiedenen Gruppen entweder in verschiedenen Blöcken (Gruppe 1 und 3) oder zufällig (Gruppe 2) variierten. Wie in ◘ Abb. 18.21 zu sehen, nahmen die Wechselkosten kontinuierlich mit zunehmendem RCI ab, und zwar in allen drei Gruppen. In Übereinstimmung mit Allport et al. (1994) übt also unabhängig von irgendwelcher Vorbereitung schon das Ausführen einer Aufgabe einen störenden, proaktiven Effekt auf darauffolgende Aufgaben aus – und zwar umso mehr, je kürzer die Zeit zwischen den benachbarten Aufgaben ist. Dass dieser Effekt relativ passiv ist, zeigt ein Vergleich von Gruppe 1, in der Aufgabenwiederholungen und Wechsel gleich wahrscheinlich waren, und Gruppe 3, in der Wiederholungen wahrscheinlicher waren als Wechsel. Einerseits ist offensichtlich, dass die Wechselkosten bei einer höheren Wahrscheinlichkeit von Wechseln größer sind (s. den Haupteffekt der Gruppen in ◘ Abb. 18.21). Es scheint also möglich zu sein, das mutmaßlich nützlichere Aufgabenset in höherer Bereitschaft zu halten. Andererseits ist die Abnahme von Wechselkosten über die Zeit nicht abhängig von der Wechselwahrscheinlichkeit, d. h., das Gefälle der RCI-Funktion ist in allen drei Gruppen vergleichbar.

Neben diesen passiven Nacheffekten sind auch Nacheffekte beobachtet worden, die auf Beiträge aktiver Hemmung schließen lassen. Wie in ▶ Abschn. 18.5.2 erörtert, fanden Mayr und Keele (2000) umso bessere Leistungen, je länger die Ausführung der nun relevanten Aufgabe zurücklag, was eine mit der Zeit nachlassende Inhibition der früheren Aufgabe nahelegt. Interessanterweise war auch dieser Effekt unabhängig vom jeweiligen CSI, d. h., er variierte nicht mit dem Ausmaß der Vorbereitung auf die nächste Aufgabe, und er hing nicht von der Wiederholung der zuvor dargebotenen Reize ab. Mit anderen Worten, er scheint wie der von Meiran et al. (2000) berichtete Nacheffekt sowohl proaktiv als auch unspezifisch zu sein.



◘ **Abb. 18.21** Aufgabenwechselkosten (Wechsel minus Wiederholung) in der Untersuchung von Meiran et al. (2000) als Funktion des Reaktions-Cue-Intervalls (RCI) und der Versuchsgruppe. In allen Gruppen nehmen die Wechselkosten mit dem Abstand zur vorigen Aufgabe ab

Hinweise auf eine Reihe spezifischerer Nacheffekte haben Untersuchungen von Allport und Kollegen ergeben. Wylie und Allport (2000) präsentierten z. B. ihren Probanden neben zu benennenden Farben und zu lesenden Wörtern auch Stroop-Reize, also Farbwörter in inkongruenter Schriftfarbe, die entweder benannt (Farbantwort) oder gelesen (Wortantwort) werden konnten. Wenn in der Farbaufgabe nur Farben (also keine Stroop-Reize) vorkamen, war der Wechsel zur Wortaufgabe mit moderaten Wechselkosten verbunden, unabhängig davon, ob in der Wortaufgabe unfarbige oder farbige Wörter erschienen. Die Wechselkosten waren also nicht davon abhängig, ob die Reize der momentanen Aufgabe auch die Ausführung der jeweils anderen Aufgabe erlauben würden. Das ist eine wichtige Beobachtung, da einige Autoren vermutet haben, Wechselkosten könnten auf die Mehrdeutigkeit von Reizen zurückgehen, d. h. deren Fähigkeit, mehre Handlungen „anzubieten" (Jersild 1927; Rogers und Monsell 1995). Als Wylie und Allport (2000) jedoch mehrdeutige (d. h. Stroop-)Reize auch in der Farbaufgabe einsetzten, wuchsen die Wechselkosten für die Wortaufgabe beträchtlich an. Mit anderen Worten, die Wechselkosten werden maßgeblich von reizinduzierten Konflikten in der vorherigen, alternativen Aufgabe und weniger von Konflikten in der momentanen Aufgabe bestimmt. Wie lässt sich dieses, auf den ersten Blick kontraintuitive Ergebnis erklären?

Die von Allport und Wylie (2000) vorgeschlagene Erklärung geht davon aus, dass die Ausführung einer bestimmten Reaktion auf einen Reiz zur Assoziation oder Bindung von Reiz- und Reaktionsrepräsentation führt – eine auch in anderen Zusammenhängen bewährte Annahme (Hommel 1998b). Wenn demnach z. B. das in grün geschriebene Wort ROT in der Farbaufgabe mit der Reaktion „grün" bedacht wird, sollte dies zur Bindung dieses Reizes und der „grün"-Reaktion führen. Erscheint dann derselbe Reiz in der Wortaufgabe, führt die erworbene Assoziation daher zur Aktivierung der nun falschen Reaktion, was wiederum die Auswahl der korrekten „rot"-Reaktion verzögert. In Übereinstimmung mit dieser Hypothese steigen die Wechselkosten

systematisch mit der Häufigkeit an, mit der die betreffenden Reize bereits im Rahmen der Alternativaufgabe vorkamen und mit jeweils anderen Reaktionen bedacht worden sind (Waszak et al. 2003; Wylie und Allport 2000).

Auf den ersten Blick scheinen sich die bislang beobachteten proaktiven Effekte zu widersprechen, und einige Autoren haben sie in der Tat verwendet, um alternative theoretische Überlegungen zu kontrastieren (z. B. Wylie und Allport 2000). Angesichts der unterschiedlichen Charakteristika der von Meiran et al. (2000) und Mayr und Keele (2000) berichteten, unspezifischen Nachwirkungen einerseits und der von Allport und Kollegen (Allport und Wylie 2000; Wylie und Allport 2000) gefundenen, spezifischen Effekte andererseits liegt es jedoch nahe, jeweils unterschiedliche Funktionsgrundlagen zu vermuten. Tatsächlich scheint es sich im ersten Fall um eher dynamische Effekte zu handeln, die das Ausmaß der Aktivierung konkurrierender Aufgabensets widerspiegeln, während die spezifischen Effekte eher von einer Art reizinduzierten Gedächtnisabrufs herrühren. Wenn das zutrifft, sollten beide Arten von Phänomenen mithilfe neurowissenschaftlicher Methoden, z. B. funktioneller Bildgebung, separierbar sein.

18.5.4 Residuale Wechselkosten

Viele Untersuchungen zum Aufgabenwechsel basieren auf der Idee, Wechselkosten spiegelten mehr oder weniger unmittelbar den Aufwand der intentionalen Vorbereitung auf eine Aufgabe wider. Eine naheliegende Implikation dieser Idee besteht darin, dass Wechselkosten bei einer ausreichenden Vorbereitung eigentlich verschwinden sollten. Mit anderen Worten, wenn man das CSI nur hinreichend verlängern würde, dürften Unterschiede zwischen Aufgabenwiederholungen und Aufgabenwechseln eigentlich nicht mehr existieren. Überraschenderweise widersprechen die meisten Befunde dieser Erwartung, wie z. B. auch die in Abb. 18.22 zusammengefassten Ergebnisse von drei Experimenten der Studie von Rogers und Monsell (1995). Einerseits nehmen die Wechselkosten zwar oft mit zunehmender Vorbereitungszeit bzw. dem CSI ab; andererseits bleibt selbst bei sehr langer Vorbereitung noch ein erklecklicher, offenbar nicht weiter reduzierbarer Teil erhalten.

Zur Erklärung dieser residualen Wechselkosten sind verschiedene, nicht unbedingt unvereinbare Vorschläge gemacht worden. Einer von Allport und Mitarbeitern (Allport et al. 1994; Wylie und Allport 2000) präferierten Möglichkeit zufolge könnten Residualkosten nichts weiter als Nacheffekte der sich langsam deaktivierenden vorherigen Aufgabe reflektieren, also lediglich proaktive Inhibition repräsentieren (▶ Abschn. 18.5.3). Angesichts der nachweisbaren Effekte solcher Art ist dies sicher eine plausible Annahme, die aber dennoch nicht alle Eigenschaften residualer Effekte erklären kann, wie z. B. ihr von null verschiedener asymptotischer Verlauf und die Beobachtung, dass bereits der erste Durchgang in einer neuen Aufgabe Residualkosten vollständig eliminiert (z. B. Rogers und Monsell 1995, Experiment 5). Rogers und Monsell (1995) haben daher vermutet, residuale Kosten spiegelten einen exogenen, also reizgetriebenen Anteil der Aufgabenvorbereitung wider, der erst nach Eintreffen des ersten Reizes unter einem neuen Aufgabenset ausgeführt werden kann (*stimulus-cued completion hypothesis*). Dies ist mit den genannten Beobachtungen konsistent, stellt aber ohne weiteren Hintergrund nicht viel mehr als eine zusammenfassende Beschreibung der Befunde dar. Die eigentliche Frage lautet, warum die Vorbereitung nicht vor dem ersten Reiz einer neuen Aufgabe abgeschlossen wird oder werden kann:

1. Es wäre denkbar, dass Versuchspersonen in manchen Durchgängen einfach nicht oder nicht hinreichend motiviert sind, sich vollständig vorzubereiten (*failure-to-engage hypothesis*; De Jong 2000; De Jong et al. 1999). Residualkosten entsprächen demnach nicht dem bei jedem Aufgabenwechsel auftretenden exogen gesteuerten Anteil der Vorbereitung, sondern repräsentierten diejenigen Durchgänge, in denen Probanden erst auf den Reiz warten und dann mit der Vorbereitung beginnen. In Übereinstimmung mit dieser Annahme sind die Wechselkosten größer, wenn die Versuchsblöcke lang und die Versuchspersonen daher mutmaßlich weniger zur frühen Vorbereitung motiviert sind (De Jong 2000). Alternativ ist

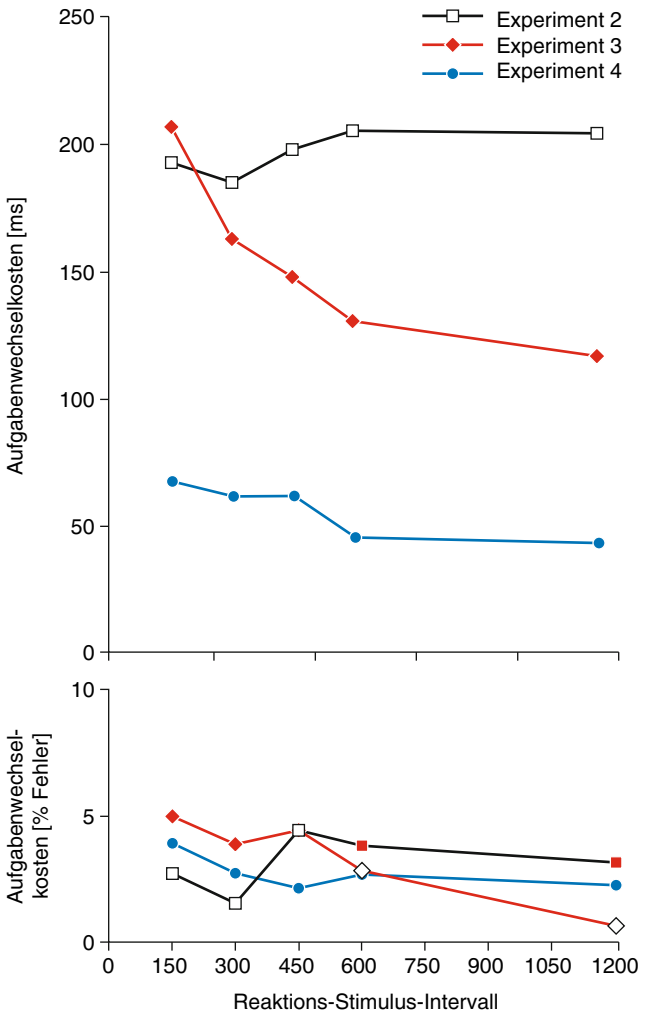


Abb. 18.22 Zusammenfassung der Aufgabenwechselkosten (Wechsel minus Wiederholung) aus drei Experimenten von Rogers und Monsell (1995) als Funktion des Reaktions-Stimulus-Intervalls (RSI). In Experiment 3 und 4 (mit geblocktem Intervall) nehmen die Wechselkosten mit zunehmendem Intervall ab. In Experiment 2 (mit zufällig variierendem Intervall) bleiben sie konstant auf hohem Niveau

aber nicht auszuschließen, dass längere Blöcke zu einer größeren Aktivierung der konkurrierenden Aufgabensets führen und dadurch die Wechselkosten erhöhen.

2. Es könnte sein, dass der Wechsel zu einer neuen Aufgabe stets die Inhibition der alten Aufgabe (Allport et al. 1994; Mayr und Keele 2000) bzw. der zur alten Aufgabe gehörigen Reaktionsassoziationen (Allport und Wylie 2000) erfordert, von der sich die alte Aufgabe erst einmal „erholen" muss, wenn sie anschließend wieder gebraucht wird. Mit anderen Worten, residuale Wechselkosten könnten widerspiegeln, dass die neue Aufgabe in einem früheren Durchgang bereits als störender Wettbewerber aufgetreten ist und als solcher behandelt wurde. Auch wenn einige der bereits erörterten Befunde für Nacheffekte dieser Art sprechen (▶ Abschn. 18.5.2), ist doch schwer zu sehen, warum die Bewältigung dieser Nacheffekte nicht vor dem ersten Reiz beginnen, aber vor dem zweiten Reiz abgeschlossen werden kann.
3. Eine dritte, dem Ansatz von Wylie und Allport (2000) verwandte Variante zur Erklärung von Residualkosten ist von Meiran (2000; Meiran et al. 2000) vorgeschlagen worden. Ein wesentliches Problem bei vielen Arten von Aufgabenwechseln besteht nach Meiran in dem Erfordernis, auf denselben Reiz einmal mit dieser, einmal mit jener Reaktion zu antworten. Die Reaktionen erhalten dadurch jeweils verschiedene, wechselnde Bedeutungen, was eine stetige, aufgabenspezifische Anpassung der kognitiven Repräsentationen dieser Reaktionen voraussetzt. Wenn z. B. in Meirans (1996) Aufgabe der Druck einer links oben lokalisierten Taste im einen Durchgang „oben", im nächsten aber „links" bedeutet, dann muss die kognitive Repräsentation dieses Tastendrucks entsprechend uminterpretiert werden. Geht man davon aus, dass Handlungen kognitiv durch Codes ihrer perzeptuellen Effekte repräsentiert sind (Hommel 1996a; 1997; ▶ Abschn. 18.2.9), dann erfordert die neue Codierung einer Handlung deren zumindest einmalige Ausführung, sodass die dadurch erzeugten Handlungseffekte wahrgenommen, codiert und mit der betreffenden Reaktion verknüpft werden können. In Meirans Aufgabe z. B. muss also zunächst die Aufmerksamkeitseinstellung von „vertikal" auf „horizontal" umgestellt werden (was nach Meiran im CSI geschieht), die Reaktion ausgeführt und ihre (hier vor allem ortsbezogenen) Effekte sozusagen mit der neuen, horizontalen „Brille" wahrgenommen werden, um die zuvor als „oben" codierte Reaktion auf „links" umzucodieren. Meiran zufolge ist der für Residualkosten verantwortliche Prozess also nicht reiz-, sondern reaktionsgetrieben, was erklären würde, warum er einerseits nicht vor dem ersten, neuen Durchgang begonnen, wohl aber vor dem zweiten Durchgang abgeschlossen werden kann. In Übereinstimmung mit diesem Ansatz treten residuale Wechselkosten dann nicht auf, wenn verschiedene, aufgabenspezifische Reaktionssets verwendet werden, sodass keine Umcodierung der Reaktionen erforderlich ist (Meiran 2000).

Zusammengenommen lässt sich festhalten, dass die Ursachen residualer Wechselkosten bislang noch nicht gut verstanden sind. Es ist zu vermuten, dass die bislang vorgeschlagenen Erklärungsansätze zum Teil verschiedene, sich nicht ausschließende Komponenten von Residualkosten (z. B. De Jong 2000; Allport et al. 1994), zum Teil aber auch verschiedene Aspekte desselben Verarbeitungsproblems (z. B. Wylie und Allport 2000; Meiran et al. 2000) thematisieren.

18.5.5 Implementierung und Aktualisierung von Aufgabensets

Der Begriff der exekutiven Funktionen bezieht sich auf Prozesse, die das kognitive System und seine Verarbeitungsprozesse so strukturieren, dass sie Umweltinformation und interne Wissensbestände in einer zieldienlichen Weise verarbeiten und so motorische Aktivität auf angestrebte Handlungsziele orientieren; es geht also um Prozesse, die andere Prozesse kontrollieren. Was immer das Produkt der Aktivität solcher exekutiver Funktionen ist, lässt sich als Aufgabenset bezeichnen – gewissermaßen ein Sammelbegriff für alle aufgaben-, intentions- und handlungsbezogenen Einstellungen des kognitiven Apparats. Wie andere Sammelbegriffe ist auch der des Aufgabensets unscharf und in der Regel mehr eine Beschreibung zu erklärender Phänomene als bereits eine Erklärung, wie Gibson (1941) schon früh anmerkte. So ist es wenig erstaunlich, dass die meisten Autoren keine weitere Definition des Begriffs anbieten, und wenn sich aus Arbeiten implizite Definitionen ableiten lassen, so konvergieren sie kaum.

Einige Aussagen über die Eigenschaften von Aufgabensets sind bereits aufgrund der bislang vorliegenden Evidenz möglich. So ist es unwahrscheinlich, dass es sich bei solchen Sets um hochgradig integrierte kognitive Strukturen handelt, die wie ein Computerprogramm aufgerufen werden und imstande sind, die innerhalb ihres Kontrollbereichs ablaufenden Prozesse vollständig gegen andere Prozesse abzuschirmen. Zu einem Aufgabenset gehören vielmehr eine Vielzahl von Einstellungen, Anpassungen von Parametern, Voraktivierungen relevanter Repräsentationen und Assoziationen, Bereitstellungen benötigter Routinen etc., die in vielen Fällen sowohl organisatorisch als auch zeitlich nur lose zusammenzuhängen scheinen. Einige Einstellungen werden offenbar zu Beginn eines ganzen Aufgabenkomplexes vorgenommen, z. B. das angestrebte Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit (Gopher 1996; Meiran et al. 2002) oder das allgemeine Bereitschaftsniveau (De Jong 2000), während andere Einstellungen bei jedem Aufgabenwechsel angepasst werden. Zudem können Aufgabensets zwar intentional implementiert werden, führen dann aber auch nach Ablauf ihrer Nutzung unter Umständen noch ein Eigenleben und können nicht einfach gelöscht werden (Allport et al. 1994). Es ist wahrscheinlich, dass zumindest bei schnell wechselnden Aufgaben alle wiederholt benötigten Sets in einem gewissen Bereitschaftsgrad gehalten werden, sodass viele Reize imstande sind, mehr als eine Aufgabe (Rogers und Monsell 1995) oder zumindest mehr als eine Reaktion (Allport und Wylie 2000) zu aktivieren. Dies ist auch daran erkennbar, dass Reize, die in allen infrage kommenden Aufgaben dieselbe Reaktion erfordern, in der Regel schneller beantwortet werden als solche, die verschiedene Reaktionen benötigten (Meiran 1996; Rogers und Monsell 1995; Sudevan und Taylor 1987).

Auch wenn wir erst beginnen, die für zielgerichtete Handlungen verantwortlichen Prozesse zu verstehen, so lässt sich doch ein allgemeines Prinzip bereits erkennen. Ähnlich wie es nicht gelungen ist, ein einheitliches Aufmerksamkeits- oder Willenszentrum zu identifizieren, so ist auch die Existenz eines exekutiven Zentrums, möglicherweise sogar mit einer präzise bestimmbaren corticalen Adresse (z. B. im Frontalhirn), alles andere als wahrscheinlich. Wesentlich plausibler ist die Annahme, dass kognitive Kontrolle verteilt stattfindet – verteilt über Zeit und anatomischen Ort, über Prozesse und Strukturen. Mit anderen Worten, kognitive Kontrolle ist eine emergente Eigenschaft unseres Gehirns und seiner Funktionen, nicht die Konsequenz eines einzelnen, identifizierbaren, mentalen Vorgangs (s. auch ▶ Zur Vertiefung 18.3).

18.6 Anwendungsbeispiele

Wie die Untersuchungen anderer psychologischer Phänomene auch, sind Studien zur Handlungsplanung und Handlungskontrolle oft sehr künstlich, um die Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren experimentell kontrollieren zu können. Die Ergebnisse dieser Studien haben jedoch vielfältige Implikationen für unseren Alltag, wie die folgenden drei Beispiele zeigen sollen.

▪ Wie multitaskingfähig sind wir?

Meine holländischen Mitbürgerinnen und Mitbürger lieben ihr Fahrrad, ein in den engen Gassen der oft mittelalterlichen Städte sehr effizientes Mittel der Fortbewegung. Viele erledigen ihre Geschäfte während der Fahrt, und so sieht man kaum einen Schüler oder Studenten, der nicht während der Fahrt seine E-Mail checkt und Textbotschaften versendet. Diese Praxis ist nicht nur in vielen europäischen Ländern aus rechtlichen Gründen problematisch, sie ist auch kognitionspsychologisch unvernünftig. Wie Sie in ▶ Abschn. 18.4 erfahren haben, verschlechtert bereits eine geringfügige Erhöhung der Aufgabenkomplexität bzw. der Gedächtnisbelastung die Auswahl situativ angemessener Reaktionen. Dabei kann die Reaktionszeit auf das Anderthalbfache anwachsen, und – was im Alltag oft schwerer wiegt – die Fehler nehmen erheblich zu. Selbst die bloße Absicht, auf einen Anruf zu reagieren, kann die Schnelligkeit und Korrektheit von Reaktionen signifikant beeinflussen (Holland und Rathoud 2013). Methoden aus der PRP-Forschung haben maßgeblich dazu beigetragen, mögliche Probleme der Doppelaufgabenbelastung durch Handybenutzung zu analysieren und die gesellschaftliche und juristische Diskussion dieses oft sehr emotionsbesetzten Themas auf eine rationale Grundlage zu stellen.

▪ Vom Nutzen der Automatisierung

In dem Spiel Costa Rica gegen die Niederlande in der Endrunde der Fußballweltmeisterschaft 2014 fiel auch in der Verlängerung kein Tor. In der 119. Minute wechselte der niederländische Trainer Louis van Gaal den Ersatztorhüter Tim Krul ein. Wie sich herausstellte, war dieser Spielzug im Voraus geplant, und Krul war intensiv auf die individuellen Vorlieben der Spieler aus Costa Rica beim Nehmen von Elfmetern vorbereitet worden. Bei jeder Annäherung des Elfmeterpunktes durch einen costa-ricanischen Spieler ging Krul auf den Elfmeterschützen zu und bedeutete ihm verbal und nonverbal, dass er genau wüsste, wohin er schießen würde (und er wiederholte mehrfach: „I know!“). Es wird für immer ein Rätsel bleiben, warum der Schiedsrichter diese Unsportlichkeit nicht unterband, aber kognitionspsychologisch war sie außerordentlich clever (wie Krul durchaus wusste). Viele Teams probieren das Nehmen von Strafstößen durch ein großes Maß von Übung zu automatisieren, sodass Spieler auch ohne großes Nachdenken das fußballerisch Richtige tun. Diese Automatismen können wir an- und ausschalten, ganz ähnlich wie beim Autofahren – was wir bei ausreichender Übung meist automatisch tun. Während Automatismen fast keine mentale Energie (konzentrierte Aufmerksamkeit) benötigen, ist die willkürliche Steuerung sehr energieintensiv, und Energie ist das, was ein Spieler nach 120 min nicht mehr hat. Kruls Verunsicherung seines Gegenspielers musste also zur Folge haben, dass der sich nicht mehr auf seine Automatismen verließ, sondern im Zustand energetischer Erschöpfung versuchte, energieintensive Entscheidungen aktuell zu treffen. Das musste schiefgehen, und so hielt Krul zwei Strafstöße, und Costa Rica schied aus. Dieses Beispiel ist nur eines von vielen, denn bei einem zunehmend breiten physischen Leistungsniveau in vielen Sportarten wird die psychologische Ausbildung von Sportlern immer wichtiger, und gerade Untersuchungen zur Planung und Ausführung von Handlungen spielen dabei eine hervorragende Rolle.

▪ Warum Mehrsprachigkeit flexibler macht

In ▶Zur Vertiefung 18.2 konnten wir sehen, dass Kleinkinder und Kinder schon zu Beginn ihrer Entwicklung Wissen über die Handlungsmöglichkeiten in ihrer Umwelt erwerben. Dies hat nicht nur theoretische, sondern auch praktische Bedeutung, denn es zeigt, wie wichtig Bewegung und aktive Exploration für die kindliche Entwicklung sind. Ein etwas unerwartetes Beispiel dafür kommt aus dem Bereich der Sprachentwicklung. Einige Beobachtungen deuteten darauf hin, dass zweisprachig erzogene Kinder zumindest vorübergehend gewisse Nachteile gegenüber monosprachlich erzogenen Kindern haben. Und das liegt ja auch nahe, denn wenn man zwei Sprachen gleichzeitig erwirbt, ergeben sich viele Gelegenheiten für Verwechslungen. Interessanterweise scheint aber dieser Nachteil zum Beginn der sprachlichen Entwicklung in einen Vorteil umzuschlagen, und dies nicht nur im sprachlichen Bereich. Zahlreiche Befunde zeigen, dass zweisprachig erzogene Erwachsene bessere Leistungen in einer Reihe von nichtsprachlichen Tätigkeiten zeigen, z. B. beim Ignorieren von Ablenkungen und beim Wechseln zwischen verschiedenen Aufgaben (Bialystok 2001). Die mögliche Ursache besteht darin, dass das gleichzeitige Umgehen mit mehreren Sprachen oft zu wechselseitigen Störungen (Interferenzen, *crosstalk*s) führt. Die lernende Person muss daher Fähigkeiten erwerben, um damit umzugehen und z. B. die momentan nicht gebrauchte Sprache effektiv zu unterdrücken. Der Erwerb dieser Fähigkeiten kostet Zeit, und dies erklärt den anfänglichen Nachteil, aber die Fähigkeiten können auch unter anderen Umständen eingesetzt werden – wie das effektive Unterdrücken einer nicht mehr aktuellen Aufgabe oder eines nicht produktiven Gedankens. Diese Einsicht eröffnet neue Perspekti-

Zur Vertiefung 18.3

Die Regulation kognitiver Konflikte

Zahlreiche Effekte in der Kognitiven Psychologie werden durch die Annahme von Reaktionskonflikten erklärt: Der Stroop-Effekt (langsamere Reaktion wenn die Farbe eines Wortes benannt werden soll, das eine andere Farbe benennt) wird z. B. darauf zurückgeführt, dass sowohl die Farbe des Wortes als auch seine Bedeutung inkompatible Reaktionen aktivieren (▶ Abschn. 18.3 und 18.5). Auch Untersuchungen zum Aufgabenwechsel bedienen sich oft indirekt derartiger Konflikte, indem sie die verschiedenen Aufgaben mit inkompatiblen Reiz-Reaktions-Regeln versehen (◘ Abb. 18.20). Wie derartige Konflikte entstehen, ist leicht zu sehen, z. B. durch Übung (wir lesen Wörter viel öfter, als dass wir ihre Farbe benennen) oder eben durch die Notwendigkeit, sich widersprechende Regeln im Kurzzeitgedächtnis zu behalten. Wie aber lösen wir solche Konflikte?

Ein einflussreiches Modell zur Regulation von Reaktionskonflikten ist von Botvinick et al. (2001) vorgestellt worden. Es basiert auf früheren Überlegungen zur Handlungskontrolle (▶ Abschn. 18.5). Wie in ◘ Abb. 18.23 skizziert, gehen die Autoren von der Existenz einer Kontrollinstanz aus, die das Auftreten von Reaktionskonflikten registriert. Sobald ein Konflikt registriert wird, führt dies zur Verstärkung der Repräsentation des Handlungszieles. Das Beispiel bezieht sich auf den Stroop-Effekt. Die Präsentation des grün gefärbten Wortes „ROT" würde dem Modell zufolge sowohl die (richtige) Reaktion „grün" als auch die (falsche) Reaktion „rot" aktivieren und damit einen Reaktionskonflikt auslösen. Die Registrierung des Konflikts durch den Konfliktmonitor führt zur Verstärkung der momentan relevanten Aufgabenrepräsentation (Farbe benennen), was wiederum die Farbeigenschaften des Wortes verstärkt. Als Konsequenz kann die richtige Reaktion „grün" stärker aktiviert werden als die falsche, was die Ausführung der korrekten Handlung zwar verzögert, aber letztlich doch erlaubt. Das Auftreten eines Konflikts führt also zu einem höheren Maß an Kontrolle.

Die Überlegung von Botvinick et al. (2001) erlaubt die Vorhersage eines interessanten sequenziellen Effekts: Das Ausmaß eines Reaktionskonflikts sollte unmittelbar nach dem Auftreten eines Konflikts reduziert sein. Wenn nämlich die Registrierung eines Konflikts zu einer verstärkten Aktivierung des Handlungszieles führt, und wenn diese Aktivierung den Wettbewerb der korrekten Reaktion um die Selektion unterstützt, dann sollte die korrekte Reaktion im darauffolgenden Durchgang von dieser höheren Zielaktivierung profitieren und sich schneller gegenüber ihren Wettbewerbern durchsetzen. Tatsächlich haben eine Reihe von Studien derartige sequenzielle Effekte gefunden: Die Größe von Stroop-Effekten (Kerns et al. 2004) und Simon-Effekten (Stürmer et al. 2002) fällt z. B. deutlich kleiner aus, wenn man sie unmittelbar nach einem inkompatiblen Durchgang misst.

Einen tieferen Einblick in die neurophysiologischen Mechanismen der Konfliktregulation erlaubt die rezente fMRI-Studie von Egner und Hirsch (2005). Dort wurden Probanden mit Stroop-artigen (d. h. kompatiblen oder inkompatiblen; ▶ Kap. 5) Kombinationen von Gesichtern und Namen bekannter Schauspieler und Politiker konfrontiert. In einer der Bedingungen sollten sie angeben, ob das jeweilige Gesicht einen Schauspieler oder einen Politiker zeigt, und dabei die Wörter ignorieren. Wie ◘ Abb. 18.24 zeigt, erlaubten kongruente Kombinationen (z. B. das Gesicht von Robert de Niro mit dem Namen „Jack Nicholson") schneller Reaktionen als inkongruente Kombinationen (z. B. das Gesicht von Robert de Niro mit dem Namen „Bill Clinton"). ◘ Abb. 18.24 zeigt aber auch, dass dieser Kompatibilitätseffekt unmittelbar nach inkompatiblen Durchgängen nicht mehr messbar war – genau wie das Modell von Botvinick et al. (2001) erwarten lässt. Egner und Hirsch (2005) maßen gleichzeitig die Aktivierung des für die Verarbeitung von Gesichtern zuständigen corticalen Areals (des fusiformen Gesichtsareals) in jedem Durchgang. Wie die *untere* Grafik zeigt, nahm diese Aktivierung nach inkongruenten Durchgängen zu, vor allem wenn auch der derzeitige Durchgang ein inkongruenter war. Dies legt nahe, dass die Erfahrung eines Reaktionskonflikts (im vorherigen Durchgang) tatsächlich zu einer erhöhten corticalen Sensibilität gegenüber aufgabenrelevanter Information führt. Was wiederum die Überlegung bekräftigt, dass Konflikte eine stärkere Konzentration auf das Handlungsziel nach sich ziehen.

Jüngste Untersuchungen haben sich mit der Frage beschäftigt, durch welche Art von Information diese stärkere Konzentration eigentlich getrieben wird. Die ursprüngliche Überlegung von Botvinick et al. (2001) ging davon aus, dass der Konfliktmonitor direkt über das Vorliegen eines Reaktionskonflikts informiert wird. Später hat Botvinick (2007) die Möglichkeit erwogen, dass der Konfliktmonitor affektive Zustände ausliest. Tatsächlich konnte nachgewiesen werden, dass die Konfliktregulation bei der Gabe von Belohnungen und der Induzierung positiver Stimmung zusammenbricht (van Steenbergen et al. 2009; 2010) und die der Konfliktregulation zugrunde liegenden corticalen Strukturen unter positiver Stimmung weniger Informationen erhalten (van Steenbergen et al. 2015).

ven und viele neue Möglichkeiten für die Gestaltung schulischer und außerschulischer Curricula.

18.7 Ausblick

Das 20. Jahrhundert hat es mit der Psychologie der Handlungsplanung und -kontrolle nicht immer gut gemeint. Auch wenn Pioniere wie Lotze (1852), James (1890) und Dewey (1896) Kognition und Handlung eng verknüpft gesehen haben, so ist die Handlung nur wenig später zur bloßen Reaktion reduziert – wie zu Zeiten des Behaviorismus – oder ganz vergessen worden – wie zu Beginn der kognitiven Revolution während der 1960er und 1970er Jahre. Erst in den letzten Jahren lassen sich zunehmend Tendenzen beobachten, die Handlung als vollwertigen Untersuchungsgegenstand der Kognitionspsychologie zu rehabilitieren. Die Gründe dafür sind recht vielfältig: Sie reichen von einem zunehmenden Leerlauf von Ansätzen der Informationsverarbeitungspsychologie und nur bescheidenen Fortschritten einer rein wissensorientierten Künstlichen Intelligenz über den zunehmenden Einfluss neurowissenschaftlicher Erkenntnisse bis zur Entwicklung moderner, handhabbarer Methoden zur Bewegungsmessung und -protokollierung. Auch der Schritt zu ökologisch valideren Forschungsfragen und Untersuchungssettings bringt die Handlung zunehmend zurück ins Spiel (z. B. Allport 1993; Clark 1999; Decety und Grèzes 1999). Weitere Gründe für die zunehmende Bedeutung der Handlung ergeben sich aus der zunehmenden Ausrichtung der Forschungsförderung (z. B. im Rahmen des EU-Programms Horizon 2020) auf gesellschaftlich relevante Forschungsfragen (was das Augenmerk auf tatsächliches Verhalten lenkt) und der zunehmenden Bedeutung der kognitiven Robotik (für die Fra-

Zur Vertiefung 18.3 (*Fortsetzung*)

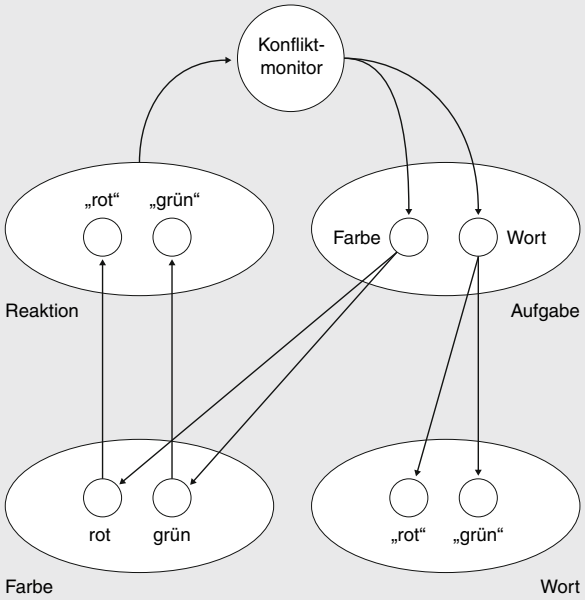


Abb. 18.23 Die mögliche Funktion eines Konfliktmonitors. In inkongruenten Bedingungen der Stroop-Aufgabe (z. B. bei der Benennung der Farbe des grün gefärbten Wortes „ROT“) entsteht ein Reaktionskonflikt, d. h., mehre Reaktionen sind aktiviert. Der Konfliktmonitor könnte derartige multiple Aktivierungen entdecken und eine stärkere Aktivierung der eigentlichen Aufgabe (Farbe benennen in diesem Fall) bewirken. Diese stärkere Aktivierung würde die Selektion des aufgabenrelevanten Merkmals erleichtern und späteren Reaktionskonflikten entgegenwirken

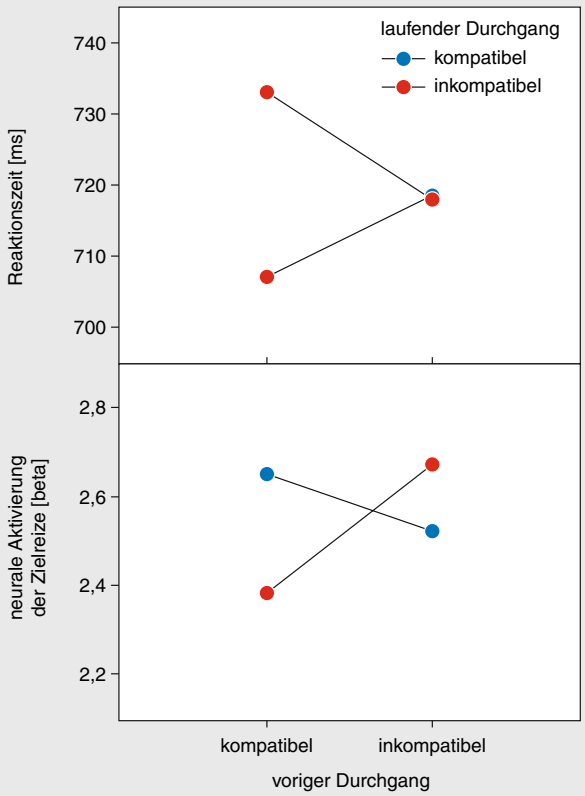


Abb. 18.24 Reaktionszeiten und Maße der Gehirnaktivität aus der Untersuchung von Egner und Hirsch (2005). Der Effekt der Kompatibilität im laufenden Durchgang wird moderiert durch die Kompatibilität im vorigen Durchgang

gen der Handlungssteuerung von besonderer Bedeutung sind; de Kleijn et al. 2014).

Aber auch die Art der theoretischen Annäherung verändert sich zunehmend. Eine beträchtliche Zahl der hier diskutierten Untersuchungen ging von einem eher übersichtlich gestrickten Rahmenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung aus, in dem auf Stufen der Reizverarbeitung die Stufen der Reaktionsauswahl, der Reaktionsprogrammierung und der motorischen Ausführung folgten. Es ist abzusehen, dass sich dieser theoretische Rahmen in verschiedener Hinsicht als zu starr erweisen wird.

Erstens zeigt sich zunehmend, dass der Fluss der Information nicht nur von *Input* zu *Output* verläuft, sondern auch umgekehrt Prozesse der Handlungsplanung und -kontrolle die Wahrnehmung beeinflussen (▶ Kap. 22). Zweitens ist der Übergang von Reaktionsauswahl zur Ausführung offenbar fließender, als Stufenmodelle suggerieren (z. B. Ghez et al. 1990; Hommel 1996b), sodass sie wahrscheinlich dynamischeren Modellen weichen werden, die Handlungsplanung als zeitlich erstreckten Prozess der zunehmend präziseren Spezifikation von Bewegungszielen charakterisieren. Drittens werden sich auch die Vorstellungen über die corticale Repräsentation von Handlungen und Handlungsplänen verändern. Es ist zu vermuten, dass die Idee einer anatomisch auf primär- und supplementär-motorische Areale begrenzten Programmierung zugunsten einer alternativen Konzeption der über viele, unter Umständen auch bislang nicht als „motorisch“ verstandenen Hirnbereiche verteilten neuronalen Kontrolle aufgegeben wird (Requin 1992; Stoet und Hommel 1999; Wickens et al. 1994). Viertens ist zu erwarten, dass die Annahmen zur Ursache von Engpässen in der Informationsverarbeitung zunehmend spezifischer werden und so über die bloße Demonstration und Lokalisierung der Verarbeitungsprobleme hinausgehend auch deren funktionale Logik, unter Umständen sogar ihren Nutzen begreiflich machen. Fünftens schließlich ist wahrscheinlich, dass der Begriff der exekutiven Kontrolle ein ähnliches Schicksal erleidet wie der der Aufmerksamkeit. Das heißt, er wird sich zunehmend zersplittern, auf immer mehr, immer verschiedenere Phänomene und Kontrollfunktionen angewandt werden – schließlich auf zu viele, um auf einer subpersonalen Analyseebene noch irgendetwas Zusammenhängendes sinnvoll beschreiben zu können. Aber angesichts der enormen Komplexität, Flexibilität und Adaptivität menschlichen Handelns ist auch kaum zu erwarten, dass es durch ein einzelnes, separierbares Systemmodul gesteuert wird.

18.8 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Zielgerichtete Bewegungen werden durch temporäre kognitive Strukturen gesteuert, die antizipative Repräsentationen der intendierten Handlungseffekte mit entsprechenden zieldienlichen motorischen Einstellungen verknüpfen.
- Handlungspläne können ohne unmittelbares Feedback ausgeführt, wahrscheinlich aber nicht erworben werden.
- Die Implementierung eines Handlungsplanes erfolgt in drei, sich unter Umständen zeitlich überlappenden Schritten. Erstens werden die Merkmale der intendierten Handlung selegiert – ein Prozess, dessen Zeitbedarf zumindest bei ungeübten Handlungen mit der Anzahl der Merkmale, der Komplexität und erforderlichen Präzision der geplanten Bewegungen zunimmt. Zweitens werden die selegierten Elemente in einen kohärenten Plan integriert, der drittens schließlich initiiert wird.
- Die Art der Handlungsplanung verändert sich mit der Übung, vor allem bei längeren Handlungssequenzen. Während zunächst oft alle erforderlichen Handlungsschritte bereits vor Bewegungsbeginn geplant werden, besteht bei geübten Sequenzen die Möglichkeit und Neigung zur zeitlich überlappenden Planung, d. h., die jeweils folgenden Schritte werden während der Ausführung des vorhergehenden Schrittes geplant und implementiert.
- Mehrfachtätigkeiten erschweren die Planung und Kontrolle von Handlungen in verschiedener Hinsicht. Erstens erfordern sie eine der eigentlichen Handlung vorausgehende Entscheidung über die den jeweiligen Teilhandlungen zu allozierenden kognitiven Ressourcen. Zweitens können sie zu Verarbeitungsengpässen führen; so scheint die Auswahl einer Reaktion den gleichzeitigen Abruf von expliziter Gedächtnisinformation und die gleichzeitige Planung oder Initiierung einer anderen Handlung schwer bis unmöglich zu machen.
- Der Wechsel zwischen verschiedenen Aufgaben kann eine Reihe von Planungs- und Kontrollproblemen hervorrufen. Erstens können häufige Wechsel zu einer Verringerung der Vorbereitung auf die jeweilige Aufgabe führen, was unter Umständen den Abruf zielbezogener Repräsentationen und Reiz-Reaktions-Regeln, die Optimierung der Aufmerksamkeitseinstellung und/oder die effektive Unterdrückung irrelevanter Information beeinträchtigt. Zweitens können Kontrollstrukturen vorangegangener Aufgaben nicht sofort vollständig gelöscht werden, sodass sie zumindest bei raschen Wechseln mit der Kontrolle nachfolgender Aufgaben interferieren. Drittens schließlich erfordert die Umstellung auf eine neue Aufgabe zumeist eine kurze Warmlaufphase, um die aufgabenrelevanten kognitiven Repräsentationen an die neue Situation anzupassen.

Schlüsselbegriffe

Antizipationseffekt (*effect of anticipation*) Effekte der kognitiven Vorbereitung auf ein Ereignis vor dessen physischer Realisierung; nur indirekt erschließbar.

Aufgaben-Cue *(task cue)* Typischerweise vor einem relevanten Reiz angebotene Information über die aktuellen Reiz-Reaktions-Regeln.

Aufgabenwechsel *(task switch)* Wechsel zwischen Tätigkeiten, die in der Regel verschiedene Zuordnungen von Reizen und Reaktionen verlangen.

Doppelaufgabe *(dual task)* Aufgabe, die die zeitlich überlappende Bearbeitung zweier verschiedener, meist durch separate Reiz- und Reaktionssets definierte Teilaufgaben erfordert.

Engpassmodell (*bottleneck model*) Modelltyp, demzufolge Leistungsdefizite durch bestimmte, lokalisierbare Verarbeitungsstufen entstehen, die nur seriell arbeiten und daher Informationsstaus auslösen können.

Exekutive Funktionen (*executive functions*) Sammelbegriff für diejenigen kognitiven Prozesse, die für die zielbezogene Kontrolle anderer, aufgabenspezifischer Prozesse verantwortlich sind.

Handlung (*action*) Gesamtheit der auf ein intendiertes Ziel gerichteten Bewegungen.

Handlungseffekt (*action effect*) Jede wahrnehmbare, mittelbare oder unmittelbare Konsequenz einer Handlung.

Handlungsinitiierung *(action initiation)* Prozess, der die schließliche Ausführung einer geplanten Handlung besorgt.

Handlungsplan (*action plan*) Kognitive Kontrollstruktur zur Realisierung intendierter Handlungseffekte.

Handlungssequenz (*action sequence*) Handlung, die aus mehreren, wie auch immer definierten Teilschritten besteht, z. B. das Zubereiten einer Tasse Kaffee.

Ideomotorisches Prinzip *(ideomotor principle)* Annahme, der zufolge Handlungen durch das Denken an oder Antizipieren von durch diese Handlung produzierte, sensorische Effekte hervorgebracht und gesteuert werden.

Integration (*integration*) Prozess des Zusammenfügens (z. B. cortical) verteilter Information zu einer kohärenten Struktur.

Komplexitätseffekt (*effect of complexity*) Auswirkungen des Umfangs oder des Detailreichtums einer Handlung auf die für ihre Planung erforderliche Zeit.

Koartikulation (*coarticulation*) Veränderung der Artikulation eines Lautes oder (metaphorisch gesprochen) einer manuellen Bewegung infolge nachfolgender, offenbar antizipierter Laute oder anderer Bewegungselemente.

Merkmalsbindung (*feature binding*) Prozess der Markierung und wechselseitigen Referenzierung von kognitiven Codes, die sich auf dasselbe Ereignis beziehen.

Motorisches Programm ***(motor program)*** Ursprünglich verstanden als gespeichertes Set von Muskelkommandos; in letzter Zeit eher als allgemeiner Begriff für kognitive Kontrollstrukturen zur Realisierung von Bewegungen (s. Handlungsplan).

Motorisches Schema ***(motor schema)*** Eine Art flexibles, nur wenige, invariante Bestandteile einer Handlung festlegende motorische Kontrollstruktur, die durch Parameter ergänzt werden muss.

Parameter (*parameter*) Im Zusammenhang mit der motorischen Programmierung verwendeter Begriff zur Bezeichnung von „freien Stellen" innerhalb erworbener Handlungsprogramme oder Schemata, mit deren Hilfe Programme an veränderliche situative Gegebenheiten angepasst werden können.

Psychologische Refraktärperiode (*psychological refractory period*, PRP) Verminderung der Leistung in einer Aufgabe, wenn sie unmittelbar nach oder gar während einer anderen Aufgabe ausgeführt werden soll. Ursprünglich als Erklärungsbegriff gedacht dient er mittlerweile zur Kennzeichnung empirisch festgestellter Mehrfachaufgabenkosten.

Reihenfolgefehler ***(sequence error)*** Fehler bei sequenziellen Handlungen, der in der Ausführung der korrekten Handlungsschritte in der falschen Reihenfolge besteht.

Reiz-Reaktions-Kompatibilität (*stimulus-response compatibility*) Besonders gute Passung bestimmter, z. B. räumlich korrespondierender Reize und Reaktionen; sichtbar durch besonders gute Leistungen bei diesen, im Vergleich zu anderen Reiz-Reaktions-Paarungen.

Reiz-Reaktions-Übersetzung (*stimulus-response translation*) Hypothetische Verarbeitungsstufe, die für die Aktivierung von Reaktionen nach Maßgabe der vorliegenden Reizinformation und der gültigen Reiz-Reaktions-Regeln sorgt.

Rückmeldung ***(feedback)*** Information über eigene Aktivitäten, z. B. über die sensorischen Konsequenzen der Ausführung einer Bewegung.

Vorinformation ***(precue)*** Ereignis, das vor der Präsentation eines wahrzunehmenden Reizes oder der Ausführung einer Reaktion verfügbar ist bzw. präsentiert wird und (zumeist nur zum Teil) über deren zu erwartende Eigenschaften informiert.

Wechselkosten (*switching costs*) Leistungsdefizite, die durch das Wechseln zu einer neuen Aufgabe entstehen, z. B. die Differenz zwischen der Reaktionszeit nach einem Aufgabenwechsel und der Reaktionszeit nach einer Aufgabenwiederholung.

Ziel (*goal*) Angestrebter Zustand einer Person (z. B. Emotionen), in der Umwelt (z. B. ein gewünschtes Ereignis) oder hinsichtlich der Person-Umwelt-Beziehung.

Weiterführende Literatur

Engel, A. K., Roelfsema, P. R., Fries, P., Brecht, M., & Singer, W. (1997). *Role of the temporal domain for response selection and perceptual binding*. Cerebral Cortex, 7, 571–582. (Wichtiger Artikel, der die mögliche Rolle zellulärer Synchronisation bei der Integration in Wahrnehmung und Handlung diskutiert.)

Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe. (Ausführliche Einführung in Fragen des Zusammenhangs von Wahrnehmung und Handlung anhand einer Vielzahl psychologischer Phänomene und Probleme.)

Hommel, B., & Nattkemper, D. (2011). *Handlungspsychologie: Planung und Kontrolle intentionalen Handelns*. Springer: Heidelberg. (Lehrbuch zu den verschiedensten Aspekten der Handlungssteuerung)

Jeannerod, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self*. Oxford: Oxford University Press. (Einführung in die Frage, wie Handlungen repräsentiert sind, mit besonderem Fokus auf antizipative Aspekte der Handlungssteuerung.)

Kiesel, A., Steinhauser, Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A.M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching - A review. *Psychological Bulletin,* 136, 849-874. (Aktueller Überblick über die Literatur zum Aufgabenwechsel.)

Meyer, D. E., & Kieras, E. D. (1997). *A computational theory of executive cognitive processes and multiple task performance: Part 1, Basic mechanisms*. Psychological Review, 104, 3–75. (Skizze eines umfassenden Modells menschlicher Handlungskontrolle mit Betonung auf Doppeltätigkeiten.)

Pashler, H. (1994). *Dual-task interference in simple tasks: Data and theory*. Psychological Bulletin, 116, 220–244. (Überblicksartikel von Arbeiten zur Kontrolle von Doppeltätigkeiten.)

Passingham, R. (1993). *The frontal lobes and voluntary action*. Oxford University Press. (Allgemeiner, breiter Überblick von Arbeiten und theoretischen Modellen der Funktion corticaler Strukturen bei der Handlungsplanung.)

Prinz, W. (2014) (Hrsg.), *Experimentelle Handlungsforschung*. Kohlhammer. (Bündel aktueller Übersichten über verschiedene Aspekte der Handlungssteuerung.)

Prinz, W., Beisert, M., & Herwig, A. (Eds.), *Action science: Foundations of an emerging discipline*. Cambridge, MA: MIT Press. (Bündel interessanter Texte zu verschiedenen Fragen der Handlungssteuerung und Handlungskontrolle.)

Rosenbaum, D. A. (2009). *Human motor control (2nd edition)*. San Diego, CA: Academic Press. (Lehrbuch mit einem Überblick einer Vielzahl von Arbeiten zur Programmierung menschlicher Handlungen.)

Webseiten

- http://actiontheory.free.fr/ – Information über philosophische Handlungstheorien.
- http://www.baddesigns.com/ – Beispiele von Alltagsdesign, das zu Handlungsfehlern einlädt.
- http://www.dualtask.org/ – Demonstrationen von Doppelaufgabenexperimenten und Verweise auf Berichte über Doppelaufgaben aus US-amerikanischen Tageszeitungen.

- http://psychclassics.yorku.ca/James/Principles/prin26.htm – W. James' wichtiges Kapitel über den Willen.
- http://www.umich.edu/~bcalab/multitasking.html – Sammlung einiger Radio- und Fernsehinterviews und Berichte über Multitasking aus US-amerikanischen Tageszeitungen.
- http://robohow.eu/ – Informationen über ein EU Projekt, das zum Ziel hat, einen humanoiden Roboter mit menschlichen Handlungsfertigkeiten auszustatten.

Literatur

Abeles, M. (1991). *Corticonics: Neural circuits of the cerebral cortex*. Cambridge: Cambridge University Press.

Ach, N. (1910). *Über den Willensakt und das Temperament*. Leipzig: Quelle und Meyer.

Aglioti, S., Goodale, M. A., & DeSouza, J. F. X. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, *5*, 679–685.

Allport, D. A. (1993). Attention and control: Have we been asking the wrong questions? A critical review of twenty-five years. In D. E. Meyer, & S. Kornblum (Hrsg.), *Attention and performance XIV* (S. 183–218). Cambridge, MA: MIT Press.

Allport, D. A., & Wylie, G. (2000). 'Task-switching', stimulus-response bindings and negative priming. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of Cognitive Processes*. Cambridge, MA: MIT Press.

Allport, D. A., Styles, E. A., & Hsieh, S. (1994). Shifting intentional set: Exploring the dynamic control of tasks. In C. Umiltá, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 421–452). Cambridge, MA: MIT Press.

Aschersleben, G., Stenneken, P., Cole, J., & Prinz, W. (2002). Timing mechanisms in sensorimotor synchronization. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention und performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 227–244). Oxford: Oxford University Press.

Baars, B. J. (1980). Eliciting predictable speech errors in the laboratory. In V. A. Fromkin (Hrsg.), *Errors in linguistic performance: Slips of the tongue, ear, pen, and hand* (S. 307–318). New York: Academic Press.

Baars, B. J. (1988). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bard, C., Paillard, J., Lajoie, Y., Fleury, M., Teasdale, N., Forget, R., & Lamarre, Y. (1992). Role of the afferent information in the timing of motor commands: A comparative study with a deafferent patient. *Neuropsychologia*, *30*, 201–206.

Bialystok, E. (2001). *Bilingualism in development: Language, literacy, and cognition*. Cambridge, England: Cambridge University Press.

Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive Affective und Behavioral Neuroscience*, *7*, 356–366.

Botvinick, M. M., & Plaut, D. C. (2004). Doing without schema hierarchies: a recurrent connectionist approach to routine sequential action and its pathologies. *Psychological Review*, *111*, 395–429.

Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, *108*, 624–652.

Bridgeman, B. (2002). Attention and visually guided behavior in distinct systems. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention und performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 120–135). Oxford: Oxford University Press.

Bridgeman, B., Kirch, M., & Sperling, A. (1981). Segregation of cognitive and motor aspects of visual function using induced motion. *Perception and Psychophysics*, *29*, 336–342.

Brown, P., Salenius, S., Rothwell, J. C., & Hari, R. (1998). Cortical correlate of the Piper rhythm in humans. *Journal of Neurophysiology*, *80*, 2911–2917.

Bullock, D., & Grossberg, S. (1988). Neural dynamics of planned arm movements: Emergent invariants and speed-accuracy properties during trajectory formation. *Psychological Review*, *95*, 49–90.

Burgess, P. W. (2000). Strategy application disorder: The role of the frontal lobes in human multitasking. *Psychological Research*, *63*, 279–288.

Butler, J., & Rovee-Collier, C. (1989). Contextual gating of memory retrieval. *Developmental Psychobiology*, *22*, 533–552.

Carrier, L. M., & Pashler, H. (1995). Attentional limits in memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 1339–1348.

Chugani, H. T. (1994). Development of regional brain glucose metabolism in relation to behavior and plasticity. In G. Dawson, & K. Fischer (Hrsg.), *Human behavior and the developing brain* (S. 153–175). New York: Guilford.

Clark, A. (1999). An embodied cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, *3*, 345–351.

Coles, M. G. H., Gratton, G., Bashore, T. R., Eriksen, C. W., & Donchin, E. (1985). A psychophysiological investigation of the continuous flow model of human information processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *11*, 529–553.

Décary, A., & Richer, F. (1995). Response selection deficits in frontal excisions. *Neuropsychologia*, *33*, 1243–1253.

Decety, & Grèzes, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Neuroscience*, *3*, 172–178.

Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J. C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature*, *371*, 600–602.

Deecke, L., Grozinger, B., & Kornhuber, H. H. (1976). Voluntary finger movement in man: Cerebral potentials and theory. *Biological Cybernetics*, *23*, 99–119.

De Jong, R. (1993). Multiple bottlenecks in overlapping task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *19*, 965–980.

De Jong, R. (2000). An intention-activation account of residual switch costs. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 357–376). Cambridge, MA: MIT Press.

De Jong, R., Berendsen, E., & Cools, R. (1999). Goal neglect and inhibitory limitations: Dissociable causes of interference effects in conflict situations. *Acta Psychologica*, *101*, 379–394.

Dell, G. S. (1986). A spreading activation theory of retrieval in sentence production. *Psychological Review*, *93*, 283–321.

Dell, G. S., Burger, L. K., & Svec, W. R. (1997). Language production and serial order: A functional analysis and a model. *Psychological Review*, *104*, 123–147.

Dewey, J. (1896). The reflex arc concept in psychology. *Psychological Review*, *3*, 357–370.

DeYoe, E. A., & Van Essen, D. C. (1988). Concurrent processing streams in monkey visual cortex. *Trends in Neuroscience*, *11*, 219–226.

Diamond, A. (1985). Development of the ability to use recall to guide action, as indicated by infants' performance on AB. *Child Development*, *56*, 868–883.

Diamond, A. (1990). Developmental time course in human infants and infant monkeys, and the neural bases of inhibitory control of reaching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *608*, 637–676.

Diamond, A., & Gilbert, J. (1989). Development as progressive inhibitory control of action: Retrieval of a contiguous object. *Cognitive Development*, *4*, 223–249.

Diamond, A., & Goldman-Rakic, P. S. (1986). Comparative development in human infants and infant rhesus monkeys of cognitive functions that depend on prefrontal cortex. *Society for Neuroscience Abstracts*, *12*, 742.

Dixon, P. (1981). Algorithms and selective attention. *Memory and Cognition*, *9*, 177–184.

Dixon, P., & Just, M. A. (1986). A chronometric analysis of strategy preparation in choice reactions. *Memory and Cognition*, *14*, 488–500.

Donkelaar, P. van, & Franks, I. M. (1991). Preprogramming vs. on-line control in simple movement sequences. *Acta Psychologica*, *77*, 1–19.

Drewe, E. A. (1975). An experimental investigation of Luria's theory on the effects of frontal lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, *13*, 421–429.

Dutta, A., Schweickert, R., Choi, S., & Proctor, R. W. (1995). Cross-task cross talk in memory and perception. *Acta Psychologica*, *90*, 49–62.

Eenshuistra, R. M., Weidema, M. A., & Hommel, B. (2004). Development of the acquisition and control of action-effect associations. *Acta Psychologica*, *115*, 185–209.

Egner, T., & Hirsch, J. (2005). Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information. *Nature Neuroscience*, *8*, 1784–1790.

Elsner, & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 229–240.
Elsner, B., Hommel, B., Mentschel, C., Drzezga, A., Prinz, W., Conrad, B., & Siebner, H. (2002). Linking actions and their perceivable consequences in the human brain. *NeuroImage*, *17*, 364–372.
Engel, A. K., Roelfsema, P. R., Fries, P., Brecht, M., & Singer, W. (1997). Role of the temporal domain for response selection and perceptual binding. *Cerebral Cortex*, *7*, 571–582.
Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception and Psychophysics*, *16*, 143–149.
Eriksen, B. A., Eriksen, C. W., & Hoffman, J. E. (1986). Recognition memory and attentional selection: Serial scanning is not enough. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *12*, 476–483.
Eriksen, C. W., Pollack, M. D., & Montague, W. E. (1970). Implicit speech: Mechanism in perceptual encoding? *Journal of Experimental Psychology*, *84*, 502–507.
Eriksen, C. W., Coles, M. G. H., Morris, L. R., & O'Hara, W. P. (1985). An electromyographic examination of response competition. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *23*, 165–168.
Estes, W. K. (1972). An associative basis for coding and organization in memory. In A. W. Melton, & E. Martin (Hrsg.), *Coding processes in human memory* (S. 161–190). New York: Wiley.
Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 2608–2611.
Fagen, J. W., Rovee-Collier, C. K., & Kaplan, M. G. (1976). Psychophysical scaling of stimulus similarity in 3-month-old infants and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, *22*, 272–281.
Fagot, C., & Pashler, H. (1992). Making two responses to a single object: Implications for the central attentional bottleneck. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 1058–1079.
Fimm, B., Bartl, G., Zimermann, P., & Wallesch, C.-W. (1994). Different mechanisms underly shifting set on external and internal cues in Parkinson's disease. *Brain and Cognition*, *25*, 287–304.
Fischer, R., & Hommel, B. (2012). Deep thinking increases task-set shielding and reduces shifting flexibility in dual-task performance. *Cognition*, *123*, 303–307.
Fischman, M. G. (1984). Programming time as a function of number movement parts and changes in movement direction. *Journal of Motor Behavior*, *16*, 405–423.
Fischman, M. G., & Lim, C. (1991). Influence of extended practice on programming time, movement time, and transfer in simple target-striking responses. *Journal of Motor Behavior*, *23*, 39–50.
Fournier, L. R., Wiediger, M. D., McMeans, R., Mattson, P. S., Kirkwood, J., & Herzog, T. (2010). Holding a manual response sequence in memory can disrupt vocal responses that share semantic features with the manual response. *Psychological Research*, *74*, 359–369.
Fromkin, V. A. (Hrsg.). (1980). *Errors in linguistic performance: Slips of the tongue, ear, pen, and hand*. New York: Academic Press.
Gallistel, C. R. (1980). *The organization of action*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Garcia-Colera, A., & Semjen, A. (1987). The organization of rapid movement sequences as a function of sequence length. *Acta Psychologica*, *66*, 237–250.
Garcia-Colera, A., & Semjen, A. (1988). Distributed planning of movement sequences. *Journal of Motor Behavior*, *20*, 341–367.
Garrett, M. F. (1982). Production of speech: Observations from normal and pathological language use. In A. W. Ellis (Hrsg.), *Normality and pathology in cognitive functions* (S. 19–76). London: Academic Press.
Gentner, D. R. (1983). The acquisition of typewriting skill. *Acta Psychologica*, *54*, 233–248.
Gentner, D. R., Grudin, J. und Conway, E. (1980). Finger movements in transcription typing. (Technical Report 8001) La Jolla, CA: University of California, San Diego, Center for Human Information Processing.
Georgopoulos, A. P. (1990). Neurophysiology of reaching. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (S. 227–263). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 31/2–7 years old on a Stroop-like day-night test. *Cognition*, *53*, 129–153.
Ghez, C., Hening, W., & Favilla, M. (1990). Parallel interacting channels in the initiation and specification of motor response features. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (S. 265–293). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Gibson, J. J. (1941). A critical review of the concept of set in contemporary experimental psychology. *Psychological Bulletin*, *38*, 781–817.
Goodman, D., & Kelso, J. A. S. (1980). Are movements prepared in parts? Not under compatible (naturalized) conditions. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 475–495.
Gopher, D. (1996). Attention control: Explorations of the work of an executive controller. *Cognitive Brain Research*, *5*, 23–38.
Gopher, D. (1984). S-Oh-R: Of stages! Oh resources! In A. F. Sanders, & W. Prinz (Hrsg.), *Cognition and motor processes* (S. 231–253). Berlin: Springer.
Greeno, J. G., & Simon, H. A. (1974). Processes for sequence production. *Psychological Review*, *81*, 187–198.
Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideomotor mechanism. *Psychological Review*, *77*, 73–99.
Greenwald, A. G. (1972). On doing two things at once: Time sharing as a function of ideomotor compatibility. *Journal of Experimental Psychology*, *94*, 52–57.
Greenwald, A. G. (2003). On doing two things at once: III. Confirmation of perfect timesharing when simultaneous tasks are ideomotor compatible. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 859–868.
Greenwald, A. G. (2004). On doing two things at once: IV. Necessary and sufficient conditions: Rejoinder to Lien, Proctor, and Ruthruff (2003). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*, 632–636.
Grudin, J. (1983). Non-hierarchic specification of components in transcription typewriting. *Acta Psychologica*, *54*, 249–262.
Harless, E. (1861). Der Apparat des Willens. *Zeitschrift fuer Philosophie und philosophische Kritik*, *38*, 50–73.
Harrington, D. L., & Haaland, K. Y. (1987). Programming sequences of hand postures. *Journal of Motor Behavior*, *19*, 77–95.
Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a „memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, *31*, 448–458.
Heuer, H. (1981). Fast aiming movements with the left and right hand: Evidence for two-process theories of motor control. *Psychological Research*, *43*, 81–96.
Heuer, H. (1986). Über die Annahme relations-abhängiger Vorprogrammierung bei der Interpretation von Reaktionszeitexperimenten zur motorischen Vorbereitung. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, *33*, 563–586.
Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *4*, 11–26.
Hirst, W., & Kalmar, D. (1987). Characterizing attentional resources. *Journal of Experimental Psychology: General*, *116*, 68–81.
Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.
Hoffmann, J., Sebald, A., & Stöcker, C. (2001). Irrelevant response effects improve serial learning in serial reaction time tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*, 470–482.
Holender, D. (1980). Interference between a vocal and a manual response to the same stimulus. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Hrsg.), *Tutorials in motor behavior* (S. 421–431). Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
Holland, C., & Rathod, V. (2013). Influence of personal mobile phone ringing and usual intention to answer on driver error. *Accident Analysis und Prevention*, *50*, 793–800.
Hommel, B. (1996a). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, *59*, 176–186.
Hommel, B. (1996b). S-R compatibility effects without response uncertainty. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *49A*, 546–571.
Hommel, B. (1997). Toward an action-concept model of stimulus-response compatibility. In B. Hommel, & W. Prinz (Hrsg.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (S. 281–320). Amsterdam: Elsevier.

Hommel, B. (1998a). Automatic stimulus-response translation in dual-task performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 1368–1384.

Hommel, B. (1998b). Event files: Evidence for automatic integration of stimulus-response episodes. *Visual Cognition*, *5*, 183–216.

Hommel, B. (2000a). Intentional control of automatic stimulus-response translation. In Y. Rossetti, & A. Revonsuo (Hrsg.), *Interaction between dissociable conscious and nonconscious processes* (S. 223–244). Amsterdam: John Benjamins.

Hommel, B. (2000b). The prepared reflex: Automaticity and control in stimulus-response translation. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 247–273). Cambridge, MA: MIT Press.

Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*, *73*, 512–526.

Hommel, B. (2010). Grounding attention in action control: The intentional control of selection. In B. J. Bruya (Hrsg.), *Effortless attention: A new perspective in the cognitive science of attention and action* (S. 121–140). Cambridge, MA: MIT Press.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849–878.

Hull, C. L. (1931). Goal attraction and directing ideas conceived as habit phenomena. *Psychological Review*, *38*, 487–506.

Hulstijn, W., & Galen, G. P. van (1983). Programming in handwriting: Reaction time and movement time as a function of sequence length. *Acta Psychologica*, *54*, 23–49.

Hulstijn, W., & Galen, G. P. van (1988). Levels of motor programming in writing familiar and unfamiliar symbols. In A. M. Colley, & J. K. Beech (Hrsg.), *Cognition and action in skilled behavior* (S. 65–85). Amsterdam: North-Holland, Elsevier.

Hyman, R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, *45*, 188–196.

Inhoff, A. W. (1986). Preparing sequences of saccades under choice reaction conditions: Effects of sequence length and context. *Acta Psychologica*, *61*, 211–228.

Ivry, R. B., Franz, E. A., Kingstone, A., & Johnston, J. C. (1998). The psychological refractory period effect following callosotomy: Uncoupling of lateralized response codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 463–480.

James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York, NY: Dover.

Jeannerod, M. (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural objects. In J. Long, & A. Baddeley (Hrsg.), *Attention and performance IX* (S. 153–169). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Jeannerod, M. (1984). The contribution of open-loop and closed-loop control modes in prehension movements. In S. Kornblum, & J. Requin (Hrsg.), *Preparatory states and processes: Proceedings of the franco-american conference* (S. 323–337). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, *17*, 187–245.

Jeannerod, M., & Biguer, B. (1982). Visuomotor mechanisms in reaching within extrapersonal space. In D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of visual behavior* (S. 387–409). Cambridge: MIT Press.

Jersild, A. T. (1927). Mental set and shift. *Archives of Psychology*, *89*.

Jolicœur, P. (1999). *Capacity demands of accessing short-term memory*. Paper presented at the Ninth Annual Meeting of the Canadian Society for Brain, Behaviour, and Cognitive Science, Edmonton, Alberta, Canada, June 18–19.

Jolicœur, P., & Dell'Acqua, R. (1998). The demonstration of short-term consolidation. *Cognitive Psychology*, *36*, 138–202.

Jolicœur, P., Dell'Acqua, R., & Crebolder, J. (2000). Multitasking performance deficits: Forging some links between the attentional blink and the psychological refractory period. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 309–330). Cambridge, MA: MIT Press.

Jolicœur, P., Tombu, M., Oriet, C., & Stevanovski, B. (2002). From perception to action: Making the connection. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention und performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 558–586). Oxford: Oxford University Press.

Kachergis, G., Wyatte, D., O'Reilly, R. C., Kleijn, R. de, & Hommel, B. (2014). A continuous time neural model for sequential action. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *369*, 20130623. doi:10.1098/rstb.2013.0623).

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Kalaska, J. F., & Hyde, M. L. (1985). Area 4 and area 5: Differences between the load direction-dependent discharge variability of cells during active postural fixation. *Experimental Brain Research*, *59*, 197–202.

Kalnins, I. V., & Bruner, J. S. (1973). The coordination of visual observation and instrumental behavior in early infancy. *Perception*, *2*, 307–314.

Karlin, L., & Kerstenbaum, R. (1968). Effects of number of alternatives on the psychological refractory period. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *20*, 167–178.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, *70*, 387–403.

Keele, S. W., & Posner, M. I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, *77*, 155–158.

Keele, S. W., Cohen, A., & Ivry, R. (1990). Motor programs: Concepts and issues. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII: Motor representation and control* (S. 77–110). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, *303*, 1023–1026.

Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M., & Koch, I. (2010). Control and interference in task switching – A review. *Psychological Bulletin*, *136*, 849–874.

Klapp, S. T., & Wyatt, E. P. (1976). Motor programming within a sequence of resposes. *Journal of Motor Behavior*, *8*, 19–26.

Kleijn, R. de, Kachergis, G., & Hommel, B. (2014). Everyday robotic action: Lessons from human action control. *Frontiers in Neurorobotics*, *8*, 13.

Kluwe, R. H. (1997). Intentionale Steuerung kognitiver Aktivität. *Kognitionswissenschaft*, *6*, 53–69.

Kolb, B., & Whishaw, I. Q. (1990). *Neuropsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Kornbrot, D. E. (1989). Organisation of keying skills: The effect of motor complexity and number of units. *Acta Psychologica*, *70*, 19–41.

Kray, J., & Lindenberger, U. (2000). Adult age differences in task switching. *Psychology and Aging*, *15*, 126–147.

Kristeva-Feige, R., Feige, B., Makeig, S., Ross, B., & Elbert, T. (1993). Oscillatory brain activity during a motor task. *NeuroReport*, *4*, 1291–1294.

Kühn, S., Keizer, A., Rombouts, S. A. R. B., & Hommel, B. (2011). The functional and neural mechanism of action preparation: Roles of EBA and FFA in voluntary action control. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 214–220.

Kutas, M., & Donchin, E. (1980). Preparation to respond as manifested by movement-related brain potentials. *Brain Research*, *202*, 95–115.

Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American Journal of Physiology*, *43*, 169–194.

Lashley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Hrsg.), *Cerebral mechanisms in behavior* (S. 112–146). New York: John Wiley und Sons.

Lee, T. D., Elliott, D., & Carnahan, H. (1987). The preparation of actions and parameters of action: A fixed or variable process? *Acta Psychologica*, *66*, 83–102.

Leonard, J. A. (1958). Partial advance information in a choice reaction task. *Genetic Psychology*, *49*, 89–96.

Lépine, D., Glencross, D., & Requin, J. (1989). Some experimental evidence for and against a parametric conception of movement programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 347–362.

Lewin, K. (1922). Das Problem der Willensmessung und das Grundgesetz der Assoziation II. *Psychologische Forschung*, *2*, 65–140.

Lhermitte, F. (1983). „Utilization behaviour" and its relation to lesions of the frontal lobes. *Brain*, *106*, 237–255.

Livesey, D. J., & Morgan, G. A. (1991). The development of response inhibition in 4- and 5-year-old children. *Australian Journal of Psychology*, *43*, 133–137.

Logan, G. D. (1978). Attention in character-classification tasks: Evidence for the automaticity of component stages. *Journal of Experimental Psychology: General*, *107*, 32–63.

Logan, G. D. (1980). Short-term memory demands of reaction-time tasks that differ in complexity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *6*, 375–389.

Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, *95*, 492–527.

Logan, G. D., & Bundesen, C. (2003). Clever homunculus: Is there an endogenous act of control in the explicit task-cuing procedure? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *29*, 575–599.

Logan, G. D., & Burkell, J. (1986). Dependence and independence in responding to double stimulation: A comparison of stop, change, and dual-task paradigms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *12*, 549–563.

Logan, G. D., & Schulkind, M. D. (2000). Parallel memory retrieval in dual-task situations: I. Semantic memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*, 1072–1090.

Lotze, R. H. (1852). *Medicinische Psychologie oder die Physiologie der Seele*. Leipzig: Weidmann'sche Buchhandlung.

Luria, A. R. (1961). *The role of speech in the regulation of normal and abnormal behavior*. New York: Pergamon.

Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. New York: Basic.

MacKay, D. G. (1987). *The organization of perception and action*. New York: Springer.

MacKay, W. A. (1997). Synchronized neuronal oscillations and their role in motor processes. *Trends in Cognitive Sciences*, *1*, 176–183.

MacNeilage, P. F. (1970). Motor control of serial ordering of speech. *Psychological Review*, *77*, 182–196.

Malsburg, C. von der (1981). *The correlation theory of brain function. Internal report*. Göttingen: Max-Planck Institute for Biophysical Chemistry.

Malsburg, C. von der (1995). Binding in models of perception and brain function. *Current Opinion in Neurobiology*, *5*, 520–526.

Mayr, U., & Keele, S. W. (2000). Changing internal constraints on action: The role of backward inhibition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *129*, 4–26.

Mayr, U., & Kliegl, R. (2000). Task-set switching and long-term memory retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *26*, 1124–1140.

McCann, R. S., & Johnston, J. C. (1992). Locus of the single-channel bottleneck in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 471–484.

McIntosh, R. D., & Schenk, T. (2009). Two visual streams for perception and action: current trends. *Neuropsychologia*, *47*, 1391–1396.

Mehta, B., & Schaal, S. (2002). Forward models in visuomotor control. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 942–953.

Meiran, N. (1996). Reconfiguration of processing mode prior to task performance. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *22*, 1423–1442.

Meiran, N. (2000a). Reconfiguration of stimulus task-sets and response task-sets during task-switching. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 377–399). Cambridge, MA: MIT Press.

Meiran, N. (2000b). Modeling cognitive control in task-switching. *Psychological Research*, *63*, 234–249.

Meiran, N., Chorev, Z., & Sapir, A. (2000). Component processes in task switching. *Cognitive Psychology*, *41*, 211–253.

Meiran, N., Hommel, B., Bibi, U., & Ben-Dov, I. (2002). Consciousness and control in task switching. *Consciousness und Cognition*, *11*, 10–33.

Melcher, T., Weidema, M., Eenshuistra, R. M., Hommel, B., & Gruber, O. (2008). The neural substrate of the ideomotor principle: An event-related fMRI analysis. *NeuroImage*, *39*, 1274–1288.

Meyer, D. E., & Gordon, P. C. (1985). Speech production: Motor programming of phonetic features. *Journal of Memory and Language*, *24*, 3–26.

Meyer, D. E., & Kieras, E. D. (1997a). A computational theory of executive cognitive processes and multiple task performance: Part 1, Basic mechanisms. *Psychological Review*, *104*, 3–75.

Meyer, D. E., & Kieras, D. E. (1997b). A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 2. Accounts of psychological refractory-period phenomena. *Psychological Review*, *104*, 749–791.

Meyer, D. E., Kieras, D. E., Lauber, E., Schumacher, E., Glass, J., Zurbriggen, E., Gmeind, L., & Apfelblat, D. (1995). Adaptive executive control: Flexible multiple-task performance without pervasive immutable response-selection bottlenecks. *Acta Psychologica*, *90*, 163–190.

Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart und Winston.

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. Oxford: University Press.

Mischel, H. N., & Mischel, W. (1983). The development of children's knowledge of self-control strategies. *Child Development*, *54*, 603–619.

Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neuroscience*, *6*, 414–417.

Monsell, S. (1986). Programming of complex sequences: Evidence from the timing of rapid speech and other productions. In H. Heuer, & C. Fromm (Hrsg.), *Generation and modulation of action patterns* (S. 72–86). Berlin: Springer.

Monsell, S. (1996). Control of mental processes. In V. Bruce (Hrsg.), *Unsolved mysteries of the mind* (S. 93–148). Hove: Erlbaum.

Monsell, S. (2003). Task switching. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*, 134–140.

Monsell, S., & Driver, J. (Hrsg.). (2000). *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes*. Cambridge, MA: MIT Press.

Münsterberg, H. (1889). *Beiträge zur experimentellen Psychologie*. Bd. 1. Freiburg: Mohr.

Murthy, V. N., & Fetz, E. E. (1992). Coherent 25- to 35-Hz oscillations in the sensorimotor cortex of awake behaving monkeys. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *89*, 5670–5674.

Murthy, V. N., & Fetz, E. E. (1996). Oscillatory activity in sensorimotor cortex of awake monkeys: Synchronization of local field potentials and relation to behavior. *Journal of Neurophysiology*, *76*, 3949–3967.

Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human information-processing system. *Psychological Review*, *86*, 214–255.

Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 435–448.

Netick, A., & Klapp, S. T. (1994). Hesitations in manual tracking: A single-channel limit in response programming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 766–782.

Neumann, O. (1987). Beyond capacity: A functional view of attention. In H. Heuer, & A. F. Sanders (Hrsg.), *Perspectives on perception and action* (S. 361–394). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Norman, D. A. (1981). Categorization of action slips. *Psychological Review*, *88*, 1–15.

Osman, A., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., Donchin, E., & Meyer, D. E. (1992). On the transmission of partial information: Inferences from movement-related brain research. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *18*, 217–232.

Owen, A. M., Stern, C. E., Look, R. B., Tracey, I., Rosen, B. R., & Petrides, M. (1993). Functional organization of spatial and nonspatial working memory processing within the human lateral frontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, *95*, 7721–7726.

Pashler, H. (1994a). Dual-task interference in simple tasks: Data and theory. *Psychological Bulletin*, *116*, 220–244.

Pashler, H. (1994b). Graded capacity-sharing in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 330–342.

Pashler, H. (1998). *The psychology of attention*. Cambridge: MIT Press.

Pashler, H., & Christian, C. (1996). Bottlenecks in planning and producing manual, vocal, and foot responses. Unveröffentlichtes Manuskript. http://www.pashler.com/Articles/techreport/Pashler_Christian_Techreport1994.pdf

Pashler, H., & Johnston, J. C. (1989). Chronometric evidence for central postponement in temporally overlapping tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *41A*, 19–45.

Passingham, R. (1993). *The frontal lobes and voluntary action*. Oxford: Oxford University Press.

Perret, E. (1974). The left frontal lobe of man and the suppression of habitual responses in verbal categorical behavior. *Neuropsychologia*, *12*, 323–330.

Pfurtscheller, G., Flotzinger, D., & Neuper, C. (1994). Differentiation between finger, toe and tongue movement in man based on 40 Hz EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *90*, 456–460.

Portier, S. J., & Galen, G. P. van (1992). Immediate vs. postponed visual feedback in practising a handwriting task. *Human Movement Science*, *11*, 563–592.

Portier, S. J., Galen, G. P. van, & Meulenbroek, R. G. J. (1990). Practice and the dynamics of handwriting performance: Evidence for a shift of motor programming load. *Journal of Motor Behavior*, *22*, 474–492.

Potter, J. M. (1980). What was the matter with Dr. Spooner? In V. A. Fromkin (Hrsg.), *Errors in linguistic performance* (S. 13–34). New York: Academic Press.

Povel, D., & Collard, R. (1982). Structural factors in patterned finger tapping. *Acta Psychologica*, *52*, 107–123.

Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1975). Corrective saccades: Dependence on retinal reafferent signals. *Vision Research*, *15*, 465–469.

Prablanc, C., & Pélisson, D. (1990). Gaze saccade orienting and hand pointing are locked to their goal by quick internal loops. In M. Jeannerod (Hrsg.), *Attention and performance XIII* (S. 653–676). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Prinz, W. (1987). Ideo-motor action. In H. Heuer, & A. F. Sanders (Hrsg.), *Perspectives on perception and action* (S. 47–76). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Prinz, W. (1997). Why Donders has led us astray. In B. Hommel, & W. Prinz (Hrsg.), *Theoretical issues in stimulus-response compatibility* (S. 247–267). Amsterdam: Elsevier.

Proctor, R. W., & Reeve, T. G. (1986). A caution regarding use of the hint procedure to determine whether partial stimulus information activates response. *Perception and Psychophysics*, *40*, 110–118.

Quinn, J. T., & Sherwood, D. E. (1983). Time requirements of changes in program and parameter variables in rapid ongoing movements. *Journal of Motor Behavior*, *15*, 163–178.

Rabbitt, P. (1997). Introduction: Methodologies and models in the study of executive function. In P. Rabbitt (Hrsg.), *Methodology of frontal and executive function* (S. 1–38). Hove: Psychology Press.

Requin, J. (1992). From action representation to movement control. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Hrsg.), *Tutorials in motor behavior II* (S. 159–179). Amsterdam: Elsevier.

Roberts, A. C., Robbins, T. W., & Weiskrantz, L. (1998). *The prefrontal cortex: Executive and cognitive functions*. Oxford: Oxford University Press.

Rochat, P., & Striano, T. (1999). Emerging self-exploration by 2-month-old infants. *Developmental Science*, *2*, 206–218.

Roelfsema, P. R., Engel, A. K., König, P., & Singer, W. (1997). Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas. *Nature*, *385*, 157–161.

Rogers, R. D., & Monsell, S. (1995). Cost of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *124*, 207–231.

Rogers, R. D., Sahakian, B. J., Hodges, J. R., Polkey, C. E., Kennard, C., & Robbins, T. W. (1998). Dissociating executive mechanisms of task control following frontal lobe damage and Parkinson's disease. *Brain*, *121*, 815–842.

Rohrer, D., Pashler, H., & Etchegaray, J. (1998). When two memories can and cannot be retrieved concurrently. *Memory and Cognition*, *26*, 731–739.

Rosenbaum, D. A. (1980). Human movement initiation: Specification of arm, direction and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, *109*, 444–474.

Rosenbaum, D. A. (1987). Successive approximations to a model of human motor programming. *Psychology of Learning and Motivation*, *21*, 153–182.

Rosenbaum, D. A. (1991). *Human motor control*. San Diego, CA: Academic Press.

Rosenbaum, D. A., & Kornblum, S. (1982). A priming method for investigating the selection of motor responses. *Acta Psychologica*, *51*, 223–243.

Rosenbaum, D. A., & Krist, H. (1993). Vorbereitung von Bewegungen. In H. Heuer, & S. W. Keele (Hrsg.), *Psychomotorik, Enzyklopädie der Psychologie, Serie Kognition* (Bd. 3, S. 3–85). Göttingen: Hogrefe.

Rosenbaum, D. A., Kenny, S. B., & Derr, M. A. (1983). Hierarchical control of rapid movement sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *9*, 86–102.

Rosenbaum, D. A., Inhoff, A. W., & Gordon, A. M. (1984). Choosing between movement sequences: A hierarchical editor model. *Journal of Experimental Psychology: General*, *113*, 372–393.

Rosenbaum, D. A., Weber, R. J., Hazelett, W. M., & Hindorff, V. (1986). The parameter remapping effect in human performance: Evidence from tongue twisters and finger fumblers. *Journal of Memory and Language*, *25*, 710–725.

Rosenbaum, D. A., Hindorff, V., & Munro, E. M. (1987). Scheduling and programming of rapid finger sequences: Tests and elaborations of the hierarchical editor model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 193–203.

Rosenbaum, D. A., Vaughan, J., Barnes, H. J., & Jorgensen, M. J. (1992). Time course of movement planning: Selection of hand grips for object manipulation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *18*, 1058–1073.

Rosenbaum, D. A., Loukopoulos, L. D., Meulenbroek, R. G. J., Vaughan, J., & Engelbrecht, S. (1995). Planning reaches by evaluating stored postures. *Psychological Review*, *102*, 28–67.

Rossetti, Y., & Pisella, L. (2002). Several 'vision for action' systems: A guide to dissociating and integrating dorsal and ventral functions. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention und performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (S. 62–119). Oxford: Oxford University Press.

Rossetti, Y., & Régnier, C. (1995). Representations in action: Pointing to a target with various representations. In B. G. Bardy, R. J. Bootsma, & Y. Guiard (Hrsg.), *Studies in perception and action III* (S. 233–236). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Roth, K. (1988). Investigations on the basis of the generalized motor programme hypothesis. In O. G. Meijer, & K. Roth (Hrsg.), *The motor-action controversy* (S. 261–288). Amsterdam: North-Holland.

Rothwell, J. C., Traub, M. M., Day, B. L., Obeso, J. A., Thomas, P. K., & Marsden, C. D. (1982). Manual motor performance in a deafferented man. *Brain*, *105*, 515–542.

Rovee, C. K., & Rovee, D. T. (1969). Conjugate reinforcement in infant exploratory behavior. *Journal of Experimental Child Psychology*, *8*, 33–39.

Rovee-Collier, C., Sullivan, M. W., Enright, M. K., Lucas, D., & Fagen, J. W. (1980). Reactivation of infant memory. *Science*, *208*, 1159–1161.

Rubinstein, J., Meyer, D. E., & Evans, J. E. (2001). Executive control of cognitive processes in task switching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 763–797.

Rumelhart, D. E., & Norman, D. A. (1982). Simulating a skilled typist: A study of skilled cognitive-motor performance. *Cognitive Science*, *6*, 1–36.

Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Van Selst, M. (2001). Why practice reduces dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 3–21.

Ruthruff, E., Johnston, J. C., & Remington, R. W. (2009). How strategic is the central bottleneck: Can it be overcome by trying harder? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*, 1368–1384.

Salenius, S., Salmelin, R., Neuper, C., Pfurtscheller, G., & Hari, R. (1996). Human cortical 40 Hz rhythm is closely related to EMG rhythmicity. *Neuroscience Letters*, *213*, 75–78.

Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, *53*, 61–97.

Sanes, J. N., & Donoghue, J. P. (1993). Oscillations in local field potentials of the primate motor cortex during voluntary movement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *90*, 4470–4474.

Sarno, K. J., & Wickens, C. D. (1995). Role of multiple resources in predicting time-sharing efficiency: Evaluation of three workload models in a multiple-task setting. *International Journal of Aviation Psychology*, *5*, 107–130.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*, 225–260.

Schwarz, G. (1933). Über Rückfälligkeit bei Umgewöhnung: 2. Über Handlungsganzheiten und ihre Bedeutung für die Rückfälligkeit. *Psychologische Forschung*, *18*, 143–190.

Schweickert, R. (1978). A critical path generalization of the additive factor method: Analysis of a Stroop task. *Journal of Mathematical Psychology*, *18*, 105–139.

Semjen, & Garcia-Colera, A. (1986). Planning and timing of finger-tapping sequences with a stressed element. *Journal of Motor Behavior*, *18*, 287–322.

Semjen, A., & Gottsdanker, R. (1991). Structural facilitation of movement sequence planning. In J. Requin, & G. E. Stelmach (Hrsg.), *Tutorials in motor neuroscience* (S. 397–412). Netherlands: Kluwer.

Shaffer, L. H. (1975). Control processes in typing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *27A*, 419–432.
Shaffer, L. H. (1991). Cognition and motor programming. In J. Requin, & G. E. Stelmach (Hrsg.), *Tutorials in motor neuroscience* (S. 371–383). Netherlands: Kluwer.
Sideaway, B. (1994). The interaction of response complexity and instructional set. *Journal of Motor Behavior*, *26*, 13–17.
Singer, W. (1994). The organization of sensory motor representations in the neocortex: A hypothesis based on temporal coding. In C. Umiltà, & M. Moscovitch (Hrsg.), *Attention and performance XV: Conscious and nonconscious information processing* (S. 77–107). Cambridge, MA: MIT Press.
Singer, W. (2011). Dynamic formation of functional networks by synchronization. *Neuron*, *69*, 191–193.
Smith, M. C. (1969). The effect of varying information on the psychological refractory period. *Acta Psychologica*, *30*, 220–231.
Spijkers, W. (1993). *Sehen und Handeln*. Aachen: Shaker.
Stablum, F., Leonardi, G., Mazzoldi, M., Umiltà, C., & Morra, S. (1994). Attention and control deficits following closed head injury. *Cortex*, *30*, 603–618.
Stelmach, G. E., & Teulings, H. (1983). Response characteristics of prepared and restructured handwriting. *Acta Psychologica*, *54*, 51–67.
Stelmach, G. E., Mullins, P. A., & Teulings, H. (1984). Motor programming and temporal patterns in handwriting. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*, 144–157.
Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, *30*, 276–315.
Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R. L., & Wright, C. E. (1978). The latency and duration of rapid movement sequences: Comparisons of speech and typewriting. In G. E. Stelmach (Hrsg.), *Information processing in motor control and learning* (S. 117–152). New York: Academic Press.
Sternberg, S., Wright, C. E., Knoll, R. L., & Monsell, S. (1982). Motor programs in rapid speech. In R. Cole (Hrsg.), *Perception and production of fluent speech* (S. 507–534). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
St James, J. D. (1990). Observations on the microstructure of response conflict. *Perception and Psychophysics*, *48*, 517–524.
Stoet, G., & Hommel, B. (1999). Action planning and the temporal binding of response codes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 1625–1640.
Stürmer, B., Leuthold, H., Schröter, H., Soetens, E., & Sommer, W. (2002). Control over location-based response activation in the Simon task: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 1345–1363.
Sudevan, P., & Taylor, D. A. (1987). The cuing and priming of cognitive operations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *13*, 89–103.
Tallon-Baudry, C., & Bertrand, O. (1999). Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 151–162.
Taub, E., & Berman, A. J. (1968). Movement and learning in the absence of sensory feedback. In S. J. Freedman (Hrsg.), *The neuropsychology of spatially oriented behavior* (S. 173–192). Homewood, IL: Dorsey.
Telford, C. W. (1931). The refractory phase of voluntary and associative responses. *Journal of Experimental Psychology*, *14*, 1–36.
Terzuolo, C. A., & Viviani, P. (1980). Determinants and characteristics of motor patterns used for typing. *Neuroscience*, *5*, 1085–1103.
Teulings, H., Thomassen, A. J. W. M., & Galen, G. P. van (1983). Preparation of partly precued handwriting movements: The size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica*, *54*, 165–177.
Teulings, H., Mullins, P. A., & Stelmach, G. E. (1986). The elementary units of programming in handwriting. In G. P. van Galen, H. S. R. Kao, & R. Hoosain (Hrsg.), *Graphonomics: Contemporary research in handwriting* (S. 21–32). Amsterdam: Elsevier.
Treisman, A. M. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, *6*, 171–178.
Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97–136.
Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of visual behavior* (S. 549–586). Cambridge, MA: MIT Press.
Van Selst, M., & Jolicœur, P. (1997). Decision and response. *Cognitive Psychology*, *33*, 266–307.
Van Selst, M., Ruthruff, E., & Johnston, J. C. (1999). Can practice eliminate the psychological refractory period? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 1268–1283.
van Sonderen, J. F., & Denier, G. J. J. van der (1991). Reaction-time-dependent differences in the initial movement direction of fast goal-directed arm movements. *Human Movement Science*, *10*, 713–726.
van Steenbergen, H. van, Band, G. P. H., & Hommel, B. (2009). Reward counteracts conflict adaptation: Evidence for a role of affect in executive control. *Psychological Science*, *20*, 1473–1477.
van Steenbergen, H. van, Band, G. P. H., & Hommel, B. (2010). In the mood for adaptation: How affect regulates conflict-driven control. *Psychological Science*, *21*, 1629–1634.
van Steenbergen, H. van, Band, G.P.H., Hommel, B., Rombouts, S.A.R.B. und Nieuwenhuis, S. (2015). Hedonic hotspots regulate cingulate-driven adaptation to cognitive demands. *Cerebral Cortex*, *25*, 1746–1756.
Verschoor, S. A., Spapé, M., Biro, S., & Hommel, B. (2013). From outcome prediction to action selection: Developmental change in the role of action-effect bindings. *Developmental Science*, *16*, 801–814.
Verschoor, S. A., Weidema, M., Biro, S., & Hommel, B. (2010). Where do action goals come from? Evidence for spontaneous action-effect binding in infants. *Frontiers in Psychology*, *1*, 201.
Verwey, W. B. (1994). Evidence for the development of concurrent processing in a sequential keypressing task. *Acta Psychologica*, *85*, 245–262.
Vidal, F., Bonnet, M., & Macar, F. (1991). Programming response duration in a precueing reaction time paradigm. *Journal of Motor Behavior*, *23*, 226–234.
Ward, L. M. (1982). Determinants of attention to local and global features of visual forms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *8*, 562–581.
Waszak, F., Hommel, B., & Allport, A. (2003). Task-switching and long-term priming: Role of episodic stimulus-task bindings in task-shift costs. *Cognitive Psychology*, *46*, 361–413.
Watson, J. S., & Ramey, C. T. (1972). Reactions to response-contingent stimulation in early infancy. *Merrill-Palmer Quarterly*, *18*, 219–227.
Welford, A. T. (1952). The „psychological refractory period" and the timing of high-speed performance – a review and a theory. *British Journal of Psychology*, *43*, 2–19.
Wickelgren, W. A. (1969). Context-sensitive coding, associative memory, and serial order in (speech) behavior. *Psychological Review*, *76*, 1–15.
Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. Nickerson (Hrsg.), *Attention and performance VIII* (S. 239–257). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
Wickens, C. D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman, & D. R. Davies (Hrsg.), *Varieties of attention* (S. 63–102). Orlando, FL: Academic Press.
Wickens, C. D., & Liu, Y. (1988). Codes and modalities in multiple resources: A success and a qualification. *Human Factors*, *30*, 599–616.
Wickens, J., Hyland, B., & Anson, G. (1994). Cortical cell assemblies: A possible mechanism for motor programs. *Journal of Motor Behavior*, *26*, 66–82.
Wolfe, J. M., Cave, K. R., & Franzel, S. L. (1989). Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *15*, 419–433.
Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, *3*, 1–114.
Wylie, G., & Allport, A. (2000). Task switching and the measurement of „switch costs". *Psychological Research*, *63*, 212–233.
Yaniv, I., Meyer, D. E., Gordon, P. C., Huff, C. A., & Sevald, C. A. (1990). Vowel similarity, connectionist models, and syllable structure in motor programming of speech. *Journal of Memory and Language*, *29*, 1–26.
Yantis, S. (2000). Goal-directed and stimulus-driven determinants of attentional control. In S. Monsell, & J. Driver (Hrsg.), *Attention and performance XVIII: Control of cognitive processes* (S. 73–103). Cambridge, MA: MIT Press.
Zelaznik, H. N. (1978). Precuing response factors in choice reaction time: A word of caution. *Journal of Motor Behavior*, *10*, 77–79.
Zelaznik, H. N., & Hahn, R. (1985). Reaction time methods in the study of motor programming: The precuing of hand, digit and duration. *Journal of Motor Behavior*, *17*, 190–218.

Zelazo, P. D., Reznick, J. S., & Piñon, D. E. (1995). Response control and the execution of verbal rules. *Developmental Psychology*, *31*, 508–517.

Zießler, M., Hänel, K., & Hoffmann, J. (1988). Die Programmierung struktureller Eigenschaften von Bewegungsfolgen. *Zeitschrift für Psychologie*, *196*, 371–388.

Zillig, M. (1926). Die Übung der Umstellung. *Zeitschrift für Psychologie*, *100*, 18–49.

Motorisches Lernen

Mathias Hegele und Sandra Sülzenbrück

19.1 Einleitung – 709

19.2 Sensomotorische Adaptation – 710

19.2.1 Sensomotorische Transformationen – 711

19.2.2 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung sensomotorischer Adaptation – 712

19.2.3 Mechanismen sensomotorischer Adaptation – 715

19.3 Fertigkeitserwerb – 724

19.3.1 Theorien und Modelle des Fertigkeitserwerbs – 724

19.3.2 Was beeinflusst den Fertigkeitserwerb? – 733

19.4 Fitness oder evolutionäres motorisches Lernen – 737

19.5 Anwendungsbeispiele – 738

19.6 Ausblick: Tear down this Ivory Tower, Nimrod! – 740

19.7 Weiterführende Informationen – 741

Literatur – 743

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_19

Im Blickfang

Auf den Schultern eines unvergesslichen Patienten – Henry Gustav Molaison (Patient H.M., 26.2.1926–2.12.2008)

Als Henry Gustav Molaison an seinem 15. Geburtstag am 26. Februar 1941 auf der Rückfahrt von Verwandten im Auto seiner Eltern seinen ersten schweren epileptischen Anfall hatte und von heftigen Krämpfen geschüttelt im Schoß seiner Mutter auf dem Rücksitz des Wagens für einige Minuten das Bewusstsein verlor, gab es für die Ärzte noch keine Möglichkeit, einen Blick in das Gehirn des Jungen zu werfen, der dort in der Notaufnahme des Krankenhauses von Manchester, Connecticut, so verloren vor ihnen saß. Das Phänomen der Magnetresonanz war noch nicht entdeckt, und erst zwölf Jahre zuvor hatte Hans Berger das erste Elektroencephalogramm am Menschen abgeleitet. Die „Psychochirurgie" (neurochirurgische Eingriffe im Gehirn zur Heilung psychiatrischer Krankheiten) war in den 1940er und 1950er Jahren eine weit verbreitete Behandlungsmethode, bevor sie 1967 mit dem Lobotomobil des Neurochirurgen Walter Freeman ihren makabren Höhepunkt erreichte. In diesem Kontext erschien zwölf Jahre nach dem ersten Anfall Henry Molaison im Büro von Dr. William Beecher Scoville, einem Neurochirurgen im Krankenhaus von Hartford, Connecticut, der Henry bereits zwei Jahre nach seinem ersten Grand-mal-Anfall medikamentös behandelt hatte.

Trotz der massiven Medikation mit Antiepileptika litt der mittlerweile 27-jährige Henry Molaison zu dieser Zeit unter häufigen Blackouts, verheerenden Krampfanfällen und war kaum mehr in der Lage, sich seinen Lebensunterhalt als Fließbandarbeiter zu verdienen. Nachdem alle anderen Behandlungen erfolglos geblieben waren, entschied sich Dr. Scoville im Jahre 1953 zu einem bis dato unerprobten neurochirurgischen Eingriff: Er entfernte zwei fingergroße Stücke aus Henry Molaisons Gehirn. Als dieser aus der Narkose erwachte, waren die Krampfanfälle verschwunden, aber die Operation, der Schnitt in den Hippocampus (einer Region tief im Gehirn in etwa auf Höhe der Ohren; ◘ Abb. 19.1), hatte Henry Molaison auf ganz grundsätzliche Art und Weise verändert. Er hatte die Fähigkeit verloren, neue Erinnerungen zu bilden.

An diesem Tag, im Alter von 28 Jahren, begann Henry Molaisons Leben für die Wissenschaft. In den restlichen 55 Jahren seines Lebens wurde er zum wohl wichtigsten Patienten in der Geschichte der Neurowissenschaft. Als Teilnehmer in Hunderten von Studien half er Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auf der ganzen Welt, die biologischen Grundlagen von Lernen und Gedächtnis zu verstehen – ebenso wie die Zerbrechlichkeit der menschlichen Identität. Seine Amnesie beeinträchtigte weder seinen Intellekt noch seinen Charakter; die Reinheit seines Defizits machte Henry zum Goldstandard in der Forschung zur Amnesie. Aber seinen Beruf als Fließbandarbeiter in einer Schreibmaschinenfabrik konnte er nicht mehr ausüben, sodass Lizzie Molaison sich in den nächsten 30 Jahren um ihren Sohn kümmerte, der sein Leben gefangen in der Gegenwart lebte.

Kurz nach seiner Operation begann die Psychologin Dr. Brenda Milner ihre Besuche in Hartford. Sie hatte, gemeinsam mit dem Gründer und Direktor des Montreal Neurological Institute der McGill University, dem Neurochirurgen Dr. Wilder Penfield, schon früher über die Erinnerungsdefizite von Amnesiepatienten (F.C. und P.B.), denen Teile des linken Temporallappens entfernt worden waren, berichtet. Ihre ersten Treffen mit Henry Molaison waren der Beginn einer Zusammenarbeit, die das wissenschaftliche Verständnis von Lernen und Gedächtnis für immer verändern sollte. „Er war ein freundlicher Mann, sehr geduldig, immer bereit, die Aufgaben, die ich ihm gab, auszuprobieren", berichtet Dr. Milner der *New York Times* in einem Interview im Jahre 2008. „Und trotzdem, jedes Mal, wenn ich den Raum betrat, war es, als hätten wir uns niemals vorher getroffen" (Carey 2008).

Zu der damaligen Zeit glaubten die meisten Wissenschaftler, dass die menschliche Fähigkeit, sich zu erinnern, eine Funktion des gesamten Gehirns sei. Die Berichte über die Epilepsiepatienten F.C., P.B., D.C. und H.M., deren Fähigkeit, neue Erinnerungen anzulegen in der Folge operativer Läsionen in eng umgrenzten Regionen des Temporallappens verloren gingen, führten viele Wissenschaftler auf eine allgemeine Schädigung des Gehirns durch die jahrelangen Krampfanfälle oder andere, noch unerkannte Läsionen zurück. Dies begann sich zu ändern, als Brenda Milner 1962 eine Studie veröffentlichte, in der sie und H.M. zeigten, dass ein Teil seines Gedächtnisses vollständig intakt geblieben war. Brenda Milner bat Henry Molaison zu versuchen, eine Linie zwischen zwei Umrissen eines fünfzackigen Sterns nachzuzeichnen, während er seine zeichnende Hand in einem Spiegel beobachtete. Spiegelzeichnen ist anfangs auch für gesunde Personen extrem schwierig. Mit der Zeit lernen gesunde Personen die Beziehung zwischen der Bewegung ihrer Hand und der beobachteten Bewegung im Spiegel; sie lernen eine neue sensomotorische Transformation. Für Henry Molaison war jede Sitzung, in der er diese Aufgabe übte, die erste Sitzung. Er hatte keinerlei Erinnerung daran, diese Aufgabe jemals zuvor geübt zu haben. Trotzdem verbesserte er sich von Sitzung zu Sitzung. „Einmal sagte er mir, nachdem er die Aufgabe viele Male ausgeführt hatte: ‚Das ist ja lustig, es sieht so schwierig aus, aber anscheinend ist es mir ziemlich gut gelungen'", erinnert sich 2014 die mittlerweile 95-jährige Brenda Milner in einem Interview mit Olga Khazan.

Die Bedeutung dieses Experiments war enorm. Wissenschaftler erkannten, dass das menschliche Gehirn über mindestens zwei Systeme verfügte, in denen neue Erinnerungen angelegt werden konnten: ein *deklaratives System*, in dem Namen, Gesichter und neue Erfahrungen gespeichert wurden, die dann zum bewussten Erinnern zur Verfügung standen, und ein *prozedurales System*, zuständig für Bewegungslernen. Auch William Beecher Scoville brachte es zu wissenschaftlichem Ruhm. Gemeinsam mit Brenda Milner veröffentlichte er einen viel zitierten Artikel im *Journal of Neurology* (Scoville und Milner 1957), in dem sie anhand von H.M. Gedächtnis und Intelligenz dissoziierten und erstmals die Notwendigkeit eines intakten Hippocampus für ein funktionierendes Langzeitgedächtnis dokumentierten. Nichtsdestotrotz bereute Scoville die Operation an Henry Molaison zutiefst, bezeichnete sie in einer Vorlesung im Jahre 1974 als „tragischen Fehler" und warnte in seinen Artikeln und Vorlesungen seine Kollegen vor einer beidseitigen Läsion hippocampaler Strukturen.

Am 2. Dezember 2008 starb Henry Gustav Molaison im Alter von 82 Jahren in einem Pflegeheim in Windsor Locks, Connecticut, an Lungenversagen.

In einer Zeit, in der sich die Neurowissenschaft in einem rasanten Wachstum befindet, in der Milliarden in neue Labore und weltumspannende Forschungsprojekte investiert werden, in der Superrechner die Funktionen des menschlichen Geistes simulieren sollen, vergisst man leicht, wie viel wir über den menschlichen Geist lernen können, wenn wir uns nur intensiv mit einem einzigen Menschen beschäftigen.

Für Henry Molaison bedeutete die Operation den Verlust der Fähigkeit, sich zu erinnern, für die Wissenschaft und unser Verständnis von Lernen und Gedächtnis war Scovilles „tragischer Fehler" ein unschätzbarer Gewinn. Traurigerweise war Henry Molaison sich seiner Berühmtheit und der enormen Bedeutung seiner Teilnahme an Forschungsprojekten in Medizin und Neurowissenschaft Zeit seines Lebens niemals bewusst.

Im Blickfang (*Fortsetzung*)

Abb. 19.1 Post-Mortem-Aufnahme von Henry Molaisons Gehirn (ventrale Ansicht). Die im Rahmen der Operation von Dr. William Beecher Scoville herbeigeführten beidseitigen Läsionen des Temporallappens sind durch die *weißen* Kästen hervorgehoben (**A**, **B**). **C** Läsion im Bereich des Orbitofrontalcortex. Weiterhin zeigt sich eine ausgeprägte Atrophie des Kleinhirns, vermutlich als Folge der jahrzehntelangen Medikation mit Antiepileptika. (Aus Annese et al. 2014)

19.1 Einleitung

Die beschriebene Beeinträchtigung der Lern- und Erinnerungsleistung des berühmten Patienten H.M., dessen anterograde Amnesie selektiv deklarative Gedächtnisinhalte und Wissensrepräsentationen betraf, ähnelt Befunden aus Dissoziationsstudien, die als empirische Belege für die Unterscheidung zwischen einem dorsalen und einem ventralen Pfad im Rahmen der visuellen Informationsverarbeitung angesehen werden (▶ Kap. 22). So existieren unabhängige Variablen (optische Ataxie, visuelle Formagnosie, verschiedene visuelle Illusionen), die Objekterkennung und Objektmanipulation prinzipiell unterschiedlich beeinflussen, was als Beleg für ein Zwei-Pfad-Modell der visuellen Informationsverarbeitung gilt (▶ Kap. 22; vgl. aber kritische Würdigung des Zwei-Pfad-Modells in Schenk und McIntosh 2010). H.M. konnte, wie oben dargestellt, genauso gut wie ein gesunder Mensch lernen, die Konturen eines im Spiegel seitenvertauscht dargestellten Sterns möglichst schnell und akkurat nachzuzeichnen (Milner 1962). Diese Lernerfolge zeigte er, obwohl ihm die Aufgabe immer wieder neu erklärt werden musste und er sich nicht daran erinnern konnte, die Aufgabe jemals vorher ausgeführt zu haben. Sein Fall war ein erster Hinweis darauf, dass eine ähnliche Unterscheidung zwischen einem Was- und einem Wie-System (*Was* muss ich tun? *Wie* muss ich es tun?) auch im Zusammenhang mit motorischem und nichtmotorischem Lernen zu finden sein könnte. Zum besseren Verständnis dieser Unterscheidung zwischen Was und Wie lesen Sie bitte die folgende Bewegungsbeschreibung eines Felgaufschwungs:

» Greifen Sie die Reckstange mit beiden Händen im Ristgriff mit gebeugten Armen. Holen Sie Schwung mit dem rechten Bein. Schwingen Sie mit der Hüfte nahe an der Reckstange, während Sie Arme und Hüfte beugen. Ziehen Sie die Reckstange zur Körpermitte und schwingen Sie die Beine über die Reckstange. Richten Sie sich auf in den Stütz.

Lesen Sie den Abschnitt so lange, bis Sie in der Lage sind, ihn zu rezitieren, ohne dabei auf dieses Seite zu schauen.

Sie haben nun zwei Dinge gelernt: Zum einen haben Sie einen Text auswendig gelernt. Bravo! Zum anderen haben Sie Wissen darüber gewonnen, was genau Sie tun müssen, um einen Felgaufschwung zu turnen. Wenn wir dieses Lernen mit Labeln versehen wollten, so sprächen wir im ersten Fall von verbalem Lernen und im zweiten Fall von deklarativem Lernen. Dass es sich bei diesen beiden Lernformen um etwas prinzipiell anderes als motorisches Lernen handelt, lässt sich nun leicht ausprobieren. Packen Sie dazu Ihre Sporttasche, sichten Sie das Angebot des allgemeinen Hochschulsports an Ihrer Hochschule und besuchen Sie den dort angebotenen Turnkurs. Lassen Sie sich von einem der Übungsleiter/innen das Reck zeigen und versuchen Sie, die auswendig gelernte Bewegungsbeschreibung in eine tatsächliche Bewegung zu überführen.

Neun von zehn Personen werden scheitern. Obwohl Sie gelernt haben, *was* zu tun ist, um einen Felgaufschwung zu turnen, müssen Sie nun erst noch lernen, *wie* die entsprechende Bewegung auszuführen ist. Analog zum Zwei-Pfad-Modell der visuellen Informationsverarbeitung lassen sich also motorisches Wie-Lernen und nichtmotorisches Was-Lernen unterscheiden.

Heuer (1983) unterscheidet in diesem Zusammenhang in Anlehnung an Miller et al. (1960) zwischen analogem und digitalem Lernen. *Analoges Lernen* bezeichnet das Lernen von Bewegungsabläufen. Diese werden dann durch *digitales Lernen* auf einer höheren Organisationsebene zu Klassen gleichartiger Bewegungen zusammengefasst, mit einem verbalen Etikett versehen und so einer bestimmten Bewegungskategorie zugeordnet. *Motorisches Lernen*, wie wir es in diesem Kapitel verstehen, bezieht sich einzig und allein auf analoges Lernen, also auf das Erlernen von Bewegungsabläufen.

Beim Versuch der Definition von motorischem Lernen oder Lernen im Allgemeinen stößt man häufig auf Definitionen, die eine überdauernde Veränderung im Verhaltensrepertoire des Lernenden als eines der Kardinalmerkmale von Lernen postulieren. Die Versuchung, sich dieser Definition anzuschließen, ist sehr groß, insbesondere angesichts der beeindruckenden Anzahl von Studien, die sehr deutlich zeigen, dass man bei der Beurteilung von Lernstrategien zum motorischen, aber auch kognitiven Fertigkeitserwerb zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangt, je nachdem, zu welchem Zeitpunkt man Lernen misst: unmittelbar am Ende der Übungsphase oder erst nach einem zusätzlichen Behaltensintervall, in dem sich das Gelernte konsolidieren kann (siehe Kantak und Winstein 2012).

In diesem Kapitel wird ein Überblick über unterschiedliche Forschungstraditionen im Bereich des motorischen Lernens gegeben. Zur Systematisierung betrachten wir in Anlehnung an Shadmehr und Wise (2005) motorisches Lernen auf unterschiedlichen Zeitskalen. Dabei verzichten wir auf eine detaillierte Darstellung von Paradigmen und Erkenntnissen, die bereits an anderer Stelle in diesem Buch diskutiert werden. Dazu gehören klassisches und operantes Konditionieren, Handlungsselektion und S-R-Lernen (▶ Kap. 10). Die unterschiedlichen Zeitskalen umfassen Phylogenese, Ontogenese, Jahre, Wochen, Tage und manchmal einzelne Experimente, die nicht länger als 1 h dauern. Entsprechend gliedert sich das Kapitel in drei Teile, die Lernen auf diesen unterschiedlichen Zeitskalen betrachten:

Sensomotorische Adaptation (▶ Abschn. 19.2) betrachtet motorisches Lernen auf der kürzesten Zeitskala innerhalb eines Experiments. Die zu erlernende Fertigkeit ist üblicherweise von geringer Komplexität. In den meisten Fällen sind die Bewegungsmuster bereits gelernt und müssen aufgrund einer Veränderung in der Beziehung zwischen Sensorik und Motorik lediglich an neue Umweltbedingungen angepasst werden.

Fertigkeitserwerb (*skill acquisition*) (▶ Abschn. 19.3) bezieht sich auf den länger andauernden Erwerb eines neuen Bewegungsablaufs. Tätigkeiten wie Fahrradfahren, Tennisspielen oder Schreiben fallen in diese Kategorie. Hier könnte man am ehesten von einer langfristigen Änderung der individuellen Verhaltenskompetenz sprechen, allerdings können auch durch sensomotorische Adaptation erworbene neue Beziehungen zwischen Wahrnehmung und Bewegungssteuerung eine neue Fertigkeit charakterisieren, die auch über längeren Zeiträume erinnert werden kann, sodass der Übergang zwischen diesen beiden Bereich eher gradueller Natur ist.

Fitness oder evolutionäres motorisches Lernen wird der Vollständigkeit halber am Ende des Kapitels kurz umrissen (▶ Abschn. 19.4). Es handelt sich dabei um sensomotorische Fertigkeiten, die sich im Laufe der Stammesgeschichte als so nützlich erwiesen haben, dass sie uns als Teil unseres speziesspezifischen Verhaltensrepertoires von Geburt an zur Verfügung stehen und uns mit geringen Modifikationen unser gesamtes Leben über begleiten. Evolutionäres motorisches Lernen ist weniger Bestandteil der Allgemeinen Psychologie, sondern eher ein Forschungsbereich in der Biologie und in gewisser Weise der Archäologie. Im Rahmen des für dieses Kapitel gewählten Organisationsprinzips der Zeitskalen, auf denen motorisches Lernen stattfindet, ist es aber eine notwendige Ergänzung und, so viel sei an dieser Stelle schon gesagt, ein extrem faszinierendes Forschungsfeld.

Die Betrachtung auf unterschiedlichen Zeitskalen in diesem Kapitel sollte ausdrücklich als Heuristik verstanden werden, die als Orientierung den Zugang zu drei unterschiedlichen Forschungstraditionen erleichtern soll. Es ist selbstverständlich möglich, ein Adaptationsexperiment als Experiment zum Fertigkeitserwerb zu konzipieren, indem ein Retentionstest mit einem entsprechenden Retentionsintervall eingefügt wird.

19.2 Sensomotorische Adaptation

In der experimentalpsychologischen und neurowissenschaftlichen Forschung zu motorischem Lernen stehen häufig zwei Aspekte im Vordergrund: Transformationslernen und Sequenzlernen. Im Folgenden konzentrieren wir uns auf Transformationslernen als Gegenstand motorischen Lernens und besprechen Sequenzlernen zu einem späteren Zeitpunkt nur in Bezug auf die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Lernprozessen (▶ Zur Vertiefung 19.1). Einerseits ist dies der für dieses Kapitel zur Verfügung stehenden Seitenanzahl geschuldet, die eine inhaltliche Schwerpunktlegung erfordert. Andererseits steht unserer Ansicht nach Sequenzlernen, egal ob explizit oder implizit, der eingangs erwähnten Frage nach dem Was des Lernens näher als der Frage nach dem Wie. Auch wenn Sequenzlernen häufig als Paradigma für motorisches Lernen bemüht wird (z. B. Keele und Summers 1976; Karni et al. 1995; Sakai et al. 2004), beherrschen die Versuchspersonen (oder Versuchsäffchen) die entsprechenden Bewegungen, beispielsweise das Drücken von Tasten in Reaktion auf in einer bestimmten Sequenz aufleuchtende Lämpchen oder das Zusammenführen von Daumen und Zeige-, Mittel-, Ring- und kleinem Finger in einer vorgegebenen Reihenfolge, schon vor dem jeweiligen Experiment (vgl. Heuer 1983). Was gelernt wird, ist lediglich eine extern vorgegebene Reihenfolge von Zielpunkten, deren Lernen dann durch Registrierung der Bewegung überprüft wird. Das Wie der Bewegungsausführung ist dabei vollkommen irrelevant. Eine übungsabhängige Veränderung in der Qualität der Bewegungsausführung ist aber ein notwendiger Bestandteil motorischen Lernens, sodass Sequenzlernen streng genommen nicht als genuin motorisches Lernen zu verstehen ist. Wenn Sie möchten, diskutieren Sie unsere Ansicht in Ihren Lehrveranstaltungen. Wir freuen uns über Ihr Feedback in dieser Sache (mathias.hegele@sport.uni-giessen.de).

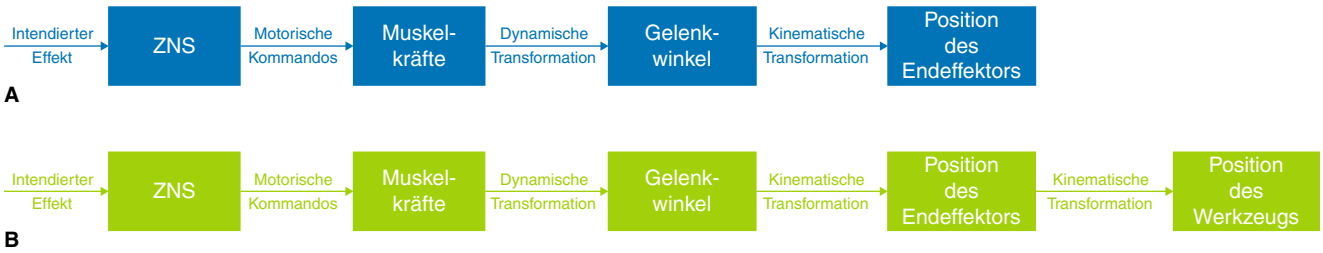


Abb. 19.2 **A** Verschiedene Transformationen bei der Ausführung von Körpertransformationen (**A**) und bei der Werkzeugtransformation (**B**). (Angelehnt an Heuer 1983, 2006).

19.2.1 Sensomotorische Transformationen

Das menschliche sensomotorische System kann sich sehr flexibel an veränderte „Arbeitsbedingungen" anpassen. So können wir z. B. mühelos und ohne zusätzliche bewusste Anstrengung nach dem Auffüllen einer leeren Kaffeetasse das motorische Kommando zum Anheben der Tasse an das nun höhere Gewicht der gefüllten Tasse anpassen, um zügig und erfolgreich aus der Tasse zu trinken. Dies zeigt, dass unser sensomotorisches System kontinuierlich über unsere Sensorik Informationen über unsere Umwelt erhält und, falls nötig, die Beziehung zwischen motorischen Signalen und daraus resultierenden Bewegungen variabel verändern kann. Solche Veränderungen können eine sehr kurzfristige, situative Anpassung erfordern wie im Fall einer plötzlich veränderten Masse (Arm/Hand + Gewicht der gefüllten Tasse) oder eines zu benutzenden Werkzeugs (Arm/Hand + Gewicht des Werkzeugs + Werkzeugeigenschaften). Anpassungen müssen allerdings auch aufgrund längerfristiger, langsamer Prozesse erfolgen, z. B. körperliche und mentale Veränderungen bedingt durch natürlich stattfindende Prozesse wie Wachstum, Reifung oder Altern, die die Beziehung zwischen sensorischen Eingaben und motorischen Ausgaben verändern. Zu *sensorischen Eingaben* gehören neben extrinsischen Informationen über den Zustand unserer Umwelt (z. B. die Füllhöhe der Flüssigkeit in der eben beschriebenen Tasse) auch intrinsische Informationen über den Zustand unseres Körpers (z. B. Position der Hand vor Beginn der Greifbewegung). *Motorische Aufgaben* beziehen sich auf neuronale Signale, die Muskeln zur Kontraktion anregen und Bewegung hervorrufen können (aber nicht müssen, z. B. bei Haltebewegungen gegen einen Widerstand). Die Überführung von sensorischen Signalen in entsprechende motorische Signale wird als **sensomotorische Transformation** bezeichnet.

In Abb. 19.2 finden Sie einen Überblick über den Ablauf einer Bewegung vom Ausgangspunkt, dem durch die Bewegung zu erzielenden, intendierten Effekt in der Umwelt, bis zur entsprechenden Bewegungsausführung und die stattfindenden sensomotorischen Transformationen. Heuer (1983) postuliert, dass für erfolgreiches motorisches Lernen das Individuum verschiedene innere Repräsentationen von unterschiedlichen sensomotorischen Transformationen erworben haben muss, die an unterschiedlichen Stellen dieses Ablaufs zu verorten sind. Er unterscheidet dabei zwei grundsätzliche Formen von Repräsentationen bzw. Transformationen: Körpertransformationen und Werkzeugtransformationen. Während *Körpertransformationen* an jeder Bewegung beteiligt sind, findet man *Werkzeugtransformationen* zusätzlich und in der motorischen Kette anschließend an die Körpertransformationen, sobald wir Bewegungen mit Werkzeugen ausführen. Im Folgenden soll der Ablauf der in Abb. 19.2 dargestellten Bewegungsausführung kurz erläutert und die beiden Transformationsarten darin verortet werden.

Ausgehend vom mit der Bewegung intendierten Effekt, also z. B. dem Ergreifen der Kaffeetasse, werden im zentralen Nervensystem (ZNS) Bewegungskommandos erzeugt, die über das Rückenmark zu den entsprechenden Muskeln weitergeleitet werden. Diese werden durch das Signal kontrahiert. Die damit verbundenen Muskelkräfte führen zu Veränderungen der Gelenkwinkel. Diese Veränderung der Gelenkwinkel resultiert in der Bewegung des Körperteils, das die intendierte Bewegung ausführen soll (dem sogenannten Endeffektor). Dieser erste Teil der Bewegungsausführung bis zur Bewegung des Körperteils wird als Körpertransformation bezeichnet. Bei der Benutzung eines Werkzeugs, wenn wir also zum Greifen eines Objekts nicht die Hand, sondern eine in der Hand liegende Zange verwenden, wird diese motorische Signalkette um ein weiteres Glied, das Werkzeug, erweitert. Die entsprechende Transformation von Körperbewegungen in zielgerichtete Bewegungen des effektiven Teils des Werkzeugs wird als Werkzeugtransformation bezeichnet.

Neben der Unterscheidung in Körper- und Werkzeugtransformationen sind in Abb. 19.2 zwei weitere Transformationstypen zu finden: kinematische und dynamische Transformationen. Während *kinematische Transformationen* die Übersetzung der Gelenkwinkel in die Position des Endeffektors darstellen, beschreiben *dynamische Transformationen* die Transformation von Muskelkräften in Gelenkwinkel.

Die kinematische Transformation beinhaltet bei einer Körpertransformation die Spezifikation der Beziehung zwischen den Gelenkwinkeln und der Bewegung des Körpergliedes. Bei der Werkzeugtransformation muss die zusätzliche kinematische Transformation der Bewegung des Körpergliedes in die Bewegung des effektiven Teils des Werkzeugs, also z. B. die Beziehung zwischen der sich schließenden Hand und damit verbunden dem Öffnen der Zange, erlernt und in die Bewegungsplanung integriert werden.

Die dynamische Transformation bezieht sich bei einer Körpertransformation nur auf die Masse des zu bewegenden Körpergliedes sowie die externen Kräfte, die neben der Schwerkraft noch zum Bewegen des Körpergliedes in die Planung der Bewegung einbezogen werden müssen. Bei einer Werkzeugtransformation muss neben der Masse des Körpergliedes noch zusätzlich die Masse des Werkzeugs und die auf die damit verbundenen

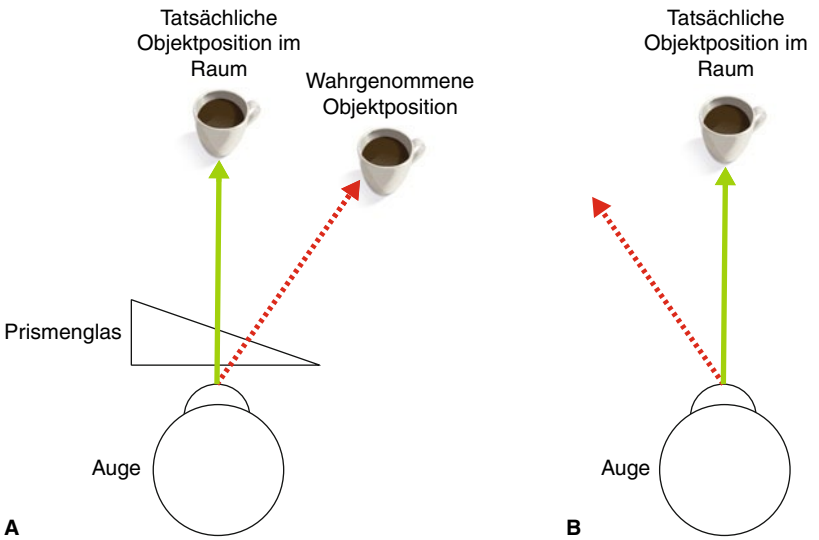


Abb. 19.3 Grundprinzip der Prismenadaptation. **A** Versuchssituation unmittelbar nach dem ersten Aufsetzen der Brille. Um das gewünschte Objekt ergreifen zu können, müsste die Hand sich geradeaus bewegen (*grüner Pfeil*). Da die visuelle Wahrnehmung des Objekts allerdings durch die Prismengläser verschoben wird, werden zunächst Bewegungen in die Richtung der visuell wahrgenommenen Objektposition ausgeführt (*roter Pfeil*). **B** Wird die Prismenbrille nach einigen Durchgängen entfernt, treten erneut Fehler in der Bewegungsrichtung auf – dieses Mal in der zur Prismenverschiebung entgegengesetzten Richtung (negative Nacheffekte)

Bewegungen einwirkenden Kräfte einbezogen werden, um die Muskelkräfte adäquat in Gelenkwinkel zu überführen.

Kinematische und dynamische Transformationen unterscheiden sich also hinsichtlich der Eingangsgröße der Transformation: Kräfte bei dynamischen und Bewegung bei kinematischen Transformationen. Die Ausgangsgrößen sind in beiden Fällen Bewegungen.

19.2.2 Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung sensomotorischer Adaptation

Das Beherrschen sensomotorischer Transformationen kann sich auf die Transformation zwischen verschiedenen sensorischen Größen, die z. B. aus dem haptischen, dem akustischen oder dem visuellen System im ZNS ankommen, und der damit verbundenen motorischen Reaktion beziehen. Ein großer Teil der Untersuchungen zum Lernen sensomotorischer Transformationen bezieht sich auf die Interaktion zwischen visuellem und motorischem System, was u. a. auch an der Dominanz der visuellen Information als der einflussreichsten Sinnesmodalität des Menschen liegt (ein schönes Beispiel für die Dominanz des visuellen Systems ist das *moving-room*-Paradigma von Lee und Aronson 1974). Solche auf das visuelle System bezogenen Transformationen werden als *visuomotorische Transformationen* bezeichnet und stehen im Zentrum der folgenden Abschnitte zur sensomotorischen Adaptation. Im Rahmen eines kurzen historischen Abrisses über die Forschung zum Transformationslernen wird zunächst auf verschiedene experimentelle Ansätze zur Erforschung des Lernens von Körper- und Werkzeugtransformationen eingegangen. Als historisch frühester Ansatz wird in Bezug auf das Erlernen von Körpertransformationen die Forschung zur **Prismenadaptation** kurz vorgestellt. Im weiteren Verlauf werden verschiedene neuere Paradigmen zur Untersuchung des Erlernens von Werkzeugtransformationen dargestellt, insbesondere die Untersuchung der Anpassung und des Erlernens visuomotorischer Verstärkungsänderungen, visuomotorischer Rotationen sowie die Kompensation von außen auf die Bewegung aufgeschalteter Kraftfelder.

Lernen von Körpertransformationen: Prismenadaptation

Bereits 1867 beschäftigte sich Hermann von Helmholtz mit dem Ergreifen von Objekten während des Tragens einer Prismenbrille. Bei diesen Brillen sind die Gläser durch keilförmige Prismen ersetzt, die zu einer seitlichen Verschiebung des visuellen Feldes relativ zur medialen sagittalen Ebene des Kopfes führen (Abb. 19.3). Die daraus resultierende Verschiebung der Blickrichtung führt dazu, dass zunächst die ausgeführten Zielbewegungen der Versuchsperson das wahrgenommene Ziel nicht erreichen, da die ursprünglich erlernte visuomotorische Beziehung nicht mehr korrekt ist. Als Ergebnis dieser visuomotorischen Transformation sind die Bewegungen der Versuchsteilnehmer zunächst in Richtung der Verschiebung verzerrt (Abb. 19.3A, roter Pfeil). Die Diskrepanz zwischen der eigenen Handlung und der erwarteten sensorischen Konsequenz löst adaptive Prozesse aus, die der Beseitigung dieser Diskrepanz dienen. So verbessert sich durch die Rückmeldung der Fehler bei ausgeführter Bewegung die visuomotorische Koordination. Nach Absetzen der Prismenbrille fand von Helmholtz erneut größere Fehler in der Greifbewegung, diesmal allerdings in die der prismatischen Verschiebung entgegengesetzten Richtung (Abb. 19.3B, roter Pfeil), was als negativer **Nacheffekt** der Prismenadaptation bezeichnet wird. Die Anpassung an die prismatische Verschiebung war also noch aktiv, auch wenn sie gar nicht mehr benötigt wurde. Die kontinuierliche Verbesserung der Zielbewegungen während des Tragens der Prismenbrille und die nach dem Absetzen der Brille gefundenen negativen Nacheffekte wurden als Belege dafür gedeutet, dass sich die Versuchsperson an die neue visuomotorische Beziehung angepasst hatte, dass also die neue Beziehung zwischen visuellen und propriozeptiven Reizen bzw. den ausgeführten Bewegungen gelernt wurde.

George Stratton (1897) führte Selbstversuche durch, bei denen er das visuelle Feld mithilfe einer Umkehrbrille um 180° rotierte. Zunächst war seine visuomotorische Koordination stark beeinträchtigt, und er hatte den visuellen Eindruck einer umgekehrten Welt. Nach wenigen Tagen der Benutzung der Brille hatte sich die visuomotorische Koordination wieder verbessert, und es gab nach Strattons Aussage sogar vereinzelte Momente, in denen

ihm sein visuelles Umfeld wieder aufrecht erschien. Eine umfassende Darstellung weiterer früher Befunde zu visuomotorischen Transformationen ist bei Welch (1978) zu finden.

Grundsätzlich findet die Adaptation an eine Prismenbrille relativ schnell statt. So reichen wenige Bewegungen nach Aufsetzen der Brille, um Objekte auch im nun verzerrten visuellen Feld erfolgreich greifen zu können (Redding und Wallace 1993). Werden die Bewegungen sehr langsam und mit vollständiger Sicht ausgeführt, so sind die beobachteten Richtungsfehler beim Zeigen auf oder dem Greifen eines Objektes sogar von der ersten Bewegung an sehr klein (Redding und Wallace 1996, 1997). Sind die prismatischen Verschiebungen sehr klein oder graduell ansteigend, sind die Bewegungsfehler von Beginn an ähnlich klein. Des Weiteren scheinen sich Versuchspersonen an solche kleinen prismatischen Verschiebungen oder auch größere, aber graduell in kleinen Schritten eingeführte Verschiebungen (*prismatic shaping*) anpassen zu können, ohne sich dieser Verschiebungen bewusst zu sein (Dewar 1971; Uhlarik 1973; Howard et al. 1974; Jacobson und Goodale 1989).

Die Interaktion zwischen solchen eher impliziten, unbewussten Anpassungsmechanismen und expliziten, bewussten Anpassungsstrategien an das Tragen einer Prismenbrille wurde in der Forschungstradition zur Prismenadaptation ebenfalls untersucht. So konnte z. B. gezeigt werden, dass sehr ausgeprägte strategische Korrekturen während der Anpassung an eine Prismenbrille, wie es z. B. bei Umkehrbrillen der Fall ist, dazu führen, dass es kaum messbaren Nacheffekte gibt (Stratton 1897; Richter et al. 2002). In einer Gruppe von Versuchspersonen bei Michel et al. (2007) wurde eine prismatische Verschiebung um 10° in sehr kleinen Schritten von jeweils 2° graduell eingeführt, während in einer anderen Gruppe sofort die maximale prismatische Verschiebung von 10° aufgeschaltet wurde. In der Gruppe mit dem graduellen Anstieg der optischen Abweichung wurde den Versuchspersonen die prismatische Verschiebung nicht bewusst, während die Versuchspersonen der anderen Gruppe diese Verschiebung bemerkten. Die graduelle, unbewusste Verschiebung war verbunden mit einem größeren Nacheffekt, einem Transfer auf die Hand, mit der nicht geübt wurde, und einer größeren Robustheit der Adaptation. Auch Jacobson und Goodale (1989) konnten solche größeren Nacheffekte bei Versuchspersonen ohne Kenntnis über die prismatische Verschiebung zeigen. Bei älteren Menschen, von denen angenommen wird, dass die strategischen Prozesse im Vergleich zu jüngeren insgesamt schlechter sind, und bei Patienten mit neurologischen Störungen, die mit verringerter strategischer Kontrolle verbunden sind, zeigten sich größere und länger anhaltende Nacheffekte (Weiner et al. 1983; Fernández-Ruiz et al. 2000). Weiterführende Informationen zu den bei der Prismenadaptation involvierten Prozessen sowie eine Zusammenfassung empirischer Befunde ist beispielsweise bei Redding et al. (2005) zu finden.

■ Lernen von Werkzeugtransformationen: Rotationen, Verstärkung und Kraftfelder

Neben dem experimentellen Paradigma der Prismenadaptation haben sich seit Beginn der 1990er Jahre insbesondere zwei Arten der sensomotorischen, im Speziellen der visuomotorischen Transformation als beliebtes Paradigma für die Untersuchung motorischer Lernprozesse etabliert: die Anpassung an eine **visuomotorische Rotation** sowie an eine **visuomotorische Verstärkungsänderung**. Diese beiden Untersuchungsansätze basieren auf der Annahme, dass unser sensomotorisches System Zielbewegungen als Vektoren in einem extrinsischen Koordinatensystem repräsentiert und plant. Dieser Vektor wird durch die beiden voneinander unabhängigen Dimensionen Richtung und Amplitude spezifiziert (Gordon et al. 1994; Vindras und Viviani 1998; Ghez et al. 2000; Vindras et al. 2005). Richtung und Weite dieser in einem Bereich des Arbeitsraumes geplanten Bewegung können so sehr gut in andere Bereiche des Arbeitsraumes übertragen werden. So kann z. B. die Bewegung einer in der Hand gehaltenen Computermaus auf dem Tisch sehr einfach in die Bewegung eines damit gesteuerten Cursors auf dem Monitor übertragen werden, indem die entsprechende Richtung und Weite der geplanten Bewegung des Cursors auf den Anfangspunkt der Bewegung der Hand der Computermaus übertragen werden. Mit dieser Art der Bewegungsplanung wird eine vom entsprechenden Bezugssystem (z. B. relativ zur Bewegung des eigenen Körpers oder relativ zur Startposition auf dem Monitor) unabhängige Ausführung von Bewegungen möglich. Die Anpassung an die Veränderung der Bewegungsamplitude wird mit dem Paradigma der visuomotorischen Verstärkungsänderung untersucht, während eine Veränderung der Bewegungsrichtung in den Untersuchungen zur Anpassung an visuomotorische Rotationen analysiert wird.

Die für Untersuchung dieser Arten von Transformationen verwendeten experimentellen Paradigmen wurden u. a. durch den methodischen Ansatz von Nielsen (1963) und dessen Weiterentwicklungen inspiriert. Bei der von Nielsen entwickelten klassischen Version hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, auf einem Papier gerade Linien zu zeichnen. Die direkte Sicht auf die Bewegung ihrer Hand und die entstehende Linie war dabei verhindert. Über einen Spiegel sahen die Versuchspersonen eine Hand, die Linien zeichnete. Was die Versuchspersonen dabei nicht wussten, war, dass sie nicht ihre eigene Hand im Spiegel sahen, sondern die des Versuchsleiters. Mit diesem Versuchsaufbau war es erstmals möglich, die visuomotorische Transformation zu variieren, indem der Versuchsleiter gekrümmte anstatt gerader Linien zeichnete und die Versuchspersonen die von ihnen ausgeführten Bewegungen in die Gegenrichtung anpassten, um die von ihnen gesehenen Abweichungen von der geraden Bewegungsbahn zu korrigieren.

In Anlehnung an diesen Versuchsaufbau von Nielsen (1963) wurden neue experimentelle Anordnungen entwickelt, um die Anpassung an sensomotorische Transformationen zu untersuchen. Vor allem durch die Entstehung neuer Werkzeuge wie der Computermaus oder ähnlicher Eingabegeräte wie dem Digitalisiertablett, bei denen die ausgeführte Bewegung (der Hand mit dem Eingabegerät auf dem Tisch) vom resultierenden Effekt (der Bewegung des Cursors auf einem Monitor) räumlich voneinander getrennt sind, war es möglich, die eigenen Bewegungen von der sensorischen (im Fall der Computermaus wiederum visuellen) Konsequenz mit relativ einfachen technischen Mitteln zu entkoppeln und die sensomotorische Beziehung zu manipulieren.

Am Beispiel der Computermaus kann man sich die visuomotorische Rotation und visuomotorische Verstärkungsänderung

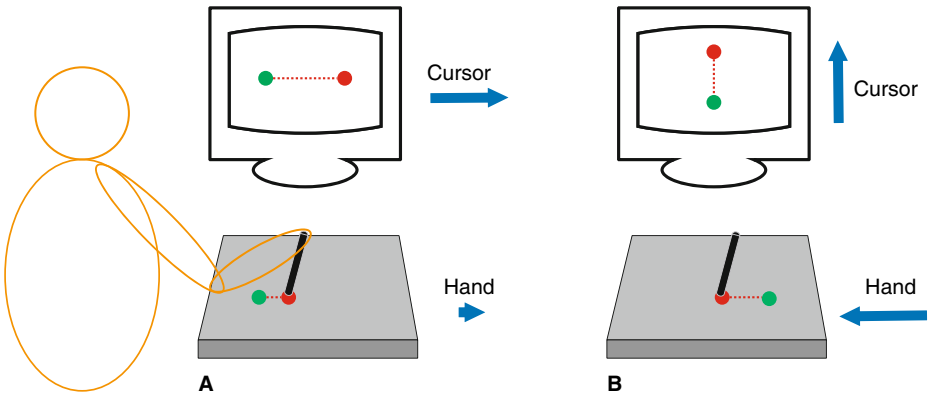


Abb. 19.4 Exemplarischer Versuchsaufbau für die Erforschung des Erlernens einer neuen visuomotorischen Verstärkung (**A**) und einer visuomotorischen Rotation (**B**). Bewegungen mit einem Eingabegerät auf einem Digitalisiertablett (in *Grau* dargestellt) sind mit entsprechenden Bewegungen des Cursors auf dem Monitor (*roter Punkt*) gekoppelt. Beim Erlernen einer neuen visuomotorischen Verstärkung ist die Richtung von Hand und Cursor identisch. Allerdings führt die Bewegung mit einer bestimmten Weite mit der Hand bzw. dem durch sie gesteuerten Eingabegerät zu einer deutlich weiteren Bewegung des Cursors auf dem Monitor. Bei der visuomotorischen Rotation hingegen bewegt sich der Cursor vom Startpunkt (*grüner Punkt*) aus senkrecht nach oben auf dem Monitor, während die Hand das Eingabegerät auf dem Digitalisiertablett von rechts nach links bewegt. Die Weite der Bewegung ist bei der visuomotorischen Rotation für Hand und Cursor identisch, die Transformation bezieht sich hier nur auf die Bewegungsrichtung

sehr gut verdeutlichen. Wenn Sie den Arbeitsplatz wechseln und z. B. am Computer eines Kollegen arbeiten, kann es sein, dass die Sensitivität der dort angeschlossenen Computermaus anders eingestellt ist als Ihre eigene. Dies bedeutet, dass Sie z. B. mit einer sehr kleinen Handbewegung mit der Maus von links nach rechts bereits den Cursor auf dem Monitor vom linken bis zum rechten Bildschirmrand bewegt haben, während Sie an Ihrem eigenen Rechner eine deutlich weitere Handbewegung mit der Maus ausführen müssten. Das Erlernen einer neuen visuomotorischen Verstärkung impliziert, dass Sie die neue Beziehung zwischen der Eingangsgröße (in diesem Fall die Weite der Bewegung Ihrer Hand mit der Computermaus) und der Ausgangsgröße (die Weite der Bewegung des Cursors auf dem Monitor) erlernen müssen (Abb. 19.4A). Das Verhältnis zwischen Ausgangsgröße und Eingangsgröße wird als *Verstärkungsfaktor* bezeichnet. Bei der visuomotorischen Rotation ist die Bewegung des gesteuerten Objekts (Cursor auf dem Monitor) gegenüber der Bewegung der Hand (die z. B. die Computermaus bewegt) rotiert, sodass sich die Hand mit der PC-Maus in eine andere Richtung bewegt als das durch sie gesteuerte Objekt auf dem Monitor (Abb. 19.4B). Solch eine visuomotorische Rotation entsteht z. B. dann, wenn Sie die Computermaus seitlich um ihre eigene Achse rotieren.

Am schnellsten und umfassendsten scheinen wir Menschen uns an Veränderungen der visuomotorischen Verstärkung anpassen zu können. Diese Anpassung erfolgt zum Teil innerhalb weniger Bewegungsdurchgänge und ist dabei nicht nur auf die in einer Übungsphase gelernten Bewegungsweiten und -richtungen beschränkt, sondern kann auch sehr gut auf andere Bewegungen übertragen werden (Bock 1992; Bedford 1994; Bock und Burghoff 1997; Krakauer et al. 2000). Dieser Prozess der Anwendung des Wissens über die sensomotorische Transformation auf neue Start-Ziel-Konfigurationen wird als ein Indiz für überdauernde Lerneffekte interpretiert und als *Generalisierung* bezeichnet. Die Geschwindigkeit, mit der solche neuen Beziehungen zwischen der Weite der Handbewegung und der daraus resultierenden Bewegung des Cursors gelernt werden können, ist vorrangig von der Komplexität der zu beherrschenden Transformation abhängig. Während die Anpassung an einen neuen konstanten Verstärkungsfaktor sehr schnell verläuft, werden komplexere Beziehungen zwischen der Bewegungsweite der Hand und dem Cursor, wie z. B. ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen beiden Weiten, deutlich langsamer und zum Teil auch nicht vollständig erlernt (Hegele und Heuer 2010a; Verwey und Heuer 2007).

Es konnte vielfach belegt werden, dass Menschen an visuomotorische Rotationen adaptieren und diese von ihnen auch gelernt werden können (Pine et al. 1996; Krakauer et al. 1999; Krakauer et al. 2000; Tong et al. 2002; Wang und Sainburg 2005). Dabei scheint diese Adaptation bei Rotationen bis zu 90° graduell voranzuschreiten; die Übertragbarkeit der für eine Bewegung gelernten Rotation scheint allerdings im Gegensatz zur Adaptation an eine Verstärkungsänderung auf einen Arbeitsbereich nahe um das in der Lernphase geübte Ziel beschränkt zu sein und wird nicht auf den gesamten Arbeitsbereich generalisiert (Caithness et al. 2004; Cunningham 1989; Heuer und Hegele 2008a, 2011; Wigmore et al. 2002). Visuomotorische Rotationen von mehr als 90° folgen einem etwas anderen Muster. Wie Abeele und Bock (2001) zeigten, wird in den ersten Durchgängen der Anpassung an solch große Rotationen zunächst eine relativ abrupte Rotation von 180° ausgeführt, an die sich in einer zweiten Phase eine graduelle Verkleinerung des Rotationswinkels bis zur Zielrotation anschließt. Solch eine zunächst grobe Annäherung an die gewünschte Rotation, an die sich im zweiten Schritt als „Feintuning" eine graduelle Anpassung zeigt, konnte z. B. auch von Sülzenbrück und Heuer (2009a, 2010) für die komplexe Transformation eines zweiseitigen Hebels beschrieben werden. Die Anpassung an große und kleine Rotationen scheint auch in unterschiedlichen Anteilen mit expliziten und impliziten sensomotorischen Anpassungsprozessen in Verbindung zu stehen (▶ Abschn. 19.2.3).

Neben den bisher vorgestellten Ansätzen, die sich vorrangig auf die visuomotorischen Transformationen beschränkt haben und die *kinematische Transformation* betreffen, wird in einem anderen experimentellen Paradigma die menschliche Fähigkeit zur Anpassung und zur Adaptation an von außen aufgeschaltete

Kräfte bzw. die Anpassung an Kraftfelder untersucht. Dieser Ansatz zielt auf die *dynamische Transformation* ab. Der einfachste Weg, die dynamische Transformation zu verändern, ist die Veränderung der Masse eines Körpergliedes durch das Hinzufügen unterschiedlich schwerer Gewichte. Komplexere experimentelle Ansätze erfordern die Anpassung von Bewegungen an ein sich veränderndes Kraftfeld (**Kraftfeldadaptation**). Ein weiterer Ansatz ist die Untersuchung der zusätzlichen dynamischen Transformation, die durch die Benutzung eines Werkzeugs bei der Ausführung der Bewegung in deren Planung mit einbezogen werden muss.

Das Hinzufügen von Gewichten zu den bewegten Körperteilen wurde u. a. von Bock (1990) untersucht. Die Anpassung an so veränderte dynamische Transformationen erfolgt sehr schnell. Die Bewegungsbahnen, Endpositionen und die Geschwindigkeitsprofile der Bewegungen sind schon nach wenigen Bewegungen äquivalent zu den Bewegungen ohne zusätzliche Masse. Allerdings verlängert sich mit einem Anstieg der aufgeschalteten Masse die Zeit für die Bewegungsausführung, während die maximalen Geschwindigkeiten der Bewegungen kleiner werden. Auch die Anpassung von Bewegungen an dynamische Transformationen, beispielsweise durch extern aufgeschaltete Kraftfelder, scheinen Menschen gut zu meistern. Gandolfo et al. (1996) z. B. ließen ihre Versuchspersonen Armbewegungen zu visuell sichtbaren Zielen ausführen. Während der Bewegungen wurde ein Kraftfeld aufgeschaltet, das proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit und etwa orthogonal zur Bewegungsrichtung war. Die Autoren konnten zeigen, dass die Versuchspersonen zunächst Bewegungsbahnen ausführten, die deutlich gekrümmt waren. Nach einiger Übung produzierten sie allerdings ebenso gerade Bewegungsbahnen wie vor der Aufschaltung des Kraftfeldes. Sie waren also in der Lage, sich an dieses Kraftfeld anzupassen, und erreichten die Zielgenauigkeit von vor der Kraftaufschaltung wieder. Diese Anpassung während der Kraftaufschaltung und ein negativer Nacheffekt nach Abschalten des Kraftfeldes sind Indizien dafür, dass eine Adaptation an die veränderte dynamische Transformation stattgefunden hat. Diese These konnte von anderen Autoren bestätigt werden (Shadmehr und Mussa-Ivaldi 1994; Brashers-Krug et al. 1996; Conditt et al. 1997; Krakauer et al. 1999; Tong et al. 2002).

19.2.3 Mechanismen sensomotorischer Adaptation

In Anlehnung an Jordan (1994) handelt es bei der Anpassung an eine neue sensomotorische Transformation um die schrittweise Lösung eines typischen Steuerungsproblems. Die bereits in ▶ Abschn. 19.2.1 definierten sensomotorischen Transformationen können im Rahmen der motorischen Kontrolle auch als Übergänge von einem proximaleren zu einem distaleren Signal beschrieben werden. *Proximal* bedeutet in diesem Zusammenhang näher am Ursprung der Bewegung, und könnte beispielsweise die Repräsentation der Bewegungskommandos im ZNS bezeichnen. *Distale Signale* sind entsprechend weiter vom Ursprung der Bewegung entfernt, wie beispielsweise die aus der Bewegung resultierenden Effekte in der Umwelt. Bewegungen werden aber, wie Sie aus Ihrer Alltagserfahrung wissen, nicht von proximal nach distal, sondern genau umgekehrt von distal nach proximal, also ausgehend von einem gewünschten Effekt, geplant (▶ Kap. 18 und 22). Dabei entspricht der gewünschte Effekt, den Sie erzielen möchten, beispielsweise das Ergreifen einer Kaffeetasse mit der Hand, der gewünschten Ausgangsgröße der motorischen Transformation, y^*. Die entsprechenden Werte der Eingangsgröße x fehlen. Diese Werte der Eingangsgröße sind nichts anderes als diejenigen Bewegungsparameter, die ein Erreichen des gewünschten Ergebnisses herbeiführen, also beispielsweise, welche Muskeln mit welcher Kraft wann und für wie lange aktiviert werden müssen, um aus einer bestimmten Ausgangssituation die Tasse sicher mit der dominanten Hand greifen zu können. Formal ausgedrückt muss das Ziel einer erfolgreichen Bewegungssteuerung also sein, die Werte der Eingangsgröße x zu bestimmen, die dazu führen, dass die Transformation $y = T(x)$ eine Ausgangsgröße y produziert, die mit der gewünschten Ausgangsgröße identisch ist ($y = y^*$) (Heuer 2006). Zur Bestimmung der Bewegungsparameter, die eine Lösung dieses Problems darstellen, muss die motorische Transformation T invertiert werden. Dabei lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Arten der Invertierung der Transformation unterscheiden, die den grundlegenden Mechanismen der Feedbackregelung und der Feedforwardsteuerung entsprechen (▶ Kap. 18 und 20). Beim Menschen finden sich grundsätzlich beide Lösungsmöglichkeiten dieses Steuerungsproblems (Cruse et al. 1990). Ist die Transformation einfach und kann gut gelernt werden, so ist die Qualität der *Feedforwardsteuerung* von entscheidender Bedeutung. Ist die Transformation hingegen sehr schwierig und kann kaum oder gar nicht gelernt werden, so ist *Feedbackregelung* für die Leistung entscheidend.

▪ Adaptation durch Anpassung von Feedbackregelung

Eine erste Möglichkeit zur Invertierung der motorischen Transformation sind sensomotorische Regelungsprozesse (▶ Kap. 20). Dabei wird der momentane Ist-Wert, also die momentane Ausgangsgröße y, kontinuierlich mit dem gewünschten Sollwert, also der gewünschten Ausgangsgröße y^*, verglichen. Die Abweichung von der gewünschten Ausgangsgröße führt dabei zur Korrektur der Eingangsgröße, bis momentane und gewünschte Ausgangsgröße übereinstimmen. Motorisches Lernen würde in diesem Zusammenhang eine Anpassung der am Regelungsprozess beteiligten Größen bedeuten. Ein Regelkreis verfügt über drei Größen:

1. Der Ist-Wert, der die Ausgangsgröße des Regelkreises darstellt, wird auch als **Regelgröße** bezeichnet.
2. Die motorischen Kommandos, die die Regelgröße (beobachtbares Verhalten) beeinflussen, gehören zur **Stellgröße**.
3. Der Soll-Wert, gegen den der Ist-Wert der Regelgröße abgeglichen wird, wird auch als **Führungsgröße** bezeichnet.

Sensomotorisches Lernen durch eine Optimierung der an der Regelung beteiligten Größen manifestiert sich neben einer erhöhten Genauigkeit meist in einer Verkürzung der Bewegungszeit, da durch die effektivere Arbeit des Regelkreises das Bewegungsziel schneller erreicht werden kann (z. B. Heuer und Hegele 2010). Eine Verkürzung der Bewegungszeit lässt sich im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückführen: eine Vergrößerung der Verstär-

kung und eine Verringerung der Totzeit. In Regelungssystemen bezeichnet Totzeit die Verzögerung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal. Totzeiten entstehen im sensomotorischen System durch die Zeit, die die synaptische Signalweiterleitung von sensorischen Signalen aus der Peripherie zu den sensomotorischen Zentren des ZNS und von motorischen Signalen vom Zentrum zu den motorischen Endplatten der an der Korrekturbewegung beteiligten Skelettmuskulatur benötigt. Die in einem Regelkreis wirksame Verstärkung gibt an, wie stark die Regeleinrichtung auf eine gemessenen Regelabweichung (= Differenz aus Führungs- und Regelgröße) reagiert. Je größer die Verstärkung ist, desto größer ist die der Abweichung entgegenwirkende Änderung der Stellgröße. Schnelles Lernen erfordert entsprechend einen großen Verstärkungsfaktor; allerdings birgt dieser die Gefahr, dass das System in eine unkontrollierte Oszillation gerät und der Regelkreis instabil wird. Das passiert im Fall überschießender Korrekturen, die dann wiederum selbst (mit überschießenden Korrekturen) kompensiert werden müssen.

Ein populäres Paradigma in der laborexperimentellen Erforschung menschlicher Regelkreiskontrolle sind sogenannte Tracking-Aufgaben. Im Allgemeinen erfordern diese Aufgaben, dass Versuchsteilnehmer einen durch sie kontrollierten Effektor, z. B. einen Cursor auf einem Computermonitor, mit einem Ziel in Übereinstimmung bringen. Während beim *Folgetracking* ein bewegliches Ziel nachzuverfolgen ist, muss die Versuchsperson beim *Kompensationstracking* einen von ihr kontrollierten Cursor durch Kompensation der durch äußere Kräfte verursachten Cursorbewegung in einem stationären Zielbereich halten (Senders und Cruzen 1952). In einem Tracking-Experiment von Pew und Rupp (1971) waren die Bewegungen des Cursors unvorhersehbar, sodass die Versuchsteilnehmer nicht in der Lage waren, ein bestimmtes Bewegungsmuster zu lernen, sondern einzig durch Optimierung von Feedbackregelung einen Leistungsfortschritt erreichen konnten. Pew und Rupp beobachteten, dass sich die Handbewegung im Lernverlauf zu einem verzögerten und maßstabsveränderten Abbild der Bewegung des Cursors entwickelte. Durch Modellierung der Verhaltensdaten konnten sie zeigen, dass die Totzeit nur zu Beginn der Übungsphase sinkt und dann eine Asymptote erreicht, während die Verstärkung über die gesamte Übungsdauer ansteigt. Diese übungsabhängige Anpassung des Regelkreises lässt sich als Optimierung eines Regelungsprozesses mit dem Ziel, Leistung zu verbessern, verstehen (Heuer 1983). Es ist allerdings noch unklar, welche psychologischen Mechanismen dieser Anpassung von Totzeit und Verstärkung zugrunde liegen. Im Folgenden betrachten wir daher in einer ersten didaktischen Annäherung die übungsabhängigen Anpassungen aller drei in einem Regelkreis vorhandenen Größen: der Führungsgröße, der Regelgröße und der Stellgröße.

Übungsbedingte Anpassung der Führungsgröße Die übungsbedingte Verbesserung der Genauigkeit und der Stabilität der *Führungsgröße* ist ein prominenter Bestandteil von Adams' Regelungstheorie motorischen Lernens (▶ Abschn. 19.3.1). Adams (1971) schlug vor, dass die Kenntnis über das Resultat der Bewegung (*knowledge of results*; ▶ Abschn. 19.3.2) dazu dient, diejenigen sensorischen Konsequenzen einer Bewegung zu speichern, die mit deren erfolgreicher Ausführung einhergingen. Eine entsprechend ausgebildete perzeptuelle Spur sollte also in der Lage sein, als Führungsgröße auch in Situationen, in denen keine Ergebnisrückmeldung zu Verfügung steht, eine Bewegung als korrekt zu erkennen und so als eine Art innerer Verstärker eine Wiederholung dieser Bewegung zu gewährleisten.

Tatsächlich konnten Adams et al. (1972) zeigen, dass der Wegfall von Ergebnisfeedback bei hochgeübten Bewegungen nicht zu einem Leistungsabfall führt, während er bei weniger gut geübten Bewegungen (entweder aufgrund einer geringeren Anzahl an Übungsdurchgängen oder mangelnder Verfügbarkeit von Ergebnisrückmeldungen in der Lernphase) in schlechterer Leistung resultiert. Adams und Kollegen werteten dies als Beleg dafür, dass sich im Verlauf des motorischen Lernprozesses eine interne Repräsentation der Führungsgröße etablierte, die zu einer erfolgreichen Bewegungsausführung beitragen könne. Allerdings ist bei den von Adams verwendeten, relativ langsamen Zielbewegungen nicht klar, ob es sich bei den beobachteten Effekten tatsächlich um eine übungsabhängige Anpassung der perzeptuellen Spur oder eine Anpassung der Gedächtnisspur handelt (▶ Abschn. 19.3.1). In einem Versuch, diese beiden Komponenten experimentell zu dissoziieren, ließen Schmidt und White (1972) ihre Versuchspersonen die zu lernende Zielbewegung sehr schnell ausführen, sodass sensorisches Feedback während der Bewegungsausführung nicht zur Verfügung stand. (Zielbewegungen der Hand werden aufgrund von Verzögerungen und Rauschen in der synaptischen Signalweiterleitung erst ab einer Bewegungsdauer von 150–200 ms von bewegungsbezogenem sensorischen Feedback beeinflusst; Miall et al. 1993; Poulton 1973; Saunders und Knill 2003.) Die Genauigkeit der tatsächlich ausgeführten Bewegung diente somit als Maß für die Qualität des in der Gedächtnisspur gespeicherten Bewegungsprogramms. Unmittelbar nach jeder Bewegungsausführung ließen Schmidt und White ihre Versuchspersonen die Genauigkeit der Bewegung selbst einschätzen und bildeten dann die Differenz zwischen der geschätzten und der tatsächlichen Bewegungsgenauigkeit als Indikator für die Qualität der perzeptuellen Spur. Sie fanden, dass sich, wenn Ergebnisrückmeldung zur Verfügung stand, beide Maße im Übungsverlauf verbesserten und diese Leistungsverbesserung auch nach Wegfall der Ergebnisrückmeldung am Ende der Lernphase stabil erhalten blieb. Darüber hinaus konnten Newell und Chew (1974) mit einer ähnlichen Aufgabe zeigen, dass eine Variation in der Verfügbarkeit von Ergebnisrückmeldung während der Lernphase selektiv die Genauigkeit der subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen beeinflusste, nicht aber die Genauigkeit der tatsächlich ausgeführten Bewegung, was wiederum die Annahme einer übungsabhängigen Verbesserung der intern repräsentierten Führungsgröße der Bewegung unterstützt.

Einen anderen Ansatz wählten Agostini et al. (2004). In ihrer Studie untersuchten sie die Wirkung zusätzlicher akustischer Information auf die Optimierung der Wurfbewegung von erfahrenen Hammerwerfern. Anstelle von akustischem Feedback über die tatsächliche Wurfbewegung hörten die Athleten während jeder Bewegungsausführung über Kopfhörer den rhythmischen Sound ihres in einem Vortest gemessenen weitesten Wurfes. Alle untersuchten Athleten verbesserten durch die gleichzeitige Präsentation einer optimalen Führungsgröße ihre Bewegung sowohl hinsichtlich der Weite als auch der Stabilität ihrer Würfe.

Die Vorgabe einer optimalen Führungsgröße unter Ausnutzung der durch vorheriges Üben entstandenen Kopplung von sensorischen (akustischen) Signalen und motorischen Kommandos scheint also Bewegungskoordination verbessern und stabilisieren zu können. Ähnliche Ergebnisse erbrachte eine Pilotstudie zur Nutzung künstlich erzeugter Bewegungsgeräusche für die Gangschulung bei Parkinsonpatienten. Hörten die Patienten die Bewegungsgeräusche einer gesunden Testperson, so verringerte sich die Variabilität der Schrittlänge in der Patientenstichprobe (Rodger et al. 2014).

Übungsbedingte Anpassung der Regelgröße Die übungsabhängige Anpassung von Feedbackregelung kann aber nicht nur durch Aufbau einer genaueren internen Repräsentation der Führungsgröße geschehen, sondern auch durch eine verbesserte Registrierung und Verarbeitung der *Regelgröße*, also der sensorischen Informationen über die tatsächlich ausgeführten Bewegungen. Bisherige Studien haben sich in diesem Zusammenhang schwerpunktmäßig mit der Wirkung eines der motorischen Lernphase vorgeschalteten Wahrnehmungstrainings beschäftigt. Diese auch als *perzeptuelles Lernen* bezeichnete Schulung der visuellen Wahrnehmung und/oder der Propriozeption konnte in unterschiedlichen Studien mit verbessertem motorischen Lernen in Verbindung gebracht werden. So berichten Rosenkranz und Rothwell (2012), dass das Üben einer somatosensorischen Diskriminationsaufgabe zu einer höheren Erregbarkeit des primärmotorischen Cortex und zu verbessertem motorischen Lernen führte. Interessanterweise waren die beobachteten positiven Effekte des sensorischen Trainings auf die Modalität beschränkt, die die für die motorische Lernaufgabe relevanten Informationen lieferte: Verbessertes motorisches Lernen der in ihrer Studie auszuführenden Handbewegung zeigte sich ausschließlich infolge einer Intervention, bei der die Versuchspersonen propriozeptive Reize zu diskriminieren hatten, nicht aber nach einer taktilen Diskriminationsaufgabe (Hautstimulation), bei der propriozeptive Signale keine Rolle spielten. Als Erklärung für die beobachteten Effekte schlugen Rosenkranz und Rothwell (2012) vor, dass durch ein vorgeschaltetes propriozeptives Wahrnehmungstraining das mit jeder Bewegungsausführung einhergehende propriozeptive Feedback besser verarbeitet werden kann. In Übereinstimmung mit früheren Studien (z. B. Ziemann et al. 2001; Stagg et al. 2011) führen sie diese Steigerung der Effizienz propriozeptiver Informationsverarbeitung auf eine gebrauchsabhängige Veränderung synaptischer Plastizität zurück, was auch die Spezifität der beobachteten Effekte erklären würde: Training, das Aufmerksamkeit von propriozeptiven Signalen ablenkt, führt dann nämlich zu einer schlechteren Verarbeitung bewegungsbezogenen propriozeptiven Feedbacks.

In eine ähnliche Richtung weisen auch die Ergebnisse einer Studie von Darainy et al. (2013). Sie konnten allerdings zeigen, dass das alleinige Beachten propriozeptiver Signale nicht automatisch zu verbessertem motorischen Lernen führt. Der positive Effekt ist vielmehr abhängig vom individuellen Lernfortschritt, der im Wahrnehmungstraining erzielt wurde. In ihrem Experiment mussten Versuchspersonen beurteilen, ob passive Armbewegungen entlang einer von einem Roboterarm geführten Bewegungsbahn nach rechts oder nach links verliefen. Im Zuge des Wahrnehmungstrainings verbesserte sich die Genauigkeit, mit der die passive Armbewegung wahrgenommen wurde. Diese Veränderung in der Wahrnehmung führte zu einem schnelleren Lernfortschritt in einer nachfolgenden motorischen Lernaufgabe. Versuchspersonen mit vorgeschaltetem Wahrnehmungstraining erreichten in derselben Zeit ein höheres Fertigkeitsniveau als eine Kontrollgruppe, die kein Wahrnehmungstraining absolviert hatten.

Besonders interessant sind nun die Ergebnisse einer weiteren Gruppe von Versuchspersonen, die dieselben passiven Armbewegungen wie die Trainingsgruppe erfahren, aber keine Diskriminationsaufgabe und auch kein Feedback hinsichtlich der Genauigkeit ihrer Bewegungswahrnehmung erhalten hatten. Diese Gruppe zeigte keine signifikante Verbesserung des motorischen Lernens im Vergleich zur Kontrollgruppe, während die Diskriminationsgruppe den beiden anderen Gruppen signifikant überlegen war. In Übereinstimmung mit diesen behavioralen Ergebnissen berichten Vahdat et al. (2012) von Veränderungen in frontalen motorischen Hirnarealen und dem cerebellären Cortex durch perzeptuelles Lernen, sodass davon auszugehen ist, dass zumindest Teile der übungsbedingten Verbesserung einer Bewegungsausführung auf perzeptuelle Lernmechanismen und eine verbesserte Wahrnehmung der an der Bewegung beteiligten Effektoren zurückgeführt werden können.

Neben Studien, die die Wirkung eines dezidierten Wahrnehmungstrainings auf motorische Lernprozesse, also die Wirkung von übungsbedingten Verbesserungen in der Wahrnehmung auf übungsbedingte Verbesserungen in der Bewegungssteuerung, untersuchen, existieren ebenfalls Studien, die sich mit der umgekehrten Wirkrichtung, also der Wirkung von übungsbedingten Verbesserungen in der Bewegungssteuerung auf die Wahrnehmung der an einer Bewegung beteiligten Effektoren, beschäftigen. Dabei sind die Konsequenzen motorischen Lernens für die Wahrnehmung sowohl von allgemeinen übungsabhängigen Veränderungen in der Wahrnehmung der Umwelt (z. B. die Vorhersage der Bewegung beobachteter Objekte; Brown et al. 2007) als auch von perzeptuellen Verzerrungen in der Wahrnehmung des eigenen Körpers (Ostry et al. 2010) zu unterscheiden, die nicht notwendigerweise zu einer genaueren Wahrnehmung der an der Bewegung beteiligten Effektoren und somit der Regelgröße führen. Die beobachteten positiven Effekte sind sehr spezifisch, da sich ein erhöhtes propriozeptives Auflösungsvermögen nur für Körperkonfigurationen nachweisen lässt, die vorher im Lernverlauf auch tatsächlich realisiert wurden, und analog zu den Ergebnissen von Darainy et al. (2013) ebenfalls abhängig vom Ausmaß der übungsbedingten Verbesserungen in der Bewegungsausführung (Wong et al. 2011). Zusammengenommen legen diese Studien die Vermutung nahe, dass zumindest ein Teil der übungsbedingten Verbesserungen im motorischen Lernen auf perzeptuelle Lernprozesse zurückzuführen ist, sodass es sinnvoll erscheint, statt von motorischem von sensomotorischem Lernen zu sprechen. Ebenfalls sinnvoll erscheint es, kein zu enges Verständnis von der in der Literatur oftmals zitierten „motorischen" Expertise für Wahrnehmungsprozesse zu pflegen, da jede Bewegungsausführung mit sensorischen Informationen einhergeht, die als Bestandteil des sensomotorischen Lernprozesses auch zur Verfügung stehen, wenn der dominante Wahrneh-

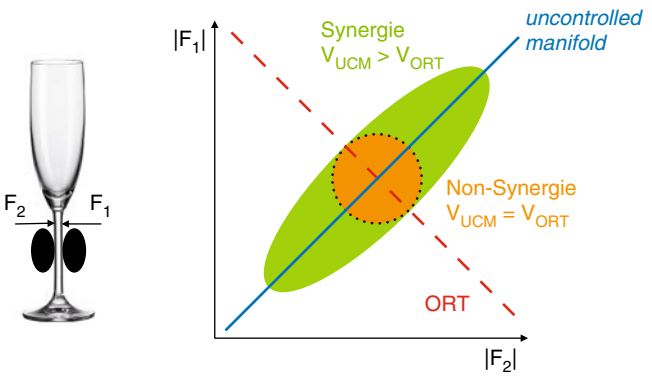


Abb. 19.5 Die Ellipse entspricht allen Kombinationen aus F_1 und F_2, die zum Erfolg führen. Der *grüne* Bereich der Ellipse kennzeichnet dabei einen Unterbereich, in dem die aufgabendienliche (Co-)Varianz entlang des UCM größer ist als die aufgabenhinderliche Varianz. Das bedeutet, dass hier die Einzelelemente des Lösungsraumes kovariieren, um das Zielerreichen zu stabilisieren. Der *orangefarbene Kreis* beschreibt den Bereich der Werte, die F_1 und F_2 annehmen können, sodass die Aufgabe erfolgreich gelöst wird, ohne dass einzelne Elemente zur Stabilisierung der Zielerreichung kovariieren (müssen). *UCM* uncontrolled monifold, *ORT* Linie orthogonal zum uncontrolled manifold. (Aus Latash 2010)

mungskanal in der Übungsphase „ausgeschaltet" ist (z. B. Casile und Giese 2006). Es scheint also auf Basis der hier dargestellten Ergebnisse unsinnig, so etwas wie pures motorisches Lernen oder eben pure motorische Expertise zu postulieren.

Übungsbedingte Anpassung der Stellgröße Abschließend kann auch eine übungsbedingte Änderung der *Stellgröße* Einfluss auf die Leistung nehmen. Die Stellgröße eines Regelkreises umfasst die Bestandteile, auf die aktiv eingewirkt wird, um den momentanen Soll-Wert an den gewünschten Ist-Wert anzunähern. Ein Beispiel für eine übungsabhängige Veränderung der Stellgröße ist die Entwicklung von muskulären Synergien im Übungsverlauf (▶ Abschn. 19.3.1). Entsprechend besteht die Grundidee einer übungsbedingten Verbesserung der Stellgröße einerseits in einer Anpassung der Anzahl und andererseits in der Koordination der an der Bewegung beteiligten Einzelelemente. Zentral für Letzteres ist das Prinzip der *Abundanz* (Latash 2012; s. auch ▶ Abschn. 19.3.1), dem zufolge das ZNS nicht nach der einen optimalen Lösung des Steuerungsproblems sucht, sondern eine Sammlung von verschiedenen Lösungsmöglichkeiten entwickelt, die alle in der Lage sind, ein geplantes Bewegungsziel zu erreichen. Zu Beginn des Lernprozesses ist nicht davon auszugehen, dass die einzelnen an der Bewegung beteiligten Elemente, seien es Gelenke, Muskeln oder motorische Einheiten, in irgendeiner Art und Weise wechselseitige Abhängigkeiten aufweisen. Das bedeutet, dass jedes einzelne Element von der Steuerzentrale einzeln angesprochen und kontrolliert werden kann/muss. Eine **Synergie** beschreibt nun eine sich im Lernverlauf entwickelnde aufgabenspezifische Organisationseinheit (Gelfand und Tsetlin 1966), in der mehrere dieser vormals unabhängigen Einzelteile kovariieren, d. h. als Teile eines aufeinander abgestimmten Koordinationsmusters durch Flexibilität in der Bewegungsausführung das stabile Erreichen eines geplantes Bewegungszieles gewährleisten. Ein Beispiel: Stellen Sie sich vor, die Kombination zweier Elemente, nennen wir sie 2 und 2, ergäbe 4. Verändert sich das erste Element, aus 2 wird 1, kann das Ergebnis genau dann weiterhin 4 lauten, wenn das zweite Element in einer aufgabendienlichen Weise mit der Veränderung des ersten Elements kovariiert: Aus 2 wird 3 und $1 + 3 = 4$.

Studien, die versucht haben, diese übungsabhängige Entwicklung motorischer Synergien zu quantifizieren, sind rar und basieren auf dem *uncontrolled-manifold*-Ansatz (Scholz und Schöner 1999; Überblick in Latash et al. 2007). Dabei kann man sich die Aufgabe der Steuereinheit als Suche nach stabilen Aufgabenlösungen in einem multidimensionalen Zustandsraum vorstellen. Dieser Zustandsraum beschreibt den Zustand aller Elemente des zu kontrollierenden Systems, z. B. den Aktivierungszustand jedes Muskels unseres Körpers. Aufgabenlösungen sind alle Kombinationen der im Zustandsraum befindlichen Elemente (z. B. besagte Muskelaktivierungen), die zu einem Erreichen des Bewegungszieles führen. Im Lernverlauf wählt die Steuereinheit diejenigen Elemente aus, die für ein Erreichen des Bewegungszieles notwendig sind. Dieser Unterbereich des Zustandsraumes ist der *uncontrolled manifold* (UCM), auf dem die einzelnen Elemente so angeordnet sind, dass sie kovariieren, d. h., dass die Variabilität jedes einzelnen Elements durch die Variabilität der anderen Elemente ausgeglichen wird und so nur wenig Auswirkung auf das Bewegungsergebnis hat. Betrachtet man nun das Verhalten der einzelnen Elemente über mehrere Bewegungsausführungen hinweg, so lassen sich zwei Arten von Variabilität in der Bewegungsausführung unterscheiden:

1. *Aufgabendienliche Variabilität* entspricht der eben erwähnten Kovarianz der einzelnen Elemente entlang des UCM. Verändert sich ein Element innerhalb des UCM, schlägt sich diese Veränderung nicht im Bewegungsergebnis nieder, da die in einem Element auftretende Varianz durch Kovarianz anderer Elementen kompensiert wird.
2. *Aufgabenhinderliche Variabilität* entspricht der Variabilität orthogonal zum UCM und wird entsprechend nicht durch Kovarianz in anderen Elementen kompensiert (Abb. 19.5).

Stellen Sie sich folgendes Gedankenexperiment vor: Sie bitten eine Versuchsperson, ein Sektglas an dessen Hals mit einem Präzisionsgriff (Daumen und Zeigefinger an gegenüberliegenden Seiten des Glases) zu greifen und in der Luft zu halten. Um zu gewährleisten, dass sich das Glas nicht in eine der beiden Kraftrichtungen F_1 oder F_2 bewegt, muss die Summe der Kräfte, die von Daumen und Zeigefinger erzeugt werden, gleich 0 sein. Dies sagt allerdings nichts über die Größe der absoluten Kräfte von Daumen und Zeigefinger aus, sodass alle Lösungsmöglichkeiten dieser Bewegungsaufgabe im Zustandsraum dieses Zwei-Komponenten-Systems als eine Gerade dargestellt werden können. Diese Gerade bildet alle Kombinationen aus F_1 und F_2 ab, die summiert 0 ergeben ($F_{SUM} = |F_1| - |F_2| = 0$), also ein Erreichen des Bewegungszieles gewährleisten. Diese Linie entspricht dem *uncontrolled manifold*. Die Linie orthogonal zum *uncontrolled manifold* (ORT) entspricht Veränderungen in F_{SUM}. Kleinere Abweichungen in diese Richtung (ORT) sind in biologischen Systemen nicht zu vermeiden.

Es wird Ihnen, auch ohne dass Sie mehrere der von Ihnen gehaltenen Sektgläser geleert haben, nicht gelingen, F_{SUM} perfekt auf 0 zu bringen. Diese Abweichungen sind allerdings zu gering, um das Erreichen ihres Bewegungszieles zu gefährden. Variabilität entlang des UCM ist hingegen abhängig von den jeweiligen Aufgabenanforderungen und den Lösungsstrategien des Ausführenden. Bestünde die Aufgabe lediglich in der Produktion von Kräften, deren Summe 0 ergäbe, so wäre jede Kombination aus F_1 und F_2, die auf dem UCM liegt, möglich. Zu große Kräfte könnten allerdings zum Zerbrechen des Stiels und zu geringe Kräfte zu einem Entgleiten des Glases führen, so dass die Merkmale der Aufgabe (die glatte Oberfläche des Glases sowie dessen Zerbrechlichkeit) die Variabilität entlang des UCM begrenzen und den Lösungsraum beschränken. Durch Bilden des Verhältnisses aus Variabilität entlang des UCM (aufgabendienlich) und Variabilität entlang von ORT (aufgabenhinderlich) kann die Entwicklung von Synergien im Übungsverlauf quantifiziert werden.

Studien, die sich mit der Quantifizierung der Entwicklung von Synergien beschäftigt haben, berichten von beidem: sowohl von einem Anstieg (Kang et al. 2004; Latash et al. 2003) als auch von einer Abnahme (Domkin et al. 2002) von Synergien im Übungsverlauf. Asaka et al. (2008) ließen Versuchspersonen Armbewegungen auf einer instabilen Plattform ausführen. Um zu verhindern, dass es infolge der Armbewegungen zu einem Verlust des Gleichgewichts kommt, muss das zentrale Nervensystem im Rahmen sensomotorischer Adaptation die mit den Armbewegungen einhergehenden Verlagerungen des Körperschwerpunktes vorhersagen und entsprechend kompensieren. Tatsächlich fanden die Autoren, dass sich die Haltungskontrolle im Übungsverlauf verbesserte, und zwar durch die Entwicklung flexibler muskulärer Synergien, die die Position des Körperschwerpunktes entlang der Horizontalachse stabilisierten. Von einer genau gegenläufigen Entwicklung, einer Abnahme der muskulärer Synergien im Übungsverlauf, berichten Domkin et al. (2002), die ihre Versuchspersonen eine bimanuelle Zeigeaufgabe üben ließen, bei der sie zwei Objekte so schnell wie möglich ineinanderstecken sollten. Eine mögliche Erklärung für die divergierenden empirischen Befunde könnte die im Übungsverlauf zunehmende Festlegung auf eine bestimmte Bewegungsausführung bzw. einen bestimmten Unterbereich entlang des UCM sein, der aufgrund von bereits im Gedankenexperiment erwähnten zusätzlichen Gesichtspunkten wie Aufgabenanforderungen oder individuellen Kontrollstrategien den möglichen Lösungsraum weiter einschränkt, was zu einer Abnahme der aufgabendienlichen Variabilität entlang des UCM führt, da nicht mehr alle möglichen Lösungen bei der Bewegungsplanung in Betracht gezogen werden. Im Falle der Studie von Domkin et al. (2002) war die zu erlernende Bewegung wahrscheinlich zu einfach. So mussten die Versuchsteilnehmer kein neues Bewegungsmuster lernen und auch keine neuen Synergien entwickeln, sondern lediglich bereits existierende Synergien auf die Anforderungen der Aufgabe abstimmen. Für diese Vermutung spricht, dass der Quotient aus aufgabendienlicher und aufgabenhinderlicher Variabilität bereits zu Beginn der Übungsphase größer als 1 war. Die Variabilitätskomponente entlang des UCM bot also mehr Raum für übungsabhängige Reduktion als die Variabilitätskomponente orthogonal zum UCM.

▪ Adaptation durch Anpassung von Feedforwardsteuerung

Neben der Optimierung von Feedbackregelung existiert noch eine weitere Möglichkeit zur Adaptation an neue sensomotorische Transformationen: die Anpassung von Feedforwardsteuerung bzw. der *offenen Steuerkette*. Dabei vertritt ein Großteil der motorischen Lerntheorien eine modellbasierte Perspektive, sodass im Zusammenhang mit der Anpassung von Feedforwardsteuerung auch häufig vom Erwerb eines inneren Modells der neuen sensomotorischen Transformation gesprochen wird. Anhand dieses Modells kann der erwünschten Ausgangsgröße der Transformation, also dem angestrebten Bewegungsziel y^*, die entsprechende Eingangsgröße (die Bewegungsparameter) zugeordnet werden, ohne dass bewegungsbezogene sensorische Informationen zur Steuerung der Bewegung genutzt werden (Heuer 1983; Wolpert und Kawato 1998). Alternativ dazu kann eine zum Erfolg führende Zuordnung von Bewegungsparametern zum jeweiligen gewünschten Bewegungseffekt aber auch direkt gelernt werden, ohne dass sich ein explizites Modell der Transformation entwickelt. Dies kann beispielsweise durch Versuch und Irrtum geschehen (▶ Kap. 10). Entsprechend wird in Anlehnung an Theorien des instrumentellen Lernens auch von *modellbasiertem* und *modellfreiem Lernen* gesprochen, wobei sich innerhalb des modellfreien motorischen Lernens mindestens zwei separate Lernprozesse unterscheiden lassen (Huang et al. 2011), von denen im Folgenden nur **gebrauchsabhängige Plastizität** kurz vorgestellt und anhand ausgewählter Studien erläutert wird.

Wenn im Zusammenhang mit sensomotorischer Adaptation vom *Erwerb eines inneren Modells* einer neuen sensomotorischen Transformation gesprochen wird, so handelt es sich dabei um ein Modell des zu kontrollierenden Systems, also z. B. des Armes und der Hand beim Greifen einer Kaffeetasse oder der Computermaus beim Erlernen des Umgangs mit einem PC. Ein inneres Modell der Transformation zeichnet sich dadurch aus, dass es vom aktuellen Zustand der motorischen Transformation abgekoppelt ist (Heuer und Jäncke 2005). Solch ein inneres Modell kann an Veränderungen der motorischen Transformation angepasst werden. Allerdings tritt diese Anpassung dabei immer zeitlich verzögert auf. Bedingt durch zufällige und geplante Variationen der motorischen Transformation wird das innere Modell nie exakt der inversen Transformation entsprechen, sondern stets nur eine Annäherung daran darstellen.

Diese modellbasierte interne Repräsentation kann auf zwei unterschiedliche Arten genutzt werden (▶ Kap. 20): Einerseits können auf Basis des Ausgangszustands des sensomotorischen Systems und der ausgehenden motorischen Kommandos Vorhersagen über den Verlauf einer Bewegung und deren zukünftige sensorische Konsequenzen generiert werden. Diese Vorhersagemodelle sind vorwärts gerichtet, d. h., sie folgen der Richtung der motorischen Transformation von proximal nach distal – daher auch der Name **Vorwärtsmodell**. Andererseits können innere Modelle auch in umgekehrter Richtung genutzt werden. Anstelle der Kombination von momentanem Ausgangszustand und motorischen Kommandos tritt die Verbindung aus Ausgangszustand und dem gewünschtem Effekt in der Umwelt, sodass durch dieses Modell der invertierten motorischen Transformation dem gewünschten Effekt die erforderlichen Bewegungsparameter zu-

geordnet werden können. Entsprechend wird diese Form eines inneren Modells als **inverses Modell** bezeichnet. Schaltet man diese beiden Modelle hintereinander, so kann das sensomotorische System über das inverse Modell Bewegungskommandos festlegen, um einen gewünschten Effekt in der Umwelt zu erreichen, und dann anhand des Vorwärtsmodells die erwarteten sensorischen Konsequenzen berechnen.

Das Lernen eines Vorwärtsmodells scheint auf den ersten Blick recht unkompliziert. Alles, was es braucht, ist der Vergleich zwischen den vorhergesagten und den tatsächlich eingetretenen sensorischen Konsequenzen der Bewegung. Eventuelle Diskrepanzen können direkt als Fehlersignal zur Anpassung des Vorwärtsmodells genutzt werden. Auf Basis der gegenwärtigen Literatur scheint es sich bei modellbasiertem motorischen Lernen um einen automatischen Lernmechanismus zu handeln, der unabhängig vom Bewegungsergebnis versucht, Abweichungen zwischen dem vorhergesagten und dem tatsächlichen Verlauf einer Bewegung zu minimieren.

Mazzoni und Krakauer (2006) untersuchten explizite und implizite Prozesse bei der Adaptation an visuomotorische Rotationen. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, kreisförmig angeordnete Ziele mit einem Cursor auf einem Monitor durch Handbewegungen zu erreichen. Der Cursor wurde dabei um 45° entgegen dem Uhrzeigersinn gegenüber der Bewegung der Hand rotiert, was durch eine Gegenrotation der Handbewegung kompensiert werden konnte. Einer Hälfte der Versuchspersonen wurde eine Strategie erläutert, mit deren Hilfe sie diese Rotation bewusst durch den Einsatz dieser Strategie kompensieren konnten. Ihnen wurde geraten, immer auf das um 45° in Uhrzeigerrichtung gelegene Ziel zu zielen, um die Rotation zu kompensieren. Erstaunlicherweise beobachteten Mazzoni und Krakauer, dass die Strategiegruppe, obwohl sie von Beginn an das Ziel trafen, im Verlauf des Experiments eine Überkompensation entwickelten, d. h., dass ihre Handbewegung zunehmend mehr als 45° mit dem Uhrzeigersinn rotierte. Neben der Bedeutung für die Interaktion von expliziten und impliziten Adaptationsprozessen, die im nächsten Abschnitt behandelt wird, ist dieses Ergebnis einer unwillkürlichen Überkompensation der visuomotorischen Rotation ein starkes Indiz für die Bedeutung des Prädiktionsfehlers für die modellbasierte Anpassung von Feedforwardsteuerung. Der Ergebnisfehler ist in der Strategiegruppe nahe 0°, die Performanz fast optimal, da das Ziel durch Strategie immer erreicht wird. Der Prädiktionsfehler, also die Abweichung zwischen vorhergesagter und tatsächlicher Cursorbewegung, liegt durch die Rotation aber zu Beginn bei 45°. Dieser Prädiktionsfehler scheint eine automatische Anpassung von Feedforwardsteuerung anzutreiben, die zu der überschießenden sensomotorischen Adaptation führt.

Die Anpassung eines inversen Modells durch motorisches Lernen ist ungleich komplizierter. Problematisch ist, dass die lernrelevante Größe, die Abweichung des tatsächlichen vom korrekten Bewegungskommando, dem sensomotorischen System nicht ohne Weiteres zur Verfügung steht (Wolpert und Ghahramani 2000). Zwar erhält das sensomotorische System die Information, dass eine Bewegung nicht das erwünschte Ziel erreicht hat, diese Information liegt aber in einem sensorischen Format vor. Um das inverse Modell nun entsprechend anzupassen, also die dem gewünschten Effekt zugeordneten Bewegungskommandos zu verändern, muss die Zielabweichung von einem sensorischen in ein motorisches Format gebracht werden. Eine Möglichkeit, diese „Fehlertransformation" zu bewerkstelligen, ist Feedbackregelung.

Wie Sie bereits gelesen haben, arbeiten beim Menschen beide Lösungen des Steuerungsproblems, Feedforwardsteuerung und Feedbackregelung, parallel. Existiert beispielsweise noch kein inneres Modell einer neuen sensomotorischen Transformation, werden Bewegungskommandos durch Regelkreiskontrolle bestimmt. Ist ein inverses Modell vorhanden, werden die Bewegungsparameter durch das inverse Modell bestimmt. Sobald sensorisches Feedback über die Bewegungsausführung zur Verfügung steht, fließt eine eventuelle Zielabweichung als Eingangsgröße in den Regelkreis. Dort werden, wie Sie wissen, auf Basis des Feedbacks Korrektursignale generiert, die ein motorisches Format haben. Diese motorischen Feedbacksignale können dann genutzt werden, um die motorischen Feedforwardsignale des inversen Modells zu trainieren. Wenn im Regelkreis keine Korrektursignale generiert werden, bedeutet das, dass das inverse Modell die korrekten Bewegungsparameter ausgegeben hat und eine Anpassung der im inversen Modell repräsentierten sensomotorischen Transformation nicht notwendig ist. Diese Lernprozedur wird entsprechend als *Feedback-Error-Learning* bezeichnet (Kawato 1990) und wird vermutlich über das Kletterfasersystem des Kleinhirns vermittelt (Kawato und Gomi 1992; Wolpert et al. 1998).

Es stellt sich nun noch die Frage, wie ein einzelnes inverses Modell all die unterschiedlichen Transformationen, die uns tagtäglich begegnen, lernen kann. Die Antwort ist einfach: gar nicht. Ein einzelnes Modell müsste extrem komplex sein, um alle Transformationen abbilden zu können. Gelänge dies nicht, müsste das Modell immer wieder an die gerade wirksame Transformation angepasst werden, was unweigerlich zu Fehlern in der Bewegungssteuerung führen würde. Wolpert und Kawato (1998; vgl. auch Haruno et al. 2001) schlugen vor, dass das sensomotorische System über eine ganze Reihe von inversen Modellen verfügt, und jedes repräsentiert eine sensomotorische Transformation. Der Beitrag jedes inversen Modells zu einer geplanten Bewegung hängt nun von zwei weiteren Modellen ab, die mit dem inversen Modell ein separates Modul bilden. Der *responsibility predictor* spezifiziert ähnlich dem Schmidt'schen Wiedergabeschema (► Abschn. 19.3.1) auf Basis sensorischer Informationen über den jeweiligen Bewegungskontext die Zuständigkeit jedes inversen Modells und gewichtet somit die Ausgabe des zugehörigen inversen Modells in einer gegebenen Ausgangssituation schon vor Bewegungsbeginn. Das Vorwärtsmodell generiert, ähnlich dem Wiedererkennungsschema, auf Basis des gegenwärtig wahrgenommenen Zustands des Körpers und der Welt sowie der motorischen Kommandos, die das jeweilige inverse Modell ausgegeben hat, Vorhersagen über die zu erwartenden sensorischen Konsequenzen, die dann mit den tatsächlichen sensorischen Konsequenzen abgeglichen werden können. Dieser Prädiktionsfehler kann dann als nachträgliches Maß für die Zuständigkeit eines inversen Modells im jeweiligen Bewegungskontext genutzt werden. Die Kombination aus diesen beiden Zuständigkeitssignalen spezifiziert den Beitrag eines inversen Modells und der

darin repräsentierten sensomotorischen Transformation zur Bewegungssteuerung in einem bestimmten Kontext.

Empirische Evidenz für eine von inneren Modellen unabhängige, *modellfreie Anpassung von Feedforwardsteuerung* kommt aus Studien, in denen die wiederholte Ausführung einer spezifischen Bewegung zu einer Verzerrung, einem Bias, zukünftiger Bewegungsausführungen in Richtung der wiederholt ausgeführten Bewegung führt. Classen et al. (1998) lösten mittels Transkranieller Magnetstimulation (TMS) isolierte Daumenbewegungen bei ihren Versuchspersonen aus. In einer initialen Baselinephase maßen sie so für jede Versuchsperson die Hauptrichtung der durch TMS induzierten Daumenbewegung. In der folgenden 30-minütigen Trainingsphase sollten die Versuchspersonen Daumenbewegungen in die der Baselinebewegung gegenüberliegende Richtung ausführen. Handelte es sich bei der Baselinebewegung also um eine Kombination aus Flexion und Adduktion, so war die zu übende Bewegung eine Kombination aus Extension und Abduktion. Nach ca. 138 (±31) Übungsbewegungen wurde wiederum TMS an demselben Stimulationsort wie in der Baselinebedingung appliziert und die Bewegungsrichtung der so ausgelösten Daumenbewegungen gemessen. Es zeigte sich eine Rotation der durch TMS evozierten Daumenbewegung in Richtung der geübten Bewegung, die im Verlauf der 40-minütigen Posttrainingsphase graduell wieder in Richtung der Baselinebewegung zurück rotierte. Classen et al. (1998) sahen in diesem Ergebnismuster einen Beleg für die Reorganisation eines für die Daumenbewegung verantwortlichen neuronalen Netzwerks als Reaktion auf die wiederholte Bewegungsausführung in die der Baselinebewegung gegenüberliegende Richtung.

Diese Form von *gebrauchsabhängiger Plastizität* kann unterschiedliche Funktionen erfüllen. Einerseits kann sie eine Art sensomotorisches Kurzzeitgedächtnis darstellen, das insbesondere in frühen Lernphasen die Formation und Konsolidierung von bewegungsbezogenen Informationen in einem sensomotorischen Langzeitspeicher ermöglicht. Andererseits kann gebrauchsabhängige Plastizität als ein Lernmechanismus verstanden werden, der bei der Spezifikation von Bewegungsparametern im Rahmen der Bewegungsplanung Informationen hinsichtlich der momentanen Ausgangssituation und des erwünschten Bewegungszieles mit Informationen über die Bewegungsparameter kürzlich ausgeführter Bewegungen kombiniert. So führte in einer Studie von Verstynen und Sabes (2011) die wiederholte Ausführung einer Zeigebewegung mit denselben Parametern zu zunehmend präziseren und weniger variablen Bewegungen, wenn in zukünftigen Bewegungen dieselben Parameter erforderlich waren. Ist allerdings eine Änderung der Bewegungsparameter erforderlich, beispielsweise bei Bewegungen zu einem anderen räumlichen Ziel, werden die Bewegungen unpräziser und variabler.

Gebrauchsabhängige Plastizität führt also einerseits zu einem Bias, zukünftige Bewegungen mit den Parametern kürzlich ausgeführter Bewegungen zu versehen, reduziert aber auch, wenn es sich um eine Wiederholung der gerade ausgeführten Bewegung handelt, die Variabilität in der (wiederholten) Bewegungsausführung. Verstynen und Sabes (2011) konnten darüber hinaus zeigen, dass es sich bei gebrauchsabhängiger Plastizität um einen automatischen Lernprozess und nicht um die Anwendung expliziter, kognitiver Strategien handelt. Sie baten ihre Versuchspersonen, Zeigebewegungen von einer zentralen Startposition zu Zielen, die kreisförmig um die Startposition angeordnet waren, auszuführen. Die Ziele wurden nacheinander in Abständen von 3° entweder mit oder gegen den Uhrzeigersinn präsentiert. Die Versuchspersonen waren sich dieser Abfolge bewusst und konnten so die Position des jeweils nächsten Zieles genau vorhersagen, sodass auf Basis einer kognitiven Strategie keine oder nur äußerst geringe Richtungsfehler zu erwarten gewesen wären. Im Gegensatz dazu sollte gebrauchsabhängige Plastizität, also ein Bias in Richtung der vorher ausgeführten Bewegungen, bei einer Zielfolge mit dem Uhrzeigersinn zu einem systematischen Richtungsfehler gegen den Uhrzeigersinn und umgekehrt bei einer Zielfolge gegen den Uhrzeigersinn zu einem systematischen Richtungsfehler mit dem Uhrzeigersinn resultieren. Und tatsächlich zeigten sich genau diese richtungsabhängigen Abweichungen (Verstynen und Sabes 2011, Experiment 3). Gebrauchsabhängige Plastizität scheint also unabhängig vom tatsächlichen Bewegungsergebnis eine Tendenz zur Wiederholung vormals ausgeführter Bewegungen darzustellen.

Mittlerweile existieren eine Reihe von Studien, die gebrauchsabhängige Plastizität auch in visuomotorischen Lernaufgaben nachweisen konnten (z. B. Diedrichsen et al. 2010; Huang et al. 2011). Dabei zeigte sich, dass sich modellbasierte und gebrauchsabhängige Anpassungen von Feedforwardsteuerung parallel und unabhängig voneinander entwickeln können. In einem Experiment von Diedrichsen et al. (2010) mussten Versuchspersonen Zielbewegungen zu einem einzelnen Ziel ausführen. Dabei wurden sie durch ein Kraftfeld in eine Bewegungsrichtung gelenkt, die relativ zur visuellen Zielrichtung um 8° mit dem Uhrzeigersinn gedreht war. Da dies zu einer Abweichung der Cursorbewegung um eben diese 8° mit dem Uhrzeigersinn führte, versuchten die Versuchsteilnehmer in den folgenden Bewegungen die durch das Kraftfeld induzierte Rotation der Bewegungsrichtung zu kompensieren. Diese Bemühungen waren allerdings ohne Erfolg, da das Kraftfeld so konstruiert war, dass nur Bewegungen innerhalb eines engen Korridors entlang der um 8° gedrehten Bewegungsrichtung möglich waren. Als Maß der Anpassung der Feedforwardsteuerung stieg die Kraft, die die Versuchspersonen gegen die Wand des Kraftfeldkorridors ausübten, über die Übungsdurchgänge hinweg an. Nach Abschalten des Kraftfeldes zeigte sich entsprechend ein Nacheffekt in die der durch den Korridor induzierten visuomotorischen Rotation entgegensetzte Richtung, also gegen den Uhrzeigersinn, der allerdings im Verlauf der folgenden wenigen Durchgänge verschwand. Zur Überraschung der Autoren zeigte sich im Anschluss ein Nacheffekt in Richtung der durch das Kraftfeld ausgelösten Rotation mit dem Uhrzeigersinn, der vermutlich durch die erzwungenermaßen wiederholte Ausführung der um 8° mit dem Uhrzeigersinn rotierten Armbewegung eine gebrauchsabhängige Tendenz entwickelt hat. Diedrichsen et al. (2010) fanden zwar eine Korrelation der gegen den Korridor ausgeübten Kraft am Ende der Übungsphase mit dem adaptiven Nacheffekt, aber nicht mit dem gebrauchsabhängigen Nacheffekt, was für eine parallele Entwicklung der beiden Nacheffekte und somit die Unabhängigkeit des Erwerbs eines inneren Modells der Transformation und modellfreier gebrauchsabhängiger Plastizität spricht.

Adaptation durch Anpassung kognitiver Strategien

Analog zu dem im ▶ Blickfang beschriebenen Fallbeispiel von H.M. belegen eine Reihe von Untersuchungen sehr beeindruckend, dass sich Menschen an Transformationsänderungen anpassen und neue Transformationen erlernen können, ohne das Auftreten oder die Art der Transformation bewusst wahrzunehmen bzw. ihre Bewegungen wissentlich anzupassen. So zeigten z. B. Abeele und Bock (2003) sowie Buch et al. (2003), dass ihre Versuchspersonen die von ihnen ausgeführten Bewegungen an eine visuomotorische Rotation adaptierten, ohne Aussagen über die Art der Transformation machen zu können. Das implizite Lernen einer visuomotorischen Rotation wurde auch von Klassen et al. (2005) nachgewiesen. Die Versuchspersonen in einer Studie von Verwey und Heuer (2007) konnten sich an eine nichtlineare Verstärkungsänderung anpassen und diese auch lernen, gaben aber an, sich an eine lineare Verstärkungsänderung angepasst zu haben. Auch bei Prismenadaptationsversuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Versuchspersonen an kleine prismatische Verschiebungen oder graduell eingeführte Verschiebungen anpassen können, ohne sich dieser Verschiebungen bewusst zu sein (Dewar 1971; Uhlarik 1973; Jacobson und Goodale 1989).

Neben dieser impliziten Anpassung von Feedbackregelung und Feedforwardsteuerung findet sich insbesondere in der Literatur zu Prismenadaptation noch ein weiterer Lernmechanismus: strategisches Lernen auf Basis der Entwicklung expliziten Wissens über die Transformation. Lernende generieren insbesondere in der kognitiven Phase zu Beginn des motorischen Lernprozesses Hypothesen darüber, wie die jeweilige Bewegungsaufgabe zu bewältigen ist. Im Zuge dieser Bemühung, die Bewegung und die ihr zugrunde liegende sensomotorische Transformation kognitiv zu durchdringen, kann sich explizites Wissen über die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße entwickeln. Stellen Sie sich vor, sie setzen sich eine Prismenbrille auf die Nase und wissen, dass die Prismen ihr visuelles Feld um 11° nach rechts verschieben. Das bedeutet, dass Sie diese Information nutzen können, um beispielsweise bei einem Dartwurf absichtlich neben das von Ihnen ausgewählte visuelle Ziel zu zielen. Das Bulls-Eye liegt ja immer noch genau vor Ihnen, wird aber durch die Prismenbrille nach rechts verschoben, sodass Sie auf Basis der visuellen Information das Ziel verfehlen würden. Ein anderes Beispiel für eine kognitive Strategie zur Kompensation einer sensomotorischen Transformation ist ein Bogenschütze, der beim Zielen mit seinem Bogen einen starken Wind von der rechten Seite bemerkt und entsprechend die Orientierung des Pfeiles anpasst, um die Ablenkung des Pfeiles während des Fluges zu kompensieren.

Im Rahmen der Erforschung von Prismenadaptationen gibt es nun eine Vielzahl von Untersuchungen, die die Rolle kognitiver Strategien auf Basis expliziten Wissens und impliziter Anpassung bei der Anpassung an prismatische Verschiebungen untersucht haben. Diese Untersuchungen konnten zeigen, dass sehr ausgeprägte strategische Korrekturen während der Anpassung an eine Prismenbrille dazu führen, dass es kaum messbare Nacheffekte gibt (Stratton 1897; Richter et al. 2002). So wurde in einer Untersuchung von Michel et al. (2007) eine prismatische Verschiebung um 10° bei einem Teil der Teilnehmer in sehr kleinen Schritten von 2° graduell eingeführt, während in einer anderen Gruppe sofort die maximale prismatische Verschiebung von 10° aufgeschaltet wurde. In der Gruppe mit dem graduellen Anstieg der optischen Abweichung war den Versuchspersonen die prismatische Verschiebung nicht bewusst, während die Versuchspersonen der anderen Gruppe diese Verschiebung bemerkt hatten. Die graduelle, unbewusste Verschiebung war verbunden mit einem größeren Nacheffekt, einem Transfer auf die Hand, mit der nicht geübt wurde, und einer größeren Robustheit der Adaptation. Auch Jacobson und Goodale (1989) konnten diese größeren Nacheffekte bei nicht über die prismatische Verschiebung informierten Versuchspersonen zeigen. Bei Untersuchungen von älteren Menschen, von denen angenommen wird, dass die strategischen Prozesse im Vergleich zu jüngeren schlechter sind, und bei Patienten mit neurologischen Störungen, die mit verringerter strategischer Kontrolle verbunden sind, zeigten sich größere und länger anhaltende Nacheffekte (Weiner et al. 1983; Fernández-Ruiz et al. 2000).

Entsprechend postulieren Redding und Wallace (2006), dass bei der Prismenadaptation zwei Arten von Prozessen involviert sind: eine eher strategische, explizite Komponente auf der einen Seite und eine implizite, automatische Komponente auf der anderen Seite. Sie nehmen an, dass zunächst als unmittelbare Reaktion auf das Tragen einer Prismenbrille der von ihnen als *recalibration* oder *adaptive coordination* bezeichnete Prozess auftritt. Dieser Prozess, der als kognitiver Lernprozess einzuordnen ist, beschreibt bewusste strategische Korrekturen der ausgeführten Bewegungen. Das explizit verfügbare Wissen über die prismatische Verschiebung wird genutzt, um die Bewegungen an diese Verschiebung anzupassen. Neben diesem Prozess der *recalibration* wird durch das Aufsetzen der Prismenbrille aber auch ein zweiter Prozess initiiert. Dieser Prozess wurde von den Autoren als *realignment* oder *alignment* bezeichnet. Mit diesem automatischen Prozess wird die durch das eingesetzte Prismenglas entstandene Diskrepanz zwischen visuellen und propriozeptiven Informationen immer mehr verkleinert und schließlich entfernt. Während der Prozess des *realignment* der visuomotorischen Beziehung unbewusst und langsam verläuft, führt die Anwendung von bewussten strategischen Korrekturen zu einer sofortigen Anpassung an die prismatische Verschiebung. Redding und Wallace (1993) gehen davon aus, dass während der Anpassungsphase als direkter Effekt der prismatischen Verschiebung beide Prozesse gleichzeitig aktiv sind, während das alignment allein zur Adaptation führt und damit auch alleinig für das Auftreten eventueller Nacheffekte verantwortlich ist. Strategische und bewusste Anpassungsprozesse sollten keine Rolle mehr spielen, wenn die Prismenbrille wieder abgesetzt wurde.

Seit einigen Jahren wird auch das Zusammenwirken expliziter und impliziter Prozesse bei der Adaptation an veränderte sensomotorische Transformationen mit den neuen Untersuchungsparadigmen Rotation und Verstärkungsänderung untersucht (Überblick in Heuer et al. 2011; Taylor und Ivry 2012). Das bereits beschriebene Experiment von Mazzoni und Krakauer (2006) zeigt dabei sehr deutlich, wie zusätzlich zu einer kognitiven Strategie eine implizite Anpassung auf Basis der Diskrepanz zwischen der vorhergesagten und der tatsächlichen Bewegungsrichtung stattfindet. Die Daten zeigten, dass sich die Anpassung an die Rotation und die Anpassung resultierend aus der Anwendung der Strategie zur Gesamtanpassung aufaddiert hatten. Solch ein additives Zusammenwirken expliziter Anpassungsstrategien und impliziter automatischer Anpassungsprozesse konnte von

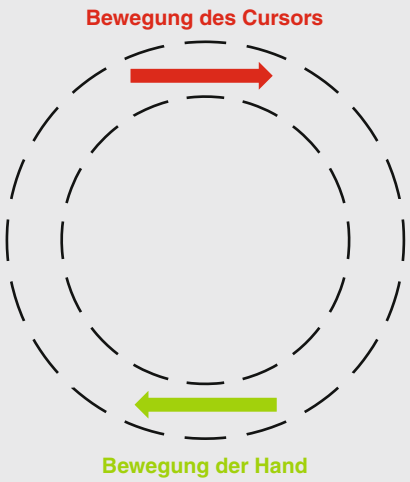
Zur Vertiefung 19.1

Der Einfluss kognitiver Faktoren auf motorisches Lernen

Wie bereits an verschiedenen Stellen angedeutet wurde, unterliegt motorisches Lernen in früheren Lernphasen oder bei bestimmten motorischen Aufgaben auch dem Einfluss strategischer Prozesse. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Aspekte vorgestellt, in welcher Form kognitive Prozesse motorisches Lernen beeinflussen können.

Es scheint für das Erlernen motorischen Aufgaben, bei denen eine eher komplexe Beziehung zwischen sensorischer Eingangs- und motorischer Ausgangsgröße besteht, sehr hilfreich zu sein, wenn die Beziehung zwischen Ein- und Ausgangsgröße für den Lernenden sinnvoll und nachvollziehbar ist. Einer der ersten Belege dafür, dass die Transparenz dieser Beziehung für motorisches Lernen sehr hilfreich ist, wurde von Merz et al. (1981) beschrieben. Ihre Versuchspersonen mussten einen sich bewegenden Cursor auf dem Monitor so kontrollieren, dass er sich mit einem ebenfalls auf dem Monitor dargestellten senkrechten Strich überlagerte. Die Steuerung des Cursors erfolgte durch Bewegungen eines Knaufes nach rechts oder links. Dieser Knauf war am unteren Teil eines Lenkrades angebracht, wobei die Bewegung des Cursors der Bewegung des oberen Bereichs des Lenkrades entsprach (◘ Abb. 19.6). Nur für einen Teil der Versuchspersonen war dieses Lenkrad allerdings sichtbar und damit die Beziehung zwischen Handbewegungen und resultierenden Bewegungen des Cursors nachvollziehbar. Diese Gruppe von Versuchspersonen war den anderen, für die das Steuerrad nicht sichtbar war, in ihrer Lernleistung deutlich überlegen. Dies deutet daraufhin, dass die mechanische Transparenz von Werkzeugen ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die erfolgreiche Benutzung und damit verbunden das Erlernen von Werkzeugtransformationen ist.

Neben den bisher genannten Eigenschaften der Lernsituation, die durch die Gestaltung der Aufgabe beeinflusst werden können, gibt es in neueren Untersuchungen allerdings auch die Erkenntnis, dass grundlegende Fähigkeiten des Lernenden eine wesentliche Rolle beim motorischen Lernen spielen können. Für motorische Fähigkeiten mag das nahezu eine triviale Erkenntnis sein. Allerdings zeigt sich auch ein Einfluss kognitiver Fähigkeiten auf motorisches Lernen. Besonders die wichtige Rolle des Arbeitsgedächtnisses, vor allem die des visuell-räumlichen Notizblockes (Baddeley und Hitch 1974; ▶ Kap. 12), für das sensomotorische Lernen konnte gezeigt werden (Überblick über die bisherige Forschung zu diesem Thema in Seidler et al. 2012). Unter anderem konnte gezeigt werden, dass diese spezifische Komponente des Arbeitsgedächtnisses (und auch nur diese und z. B. nicht die phonologische Schleife als verbaler Teil des Arbeitsgedächtnisses) vor allem zu Beginn des Erlernens neuer sensomotorischer Transformationen einen starken Einfluss auf die Lernleistung hat. Dieser Einfluss ist allerdings – zumindest in den bisher untersuchten Transformationsarten – auf die frühe Lernphase beschränkt. Interessanterweise zeigt sich dieser Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtnis und Lernleistung auch nur bei jüngeren Versuchspersonen; ältere hingegen scheinen beim motorischen Lernen nicht auf diese zusätzlichen Arbeitsgedächtnisressourcen zurückzugreifen. Ob dies eine mögliche Erklärung für die beschriebenen Defizite älterer Versuchspersonen beim sensomotorischen Lernen darstellt, ist noch unklar. In Kombination mit Befunden, die die Relevanz der Ausbildung expliziten Wissens über zu lernende Transformationen betonen und diese seltener bei älteren Versuchspersonen finden, könnte ein Indiz dafür sein, dass das Arbeitsgedächtnis tatsächlich eine vermittelnde Funktion beim sensomotorischen Lernen hat.



◘ **Abb. 19.6** Versuchsaufbau von Merz et al. (1981). Ohne Sicht auf das Lenkrad (*gestrichelte Linie*) war die Beziehung zwischen Hand- und Cursorbewegungen inkompatibel. Mit dem Wissen über den Zusammenhang zwischen Hand- und Cursorbewegungen konnte die Aufgabe besser erlernt werden

Sülzenbrück und Heuer (2009b) auch für die Anpassung an visuomotorische Verstärkungsänderungen gezeigt werden.

Explizites Wissen und die darauf basierenden kognitiven Strategien unterscheiden sich hinsichtlich einiger Aspekte von impliziten Adaptationsprozessen: Zum einen generalisiert explizites Wissen über alle Bewegungsrichtungen und -weiten (Heuer und Hegele 2008a) sowie über andere Startpositionen im Arbeitsbereich (Heuer und Hegele 2011), während implizite Anpassungen auf einen engen Bereich um die in der Übungsphase geübten Zielrichtungen beschränkt sind (Heuer und Hegele 2008a; Krakauer et al. 2000). Des Weiteren zeigt sich für explizites Wissen sowie dessen Anwendung im Rahmen kognitiver Strategien eine selektive altersbedingte Beeinträchtigung im späteren Erwachsenenalter, während implizite Prozesse altersstabil erhalten bleiben (Hegele und Heuer 2013; Heuer und Hegele 2008a). Letztlich scheint implizite Anpassung unabhängig von der Größe der zu lernenden Rotation zu sein, während explizites Wissen proportional mit der Größe der Rotation ansteigt (Bond und Taylor 2015). In ▶ Zur Vertiefung 19.1 werden weitere kognitive Prozesse beschrieben, die Einfluss auf motorisches Lernen haben können.

19.3 Fertigkeitserwerb

19.3.1 Theorien und Modelle des Fertigkeitserwerbs

» The field of motor-skill acquisition is a part of experimental psychology and one of the siblings of the learning family. Those who work in the area think of themselves as contributing more to learning and less to motor and few investigators care much about motor-skill qua motor-skill (Bilodeau 1966, S. vii).

Was dieses Zitat von Edward A. Bilodeau zeigen soll, ist, dass motorisches Lernen Ende der 1960er Jahre zwar ein ernst zu nehmendes Forschungsfeld war, sich aber immer noch in einer gewissen Abhängigkeit von der Mutterwissenschaft befand. So orientierte man sich, was die Theorieentwicklung im Bereich des motorischen Lernens betraf, bis Mitte der 1960er Jahre an den Vertretern der behavioristischen Lerntheorien. Für die Entwicklung eines tieferen Verständnisses motorischen Lernens waren diese Theorien allerdings unbefriedigend. Warum? Die vorherrschenden Theorien, egal ob sie eher die Stimulus- oder die Response-Seite betonten, waren „stumm", was das Erlernen einer spezifischen Bewegung betraf. Thorndikes *Law of Multiple Responses* beschrieb das explorative Verhalten angesichts einer neuen Bewegungsaufgabe, und sein *Law of Effect* erklärte, wie eine Bewegung, die zur Lösung der Bewegungsaufgabe geeignet schien, an die situativen Bedingungen gekoppelt werden konnte. Für ein tieferes Verständnis der Prozesse, durch die Bewegungsausführungen verbessert und optimiert wurden, waren diese Theorien allerdings unnütz. Mit dem Niedergang des Behaviorismus hatte man dann zwar erkannt, dass der Hull'sche S-R-Ansatz keine belastbare Theorie menschlichen Fertigkeitserwerbs darstellte; allerdings verpasste man die Möglichkeit, eine Theorie motorischen Lernens zu entwickeln, die sich deutlich von behavioristischen S-R- und den aufkommenden Informationsverarbeitungsansätzen abhob. In dem vorliegenden Abschnitt werden wir uns in einer ersten Annäherung an eine theoretische Auseinandersetzung mit dem sensomotorischen Fertigkeitserwerb zuerst mit zwei einflussreichen Modellen der Phasenstruktur des sensomotorischen Lernprozesses beschäftigen, bevor wir anschließend zwei in den 1970er Jahren erschienene Lerntheorien darstellen, die sich spezifisch mit dem Bereich des motorischen Lernens befassten und deren Bedeutung für die nachfolgende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit diesem Thema zu betonen ist: Adams' Closed-Loop-Theorie und Schmidts Schematheorie. In ► Abschn. 19.3.2 widmen wir uns einer neueren Theorie, die Fertigkeitserwerb im Sinne des Konzepts des Transformationslernens begreift und motorisches Lernen auch in Verbindung mit dessen neurophysiologischem Substrat diskutiert.

■ Phasenmodelle motorischen Lernens

Ein weit verbreiteter und wenig formalisierter Ansatz, motorische Lernprozesse zu beschreiben, findet sich in sogenannten Phasenmodellen. Trotz der vielfältigen Unterschiede in Aufgabenanforderungen – von großmotorischen Ganzkörper- zu filigranen Finger- und komplexen Werkzeugbewegungen – und den interindividuellen Variationen in kognitiven und körperlichen Voraussetzungen postulieren diese Ansätze einen für alle (motorischen) Lernprozesse charakteristischen Verlauf durch verschiedene Phasen des Fertigkeitserwerbs. Es ist dabei irreführend, diese Phasen als gegeneinander abgeschottete Einheiten zu betrachten. Vielmehr handelt es sich auch beim motorischen Lernen um einen kontinuierlichen Prozess, in dessen Verlauf sich die Struktur einer Fertigkeit bzw. die an der Bewegung beteiligten Prozesse in charakteristischer Art und Weise verändern. Im Folgenden sollen zwei klassische Phasenmodelle motorischen Lernens vorgestellt werden, die auch heute noch aktuell sind und jeweils eine besondere Perspektive auf die behavioralen Merkmale der einzelnen Lernphasen vermitteln.

Paul Fitts und Michael Posner (Fitts 1964; Fitts und Posner 1967) unterscheiden in ihrem Modell drei Phasen des Lernprozesses: die kognitive Phase, die assoziative Phase und die autonome Phase. In der ersten, der *kognitiven Phase* setzen sich die Lernenden bewusst mit den grundlegenden Merkmalen des zu erlernenden Bewegungsablaufs auseinander und versuchen herauszufinden, wie die Bewegung auszuführen ist, um ein angestrebtes Handlungsziel zu erreichen. Die Dauer dieser Phase ist abhängig von der Schwierigkeit und Komplexität der zu erlernenden Bewegung. Sie kann insbesondere bei einfachen Bewegungen sehr kurz sein und gerade die Zeit umfassen, die nötig ist, um die Aufgabenstellung zu begreifen und einige Übungsbewegungen durchzuführen. Meist zeichnet sich diese Phase aber durch ein aktives Explorieren und Ausprobieren verschiedener Bewegungsvarianten in der Annäherung an das jeweilige Handlungsziel aus. Die Bewegungen in der kognitive Phasen sind durch hohe Variabilität und viele grobe Fehler im Bewegungsablauf gekennzeichnet. Die Lernenden konzentrieren sich auf die einzelnen Bestandteile der Bewegung, was zu einer erheblichen Beanspruchung von Aufmerksamkeitsressourcen führt. Häufig verwenden Lernende in dieser Phase Selbstinstruktionen, beispielsweise durch Verbalisierung des Bewegungsablaufs, weswegen sie von Adams (1971) auch als *verbale* Phase bezeichnet wurde.

Mit der Zeit entwickelt sich ein Grundverständnis der Bewegung, ein Wissen, was zu tun ist, und der Lernende tritt in die zweite, die *assoziative Phase* ein. In dieser Phase wird das Bewegungsmuster, das in seiner Grundform nun vorhanden ist, weiter geübt und verfeinert. Ziel ist es, den erforderlichen Bewegungsablauf zu festigen und die Koordination der an der Bewegung beteiligten Elemente zu verbessern. Im Vergleich zur kognitiven Phase sind die zu beobachtenden Bewegungskorrekturen eher klein. Das Handlungsziel wird in der Regel erreicht, und die einzelnen Bewegungsausführungen ähneln einander mehr und mehr. Die Ausführung der Bewegung ist gekennzeichnet durch weniger Fehler und eine graduellen Verbesserung der Bewegung. Gleichzeitig sinken die Anforderungen an Aufmerksamkeitsressourcen, sodass andere Aspekte der Umwelt beachtet werden können, ohne dass die Bewegung beeinträchtigt wird.

Erreicht eine Person nach einer langen Übungsphase, die sich über mehrere Jahre erstrecken kann, die dritte, die *autonome Phase*, fällt ihr die Bewegungsausführung sehr leicht, und

Zur Vertiefung 19.2

Das Problem der Freiheitsgrade

Befestigen Sie den Griff eines Skistocks an der Gürtelschnalle einer Versuchsperson. Befestigen Sie ein 1–2 kg schweres Gewicht am anderen Ende des Stocks sowie ein elastisches Gummiband rechts und links am Teller des Stocks, deren anderes Ende die Versuchsperson in der rechten und linken Hand hält. Platzieren Sie die Versuchsperson vor einer Tafel, auf der ein großer Kreis, ein Quadrat oder eine andere einfache geometrische Figur gezeichnet ist. Instruieren Sie die Person, die Kontur der Figur mit der Spitze des Skistocks nachzufahren. Der Stock repräsentiert ein Segment einer Extremität mit zwei Freiheitsgraden; die Gummibänder entsprechen zwei antagonistisch arbeitenden Muskeln, die dem System zwei zusätzliche Freiheitsgrade hinzufügen. Dieses Experiment verdeutlicht allen, die es ausprobieren, wie schwierig und kompliziert es ist, Systeme zu kontrollieren, die eine Koordination von vier Freiheitsgraden erfordern, sogar wenn es sich bei der Kontrollinstanz um einen Menschen im Vollbesitz all seiner Sinnesrezeptoren, aber ohne motorische Übung mit der Aufgabe handelt, der sich seit den ersten Wochen seines Lebens mit seinem Muskel-Skelett-System auseinandersetzt (Bernstein 1967).

Für Bernstein bestand ein zentrales Problem der Bewegungssteuerung in der Kontrolle der an einer Bewegung beteiligten **Freiheitsgrade** (*degrees of freedom*, DoF). Formal gesehen handelt es sich bei Freiheitsgraden um die Anzahl der unabhängigen Elemente eines zu kontrollierenden Systems multipliziert mit deren Dimensionalität, also der Anzahl an Dimensionen, die den Zustand des jeweiligen Elements vollständig beschreiben. So sind bei der Bewegung des Armes drei Gelenke beteiligt: das Schulter-, das Ellenbogen- und das Handgelenk. Das Schultergelenk, das beweglichste Gelenk des menschlichen Körpers, kann um drei Achsen bewegt werden. Probieren Sie es aus: Ihr nach vorn ausgestreckter Arm kann nach oben und unten sowie nach rechts und links bewegt werden. Zusätzlich kann er um seine Längsachse rotiert werden. Die Position des Armes kann also zu jedem Zeitpunkt durch drei Koordinaten beschrieben werden. Das Schultergelenk hat somit drei Freiheitsgrade, die zur Beschreibung der Bewegung des Armes spezifiziert werden müssen. Das Ellenbogengelenk, ein zusammengesetztes Gelenk aus drei Teilgelenken, die wir der Einfachheit halber als funktionelle Einheit betrachten, verfügt über zwei Freiheitsgrade. Es ermöglicht die Beugung/Streckung des Unterarmes und die Drehung der Hand. Das Handgelenk ermöglicht Bewegungen in der Vertikalen und der Horizontalen und verfügt somit ebenfalls über zwei Freiheitsgrade. Der gesamte Arm verfügt somit über sieben Freiheitsgrade.

Was passiert nun, wenn man eine andere Betrachtungsebene wählt, z. B. die der an der Bewegung beteiligten Muskeln? Jeder Muskel hat einen Freiheitsgrad, da jeder Muskel vollständig durch seinen Kontraktionszustand beschreibbar ist. Allerdings steigt die Anzahl der an der Bewegung beteiligten Einzelelemente von drei auf 26 (zehn Muskeln an der Schulter, zehn Muskeln am Ellenbogen, sechs Muskeln am Handgelenk), sodass 26 Freiheitsgrade zu kontrollieren sind. Folgt man nun dem neurophysiologischen Zeitgeist und postuliert einen Bewegungsplan auf der Ebene einzelner Alpha-Motoneurone, so käme man, ausgehend von einer konservativen Schätzung von 100 motorischen Einheiten pro Muskel, auf 2600 zu kontrollierende Freiheitsgrade!

Der hohen Anzahl an Freiheitsgraden bei der Bewegungsausführung stehen nun wesentlich weniger Freiheitsgrade bei den zu erreichenden Bewegungszielen gegenüber. Die durch Muskeln und externe Kräfte erzeugten Drehbewegungen der Gelenke werden, wie Sie wissen, in die Bewegung eines Endeffektors, beispielsweise der Hand, überführt. Stellen Sie sich vor, Sie nehmen an einem psychologischen Experiment teil. Häufig geht das mit der Aufforderung zu möglichst schnellem Tastendrücken einher. Ihr Bewegungsziel, den Zeigefinger auf einer Taste zu platzieren, lässt sich durch drei Raumkoordinaten beschreiben. Während Ihr Bewegungsziel also drei Freiheitsgrade hat, verfügt die Bewegung des Armes auf Gelenkebene, ohne Berücksichtigung der Fingerbewegung, bereits über sieben Freiheitsgrade. Sie verfügen also über sehr viele verschiedene Möglichkeiten, ihren Finger auf der Taste zu platzieren, sowohl hinsichtlich der Endhaltung Ihres Armes als auch hinsichtlich der Bewegungsausführung. Es handelt sich um ein sogenanntes *one to many mapping*: Zur Realisierung jedes angestrebten Bewegungszieles existieren viele unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten.

Angesichts dieser Redundanz stellte Bernstein die Frage, wie ein komplexes System wie der menschliche Bewegungsapparat seine Freiheitsgrade so kontrollieren kann, dass zielgerichtetes Bewegen überhaupt möglich wird. Bernsteins Vorschlag zur Lösung des Problems der Freiheitsgrade basierte auf der Aufzeichnung verschiedener kinematischer Parameter des menschlichen Gangbildes. In seinen Aufzeichnungen beobachtete er wiederkehrende systematische Korrelationen zwischen unterschiedlichen Effektoren. Es schien, als gruppierte das ZNS einzelne Muskeln zu funktionalen Einheiten, innerhalb derer die beteiligten Muskeln koordiniert zusammenarbeiteten. Tatsächlich bestätigten nachfolgende empirische Untersuchungen die Idee, dass es sich bei den Basiselementen der Bewegungssteuerung nicht um Muskeln, sondern um sogenannte Muskelsynergien handelte, in denen die Aktivität mehrerer Muskeln in funktionaler Weise aneinander gekoppelt wurden.

sie beansprucht nur wenige bis gar keine kognitiven Ressourcen, sodass auch andere Aufgaben gleichzeitig ohne Beeinträchtigung der Bewegungsausführung bearbeitet werden können. Die Bewegung ist nun sehr stabil, läuft automatisch ab und ist weitestgehend unempfindlich gegenüber äußeren Störungen oder Stress. Allerdings ist sie auch nur noch schwer zu verändern, sodass Fehler in der Bewegungsausführung in dieser Phase nur noch mit großem Aufwand korrigiert werden können. Bei Bewegungen, die in hohem Maße von situativen Gegebenheiten abhängen, beispielsweise in Sportspielen wie Basketball oder Fußball, stehen die frei gewordenen mentalen Ressourcen für Entscheidungsprozesse, z. B. welche Bewegung in einer gegebenen Situation auszuführen ist, zur Verfügung.

Eine etwas andere, aber ebenfalls dreiphasige Perspektive vertrat der sowjetische Physiologe Nicolai Alexandrowitsch Bernstein (1896–1966). Ihm ging es beim motorischen Lernen in erster Linie um die Beherrschung der redundanten Freiheitsgrade des Muskel-Skelett-Systems (► Zur Vertiefung 19.2). Basierend auf dieser Problemstellung schlug er ebenfalls drei Lernphasen vor. Die erste Phase (*Freezing*) ist gekennzeichnet durch ein Einfrieren der an der Bewegung beteiligten Freiheitsgrade. Beim Übergang in die zweite Phase (*Freeing*) erfolgt ein schrittweises Freilassen der Freiheitsgrade, bevor es in der dritten und letzten Phase (*Exploiting*) um die Ausnutzung der mit der Bewegung verbundenen reaktiven Kräfte geht.

In der *Freezing-Phase* geht es nach Bernstein vornehmlich um die Reduktion der redundanten Freiheitsgrade durch die Begrenzung der Anzahl der an der Bewegung beteiligten, sich unabhängig voneinander bewegenden Körperteile. Dies geschieht durch Einfrieren der beteiligten Gelenke. Einfrieren bedeutete für Bernstein, dass in dem entsprechenden Gelenk tatsächlich keine Bewegung stattfand, sodass sich die über das

Gelenk verbundenen Körperglieder als Einheit ansteuern ließen. Eine solche Zusammenfassung einzelner Körperglieder reduziert die Komplexität der Bewegung, da nun weniger einzelne Komponenten zu kontrollieren sind. Eine Kontrollstrategie, dies zu erreichen, ist durch Kokontraktion der beteiligten Muskeln (McIntyre et al. 1996). Unter Kokontraktion versteht man die gleichzeitige Aktivierung der das Gelenk umgebenden Agonisten und Antagonisten, was eine Versteifung des Gelenks zur Folge hat. Durch Kokontraktionen lassen sich die Störeinflüsse durch externe (Milner 2002; Milner und Cloutier 1998) und interne Kräfte (Gribble und Ostry 1998; Suzuki et al. 2001) minimieren.

Um zu untersuchen, wie sich Kokontraktionen auf die Bewegungsgenauigkeit auswirken, ließen Gribble et al. (2003) Versuchspersonen schnelle Zeigebewegungen zu Zielen unterschiedlicher Größe ausführen. Dabei registrierten sie die Bewegungsbahn (Bewegungstrajektorie) des Zeigefingers sowie die Aktivierungsmuster von Schulter- und Ellenbogenmuskeln. Ihre Ergebnisse zeigten eine inverse Beziehung zwischen den Genauigkeitsanforderungen der Bewegung und dem Ausmaß an Kokontraktion: Je kleiner das Ziel war, desto größer war die Stärke der beobachteten Kokontraktion. Darüber hinaus sank mit erhöhter Kokontraktion die Variabilität der Bewegungstrajektorie, und die Zielgenauigkeit am Ende der Bewegung verbesserte sich. Es scheint also, als hätte Bernstein recht mit seiner Idee, dass eine Verringerung der Freiheitsgrade durch ein Ausschalten der Bewegung in einzelnen Gelenken die Bewegungssteuerung erleichtere. Allerdings ist einschränkend anzumerken, dass durch Kokontraktionen Gelenkbewegungen nicht gänzlich unterdrückt werden können, sondern die durch sie bewirkte Impedanzänderung lediglich die Steifigkeit des Gelenks gegenüber Störungen erhöht (Zatsiorsky 2002). Auch können bei sehr schnellen Bewegungen starke Drehmomente an den Gelenken wirken, sodass es präzise abgestimmte Signale an die das Gelenk umgebende Muskulatur erfordert, um ungewollte Gelenkbewegungen zu vermeiden (Latash et al. 1999).

In der Studie von Gribble et al. (2003) ist noch ein weiterer Aspekt erwähnenswert. So konnten sie in ihren Daten in Übereinstimmung mit früheren Studien (Thoroughman und Shadmehr 1999; Osu et al. 2002) einen allgemeinen Trend zur Verringerung der beobachteten Kokontraktionen über die Zeit nachweisen. Dieses schrittweise „Freilassen" der an der Bewegung beteiligten Freiheitsgrade mit zunehmender Übung steht im Zentrum der zweiten Phase des Bernstein'schen Lernmodells, dem *Freeing*. In der ersten Phase, dem Freezing, in der der Lernende über wenig bis gar keine Erfahrung mit der jeweiligen Bewegungsfertigkeit verfügt, bedeuten zu viele Freiheitsgrade ein computationales Problem bei der Steuerung eines redundanten Systems. Ist durch eine Reduktion der Freiheitsgrade die Grobform der Bewegung gemeistert, wird aus Redundanz, einem Problem der Spezifikation einer Bewegung aus vielen möglichen Bewegungen, Abundanz. *Abundanz* bedeutet, dass viele Freiheitsgrade es erlauben, eine Bewegung flexibel an vor oder während der Bewegung auftretende Störungen anzupassen. Zu Beginn der Lernphase erschwert die Tatsache, dass jedes unabhängige Glied der kinematischen Kette eine Quelle von Variabilität ist, die Bewegungskoordination. Mit zunehmender Übung gelingt diese Koordination besser und besser, und die Anzahl der Kettenglieder (und somit die Anzahl der Quellen von Variabilität) kann erhöht werden. Mehr unabhängige Variabilität bedeutet, dass im Fall einer Störung an einem der Kettenglieder diese durch die Variabilität der anderen Kettenglieder ausgeglichen werden kann, wodurch das Erreichen des Handlungszieles sichergestellt wird.

Die Richtung, in der Freiheitsgrade schrittweise freigegeben werden, verläuft üblicherweise von proximal nach distal. So konzentriert sich die Greifbewegung bei Säuglingen zu Beginn hauptsächlich auf das Schultergelenk, bezieht aber mit fortschreitender Übung Ellenbogen-, Hand- und zuletzt die Fingergelenke mit ein (Gesell 1929). Eine ähnliche Reihenfolge von proximal nach distal zeigt sich auch beim Erlernen anderer sensomotorischer Fertigkeiten wie dem Werfen (McDonald et al. 1989), dem Schreiben mit der Hand (Newell und van Emmerick 1989) oder dem Cellospielen (Verrel et al. 2013). Die empirische Befundlage ist allerdings uneinheitlich (z. B. Broderick und Newell 1999; Konczak et al. 2009), was unter Umständen auf unterschiedliche Aufgabencharakteristika und/oder verschiedene abhängige Variablen zurückzuführen ist.

Neben der schrittweisen Freigabe von Freiheitsgraden steht ein weiterer Prozess im Zentrum der zweiten Phase. Bernstein vermutete, dass im Lernverlauf vormals unabhängige Freiheitsgrade in funktionalen Untereinheiten zusammengefasst werden. Durch eine Kopplung einzelner Kettenglieder bilden sich sogenannte koordinative Strukturen oder auch funktionale Synergien. Im Gegensatz zu der starren Kopplung in der ersten Phase ist diese Kopplung funktional, d. h. auf die optimale Lösung der Bewegungsaufgabe gerichtet. Beispiele für diese Art von Kopplung kommen aus dem Bereich der bimanuellen Koordination.

In der finalen Phase, dem *Exploiting*, geht es nun darum, die reaktiven Phänomene, die sich aus der Interaktion des Lernenden mit seiner Umgebung ergeben, für die Bewegungssteuerung auszunutzen. Dies betrifft beispielsweise die Interaktionskräfte, die bei der Bewegung der Schulter im Ellenbogen entstehen. Anstatt diesen Wechselwirkungen zwischen den an der Bewegung beteiligten Körperteilen entgegenzuwirken, werden sie für die Optimierung der Bewegungskoordination genutzt. Debicki et al. (2010) analysierten die Wurfbewegungen erfahrener Werfer bei unterschiedlichen Wurfgeschwindigkeiten. Sie fanden heraus, dass das sensomotorische System die biomechanischen Eigenschaften des Armes nutzt, um die Abwurfgeschwindigkeit zu steigern. Genauer gesagt zeigte sich bei erfahrenen Werfern, dass bei schnellen Würfen zwischen Ellenbogen und Schulterrotation eine positive Rückkopplung von Interaktionskräften dieser beiden Gelenke entsteht, die zu einer weiteren Steigerung der Geschwindigkeit der Ellenbogenstreckung kurz vor Abwurf führt. Eine Interpretation dieser Ergebnisse könnte darin bestehen, dass das sensomotorische System im Lernprozess die biomechanischen Eigenschaften des zu kontrollierenden (Teil)Systems lernt und dieses Wissen zur Optimierung aufgabenrelevanter Bewegungsmerkmale nutzt. Tatsächlich scheinen innere Modelle des Armes im Cerebellum genau solche Interaktionskräfte zu repräsentieren (Bastian et al. 2000).

Kritisch ist anzumerken, dass Phasenmodelle motorischen Lernens häufig deskriptiv Veränderungen in beobachtbarem Verhalten oder sensomotorischen Kontrollstrategien beschreiben, ohne eine formalisierte Verbindung zu den qualitativen Veränderungen in der Leistungsfähigkeit der Lernenden herzustellen. Ein

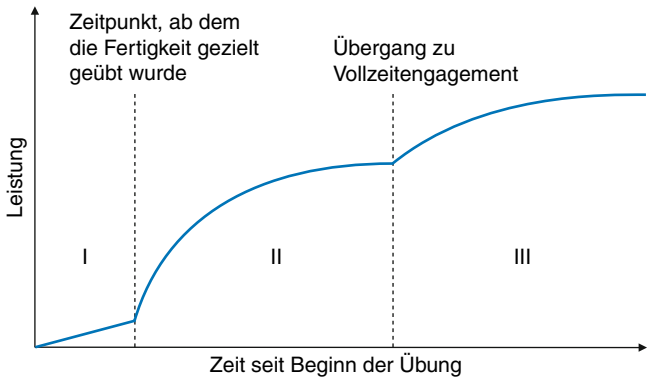


Abb. 19.7 Die drei Phasen der Expertise als Funktion der Zeit. (Nach Ericsson et al. 1993)

Beispiel, wie eine solche Verknüpfung aussehen könnte, kommt aus der Expertiseforschung, wo die Zahl 10.000 eine wohl ähnliche Berühmtheit erreicht hat wie die Miller'sche Zahl 7 (±2) in der Forschung zum menschlichen Arbeitsgedächtnis (▶ Kap. 12): 10.000 h Übung (20 h pro Woche für 50 Wochen pro Jahr über zehn Jahre) sollen nötig sein, um Expertise in einer spezifischen Domäne zu erreichen (Ericsson et al. 1993; Zurückweisung dieser Hypothese in Hambrick et al. 2014). In der Expertiseforschung geht es dabei weniger darum zu erklären, wie die Mehrheit der Menschen motorische Fertigkeiten erlernt, sondern welche Voraussetzungen die außergewöhnlichen Leistungen von Hochleistungssportlern, Konzertvirtuosen oder Nobelpreisträgern ermöglichen.

Ein einflussreicher Ansatz betont die Zeit, die Menschen der zielgerichteten Übung (*deliberate practice*) einer bestimmten Fertigkeit widmen. Ericsson et al. (1993) schlugen dazu ein Modell vor, das in Abb. 19.7 dargestellt ist. Auch hier werden wie beim Phasenmodell von Fitts und Posner drei Stufen auf dem Weg zum Experten unterschieden, die aber als Funktion der in den Übungsprozess investierten Zeit zumindest qualitativ in Bezug zu den Lernstufen gesetzt wird, nämlich als Übergang vom freien Spiel zu strukturiertem Üben unter Anleitung einer Lehrkraft und vom regelmäßigen Üben hin zur Ganztagsbeschäftigung.

Neben dem Zusammenhang zwischen der Menge an Übungszeit und der Qualität einer zu erlernenden motorischen Fertigkeit betont das Modell von Ericsson et al. (1993) einen weiteren interessanten Aspekt: die optimale Dauer von täglichen Übungseinheiten. Da zielgerichtetes Üben mit mentaler und körperlicher Anstrengung verbunden ist, ist die Dauer, mit der täglich effektiv geübt werden kann, begrenzt. Es stellt sich also die Frage, wie die zur Verfügung stehende Übungszeit am effektivsten genutzt werden kann – eine Frage, die in ▶ Abschn. 19.3.2 nochmals aufgegriffen wird. An dieser Stelle wollen wir die eher deskriptiven Modelle des sensomotorischen Lernverlaufs verlassen und uns drei Theorien des motorischen Lernens widmen.

Regelungstheorie motorischen Lernens von Jack Adams

» Theory not fixed in data can be a fanciful dream that will have little chance of saying anything about the real world, and it can have an apparent scientific pertinence that is attractive to the unwary (Adams 1976, S. 88).

Dieses Zitat von Jack Adams (1976), dem Entwickler der *Regelungstheorie* (*closed-loop theory*) motorischen Lernens, illustriert eine Stärke seines Ansatzes: die enge Verflechtung theoretischer Vorstellungen mit empirischen Daten aus sorgfältig kontrollierten experimentellen Studien. Aus einer theoretischen Perspektive verwarf Adams das im Behaviorismus vorherrschende Bild des lernenden Organismus als das eines passiven Signalempfängers zugunsten der Vorstellung eines aktiven Handlungsverursachers, der Verhalten plant, steuert und an wechselnde Umweltbedingungen und Aufgabenanforderungen anpasst.

Im Zentrum seiner Theorie des Fertigkeitserwerbs standen dabei zwei Aspekte:

1. Die Idee, dass motorisches Lernen, ebenso wie verbales Lernen, über voneinander unabhängige Gedächtnisstrukturen für den Abruf (*recall*) und das Wiedererkennen (*recognition*) von bereits Gelerntem verfügt.
2. Die Vorstellung von motorischem Lernen als einem Problemlöseprozess, in dessen Verlauf Rückmeldung über das Ergebnis einer Bewegung zum Aufbau einer internen Repräsentation der korrekten Bewegung führt, die wiederum im Rahmen von Regelungsprozessen (▶ Kap. 20) als Referenz zur Fehlerdetektion und -korrektur herangezogen wird.

Die Idee, dass Bewegungen durch eine kontinuierliche Angleichung einer bestimmten Ist-Größe an eine vorgegebene Soll-Größe gesteuert werden, ist in ▶ Kap. 20 als Feedbackregelung bzw. als Closed-Loop-Kontrolle detailliert erläutert. Lernen in Adams' Theorie erfordert ebenfalls solch einen Referenzmechanismus, mit dem eingehendes Feedback über den Verlauf der Bewegung als auch über deren Ergebnis hinsichtlich der geplanten Bewegung und dem zu erreichenden Bewegungsergebnis bewertet werden kann. Solch bewegungsbezogenes Feedback kann einerseits zur Steuerung einer sich in der Ausführung befindlichen Bewegung als auch zur Anpassung einer späteren Bewegungsausführung auf Basis der Diskrepanz zwischen beabsichtigtem und tatsächlichem Bewegungsergebnis genutzt werden. Adams bezeichnet diese Soll-Größe als *perzeptuelle Spur*. Die perzeptuelle Spur ist eine Repräsentation der Gesamtheit aller sensorischen Signale, die mit der jeweilig gewünschten Bewegung assoziiert sind. Sie beinhaltet entsprechend Informationen aus allen sensorischen Kanälen, also propriozeptives und taktiles Feedback, das sich unmittelbar aus der Lageveränderung des Körpers im Raum ergibt, sowie etwaige visuelle, akustische oder olfaktorische Signale, die sich aus der Bewegungsausführung ergeben.

Neben der perzeptuellen Spur findet sich in Adams' Theorie eine rudimentäre Version einer motorischen Steuerung in Form der *Gedächtnisspur*. Hierbei handelt es sich um eine Art basales motorisches Programm, das im Sinne einer kontiguitätsbasierten Verbindung zwischen Reiz und Reaktion auch in den behavioristischen Lerntheorien zu finden ist (z. B. Hulls *habit*; ▶ Kap. 10). Die Gedächtnisspur dient in erster Linie der Initiierung einer Bewegung, bevor bewegungsbezogenenes sensorisches Feedback zur Bewegungssteuerung zur Verfügung steht. Neben der Gedächtnisspur wird vor Bewegungsbeginn auch die jeweilige perzeptuelle Spur aktiviert und nachfolgend mit den während der Bewegungsausführung eingehenden bewegungsbezogenen sensorischen Informationen abgeglichen, um zu einer Bewertung

der in der Gedächtnisspur gespeicherten Bewegung zu gelangen. Stimmen beide Größen überein, liegt das Fehlersignal bei 0, und es sind keine Bewegungskorrekturen notwendig. Im Falle einer Abweichung (Fehlersignal >0) werden Bewegungskommandos generiert, um die Abweichung zu minimieren. Dies kann während, aber auch nach der Bewegungsausführung geschehen.

Nun ist es eine Sache zu behaupten, dass Bewegungen durch Regelungsprozesse gesteuert werden, aber eine ganz andere, erklären zu wollen, wie motorische Regelung die korrekten perzeptuellen Spuren zu repräsentieren lernt, die dann als Referenz für die tatsächlich ausgeführten Bewegungen dienen können und dem Ausführenden signalisieren, welche Aspekte der Bewegungsausführung korrekt sind und welche einer Anpassung bedürfen. Ein Regelkreis als Werkzeug zur Fehlerminimierung ist zwar eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für motorisches Lernen, da zu Beginn der Lernphase die perzeptuelle Spur nicht an die jeweiligen Aufgabenanforderungen angepasst und durch nur wenige korrekte Bewegungsausführungen noch unterbestimmt ist. Eine Nutzung dieser unangepassten und unterbestimmten Spur als Referenz für weitere Bewegungsausführungen würde lediglich dazu führen, dass Lernende ihre eigenen Fehler ein um das andere Mal wiederholen. An dieser Stelle betont Adams die Relevanz von *ergebnisbezogenem Feedback* (*knowledge of results*; ▶ Abschn. 19.3.2) für motorisches Lernen.

In den behavioristischen Lerntheorien verstand man ergebnisgezogenes Feedback als ein Ereignis, das die Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Verhaltens beeinflusste. War ein gewünschtes Handlungsergebnis eingetreten, so erhöhte dies die Wahrscheinlichkeit, dass das Tier (oder der Mensch) diese Verhaltensweise in einer ähnlichen Situation erneut zeigen würde. Aus Adams' Sicht griff diese Konzentration auf den motivationalen Aspekt ergebnisbezogenen Feedbacks als purem Verstärker von Verhalten zu kurz. Stattdessen betonte er den informationellen Aspekt von bewegungsbezogenem Feedback. Wie eingangs erwähnt, verstand Adams' Bewegungslernen als eine Art von Problemlöseprozess, in dessen Verlauf das Individuum Informationen über das erzielte Bewegungsergebnis als Ausgangspunkt zur Bildung von Strategien und Hypothesen zur Lösung des „Bewegungsproblems" nutzte. Entsprechend postulierte Adams, und hier ist er nicht weit entfernt von dem Phasenmodell von Fitts und Posner, dass Lernende in dieser frühen Phase des Lernprozesses, die er als *verbal-motorische Phase* bezeichnet, vielfältige Bewegungsvariationen ausprobieren sollten. Rückmeldung über das Bewegungsergebnis, z. B. in Bezug auf Schnelligkeit, Genauigkeit oder allgemein ausgedrückt Erfolg oder Misserfolg, signalisiert den Lernenden, wann und wie sie ihre Bewegungen zu verändern haben, um das angestrebte Bewegungsziel zu erreichen. In der perzeptuellen Spur werden nun alle mit diesen Bewegungsausführungen verbundenen sensorischen Konsequenzen abgelegt. Durch die Verfügbarkeit von Ergebnisrückmeldung kann bewegungsbezogenes Feedback mit Erfolg und Misserfolg der Bewegung verbunden werden, sodass mit der Zeit nur noch die Bewegungsvariationen ausgeführt werden, die zum Erfolg führen, sodass sich gleichzeitig eine immer stabilere perzeptuelle Spur ausbilden kann. Hat sich die perzeptuelle Spur so weit etabliert, dass es nur noch zu kleineren Fehlern hinsichtlich des angestrebten Bewegungszieles kommt, kann sie als stabile Referenzgröße im Rahmen der Regelkreiskontrolle dienen. Ergebnisbezogene Rückmeldung ist in dieser *motorischen Phase* nicht mehr notwendig. Stattdessen übernimmt die perzeptuelle Spur die Rolle eines „inneren Verstärkers" korrekter Bewegungsausführungen.

Schematheorie von Richard Schmidt

» A schema is a characteristic of some population of objects, and consists of a set of rules serving as instructions for producing a population prototype (the concept) (Evans 1967; zit. in Schmidt 1975).

Das Schemakonzept hat eine lange Tradition in Psychologie und Philosophie. Es findet sich früh als Vorläufer der Wahrnehmungspsychologie in den Schriften Kants (1781) zur Strukturierung von Sinnesempfindungen durch angeborene Ordnungsprinzipien (A-priori-Kategorien) und erfuhr die formal erste Erwähnung in der Psychologie durch Henry Head (1926) im Sinne einer unbewussten, sich über die Zeit kontinuierlich aktualisierenden Repräsentation des eigenen Körpers, die zur *Wiedererkennung* von Körperpositionen und -bewegungen genutzt wurde. Etwas später spielte es eine zentrale Rolle als eine gemeinsame repräsentationale Struktur für die *Wiedergabe* von Bewegungen und Wörtern im Rahmen von Frederic Bartletts Forschung zum verbalen und motorischen Gedächtnis. Richard Schmidt (1975) griff diese beiden Schemakonzepte auf und integrierte sie mit seiner Theorie der Bewegungssteuerung, deren Herzstück, das generalisierte motorische Programm (GMP) ist (▶ Kap. 20). Das Ergebnis, die *Schematheorie motorischen Lernens*, basiert auf der Grundidee, dass Lernende über die Zeit regelhafte Beziehungen zwischen Bewegungsausführungen, Umweltbedingungen und Bewegungsergebnissen abstrahieren, die zur optimalen Parametrisierung generalisierter motorischer Programme herangezogen werden können.

Wie Adams ging es Schmidt in erster Linie um die Entwicklung einer Theorie des Fertigkeitserwerbs, die erklärt, wie Bewegungserfahrung zum Aufbau einer Bewegungsrepräsentation im Gedächtnis führt. Der Schematheorie zufolge stehen nach Beendigung einer Bewegung vier Arten von Informationen zur Verfügung. Im Einzelnen handelt es sich um Informationen über (am Beispiel eines Basketballwurfes)

1. die Parameter des gerade ausgeführten GMP (Kraft, Dauer der Bewegung etc.),
2. das Ergebnis der Bewegung (Wurfweite, Treffer/Nichttreffer etc.),
3. sensorisches Feedback über den Verlauf der Bewegung (Ballflugkurve, Gelenkbewegungen etc.),
4. den Ausgangszustand vor der Bewegung (Distanz zum Korb, Position der Gegenspieler etc.).

Diese im Kurzzeitgedächtnis gespeicherten Informationen führen im Zuge ihrer Verarbeitung bei jeder Bewegungsausführung zur Modifikation zweier Schemata im Langzeitgedächtnis: das **Wiedergabeschema** (*recall schema*) und das **Wiedererkennungsschema** (*recognition schema*).

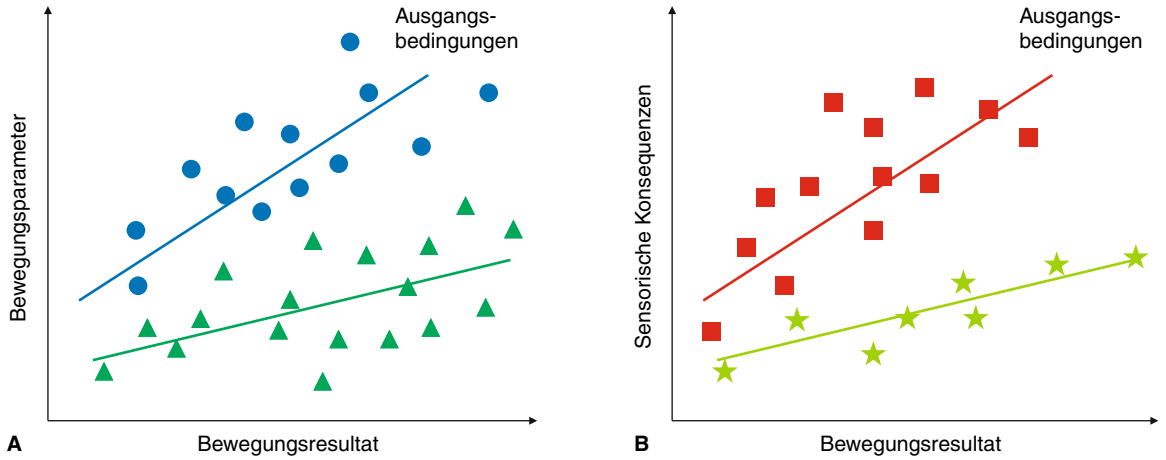


Abb. 19.8 Wiedergabe- (**A**) und Wiedererkennungsschema (**B**). (Nach Schmidt 1982)

Das *Wiedergabeschema* (Abb. 19.8A) repräsentiert die Beziehung zwischen gewählten Programmparametern (y-Achse) und erzielten Bewegungsergebnissen (x-Achse). Dabei können Sie sich jede Kombination aus Parametern und Bewegungsresultat als einen Datenpunkt im Koordinatensystem in Abb. 19.8 vorstellen. Wiederholte Bewegungsausführungen mit unterschiedlichen Parametern führen zu anderen Bewegungsergebnissen; aus einem Datenpunkt wird so eine Punktwolke. Aus dieser lässt sich ein Zusammenhang zwischen Programmparametern und Bewegungsergebnissen herauslesen, der sich in Abb. 19.8 als Regressionsgerade durch die Punktwolke legen lässt. Diese Linie repräsentiert das Schema, nach dem der Lernende nun vor Bewegungsbeginn einem bestimmten Bewegungsprogramm diejenigen Parameter zuordnen kann, die auf Basis vergangener Abrufe dieses GMP zu dem erwünschten Bewegungsergebnis führen sollten. Variationen in den Ausgangsbedingungen lassen sich als unterschiedliche Linien in demselben Koordinatensystem denken. Das Wiedergabeschema dient also, ähnlich der Adams'schen Gedächtnisspur, der Bewegungsproduktion. Dabei ist es nicht notwendig, dass die Person die Bewegung vorher schon einmal in dieser Weise parametrisiert hat, da das Schema in der Lage ist, über vergangene Erfahrung zu interpolieren.

Das *Wiedererkennungsschema* (*recognition schema*; Abb. 19.8B) bildet die Beziehung zwischen früheren Bewegungsergebnissen und den damit einhergehenden sensorischen Konsequenzen der Bewegung ab. Ebenfalls unter Berücksichtigung der jeweiligen Ausgangssituation können so erwartetes sensorisches Feedback mit tatsächlich eingehenden sensorischen Informationen abgeglichen sowie Größe und Art von Bewegungsfehlern während und nach der Bewegungsausführung detektiert werden.

Eine neuropsychologische Theorie des Fertigkeitserwerbs: Control-Based Learning Theory von Daniel Willingham

Grundidee der Control-Based Learning Theory (CoBaLT) von Willingham (1998) ist, dass motorisches Lernen unmittelbar aus der aufgabenabhängigen Anpassung von motorischen Transformationsprozessen entsteht. Drei Prinzipien der motorischen Kontrolle bilden die Grundannahmen von CoBaLT:

1. Gemäß dem *Prinzip der neuronalen Trennung* besteht Bewegungssteuerung aus separaten Teilprozessen (Transformationen), die getrennt voneinander spezifischen neuronalen Arealen zugeordnet werden können.
2. Das *Prinzip disparater Repräsentationen* besagt, dass im Zuge dieser verschiedenen Kontrollprozesse unterschiedliche Repräsentationsformen zur Anwendung kommen.
3. Während der Bewegungsausführung können motorische Transformationsprozesse entweder in einem bewusst-kontrollierten oder einem unbewusst-automatischen Verarbeitungsmodus ablaufen. Dies bezeichnet Willingham als das *Prinzip der dualen Verarbeitung*.

Die in den Prinzipien zugrunde liegenden Transformationen sind strategische Prozesse, perzeptuell-motorische Integration, Sequenzierung und dynamische Prozesse:

1. *Strategische Prozesse* dienen der Auswahl geeigneter Handlungsziele in der Umwelt. Handlungsziele sind ein Produkt von Prozessen, die außerhalb des motorischen Systems liegen, wie z. B. Problemlöse- oder Entscheidungsprozesse. Sie sind dem Bewusstsein zugänglich und verbalisierbar. Ein Tennisspieler wählt das Handlungsziel, den nächsten Aufschlag so zu spielen, dass der Ball in der rechten hinteren Ecke des Aufschlagfeldes landet.
2. Das festgelegte Handlungsziel, in unserem Beispiel die Zielposition des Tennisaufschlags, geht als Eingangsgröße in die *perzeptuell-motorische Integration,* die das ausgewählte Handlungsziel in der Umwelt in ein Bewegungsziel, das vom motorischen System zur Bewegungsplanung genutzt werden kann, transformiert. Genauer gesagt muss die räumliche Position spezifiziert werden, an die sich der Endeffektor bewegen muss, um das Handlungsziel zu erreichen. Da in unserem Beispiel der Tennisball mit einem Schläger gespielt wird, muss der Tennisspieler einen Endpunkt der Handbewegung bestimmen, der ein Treffen des Balles mit dem Schlägerkopf gewährleistet.
3. Sind die Bewegungsziele durch die perzeptuell-motorische Integration ausgewählt, werden sie in eine geordnete Reihenfolge von räumlichen Bewegungszielen transformiert. Diese Transformation wird als *Sequenzierung* bezeichnet.

Zur Vertiefung 19.3

Automatisierung, Aufmerksamkeitsfokus und Choking under Pressure

In CoBaLT erfordert die Leistung in frühen Phasen des Lernprozesses eine bewusst-kontrollierte Verarbeitung, d. h., sie benötigt Aufmerksamkeit. Im Übungsverlauf werden die Transformationen der perzeptuell-motorischen Integration und der Sequenzierung (dynamische Prozesse sind bereits hochgeübt) langsam an die Aufgabe angepasst. Durch die unbewusste Adaptation der Transformationsprozesse entwickelt sich so ein aufgabenspezifisches implizites Wissen. Die Aufgabe benötigt immer weniger Aufmerksamkeit, und es kommt zu einem graduellen Wechsel von bewusst-kontrollierter zu unbewusst-automatischer Verarbeitung. Am Ende der Bewegung kann diese automatisiert ablaufen, d. h., dass nur noch ein Handlungsziel spezifiziert werden muss. Bewusste und unbewusste Verarbeitungsmodi sind laut CoBaLT allerdings während jeder Lernphase verfügbar, d. h., auch in späteren Phasen kann die bewusst-kontrollierte Verarbeitung die unbewusst-automatisch ablaufenden Transformationsprozesse ersetzen. So kann zwar die Entdeckung effektiverer Strategien zu einem unmittelbaren und rapiden Leistungszuwachs im gesamten Übungsverlauf führen, aber andererseits kann der bewusst-kontrollierte Modus in hochautomatisierte Transformationen eingreifen und Leistung verschlechtern statt verbessern.

Solche Leistungseinbußen durch die bewusst-kontrollierte Ausführung von Handlungen, die bereits prozeduralisiert worden sind, findet man häufig gerade in Situationen, in denen die Betroffenen eigentlich ihre Höchstleistung zeigen möchten. Diese Jetzt-oder-nie-Situationen wie ein wichtiger Wettkampf eines Sportlers, ein großer Auftritt eines Musikers oder eine wichtige Präsentation erzeugen ein hohes Maß an erlebtem Druck, die unter Normalbedingungen hochautomatisierte Fertigkeit möglichst perfekt darzubieten. Um diese optimale Leistung zu erreichen, wird die Aufmerksamkeit auf einzelne Komponenten der Handlungsausführung gerichtet, die wir als Experten in der autonomen Phase der Fertigkeitsausübung eigentlich nicht mehr benötigen. Die dadurch entstehende kontrollierte und bewusste schrittweise Ausführung der Bewegung führt dazu, dass die Betroffenen die Handlung deutlich schlechter ausführen können, als es ihr tatsächliches durchschnittliches Leistungsniveau erwarten lassen würde, und bringen sie zurück auf die Ebene der Handlungsausführung, auf der sie als Anfänger diese Aufgabe gelernt hatten (Willingham 1998; Jackson und Beilock 2008).

Die These, dass eine für die Leistung in der Aufgabe ungünstige Verschiebung der Aufmerksamkeit für diese Leistungseinbrüche verantwortlich ist, konnte für verschiedene motorische Aufgaben wie den Golfabschlag (Beilock und Carr 2001), Baseballschlagen (Gray 2004) und Fußball (Beilock et al. 2002) gezeigt werden. Basierend auf diesen empirischen Erkenntnissen zur Rolle der Aufmerksamkeit konnten wirksame Interventionsmethoden etabliert werden, die im Wesentlichen alle das Ziel verfolgen, Aufmerksamkeit von der auszuführenden Handlung etwas abzulenken. Als wirksame Strategien zur Prävention des *Choking under Pressure* haben sich z. B. Musikhören (Mesagno et al. 2009) oder Rückwärtszählen (Lewis und Lindner 1997) bewährt. Weiterführende Informationen zum Phänomen des Versagens unter Druck sind u. a. in den Übersichtsarbeiten von Beilock und Gray (2007) sowie Beilock (2010) zu finden.

4. Zuletzt wird die Bewegung aus räumlichen Koordinaten durch *dynamische Prozesse* in spezifische Muskelkommandos überführt.

Duale Verarbeitung bedeutet in CoBaLT, dass die jeweiligen Transformationen sowohl *unbewusst-automatisch* als auch *bewusst-kontrolliert* ablaufen können. Eine bewusst-kontrollierte Verarbeitung hat zur Folge, dass der Lernende kontrolliert Einfluss auf die sonst automatisch ablaufenden Transformationsprozesse nimmt, sodass die Bewegungsausführung in diesem Modus höhere Anforderungen an Aufmerksamkeit stellt, als es im unbewusst-automatischen Modus der Fall wäre. Im Lernverlauf verschiebt sich die Verarbeitung von bewusst-kontrolliert nach unbewusst-automatisch. Ähnlich dem Phasenmodell von Fitts und Posner kommt es im Lernverlauf zu einer **Automatisierung** der Bewegung. Dabei ist die Genauigkeit der Bewegungsausführung im unbewusst-automatischen Modus proportional zur Erfahrung des Lernenden mit der Ausführung der Bewegung. Das Prinzip der dualen Verarbeitung bedeutet aber auch, dass hochautomatisierte Bewegungen grundsätzlich eine bewusst-kontrollierte Bewegungen grundsätzlich bewusst-kontrolliert ausgeführt werden können, was allerdings die damit verbundene Leistung nicht notwendigerweise verbessert (► Zur Vertiefung 19.3).

Motorisches Lernen beruht in CoBaLT auf zwei Mechanismen: beim *Lernen durch Tuning der motorischen Transformationen* werden die für die Bewegung erforderlichen motorischen Transformationsprozesse (perzeptuell-motorische Integration, Sequenzierung und dynamische Prozesse) mit jeder Bewegungsausführung effizienter und genauer. Tuning läuft unbewusst ab und findet immer dann statt, wenn Bewegungen ausgeführt werden, unabhängig vom Verarbeitungsmodus (unbewusst-automatisch oder bewusst-kontrolliert). Allerdings benötigt Tuning Feedback über die Genauigkeit der Bewegung. Die so induzierten Veränderungen sind sehr klein. Für die perzeptuell-motorische Integration verfügen wir in der Regel über extensives Vorwissen, d. h. die Auswahl eines Bewegungszieles ist meist hochgeübt. Lernen wird notwendig, wenn sich die Beziehung zwischen Bewegungssteuerung und den an der Bewegung beteiligten Modalitäten ändert oder die räumliche Position des Bewegungszieles nicht der räumlichen Position des Handlungszieles entspricht, wie es bei fast allen Werkzeugen der Fall ist. Auch der Sequenzierungsprozess wird mit jeder Bewegungsausführung automatisch optimiert, wobei die wiederholte Ausführung derselben Reihenfolge von egozentrischen Bewegungszielen eine notwendige und hinreichende Bedingung für das Sequenzlernen darstellt. Die Transformation von egozentrischen Bewegungszielen in raumzeitliche Muskelaktivierungsmuster ist ebenfalls hochgeübt. Veränderungen ergeben sich neben natürlich stattfindenden Wachstums- oder Alterungsprozessen auch in Situationen, in denen neue Endeffektoren genutzt werden müssen (z. B. nichtdominante Hand, Werkzeuge) oder die Genauigkeitsanforderungen an die Bewegung extrem hoch sind.

Lernen durch Anpassung strategischer Prozesse kann auf zweierlei Weise die Bewegungsausführung verbessern. In beiden Fällen aktiviert der Lernende den bewusst-kontrollierten Modus einerseits, um effektivere Handlungs- und Bewegungsziele auszuwählen, und andererseits, um die Sequenzierung von Bewegungszielen zu verbessern. Einflussfaktoren sind beispielsweise Instruktionen durch einen Trainer, die Beobachtung anderer Bewegungen oder selbst generierte Hypothesen, die Art

der erforderlichen perzeptuell-motorischen Integration und/oder Sequenzierung. Bewusste Strategien spielen nicht nur bei komplexen Bewegungsaufgaben eine Rolle, sondern sind auch in eher einfachen Laboraufgaben zu visuomotorischem Lernen zu beobachten. Auf das Zusammenwirken expliziter und impliziter Prozesse bei der Sequenzierung wird in ▶ Zur Vertiefung 19.4 eingegangen.

An motorischem Lernen sind viele Hirnareale beteiligt (Überblick in Hardwick et al. 2012). Gemäß dem *Prinzip der neuronalen Trennung* sollten Patienten mit eng umgrenzten Läsionen in einem der am motorischen Lernen beteiligten Areale spezifische Beeinträchtigungen für das Erlernen einer Transformation zeigen, während andere Transformationen weiterhin gelernt werden können.

Zur Vertiefung 19.4

Explizite und implizite Prozesse im Sequenzlernen

Ein klassisches Paradigma zur Untersuchung von Sequenzlernen ist die von Nissen und Bullemer (1987) etablierte Variante der seriellen Wahlreaktionsaufgabe. Der grundsätzliche Versuchsaufbau ist in Abb. 19.9 dargestellt. In dieser Aufgabe leuchtet auf einem Monitor jeweils eine von vier möglichen Zielpositionen auf, und die Versuchsperson muss möglichst schnell die zu dieser Position korrespondierende Taste auf einem Eingabegerät drücken. Nach dem Tastendruck leuchtet erneut ein Licht auf dem Monitor auf. Die Abfolge der erleuchteten Positionen erfolgt dabei in einer bestimmten, sich wiederholenden Sequenz, die z. B. acht oder zwölf Elemente umfasst. Das Erlernen dieser Sequenz ist mit einer Verringerung der Reaktionszeiten auf die aufleuchtenden Signale verbunden. Diese Verringerung der Reaktionszeit ist darauf zurückzuführen, dass die Signale für die entsprechenden Teilbewegungen vorhersagbar werden und dementsprechend Kontrollprozesse optimiert werden.

Befunde zum Erlernen solcher Bewegungssequenzen legen nahe, dass das Erlernen der Folgen grundsätzlich in zwei verschiedenen Modi ablaufen kann. Relative Einigkeit besteht darüber, dass einer dieser Modi eher implizit, also ohne bewusste, explizite Prozesse abläuft, während sich der zweite Prozess durch genau solche expliziten Abläufe auszeichnet. Ein erster Anhaltspunkt dazu stammt aus frühen Arbeiten von Nissen und Bullemer (1987). Während alle gesunden Versuchspersonen das Auftreten der Sequenz bemerkt hatten und dies für ihre Leistung in der Aufgabe nutzen konnten, zeigte sich bei einer klinischen Population eine bemerkenswerte Dissoziation zwischen bewusster Wahrnehmung und Lernleistung. Die Autoren untersuchten Korsakoffpatienten, deren Störung sich u. a. durch eine vollständige Amnesie, also die Unfähigkeit zum Gedächtnisabruf von Informationen, auszeichnet. Diese amnestischen Patienten bemerkten die sich wiederholende Sequenz in der seriellen Reaktionszeitaufgabe nicht, zeigten aber ungefähr gleich große Lerneffekte im Sinne verkürzter Reaktionszeiten wie die gesunde Kontrollgruppe, die wiederum die Sequenz bemerkt hatte (▶ Kap. 10). Dieses implizite Lernen der Sequenz ohne verbalisierbares Wissen über ihre Abfolge wurde auch in späteren Untersuchen belegt, und die Mechanismen der Interaktion bzw. des einzelnen Beitrags wurden expliziter und impliziter Lernanteile weiter erforscht. Willigham et al. (1989) z. B. fanden, dass der Grad der „Explizitheit" im Sinne der Verbalisierbarkeit der Sequenz linear mit der Lernleistung verbunden ist. Shanks und Cameron (2000) wiederum konnten keine Verbesserung der Lernleistung bei expliziter Kenntnis der Sequenz finden. Curran und Keele (1993) hingegen bestätigten, dass explizites Wissen das Lernen verbessert.

Sie fanden weiterhin, dass eine zweite Aufgabe, die zusätzliche Kapazität des Arbeitsgedächtnisses beansprucht, den positiven Effekt des expliziten Wissens beeinträchtigt, während das implizite Lernen von einer zweiten Aufgabe wenig beeinträchtigt war. Abgeleitet aus diesen Befunden postulierten sie, dass beim Sequenzlernen zwei verschiedene Lernsysteme involviert sind: ein aufmerksamkeitsabhängiges System und ein aufmerksamkeitsunabhängiges. Obwohl die Existenz dieser beiden Systeme heute weitestgehend akzeptiert ist, herrscht bezüglich der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale noch keine Einigkeit. Besonders wird hier die Rolle der von Curran und Keele (1993) postulierten Aufmerksamkeit diskutiert. Zu dieser Diskussion beigetragen haben u. a. Befunde, die gegen einen verallgemeinerbaren Effekt von Zweitaufgaben sprechen. So scheint z. B. das Zählen von Tönen, das nur wenig mit Ablenkung von Aufmerksamkeit zu tun haben sollte, eine Auswirkung auf das Sequenzlernen zu haben (Frensch et al. 1994; Stadler 1995), während deutlich komplexere Aufgaben zum Teil keine Auswirkungen auf das Sequenzlernen haben (Stadler 1995; Heuer und Schmidtke 1996). Diese Überlegungen inspirierten Keele et al. (2003) zur These, dass die beiden Systeme sich weitestgehend durch ihre Modalitätsspezifität auszeichnen. Während das sogenannte *dorsale Lernsystem* innerhalb einer Modalität wirksam und dabei grundsätzlich implizit ist, kann das *ventrale Lernsystem* explizit oder auch implizit wirken und verknüpft Informationen aus unterschiedlichen Modalitäten.

Neben den Annahmen über die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der beiden Lernsysteme ist auch das Ausmaß der Interaktion der damit verbundenen Prozesse noch nicht endgültig geklärt. In einer Reihe von Studien an Schlaganfallpatienten untersuchten Boyd und Winstein (2003, 2004) den Einfluss expliziter Prozesse auf implizites Sequenzlernen. Sie zeigten, dass gesunde Kontrollpersonen immer vom expliziten Wissen über die Sequenz profitierten, während das explizite Wissen bei den Schlaganfallpatienten, bei denen die Basalganglien oder der sensomotorische Cortex betroffen war, das implizite Sequenzlernen verschlechterte. Die Ergebnisse einer Untersuchung von Willingham und Goedert-Eschmann (1999) legen hingegen nahe, dass sich implizite und explizite Lernprozesse parallel entwickeln und keinen Einfluss aufeinander ausüben. In dieser Untersuchung wurde eine Gruppe von Versuchspersonen (explizite Gruppe) über das Auftreten einer zwölf Signale umfassenden Sequenz informiert. Zusätzlich wurde ihnen die Position (1 bis 12) des momentan aufleuchtenden Signals in der zu lernenden Sequenz dargeboten. Die anderen Versuchspersonen (implizite Gruppe) erhielten keinerlei Informationen über die Regelhaftigkeit in der Abfolge der aufleuchtenden Signale. Im Anschluss an eine Trainingsphase absolvierten beide Gruppen einen Transferblock, in dem die vorher gelernte Sequenz oder eine neue Sequenz (jeweils die Hälfte der Versuchspersonen einer Gruppe) in eine zufällige Abfolge der Signale eingebettet war. Die Versuchspersonen wurden nicht darüber informiert, dass die gelernte Sequenz in diesem Transferblock wieder auftrat. Beide Gruppen zeigten einen stärkeren Lerneffekt für die vorher gelernte als für die neue Sequenz.

Der wichtigste Befund dieser Untersuchung war jedoch, dass sich die explizite und implizite Gruppe im Transferblock nicht im Ausmaß des Lerneffekts bei der in der Trainingsphase gelernten Sequenz unterschieden. Dies bedeutet, dass das Ausmaß impliziten Lernens in der vorher über die Sequenz informierten Gruppen genauso groß war wie das implizite Lernen der nicht informierten Gruppe. Willingham und Goedert-Eschmann schlussfolgerten aus diesem Ergebnis, dass in der expliziten Gruppe in der Trainingsphase parallel zu dem expliziten Lernen auch implizites Lernen stattgefunden hatte. Die Autoren konnten somit zeigen, dass implizites und explizites motorisches Sequenzlernen parallel auftreten kann. In einer Untersuchung von Willingham et al. (2002) wurde den Versuchs-

Zur Vertiefung 19.4 (*Fortsetzung*)

personen mitgeteilt, dass die Anwesenheit der Sequenz immer durch einen Farbreiz angezeigt werden würde. Die Versuchspersonen wussten nicht, dass die Sequenz auch anwesend sein konnte, ohne dass dies durch den Farbreiz angezeigt wurde (*explicit-covert*-Bedingung). Des Weiteren wussten sie auch nicht, dass eine zweite Sequenz in der Abfolge der Signale vorhanden war (implizite Bedingung). In den Ergebnissen zeigte sich, dass die Reaktionszeiten der *explicit-covert*-Bedingung sich nicht von denen der impliziten Bedingung unterschieden. Song, Howard und Howard (2007) konnten zeigen, dass das Ausmaß impliziten Lernens bei Versuchspersonen bei An- und Abwesenheit expliziten Wissens beim Sequenzlernen gleich groß war.

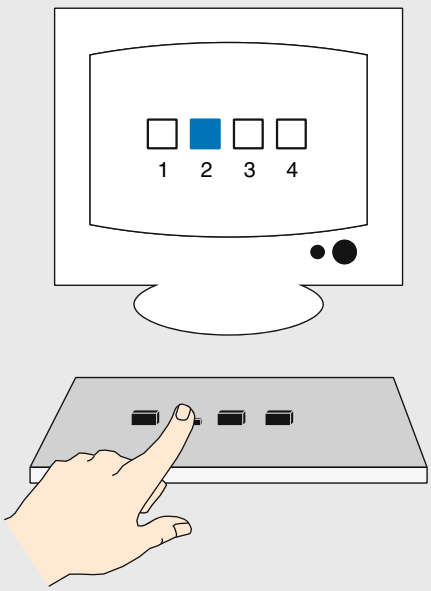


Abb. 19.9 Versuchsaufbau der seriellen Wahlreaktionsaufgabe. Nach dem Aufleuchten der Zielposition (Nummer 2) auf dem Monitor muss die entsprechende Zieltaste (die zweite von *links*) möglichst schnell gedrückt werden. Die Reaktion der Versuchsperson führt zum Aufleuchten der nächsten Zielposition

Beide Facetten strategischen Lernens, sowohl die Auswahl geeigneter Handlungsziele als auch der Ersatz der unbewusst-automatischen durch eine bewusst-kontrollierte Verarbeitung, sind in CoBaLT eng mit dem Präfrontalcortex verbunden. Patienten mit Läsionen im präfrontalen Cortex generieren signifikant weniger Lösungsmöglichkeiten bei der Bearbeitung kognitiver Aufgaben und haben Schwierigkeiten, eine einmal gewählte Strategie im Übungsverlauf durch eine neue, effektivere Strategie zu ersetzen (Milner 1964). Weiterhin zeigen sich beim expliziten Lernen einer neuen Bewegungssequenz zu Beginn der Lernphase, in der die Versuchspersonen die Sequenz memorieren, eine erhöhte Aktivität im präfrontalen Cortex, die aber mit dem Übungsverlauf abnimmt, parallel zu Berichten von Versuchspersonen, dass sie nicht mehr auf die Fingerbewegung achten müssen (Seitz 1990). Beim impliziten Lernen einer solchen Bewegungssequenz zeigen sich entsprechend komplementäre Ergebnisse: Während von Beginn an Aktivierungen im supplementär-motorischen Cortex (SMA), im prämotorischen Cortex (PMC) und den Basalganglien zu beobachten ist, zeigt sich eine Aktivierung im präfrontalen Cortex (PFC) erst, sobald sich die Versuchsperson der verborgenen Sequenz bewusst geworden ist (Doyon et al. 1995; Grafton et al. 1995).

Das Erlernen der Transformation von Handlungszielen in Bewegungsziele (perzeptuell-motorische Integration) wird in CoBaLT mit dem posterioren Parietalcortex (PPC) und dem PMC in Verbindung gebracht. Läsionsstudien bei Affen zeigen, dass Läsionen im PPC und im PMC das Erlernen arbiträrer perzeptuell-motorischer Assoziationen, wie beispielsweise das Drücken einer Taste in Reaktion auf das Aufleuchten einer Lampe, beeinträchtigen (z. B. Halsband und Passingham 1982). Studien an Patientenpopulationen, die im Rahmen von ZNS-Erkrankungen (Morbus Huntington, Alzheimer) sensomotorische Defizite aufweisen, aber über einen intakten PPC und/oder PMC verfügen, zeigen, dass diese Patienten in der Lage sind, neue perzeptuell-motorische Assoziationen normal zu lernen und entsprechend normale Nacheffekte bei Prismenadaptation zeigen (Paulsen et al. 1993).

Das Erlernen der Transformation von Bewegungsziel(en) in eine Bewegungssequenz scheint in erster Linie dem supplementärmotorischen Areal und den Basalganglien zuzufallen. Patienten, die unter Morbus Huntington, einer neurodegenerativen Erkrankung der Basalganglien, leiden, lernen die Beziehung zwischen einem Joystick und einem damit gesteuerten Cursor auf dem Monitor im Rahmen einer Tracking-Aufgabe problemlos (perzeptuell-motorische Integration); sie lernen aber nicht eine sich wiederholende Bewegungstrajektorie innerhalb der Tracking-Aufgabe (Willingham et al. 1995). Bildgebende Verfahren bestätigen entsprechende Zusammenhänge zwischen dem Sequenzlernen und der Aktivität im Striatum und im supplementär-motorischen Areal (Doyon et al. 1995; Grafton et al. 1995).

Dynamische Prozesse verortet Willingham auf Rückenmarksebene. Mikrostimulation an spinalen Neuronen des Frosches führen zu konvergierenden Bewegungen des Beines aus unterschiedlichen Ausgangspositionen auf einen Zielpunkt hin, und zwar unabhängig von der Ausgangsposition. Stimulation am Motoneuron hingegen führt zu identischen Muskelkräften, d. h., un-

terschiedliche Ausgangspositionen führen zu unterschiedlichen Endpositionen (Überblick in Bizzi et al. 2000). Zwischen diesen beiden Verarbeitungsstufen müsste also die Transformation von räumlichen Merkmalen der Bewegung in Kräfte stattfinden.

19.3.2 Was beeinflusst den Fertigkeitserwerb?

Wie in Abb. 19.7 zu sehen, existiert ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge an Übung und der Qualität einer zu erlernenden motorischen Fertigkeit. Übung benötigt Zeit. In vielen Situationen ist Zeit allerdings nicht unbegrenzt verfügbar. So sehen sich bedingt durch den technologischen Fortschritt immer mehr Menschen in Alltag und Beruf mit schnell wechselnden und teilweise gänzlich neuartigen sensomotorischen Anforderungen konfrontiert. Wie viel Zeit bleibt nun einem Arbeitnehmer, den Umgang mit einer neuen Maschine oder einem neuen Werkzeug zu erlernen, bevor er oder sie durch einen anderen Menschen ersetzt wird? Wie viel Zeit bekommt ein Physiotherapeut für die sensomotorische Rehabilitation eines Schlaganfallpatienten, damit dieser sich wieder im Alltag selbstständig bewegen kann? Wie viel Zeit darf ein Computerspiel an Übung fordern, damit es für eine breite Masse an Konsumenten attraktiv bleibt und möglichst oft gekauft wird? Die Antwort auf Fragen ist: nicht viel. Daher ist es wichtig, die Zeit, in der motorisches Lernen stattfindet, optimal zu nutzen.

In diesem Abschnitt geht es um zwei Variablen, die den Verlauf motorischen Lernens beeinflussen und die zu dessen Optimierung herangezogen werden. Wir wechseln damit von einer prozess- zu einer ergebnisorientierten Perspektive auf motorisches Lernen und befassen uns im Folgenden mit der Organisation und inhaltlichen Gestaltung von Übungseinheiten und der Verfügbarkeit von ergänzendem Feedback über Bewegungsverlauf und -ergebnis. Wir beschränken uns allerdings auf Aspekte, die auch in der eher grundlagenorientierten Forschung zum motorischen Lernen eine Rolle spielen. Im Einzelnen sind das für den Bereich der Übungsgestaltung die in Abb. 19.10 dargestellten Faktoren der Übungsverteilung (massierte vs. verteilte Übung), der Übungsorganisation (geblockte vs. zufällige Übung) und der Übungsvariabilität (konstantes vs. variables Üben). Für den Bereich der Rückmeldung der Konsequenzen einer Bewegung (Feedback) sind dies Art (verlaufs- vs. ergebnisbezogene Rückmeldung), Inhalt, Häufigkeit und die zeitliche Platzierung der Rückmeldung. Diese Themenauswahl ist angesichts des zur Verfügung stehenden Platzes natürlich höchst selektiv und zeigt nur einen kleinen Ausschnitt der theoretischen und empirischen Auseinandersetzung mit Übungsgestaltung und Feedback, sodass wir den interessierten Leser auf detailliertere Abhandlungen verweisen, und zwar auf die in den entsprechenden Abschnitten angegebenen Überblicksartikel in Fachzeitschriften sowie auf die einschlägigen Lehrbücher im Bereich der Sportpsychologie und der Bewegungswissenschaft (z. B. Schmidt und Lee 2011; Magill und Anderson 2013).

Übungsgestaltung

Im Folgenden verstehen wir Übung im Sinne der *deliberate practice*, d. h., wir definieren Übung im Sinne von Ericsson et al. (1993) als einen Sammelbegriff für alle Verhaltensweisen, die speziell auf die Verbesserung des gegenwärtigen individuellen Fertigkeitsniveaus ausgerichtet sind. Eine der am besten untersuchten Aspekte der Schmidt'schen Schematheorie bezieht sich auf die Bedeutung von **Übungsvariabilität** (Moxley 1979) für die Entwicklung von Wiedergabe- und Wiedererkennungsschemata (Überblick in van Rossum 1990). Gemäß der Schematheorie sollte das Üben verschiedener Variationen einer Fertigkeit in unterschiedlichen Ausführungskontexten zur Entwicklung eines all diese umfassenderen generativen Modells oder generalisierten motorischen Programms (GMP) führen. Durch variables Üben werden Lernende gezwungen, Bewegungen immer wieder neu zu parametrisieren, sodass sich eine flexiblere und anpassungsfähigere Bewegungsrepräsentation entwickeln kann. Erinnern Sie sich, dass beispielsweise jede Kombination aus Bewegungsparametern und erzieltem Ergebnis als Punkt im Wiedergabeschema gespeichert wird. Wenn Sie nun durch ein Ausprobieren vieler verschiedener Bewegungsvariationen möglichst viele Kombinationen aus Bewegungsparametern und -ergebnissen abspeichern und zusätzlich noch die Ausgangsbedingungen variieren sollten, so ist die Erwartung der Schematheorie, dass dies zur Entwicklung eines flexibleren und auch für neue Situationen valideren Schemas beiträgt.

Eine der ersten Studien zu Übungsvariabilität stammt von McCracken und Stelmach (1977). Versuchspersonen mussten in einer vorgegebenen Bewegungszeit von 200 ms einen Schlitten über eine Metallschiene bewegen. Innerhalb dieser Bewegungszeit waren unterschiedliche Bewegungsweiten zurückzulegen. Eine Gruppe von Versuchspersonen, die konstant übende Gruppe, trainierte nur eine dieser Bewegungsweiten, während eine zweite Gruppe, die variabel übende Gruppe, vier verschiedene Bewegungsweiten in einer zufälligen Abfolge übte. Wenig überraschend zeigte die konstante Gruppe bessere Leistung in der Übungsphase. In einem anschließenden Transfertest, in dem beide Gruppen eine zuvor nicht geübte Bewegungsweite in 200 ms zurücklegen mussten, schnitt allerdings die variabel übende Gruppe besser ab. Es scheint also, als hätte variables Üben zum Erwerb einer anpassungsfähigeren Bewegungsrepräsentation geführt, mit der in einer neuen Variation der geübten Fertigkeit bessere Ergebnisse erzielt werden können. Interessanterweise sind die größten Effekte von variabler Übung bei Kindern zu beobachten (z. B. Wulf 1991; Yan et al. 1998).

Seit mehr als 100 Jahren ist die Frage der **Übungsverteilung**, also wie Lerninhalte über die Zeit verteilt werden sollen, ein zentraler Gegenstand psychologischer Forschung (z. B. Ebbinghaus 1885; Glenberg 1979; Cepeda et al. 2009). Dies kann sowohl die zeitliche Abfolge von einzelnen Übungsdurchgängen innerhalb einer Übungseinheit als auch die Organisation von Übungseinheiten über einen größeren Zeitraum betreffen und wurde sowohl im Bereich des motorischen als auch des verbalen Lernens untersucht. *Massiertes Üben* bedeutet, dass Übungsdurchgänge oder Übungseinheiten in einem kurzen Zeitraum mit wenig bis gar keinen Pausen absolviert werden, während *verteiltes Üben* dieselben Lerninhalte, also die gleiche Anzahl an Übungsdurchgängen bzw. Übungseinheiten, über einen längeren Zeitraum mit größeren Pausen verteilt. Übt man verteilt, benötigt man also zwangsläufig mehr Zeit für dasselbe Übungspensum oder, anders ausgedrückt, durch massiertes Üben kann im sel-

ben Zeitraum ein größeres Übungspensum absolviert werden. Trotz dieses scheinbaren Vorteils des massierten Übens (mehr Übung pro Zeit) favorisieren die meisten Studien verteiltes Üben als die effektivere Methode, den zeitlichen Ablauf von Übung zu organisieren (Überblick in Cepeda et al. 2006; Dempster 1989; Donovan und Radosevich 1999; Gerbier und Toppino, im Druck; Lee und Genovese 1988). Verteilt man dieselben Inhalte über mehrere Sitzungen, zeigen sich in einem späteren Behaltenstest bessere Ergebnisse für die verteilt im Vergleich zur massiert übenden Gruppe (Verteilungseffekt; ▶ Kap. 12).

In einer klassischen Studie aus dem Jahr 1950 verglich Robert Bruce Ammons unterschiedliche Pausendauern beim Erlernen einer Tracking-Aufgabe, bei der die Versuchspersonen mit einem Stift Kontakt zu einem Zielpunkt, der auf einer sich drehenden Unterlage aufgebracht war, beibehalten mussten. Am Ende der Übungsphase (36 Durchgänge à 20 s) zeigen sich deutliche Gruppenunterschiede in Abhängigkeit von der Pausenlänge und somit der zeitlichen Übungsverteilung. Auch zu Beginn des ersten Nachtests, in dem die Versuchspersonen nach einer 20-minütigen Pause nochmals 36 Durchgänge, diesmal allerdings ohne Pause, absolvierten, waren die Gruppenunterschiede noch sichtbar. Interessanterweise waren diese aber am Ende des Nachtests größtenteils verschwunden. Einzig die Gruppe, die in der Übungsphase zwischen jedem 20-sekündigen Übungsdurchgang 24 h (!) Pause machte, zeigte immer noch eine bessere Tracking-Leistung. Nach 24 h erschienen die Versuchsteilnehmer zu einem weiteren Nachtest. Zu Beginn dieses zweiten Tests konnte Ammons wiederum Leistungsunterschiede in Abhängigkeit von der Übungsverteilung beobachten, woraus sich zwei Dinge schließen lassen:

1. Die Verteilung von Übungsdurchgängen scheint über einen längeren Zeitraum mit größeren Pausendauern nicht nur temporäre, sondern relativ langfristige Auswirkungen auf motorisches Lernen zu haben.
2. Das Verschwinden der Gruppenunterschiede im Verlauf des ersten Nachtests demonstriert, dass sich das Fehlen von Pausen zwischen Übungsdurchgängen negativ auf die individuelle Leistungsfähigkeit auswirkt, beispielsweise durch Ermüdung, sodass zumindest ein Teil des leistungserniedrigenden Effekts von massierter Übung ohne Pausen am Ende der Übungsphase auf temporäre Ermüdungseffekte zurückzuführen ist.

Neuere Studien, die andere Fertigkeiten, ein größeres Ausmaß an unterschiedlichen Pausendauern und längere Retentionsintervalle (z. B. Cepeda et al. 2009: Pausendauern von 5 min bis 6 Monaten und Retentionsintervalle von fünf bis sechs Monaten) untersuchten, berichten von einem umgekehrt-U-förmigen Verlauf des Zusammenhangs zwischen Pausendauern und Lernertrag, sodass die breitere Verteilung von Übung mit längeren Pausendauern nur bis zu einem bestimmten Punkt lernförderlich zu sein scheint, ab dem eine weitere Verlängerung der Pausendauer eher lernhinderlich zu sein scheint (Cepeda et al. 2009; Glenberg 1976; Verkoeijen et al. 2005).

Erklärungsmodelle für die beobachteten Verteilungseffekte beschränken sich nicht auf das Lernen von motorischen Fertigkeiten, sondern können auch auf andere Formen des Fertigkeitserwerbs verallgemeinert werden. Theorien der Enkodierungsvariabilität wie beispielsweise das Stimulus Fluctuation Model von Estes (1955) verstehen die Lernvorteile verteilter Übung als Konsequenz der Ähnlichkeit von Übungs- und Anwendungs- bzw. Testsituation. Demnach wird neben den gelernten Fertigkeiten auch der Kontext, in dem geübt wird, als Teil des Gelernten im Gedächtnis abgespeichert oder enkodiert (▶ Kap. 12). Der Abruf von Lerninhalten wird dann erleichtert, wenn die situativen Gegebenheiten, der Kontext während des Lernens und der Kontext während des Abrufs der gelernten Informationen, einander ähnlich sind (vgl. Thorndikes Theorie der ähnlichen Elemente). Durch verteiltes Üben zu unterschiedlichen Zeitpunkten kommt es automatisch zu einer Variation des Lernkontexts, die wiederum die Wahrscheinlichkeit einer zumindest graduellen Übereinstimmung zwischen Lern- und Testkontext erhöht, was den Abruf der gelernten Inhalte erleichtert.

Im Bereich des motorischen Lernens hat sich dieser Zusammenhang zwischen Übungs- und Anwendungskontext auch als Prinzip der *Übungsspezifität* einen Namen gemacht (z. B. Barnett et al. 1973). Dabei kann sich Übungsspezifität sowohl auf sensorische (Heuer et al. 2011; Proteau et al. 1987; Proteau et al. 1992; Smith und Vela 2001), motorische (Ingram et al. 2013), emotionale (Lawrence et al. 2014) als auch physiologische (Movahedi et al. 2007) Merkmale der Übungssituation beziehen. Neben der Ähnlichkeit von Übungs- und Testkontext im Sinne spezifischer Merkmale der Übenden oder der Umwelt kann sich Übungsspezifität aber auch auf die in Übungs- und Anwendungssituation ablaufenden kognitiven Verarbeitungsprozesse beziehen (*transfer appropriate processing*; Morris et al. 1977). Die Effektivität von Übungsbedingungen, die immer in Relation zur tatsächlichen Anwendungssituation zu sehen ist, hängt demnach in entscheidender Art und Weise von der Übereinstimmung zwischen den im Übungsverlauf und in der Anwendungssituation geforderten Informationsverarbeitungsprozessen (z. B. schnelles Entscheiden, visuelle selektive Aufmerksamkeit) ab. So könnte man auch den positiven Effekt verteilter Übung als einen Effekt der Spezifität der kognitiven Verarbeitungsprozesse verstehen: Gehen wir in Anlehnung an Hintzman et al. (1975) davon aus, dass jedes Mal, wenn eine Bewegung geübt wird, dies die bereits gespeicherte Gedächtnisspur der auszuführenden Bewegung aktiviert. Pausen zwischen den einzelnen Durchgängen erschweren die Aktivierung dieser Gedächtnisspur in Abhängigkeit von der Pausendauer, da mehr Zeit seit dem letzten Abruf der Bewegung vergangen ist und verschiedene andere Tätigkeiten in der Zwischenzeit mit dem Abruf des Bewegungsplanes interferieren konnten. Ist nun der Abruf des Handlungsplanes während der Übungsphase sowohl schwierig als auch erfolgreich, verbessert dies den Abrufprozess und erleichtert entsprechend den Abruf der gelernten Fertigkeit in einer späteren Anwendungssituation (Hintzman et al. 1975).

Ein ähnlicher Erklärungsansatz, die Handlungsplanrekonstruktionshypothese (*action plan reconstruction hypothesis)* existiert für einen weiteren prominenten Einflussfaktor auf motorisches Lernen: die **Kontextinterferenz** (*contextual interference*). Dieses Konzept hat seinen Ursprung in den Arbeiten des Kognitionspsychologen William Battig (1966, 1979) zum verbalen Lernen. Battig berichtete, dass das Lernen einer Wortliste Übungsbe-

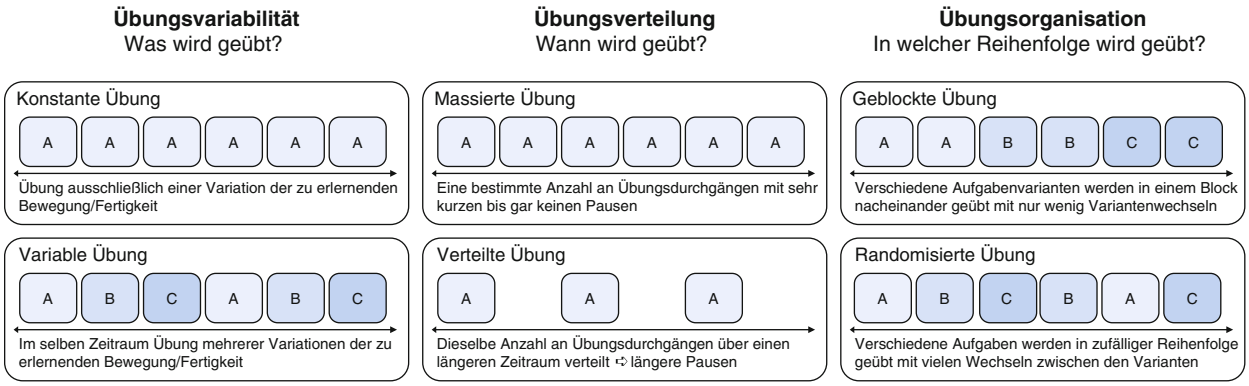


Abb. 19.10 Während Übungsvariabilität und Übungsverteilung jeweils Übungsinhalte und -zeiten spezifizieren, bezieht sich Übungsorganisation auf die inhaltliche Verteilung der Übungsinhalte innerhalb der festgelegten Übungszeit

dingungen, in denen die Wörter stark miteinander interferierten (hohe kontextuelle Interferenz), beispielsweise durch eine komplett zufällige und für die Versuchspersonen unvorhersehbare Reihenfolge der Einzelitems, im Vergleich zu Übungsbedingungen, in denen die Wörter nur wenig miteinander interferierten (niedrige Kontextinterferenz), beispielsweise durch eine wiederholte Darbietung der Einzelitems in einer geblockten Reihenfolge (Abb. 19.10), mit einem höheren Verarbeitungsaufwand einhergeht, der zu einem langsameren Lernfortschritt und unter Umständen unvollständigem Memorieren der Wortliste führt. Diejenigen Wörter, die trotz hoher Kontextinterferenz gelernt wurden, werden allerdings länger und besser erinnert als Wörter, die unter niedriger Kontextinterferenz gelernt wurden.

Shea und Morgan (1979) sowie Lee und Magill (1983) waren die Ersten, die Kontextinterferenz im Bereich des motorischen Lernens untersuchten. Shea und Morgan (1979) ließen zwei Gruppen von Versuchspersonen drei unterschiedliche Bewegungsmuster lernen. Eine Gruppe übte geblockt, so dass alle Übungsdurchgänge einer spezifischen Bewegung direkt aufeinanderfolgten, bevor zu einer anderen Bewegung gewechselt wurde. Die andere Gruppe übte randomisiert, also in einer zufälligen Abfolge der einzelnen Bewegungen, mit unsystematischen Wechseln zwischen den Bewegungsmustern nach jedem Durchgang. Die gemessenen Bewegungs- und Reaktionszeiten zeigten, dass randomisiertes Üben mit seinen häufigen Wechseln zwischen den Bewegungsmustern einen negativen Effekt auf die Leistung in der Übungsphase hatte. Die geblockt übende Gruppe war in der Lage, die Bewegungen signifikant schneller auszuführen als die randomisiert übende Gruppe. In den anschließenden Behaltenstests, 10 min und 10 Tage später, waren die Ergebnisse genau umgekehrt. Die Versuchspersonen der geblockt übenden Gruppe zeigten deutlich schlechtere Leistung im Vergleich zur randomisiert übenden Gruppe. Vergegenwärtigen Sie sich das Paradoxe dieses Ergebnisses! Schwierigere Übungsbedingungen, die unmittelbar im Übungsverlauf zu schlechteren Ergebnissen führen, führen langfristig zu besseren Lernergebnissen.

Zur Erklärung dieser paradoxen Ergebnisse formulierten Shea und Zimny (1983) die Elaborationshypothese (*elaborative processing hypothesis*). In postexperimentellen Interviews ihrer Versuchspersonen fanden sie heraus, dass Teilnehmer der randomisiert übenden Gruppen die einzelnen Bewegungsmuster häufiger miteinander verglichen und Angaben über Unterschiede in den Bewegungen machten. Der häufige Wechsel zwischen Bewegungsmustern führt nach der Elaborationshypothese zur Präsenz unterschiedlicher Bewegungspläne im Arbeitsgedächtnis, was eine vergleichenden Verarbeitung der verschiedenen Bewegungen ermöglicht, die letztendlich zu kontrastreicheren und detaillierteren Bewegungsrepräsentationen führt, die zu einem späteren Zeitpunkt besser erinnert werden können. Obwohl die Hypothese in der Folge empirische Unterstützung erfuhr (z. B. Shea und Titzer 1993; Lin et al. 2008), ist sie nicht ohne Alternativen. Die Kernaussage der eingangs erwähnten Rekonstruktionshypothese (Lee und Magill 1983; ähnliche Argumentation im Bereich des verbalen Lernens in Cuddy und Jacoby 1982) lässt sich wie folgt zusammenfassen: Vergessen unterstützt Lernen! In einer randomisierten Übungsabfolge passieren während des Wechsels von Bewegung A zu Bewegung B zwei Dinge: Bewegungsplan A muss aus dem Arbeitsgedächtnis gelöscht bzw. vergessen werden, und Bewegungsplan B muss im Arbeitsgedächtnis bereitgestellt bzw. (re-)konstruiert werden. Das Vergessen von Bewegungsplänen nach jedem Übungsdurchgang unterstützt Bewegungslernen durch die Notwendigkeit zur wiederholten (Re-)Konstruktion der verschiedenen Bewegungspläne. Kurzfristig führt dies zu schlechteren Leistungen in der Übungsphase im Vergleich zu geblockter Übung, in der der jeweilige Bewegungsplan über alle Übungsdurchgänge eines Blocks hinweg im Arbeitsgedächtnis aktiv bleibt und nicht neu konstruiert werden muss. Langfristig führt aber die wiederholte Bewegungsplanung zu stabileren Bewegungsrepräsentationen und besserem Bewegungslernen. Die Rekonstruktionshypothese ist weiterhin kompatibel mit Verhaltensdaten und computationalen Modellen im Bereich der gleichzeitigen Adaptation an multiple sensomotorische Transformationen (Doppeladaptation; Hegele und Heuer 2010b; Lee und Schweighofer 2009), und zwar insofern, als dass Interferenz durch häufige Transformationswechsel langfristiges Transformationslernen unterstützt (Schweighofer et al. 2011).

Feedback

Feedback bezeichnet die Rückmeldung von Leistungsinformationen während und nach der Bewegungsausführung und ist ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf motorische Lernprozesse. Im Folgenden geben wir einen kurzen Überblick über Art, Inhalt, Häufigkeit und zeitliche Platzierung von Feedback im Übungsverlauf. Für detailliertere Darstellung sei an dieser Stelle auf die

Überblicksarbeiten von Hodges und Franks (2008) sowie Wulf und Shea (2004) verwiesen.

Intrinsisches Feedback sind diejenigen sensorisch-perzeptuellen Informationen, die notwendigerweise immer mit der Bewegungsausführung einhergehen. Feedback über die eigene Bewegung kann über verschiedene sensorische Kanäle wahrgenommen werden. Diese sensorisch-perzeptuellen Informationen stehen ihnen als ein natürlicher Bestandteil der Bewegung während und nach der Bewegungsausführung zur Verfügung. Zum Beispiel wissen Sie, dass Ihre Bewegung fehlerhaft war, wenn Sie sehen, wie der Basketball den Korb verfehlt, und der schmerzhafte Aufprall auf den Hallenboden signalisiert Ihnen unmissverständlich, dass Sie bei der Reckübung danebengegriffen haben. Aber auch während der Ausführung von hochgeübten Bewegungen können Sie schon vor einem wahrnehmbaren Ergebnis feststellen, dass sich die Bewegung „nicht rund anfühlt", also einen Fehler in der Bewegungsausführung detektieren. In vielen Situationen ist diese Art des Feedbacks klar und eindeutig; allerdings unterliegt die Wahrnehmung bewegungsbezogenen Feedbacks auch gewissen Wahrnehmungsbeschränkungen, sodass beispielsweise eine rhythmische Sportgymnastin erst lernen muss, die richtige von der falschen Kniegelenkstellung zu unterscheiden, bzw. eine Patientin nach dem Einsatz einer Hüftprothese erst lernen muss, wie viel Gewicht sie teilweise über das Bein abstützen kann, während sie an Krücken das Laufen wieder erlernt.

Des Weiteren können Sie *extrinsisches Feedback* über die ausgeführte Bewegung erhalten. Bei extrinsischem Feedback handelt es sich um ergänzende sensorisch-perzeptuelle Informationen, die Ihnen entweder zusätzlich von außen gegeben werden (z. B. der Kommentar Ihres Trainers) oder die bereits vorhandene intrinsische Informationen verstärken und vielleicht so erst wahrnehmbar machen. Nach Gentile (1972) – und diese Unterscheidung hat sich mittlerweile etabliert – gibt es zwei Kategorien von extrinsischem Feedback:

1. **Ergebnisbezogenes Feedback** (*knowledge of results*, KR): Hierbei handelt es sich um von außen gegebene Informationen über das Resultat einer Bewegung, z. B. die Rückmeldung eines Trainers an den Turner, in welchem Bewertungsbereich die gerade geturnte Übung anzusiedeln ist, oder alternativ Informationen über das Erreichen oder Nichterreichen des jeweiligen Bewegungszieles, also beispielsweise ein akustisches Warnsignal, wenn eine Patientin den vorher festgelegten *range of motion* einer Bewegung erreicht hat. KR bezieht sich dabei per Definition auf extrinsisches Feedback. Natürlich bekommt man auch Informationen über das Resultat einer Bewegung aus intrinsischem Feedback, z. B. wenn man sieht, dass man ein Ziel verfehlt hat, aber wir beschränken die Verwendung von KR auf den spezifischen Einfluss von Leistungsinformationen, die von außen zusätzlich oder verstärkend gegeben werden, um motorische Lernprozesse zu unterstützen.
2. **Verlaufsbezogenes Feedback** (*knowledge of performance*, KP): Dabei handelt es sich um von außen gegebene Informationen über den Verlauf einer Bewegung, d. h., der kritische Unterschied zwischen KR und KP ist, auf welchen Aspekt der Bewegung sich die gegebene Information bezieht. Für das Turnerbeispiel würde das bedeuten, dass die KP des Trainers sich auf diejenigen Aspekte der Bewegungsausführung beziehen würde, die zu der erreichten Bewertungspunktzahl geführt haben.

Obwohl Bewegungen auch ohne extrinsisches Feedback gelernt werden können, insbesondere wenn extrinsisches Feedback nur zu intrinsischem Feedback redundante Informationen liefert (z. B. Magill et al. 1991; Zubiaur et al. 1999), berichten viele Studien von einer unterstützenden Funktion extrinsischen Feedbacks (Stelmach, 1970), das den Lernprozess beschleunigt oder über ein bestimmtes Niveau hinausführt. Auch in späteren Lernphasen, wenn die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert der Bewegung kleiner werden und schwerer zu entdecken sind, kann extrinsisches Feedback weitere übungsbedingte Verbesserungen der Bewegungsausführung unterstützen bzw. ermöglichen. Diese Unterstützung des Fertigkeitserwerbs durch extrinsisches Feedback kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen. Zum einen gibt extrinsisches Feedback sowohl Informationen über den Grad der Zielerreichung, sodass Lernende wissen, ob Änderungen an der Bewegungsausführung vorzunehmen sind oder nicht, als auch spezifischere Informationen wie eine Bewegung zu verändern ist, um Ausführungsfehler zu minimieren. Des Weiteren gibt extrinsisches Feedback dem Lernenden Informationen über die eigene Leistungsfähigkeit und deren Entwicklung über die Zeit, was zu einer realistischeren Einschätzung der eigenen Fähigkeiten und zu einer erhöhten Motivation beim motorischen Lernen führen kann. Es ist also wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass Feedback immer sowohl informationelle als auch motivationale Komponenten enthält. Auch das im operanten Konditionieren äußerst beliebte Smiley/Frowny-Face ist eben nicht nur als Belohnungs-/Bestrafungssignal zu verstehen, sondern letztendlich auch eine Form von binärem Leistungsfeedback.

Bezüglich des *Inhalts* und der *Häufigkeit* von extrinsischem Feedback zeigt sich kein allgemeingültiges Bild, da die Wirkung beider Variablen durch eine Reihe von Faktoren wie beispielsweise die Aufgabenschwierigkeit, das Alter oder das Fertigkeitsniveau der Übenden beeinflusst wird (Überblick in Magill 2001). Es zeigte sich aber, dass die Gabe von extrinsischem Feedback nach jedem Übungsdurchgang einen negativen Effekt auf motorisches Lernen hat (Winstein und Schmidt 1990). Gemäß der Guidance-Hypothese (Salmoni et al. 1984) kann Feedback nach jedem Übungsdurchgang zwar zu einer besseren Leistung führen, wird dann aber als Führungsgröße Bestandteil der gelernten Bewegung und behindert aufgrund einer sich im Übungsverlauf entwickelnden Abhängigkeit von extrinsischem Feedback langfristig den Lernerfolg, insbesondere, wenn Feedback im Anwendungskontext nicht mehr zur Verfügung steht. Durch die kontinuierliche Verfügbarkeit von extrinsischem Feedback wird im Verlauf des Lernprozesses versäumt, eine Verbindung zwischen dem intrinsischen Feedback und der handlungsleitenden Repräsentation zu schaffen. Stattdessen entwickeln die Lernenden eine Abhängigkeit von der zusätzlichen Information, sodass auf das Fehlen von extrinsischem Feedback mit einem sofortigen Leistungseinbruch reagiert wird. Eine reduzierte Feedbackhäufigkeit zwingt die Lernenden, intrinsisches Feedback zu verarbeiten und so im Übungsverlauf effektivere Kontrollstrategien zu entwickeln. Als allgemeine Richtlinie kann gesagt werden,

dass im Verlauf des Übungsprozesses die Häufigkeit der Gabe von extrinsischem Feedback verringert (Swinnen 1996) und die Präzision erhöht werden sollte (Magill und Wood 1986).

Extrinsisches Feedback kann gleichzeitig (simultan) oder nach Beendigung der Bewegung (terminal) gegeben werden. Welche Art der *zeitlichen Platzierung* besser ist, lässt sich nicht klar bestimmen, auch nicht in relativ gut kontrollierten Laborstudien zu sensomotorischer Adaptation, die sowohl von Vorteilen terminalen (Bernier et al. 2005; Heuer und Hegele 2008b) als auch simultanen (Hinder et al. 2008, 2010) visuellen Feedbacks berichten. Im Bereich des Fertigkeitserwerbs hat sich allerdings gezeigt, dass die Nützlichkeit von simultanem Feedback in erster Linie vom Informationsgehalt des extrinsischen in Relation zum intrinsischen Feedback bestimmt wird. Wenn simultanes extrinsisches Feedback zusätzliche intrinsische Informationsquellen parallel zu anderem intrinsischem Feedback verstärkt, können diese Informationen für den Lernprozess genutzt werden, beispielsweise durch Evaluation des intrinsischen Feedbacks oder durch die Verknüpfung der Bewegungssteuerung mit anderen Aspekten des intrinsischen Feedbacks (z. B. Wulf et al. 1998). Ist der Informationsgehalt des intrinsischen Feedbacks aber niedrig und im extrinsischen Feedback sehr hoch, kann es entsprechend der Guidance-Hypothese zu einer Abhängigkeit der Lernenden vom extrinsischen simultanen Feedback kommen.

Bezüglich der zeitlichen Platzierung von terminalem Feedback nach Beendigung der Bewegung lassen sich zwischen zwei Übungsdurchgängen zwei Zeitintervalle unterscheiden: das Feedback-Delay-Intervall zwischen Beendigung der Bewegung und Erscheinen des Feedbacks und das Post-Feedback-Intervall zwischen Verschwinden des Feedbacks und Beginn der nächsten Bewegung. Im *Feedback-Delay-Intervall* sollten die Lernenden die Gelegenheit bekommen, zunächst das intrinsische Feedback zu verarbeiten. Daher sollte terminales Feedback nicht unmittelbar nach Bewegungsende gegeben werden. Neben einem solchen minimalen Delay-Intervall scheint die Länge des Feedback-Delay-Intervalls aber keine Rolle für den langfristigeren Lernerfolg beim Üben komplexer Bewegungen zu spielen (Studien zu Prismenadaptation deuten aber auf eine zeitabhängige Modulation der beteiligten Lernprozesse hin; z. B. Kitazawa et al. 1995). Im *Post-Feedback-Intervall* vergleichen die Lernenden intrinsisches und extrinsisches Feedback und planen die nächste Bewegung. Ähnlich den Ergebnissen zum Feedback-Delay-Intervall scheint es lediglich eine minimal notwendige Zeitdauer je nach Komplexität des Feedbacks zu geben.

19.4 Fitness oder evolutionäres motorisches Lernen

» It is difficult to realize how far we have travelled from the early days of studying animal behaviour. Before Niko arrived on the scene, behaviour science was focussed largely on white rats and pigeons behind bars. Things that happened out in the wild were rarely respectable subjects for scientific enquiry. Now we see this fabulous richness of displays, gestures, attacks, and courtship in all creatures around us, and we simply cannot imagine not asking questions about that. Much of this change is due to „ethology", the discipline of Konrad Lorenz and Niko Tinbergen (Kruuk 2003, S. 3).

Während der in Amerika entstandene Behaviorismus als Teildisziplin der Psychologie sorgfältig kontrollierte Experimente mit Labortieren, meist Ratten, Mäusen und Tauben, nutzte, um Rückschlüsse auf menschliches Verhalten zu ziehen, entstand im Europa der 1930er Jahre die Verhaltensbiologie oder auch Ethologie, die sich schwerpunktmäßig mit dem Verhalten unterschiedlicher Tierarten in deren natürlicher Umgebung befasste. Eine der wichtigsten Erkenntnisse der klassischen Verhaltensbiologie war, dass viele tierische Verhaltensweisen angeboren, d. h. genetisch vorprogrammiert, sind. Beach (1955) berichtete von schwangeren Ratten, die in kompletter Isolation aufgewachsen waren und trotzdem dasselbe speziestypische Nestbau- und Pflegeverhalten ihrem Nachwuchs gegenüber zeigten, obwohl sie niemals andere weibliche Ratten diese Verhaltensweisen hatten ausführen sehen.

Beim diesem *evolutionären motorischen Lernen*, dem Erlernen von Instinktverhalten, erstreckt sich der Lernprozess nicht über Tage, Monate oder Jahre eines spezifischen Individuums, sondern über mehrere Generationen einer Spezies. Das Ergebnis dieses Lernprozesses wird genetisch fixiert. Es wird Bestandteil des Verhaltensrepertoires aller nachfolgenden Generationen. Das Ziel evolutionären motorischen Lernens ist der Erhalt bzw. die Steigerung der relativen Fitness, die Populationsgenetiker als Beitrag eines Genotyps zur nächsten Generation im Vergleich zu den Beiträgen alternativer Genotypen definieren. Entsprechend postuliert eine evolutionäre Perspektive auf motorisches Lernen, dass Variation und Selektion nicht nur hinsichtlich der morphologischen Charakteristika eines Individuums, sondern auch in Bezug auf sein Verhalten wirken. Nicht nur die individuellen Exemplare einer Spezies, deren Gefiederfarbe zu besserer Tarnung, längerem Überleben und somit einer größeren Anzahl an Nachkommen führt, hat einen Selektionsvorteil, sondern auch die Individuen, die innerhalb der Variation im speziestypischen Verhalten einer Population, beispielsweise im Paarungs- oder Fressverhalten, günstige Verhaltensweisen zeigen, haben einen Überlebensvorteil und somit mehr Fortpflanzungserfolg.

Diese genetische Vorprogrammierung bildet einerseits ein elementares Verhaltensrepertoire, andererseits die Grundlage für weitere motorische Lernprozesse in der Einzelentwicklung (Ontogenese). Um diese Interaktion von genetisch fixierten Verhaltensweisen und individueller Lernerfahrung besser zu verstehen, kehren wir abschließend zur Ratte, genauer gesagt zur schwangeren Ratte, zurück (Beach 1955). Die erwähnten angeborenen Verhaltensweisen Nestbau und Pflege zeigen die Tiere nämlich nur, wenn sie in ihrer Entwicklung selbst einmal Material mit dem Maul transportiert haben (Nestbau) bzw. Erfahrung mit Leckbewegungen zur Reinigung an sich selbst haben sammeln können (Pflege). Dieses Pflegeverhalten ist dann auch tatsächlich überlebensrelevant, da junge Ratten nicht urinieren können, bevor ihre Genitalien nicht in dieser Weise vom Elterntier stimuliert worden sind (Slater 1985).

Interessierte Leser seien an dieser Stelle auf die Forschung von Niko Tinbergen, Konrad Lorenz und Karl von Frisch ver-

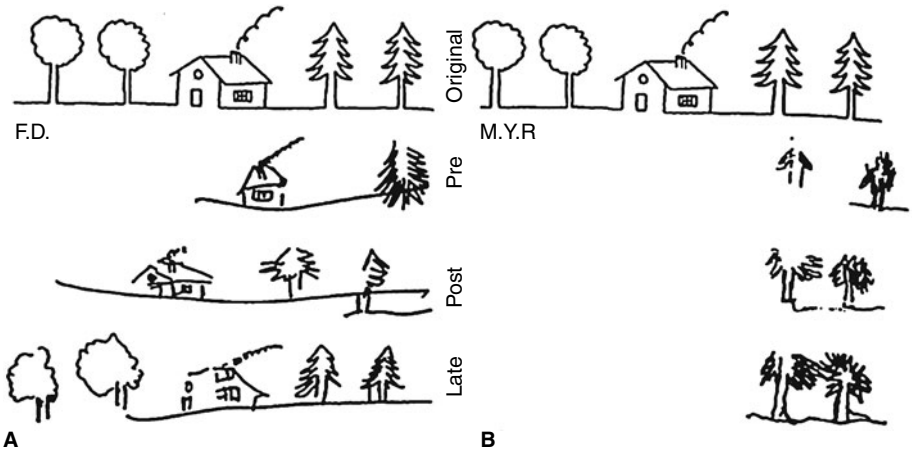


Abb. 19.11 Leistung der Neglectpatienten im Gainotti-Test, in dem eine Reihe verschiedener Gegenstände (*erste Zeile*) möglichst vollständig abgezeichnet werden muss. Dargestellt sind die Leistung eines der Patienten (F.D.) der Prismenbrillengruppe vor (*PRE*), unmittelbar nach (*POST*) und 2 h nach (*LATE*) der Prismenadaptation (**A**) sowie die Leistung eines der Patienten (M.Y.R.) der Kontrollgruppe, in der die Neglectpatienten keine Prismengläser in ihren Brillen trugen (**B**). (Nach Rossetti et al. 1998; Nachdruck mit Genehmigung von Macmillan Publishers Ltd, © 1998)

wiesen, die 1973 für ihre Entdeckungen zu angeborenem Verhalten den Nobelpreis in Medizin erhielten, aber auch auf neuere Überblicksarbeiten (z. B. Cziko 2000), die eine Perspektive auf Evolution als einen generationenübergreifenden sensomotorischen Lernprozess erlauben.

19.5 Anwendungsbeispiele

Prismenadaptation zur Behandlung des unilateralen Neglects

Ein Schlaganfall, von dem die rechte Hirnseite des Patienten betroffen ist, führt in vielen Fällen zu einer bestimmten Beeinträchtigung der ortsbezogenen Aufmerksamkeit, dem unilateralen Neglect (▶ Kap. 5). Patienten mit dieser Störung haben Schwierigkeiten damit, Reize aus der linken Hälfte ihres Gesichtsfeldes zu erkennen und zu benennen. So zeichnen sie, wenn sie gebeten werden, eine Wanduhr abzuzeichnen, die in der Mitte ihres Gesichtsfeldes liegt, z. B. nur die Zahlen von 1 bis 6 oder 7, die Zahlen auf der linken Seite des Gesichtsfeldes werden vernachlässigt.

Bereits in der Mitte der 1980er Jahre gab es erste empirische Belege dafür, dass dem Neglectphänomen eine Verschiebung des egozentrischen Referenzrahmens des Betroffenen zugrunde liegt und dass z. B. die Stimulation des Gleichgewichtsorgans (durch das Ausspülen des linken Ohres des Betroffenen) zu einer zumindest kurzzeitigen Verbesserung des Neglects führte (Rubens 1985). Eine kurzzeitige Verschiebung des egozentrischen Referenzrahmens ist auch eine Konsequenz des Aufsetzens einer Brille mit Prismengläsern. Rossetti et al. (1998) konnten zeigen, dass nach nur wenigen Zeigebewegungen mit einer Prismenbrille, die eine Verschiebung des visuellen Feldes um 10° bewirkte, verschiedene neglectassoziierte Symptome bei den Patienten verbessert werden konnten. So wurde z. B. durch diese kurze und unaufwendige Intervention die Genauigkeit, mit der die Patienten ihre subjektive Mitte des Körpers angeben konnten, deutlich verbessert. Während nichttherapierte Neglectpatienten bei dieser einfachen Aufgabe nicht in der Lage waren, geradeaus von ihrer Körpermitte weg zu zeigen, sondern eine um mehrere Grad nach rechts verschobene Richtung als „subjektive Mitte" angaben, waren die Patienten nach der Prismenadaptation dazu genauso gut in der Lage wie gesunde Kontrollpersonen.

Auch andere Fähigkeiten der Neglectpatienten konnten durch die Prismenadaptation verbessert werden. Besonders beeindruckend war dabei die Leistungssteigerung im Gainotti-Test, einer Aufgabe, bei der die Patienten ein aus fünf Elementen bestehendes Bild abzeichnen sollten. Wie in Abb. 19.11A dargestellt, konnten die Patienten mit der Prismenbrillenintervention nach dem Absetzen der Prismenbrille schon ein Element mehr aus dieser Abbildung reproduzieren (POST); ungefähr 2 h nach Absetzen der Brille konnten sie zum Teil alle dargestellten visuellen Elemente abzeichnen. Dies gelang den Patienten in der Kontrollbedingung ohne Prismengläser in den getragenen Brillen nicht (Abb. 19.11B). Diese Befunde von Rossetti et al. (1998) konnten in folgenden Untersuchungen bestätigt und um andere positive Konsequenzen der Prismenadaptation für die Symptome der Neglectstörung ergänzt werden. So wirkt sich eine kurzzeitige Prismenadaptation z. B. positiv auf das visuelle Vorstellungsvermögen aus. Es zeigten sich des Weiteren positive Effekte auf sehr alltagsnahe Fertigkeiten wie das Halten der Körperbalance oder das Rollstuhlfahren. Dieser positive Effekt der Prismenadaptation zeigte sich sogar bei Patienten, deren Schlaganfall schon mehr als zehn Jahre zurücklag. Die positiven Konsequenzen hielten bei entsprechenden Trainingsintervallen sogar bis zu fünf Wochen nach Beendigung der Intervention an. Eine Übersicht zu weiteren Befunden ist im Übersichtsartikel von Pisella et al. (2006) zu finden.

Motorisches Lernen in der Medizin

Der technologische Fortschritt, ein kontinuierlich steigender Kostendruck und die zunehmende Komplexität chirurgischer Eingriffe stellen nicht nur neue Anforderungen an die sensomotorische Leistungsfähigkeit von Chirurgen, sondern auch an die Entwicklung von geeigneten Lernumgebungen und Vermittlungsmethoden. Auf die Fragen nach dem Was, Wie, Wann und Wie oft antworten viele Kursprogramme mit Intensivkursen, in denen in kurzer Zeit, meist an einem Tag oder an einem Wochenende, mit hoher Intensität eine spezifische Fertigkeit geübt wird. Eine Möglichkeit zur späteren Wiederholung des Gelernten ist nicht gegeben. Auch wenn am Ende des Kurses die Teilnehmer/innen die Fertigkeit zu beherrschen scheinen, fehlen Erkenntnisse über die Stabilität dieser Übungseffekte und über den Transfer aus der Übungs- in die Anwendungssituation.

Carol-Anne Moulton et al. (2006) von der Universität Toronto untersuchten, ob sich die in Laborexperimenten beobachteten positiven Effekte von verteilter im Vergleich zu massierter Übung auf das Erlernen einer mikrochirurgischen Technik übertragen ließen. Dazu baten sie 38 sich in der Facharztausbildung befindliche Ärzte/innen, an einem mikrochirurgischen Operationskurs teilzunehmen, indem sie sie nach initialen Nahtübungen sogenannte Anastomosen am Gefäßpräparat üben ließen. Die konstant übende Gruppe erhielt vier Übungseinheiten am selben Tag, während die verteilt übende Gruppe dieselben Übungseinheiten über vier Wochen verteilt erhielt. Jede Übungseinheit begann und endete mit einem Testdurchgang, in dem wiederum eine Nahtübung zu absolvieren war. Zusätzlich wurden die Versuchspersonen einen Monat später zu einem Behaltenstest (wieder Nahtübung) und einem Transfertest ins Labor gebeten, in dem sie die Anastomosetechnik unter realen physiologischen Bedingungen an der Aorta einer anästhesierten Ratte anwenden mussten. Abhängige Variablen waren die Zeit, die für einen Durchgang benötigt wurde, die Anzahl der Handbewegungen pro Durchgang sowie Expertenratings der Güte der Bewegung. Im Rattentransfertest kamen noch klinisch-relevante Variablen wie Ausführungsgrad und -qualität sowie das Auftreten von Blutungen hinzu. Es zeigte sich eine Verbesserung beider Gruppen im Übungsverlauf, aber keine signifikanten Unterschiede zwischen der massiert und der verteilt übenden Gruppe. Im Behaltenstest einen Monat später zeigten sich hingegen Vorteile für die verteilt übende Gruppe in den (verblindeten) Expertenratings, der Bewegungszeit und der Anzahl an Teilbewegungen. Für den Rattentransfertest berichteten Moulton et al. (2006) nur von signifikanten Gruppenunterschieden in den Expertenratings. Darüber hinaus schlossen alle Teilnehmer der verteilt übenden Gruppe die Anastomose an der Ratte erfolgreich ab, während drei Teilnehmer in der massiert übenden Gruppe das Blutgefäß im Verlauf der Operation irreparabel beschädigten. Obwohl dies statistisch nicht signifikant war, hielten die Autoren dieses Ergebnis für klinisch äußerst relevant.

Die Studie zeigt, dass verteiltes Üben nicht nur in hochkontrollierten Laborexperimenten, sondern auch beim Üben komplexer sensomotorischer Fertigkeiten mit hohem kognitiven Anteil einen positiven Effekt auf das Lernergebnis hat. Die vorherrschende Praxis von kurzen Intensivkursen sollte reformiert werden, beispielsweise durch Verteilung der Lerninhalte über mehrere zeitlich getrennte Übungseinheiten. Die Ergebnisse der Behaltenstests zeigen langfristig gesehen ein geringer entwickeltes Fertigkeitsniveau am Ende des kurzzeitigen, intensiven Übens und unterstützen die Forderung der Autoren nach der konsequenten Anwendung motorischer Lernprinzipien in der praktischen Vermittlung von feinmotorischen Operationstechniken, die zukünftig im Rahmen des technologischen Fortschritts in ihrer Entwicklung hin zu komplexeren und intransparenteren Transformationen nicht stehen bleiben werden.

▪ Motorisches Lernen in der Mathematik

Dor Abrahamson und seine Kollegen des Embodied Design Research Laboratory an der University of California, Berkeley, befassen sich seit einigen Jahren mit der Frage, wie aus *Tun* eigentlich *Wissen* oder, anders ausgedrückt, inwiefern das Erlernen von abstrakten Konzepten durch sensomotorisches Problemlösen unterstützt werden kann. Ziel ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich der Mathematikdidaktik ist es, interaktive Lernumwelten zu schaffen, in denen naive Lernende sensomotorische Erfahrungen in formale mathematische Inhalte überführen können, wobei weniger das Endprodukt der Interaktion mit der Umwelt, sondern die Art und Weise, mit der interagiert wird, von Bedeutung ist.

Durch den Einsatz moderner Technologien werden unterstützende Handlungsfelder (*fields of promoted action*) geschaffen, in denen existierende motorische Schemata aktiviert und mit dem semiotischen System der Mathematik verknüpft werden. Ein besonders schönes Beispiel für diese Vorgehensweise ist der Mathematical Imagery Trainer for Proportion (MIT-P), mit dem Abrahamson und Kollegen Schülerinnen und Schülern die Verhältnisrechnung zu vermitteln versuchen. Beim Rechnen mit rationalen Zahlen werden proportionale Beziehungen von Lernenden häufig fälschlicherweise als additive Beziehung verstanden, sodass $2/3 = (2+2)/(3+2) = 4/5$ angesehen wird. Mit dem MIT-P wollen Abrahamson und Trninic (2015) Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geben, Proportionalität sensomotorisch zu erfahren, indem sie eine bimanuelle Koordinationsaufgabe zu meistern lernen. Dazu werden die Lernenden vor einen Computerbildschirm gesetzt und der vertikale Abstand der Hände von der Tischplatte gemessen. Entspricht nun dieser Abstand (z. B. 10 cm linke Hand und 20 cm rechte Hand) einem vorher festgelegten Verhältnis (z. B. 1:2), so leuchtet der Bildschirm grün (◘ Abb. 19.12A). Die Lernenden werden nun zunächst instruiert, den Bildschirm „grün zu machen“ (◘ Abb. 19.12A). Sobald die Lernenden implizit das richtige Verhältnis aus Höhe der rechten und linken Hand gefunden haben, werden sie vom Versuchsleiter ermuntert, den Bewegungsraum zu explorieren und „nach anderen grünen Bereichen zu suchen“. Dazu müssen sie, was sie nicht wissen, das Verhältnis der Höhe der rechten und linken Hand konstant halten (z. B. 10 cm / 20 cm, 12 cm / 24 cm, 16 cm / 32 cm). Halten sie beispielsweise den Abstand der beiden Hände konstant (z. B. 10 cm / 20 cm, 12 cm / 22 cm, 16 cm / 26 cm), leuchtet der Bildschirm rot (◘ Abb. 19.12B). Angeleitet durch den Versuchsleiter sollen die Lernenden in der Interaktion mit dem MIT-P die zugrunde liegende Transformationsregel explorieren, bis sie sie verbal beschreiben können.

Sobald sie diese bimanuelle Koordinationsaufgabe gelernt haben, wird die visuelle Information auf dem Computermonitor sukzessive angereichert. Zuerst erscheinen zwei Cursor, die die Bewegungen der Hände auf dem Monitor abbilden, dann ein Gitternetz, dass die Lernenden bei der Planung, Durchführung und Interpretation ihrer Bewegungen unterstützen soll (◘ Abb. 19.12B). In einem finalen Schritt werden Zahlen entlang der vertikalen Achse der Gitternetzes aufgetragen. (Ein noch komplexeres Interfacedsign des MIT-P ist in ◘ Abb. 19.12C zu sehen.) Dieser sensomotorische Lernprozess, so Abrahamson und Trninic (2015), bildet die Basis für die Entwicklung abstrakter Konzepte, die die Lernenden in ihrer Interaktion mit der Umwelt selbst entdecken. Durch die Lösung eines motorischen Problems in einer entsprechend ausgestalteten Umgebung konstruieren die Lernenden neue Bedeutungen durch bewusste Reflektion der gelernten sensomotorischen Transformationen.

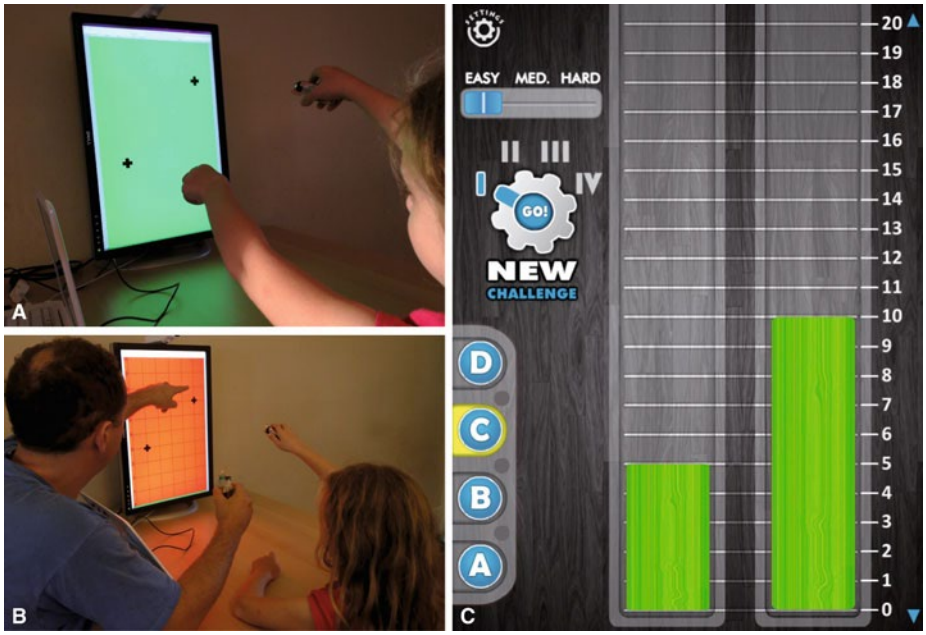


Abb. 19.12 Verschiedene Stufen des MIT-P: vom Erlernen einer sensomotorischen Transformation zum Verstehen von Proportionalität. (Nachdruck mit Genehmigung von Dor Abrahamson)

19.6 Ausblick: Tear down this Ivory Tower, Nimrod!

Am 6. Mai 1924 wandte sich der britische Neurophysiologe Charles Sherrington in seiner Linacre Lecture am St. John's College in Cambridge mit folgenden Worten an seine Zuhörer:

» To move things is all mankind can do and for such the sole executant is muscle, whether in whispering a syllable or in felling a forest.

Ähnlich argumentiert der Evolutionsbiologe Lewis Wolpert in seinem 2003 erschienenen Artikel über den Ursprung moderner Technologie im menschlichen Glauben an Kausalität:

» Belief is a property of the brain, but what is the ultimate function of the brain itself? Just one, to control movement of the body, so this must be at the core of any attempt to understand the origins of causal belief. […] Thus I propose that consciousness has only one ultimate function and that is to control bodily movements (Wolpert 2003).

Lewis Wolperts Sohn Daniel, Professor am Department of Engineering an der Universität von Cambridge, führt diesen Gedanken in seinem TED-Talk mit dem Titel „The real reasons for brains" sehr anschaulich aus und sei jedem interessierten Studierenden wärmstens empfohlen: Es sind faszinierende und unterhaltsame 20 min, die sich lohnen (► www.ted.com/talks/daniel_wolpert_the_real_reason_for_brains).

Angesichts der zentralen Bedeutung von Bewegung für die erfolgreiche Interaktion von Individuum und Umwelt ist es wenig verwunderlich, dass Bewegungslernen in vielen Wissenschaftsdisziplinen Gegenstand theoretischer und empirischer Forschung ist. Die im vorliegenden Kapitel geschehene Abstraktion über all diese unterschiedlichen Forschungstraditionen in Psychologie, Neurowissenschaft, Ingenieurswissenschaft, Physik, Biologie und Sportwissenschaft hinweg erscheint uns zwar didaktisch notwendig, ignoriert aber eine der zentralen Herausforderungen der zukünftigen wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit sensomotorischem Lernen: die Integration der unterschiedlichen Forschungstraditionen in einer gemeinsamen Theorie des Bewegungslernens oder zumindest in eine disziplinübergreifende Konzeption von Forschungsgegenständen, -zielen und -methoden. Auch wenn methodische Vielfalt eine der Stärken des interdisziplinären Austauschs ist, erfordert *produktive Interdisziplinarität* das Sprechen einer gemeinsamen Sprache. Dies sehen wir als eine zentrale Herausforderung für die Zukunft und würden dies gern am Beispiel von kognitiven Strategien im Rahmen sensomotorischer Adaptation erläutern.

Bewusste kognitive Strategien auf Basis expliziten Wissens einer zu erlernenden sensomotorischen Transformation sind in der Psychologie seit den ersten Studien zu Prismenadaptation (Stratton 1897) bekannt. Während man kognitive Strategien bis in die 1980er Jahre eher als Störgröße begriff, deren Einfluss auf „reine" Adaptationsprozesse es zu minimieren galt, begann man sich in den 1990er Jahren auch mit kognitiven Strategien als sensomotorischem Lernprozess zu beschäftigen. In den letzten zehn Jahren erschienen dann immer mehr Forschungsarbeiten, die sich mit der systematischen Untersuchung der Wechselwirkung zwischen explizitem und implizitem Transformationslernen beschäftigten (Hegele und Heuer 2010a, b; Heuer und Hegele 2008a, b; Mazzoni und Krakauer 2006; Sülzenbrück und Heuer 2009b; Taylor und Ivry 2012). Nichtsdestotrotz finden kognitive Strategien in den eher ingenieurswissenschaftlich geprägten Laboren, die sich mit sensomotorischem Lernen beschäftigen, nur wenig Beachtung. Ganz im Gegenteil scheint es sogar eine gewisse Reaktanz gegenüber der Konzeption von Versuchspersonen als Wesen, die Hypothesen über Versuchsanordnungen bilden und kognitive Strategien bei der Bewältigung einer Aufgabe anwenden, zu geben. Der teilweise komplexen mathematischen Modellierung von menschlichem Verhalten in Ingenieurs- und Neurowissenschaften steht ein extrem simples Verständnis des eigentlichen Men-

schen gegenüber, dem man als Teilnehmer an einem Experiment zu motorischem Lernen lediglich die Fähigkeit zur Minimierung von Bewegungsfehlern über die Zeit zuweist. Mentale Zustände werden selten explizit in diesen Untersuchungen als relevante Einflussfaktoren betrachtet.

Warum betonen wir das im Abschluss eines Lehrbuchkapitels der Allgemeinen Psychologie? Weil produktive Interdisziplinarität eben nicht nur eine Aufgabe für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Elfenbeinturm ist, sondern auch für jede Studentin und jeden Studenten der Psychologie. Ziel muss es sein, den Austausch mit den Kommilitonen aus den anderen Wissenschaften zu suchen, damit Interdisziplinarität kein von oben verordnetes Gerüst von mehr oder weniger sinnvoll zusammengestellten Graduiertenkollegs, sondern eine Basisbewegung der gesamten Wissenschaftsgemeinde mit dem Ziel eines interdisziplinären Dialogs ohne Sprachverwirrung wird.

19.7 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Motorisches Lernen kann auf unterschiedlichen Zeitskalen stattfinden und entsprechend in verschiedene Bereich unterteilt werden: sensomotorische Adaptation (kurzfristig), Fertigkeitserwerb (langfristig) und evolutionäres motorisches Lernen (sehr langfristig).
- Im Zentrum motorischen Lernens steht das Beherrschen neuer sensomotorischer Transformationen, die Eigenbewegung in Effekte in der Umwelt überführen. Die Invertierung dieser Transformationen ermöglicht die Planung zielgerichteter Bewegung auf Basis eines intendierten Handlungseffekts.
- Sensomotorische Adaptation umfasst die Anpassung und das Erlernen von Veränderungen in der Beziehung zwischen sensorischem Input und motorischem Output. Populäre Paradigmen zur experimentellen Untersuchung des Erlernens sensomotorischer Transformationen sind Prismenadaptation, Anpassung an visuomotorische Rotationen, an Verstärkungsänderungen sowie an Kraftfelder.
- Fertigkeitserwerb bezieht sich auf den länger andauernden Erwerb eines neuen Bewegungsablaufs und ist gekennzeichnet durch eine charakteristische Abfolge von Lernphasen. Verschiedene Phasenmodelle betonen unterschiedliche Aspekte der übungsabhängigen Veränderung der Bewegung im Lernverlauf, beispielsweise die Aufmerksamkeitsanforderungen einer Bewegung (Fitts und Posner) oder die Koordination der an der Bewegung beteiligten Elemente (Bernstein).
- Motorisches Lernen kann durch die Anpassung von Feedbackregelung, die Anpassung von Feedforwardsteuerung und/oder die Anpassung kognitiver Strategien realisiert werden. Die Gewichtung dieser parallel ablaufenden Lernprozesse ist abhängig von der Art der zu erlernenden Transformation.
- Die Optimierung von Feedbackregelung kann durch eine übungsbedingte Verbesserung der Repräsentation des Soll-Wertes der Bewegung (Führungsgröße), der Wahrnehmung des Ist-Wertes der Eigenbewegung (Regelgröße) und/oder der Auswahl und Koordination der an der Bewegung beteiligten Einzelelemente (Stellgröße) geschehen.
- Die Optimierung von Feedforwardsteuerung kann durch modellbasiertes (Entwicklung eines inneren Modells der Transformation) und modellfreies (gebrauchsabhängige Plastizität, operantes Konditionieren) motorisches Lernen geschehen.
- Kognitive Strategien beziehen sich auf die bewusste und absichtsvolle Bewegungsausführung auf Basis von explizitem Wissen über die der Bewegungsfertigkeit zugrunde liegenden sensomotorischen Transformationen. Dies kann sich sowohl auf die Auswahl eines spezifischen Handlungszieles als auch auf die Parametrisierung einer Bewegung beziehen.
- Einflussreiche Theorien zur Erklärung des Fertigkeitserwerbs sind die Regelungstheorie von Adams (1971), die Schematheorie von Schmidt (1975) sowie die Control-Based Learning Theory von Willingham (1998).
- Lernen benötigt Zeit, und Zeit ist häufig eine begrenzte Ressource. Durch die Gestaltung von Übungsbedingungen und die Verfügbarkeit von bewegungsbezogener Rückmeldung über Verlauf und Ergebnis einer Bewegung lässt sich der Lernertrag nach einen bestimmten Übungszeitraum optimieren.

Schlüsselbegriffe

Automatisierung (*automatization*) Abnahme der Aufmerksamkeitsanforderungen der Bewegungsausführung im Übungsverlauf.

Ergebnisbezogenes Feedback (*knowledge of results*) Zusätzliche von außen gegebene Information über das Bewegungsergebnis bzw. das Erreichen oder Nichterreichen eines angestrebten Bewegungszieles.

Freiheitsgrade (*degrees of Freedom*) Anzahl unabhängiger Elemente einer Bewegung, die in deren Verlauf kontrolliert werden müssen.

Führungsgröße (*reference variable /set-point*) Vorlage in einem Regelkreis, gegen die eingehende sensorische Informationen über den Bewegungsablauf abgeglichen werden. Wird auch als Soll-Wert bezeichnet und bildet gemeinsam mit der Regelgröße die Eingangsgröße in die Steuerzentrale.

Gebrauchsabhängige Plastizität (*use-dependent plasticity*) Eine durch häufige Wiederholung einer bestimmten Bewegung induzierte Tendenz zur Beibehaltung der vormals spezifizierten Bewegungsparameter bei der Ausführung der aktuellen Bewegung.

Inverses Modell (*inverse model*) Inneres Modell des Muskel-Skelett-Systems, das auf Basis sensorischer Informationen über den gegenwärtigen Zustand des Systems und des gewünschten Zielzustands motorische Kommandos generiert, die den Ist-Zustand in den Zielzustand überführen.

Kontextinterferenz (*contextual interference*) Phänomen der Übungsorganisation, nach dem die Übungsleistung und der Lernertrags durch den Kontext, in dem eine Bewegung geübt wird, beeinflusst werden. Bei geblockter Übung (niedrige Kontextinterferenz) wird eine Bewegung im Kontext identischer Bewegungen geübt, während bei randomisierter Übung (hohe Kontextinterferenz) durch ständige Aufgabenwechsel die Bewegung im Kontext unterschiedlicher Bewegungen geübt wird.

Kraftfeldadaptation (*force-field adaptation*) Experimentelles Paradigma, bei dem die normale Bewegungsausführung durch äußere Kräfte gestört wird, beispielsweise indem ein Roboterarm die Handbewegung der Versuchsperson in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit in eine bestimmte Richtung auslenkt.

(Senso-)Motorische Transformation (*sensorimotor transformation*) Überführung von einem proximaleren zu einem distaleren Signal im Rahmen der Bewegungssteuerung. Je nach Eingangs- und Ausgangsgröße lassen sich unterschiedliche Transformationsarten unterscheiden: dynamische Transformation (Kraft → Bewegung), kinematische Transformation (Bewegung → Bewegung), Körpertransformation (Muskelkraft/Gelenkbewegung → Endeffektorbewegung), Werkzeugtransformation (Körperbewegung → Werkzeugbewegung).

Nacheffekt (*aftereffect*) Nach dem Abschalten einer neuen sensomotorischen Transformation auftretende Fehler in Bewegungsweite, -richtung oder Trajektorie, die auf die pezeptuell-motorische Adaptation an die vorher ausgeübte Transformation hinweist.

Prismenadaptation (*prism adaptation*) Experimentelles Paradigma, bei dem durch das Tragen einer Brille mit Prismengläsern eine seitliche Verschiebung des visuellen Feldes relativ zur medialen sagittalen Ebene des Kopfes entsteht, die durch perzeptuell-motorische Integrationsprozesse angepasst werden kann.

Regelgröße (*controlled variable*) Die in einem Regelkreis durch Sensoren gemessenen Informationen über den momentanen Zustand des Regelsystems, der an die Führungsgröße angeglichen werden soll. Wird auch als Ist-Wert bezeichnet und bildet gemeinsam mit der Führungsgröße die Eingangsgröße in die Steuerzentrale.

Stellgröße (*manipulated variable*) Die Ausgangsgröße der Steuerzentrale in einem Regelkreis, also beispielsweise die motorischen Kommandos, die einer Diskrepanz zwischen Führungs- und Regelgröße entgegenwirken.

Synergien (*synergies*) Zusammenfassung mehrerer an der Bewegung beteiligten Einzelelemente durch aufgabenspezifische Kovariation.

Übungsvariabilität (*practice variability*) Phänomen der inhaltlichen Übungsgestaltung, dem zufolge variables Üben mehrerer Bewegungsvariation innerhalb einer Übungseinheit/-periode zu einem besseren Lernertrag führt als das konstante Üben einer einzelnen Bewegungsvariation.

Übungsverteilung (*practice distribution*) Phänomen der zeitlichen Übungsgestaltung, dem zufolge verteiltes Üben über einen längeren Zeitraum mit größeren Pausen zu einem besseren Lernertrag führt als das massierte Üben ohne bzw. mit sehr geringen Pausen in einem kürzeren Übungszeitraum.

Verlaufsbezogenes Feedback (*knowledge of performance*) Zusätzliche von außen gegebene Information über die Ausführungsmerkmale einer Bewegung, die zu einem bestimmten Ergebnis geführt hat.

Verstärkungsänderung (*gain change*) Experimentelles Paradigma, mit dem das Erlernen einer neuen Transformation der Bewegungsrichtung der Bewegungsweite bezeichnet wird.

Visuomotorische Rotation (*visuomotor rotation*) Experimentelles Paradigma, mit dem das Erlernen einer neuen Transformation der Bewegungsrichtung bezeichnet wird.

Vorwärtsmodell (*forward model*) Inneres Modell des Muskel-Skelett-Systems, das auf Basis sensorischer Informationen über den gegenwärtigen Zustand des Systems und der motorischen Kommandos Vorhersagen über zukünftige sensorische Signale generiert.

Wiedererkennungsschema (*recognition schema*) Abstrakte Repräsentation einer regelhaften Beziehung zwischen früher erfahrenen sensorischen Konsequenzen einer Bewegung und den mit diesen sensorischen Signalen einhergehenden Bewegungsergebnissen und entsprechend Ausgangsbedingungen.

Wiedergabeschema (*recall schema*) Abstrakte Repräsentation einer regelhaften Beziehung zwischen früher erzielten Bewegungsergebnissen und den entsprechenden Bewegungsparametern und Ausgangsbedingungen.

Weiterführende Literatur

Cziko, G. A. (2000). *The Things We Do. Using the Lessons of Bernard and Darwin to Understand the What, How, and Why of Our Behavior*. Cambridge, MA.: MIT Press. (Sehr lesenswerte Erweiterung der allgemein- und kognitionspsychologischen Standardliteratur um eine biologisch-evolutionäre Perspektive auf menschliches und tierisches Verhalten, die in diesem Kapitel nur angerissen werden konnte; ▶ http://faculty.education.illinois.edu/g-cziko/twd/pdf/)

Haith, A. M. & Krakauer, J. W. (2014). Theoretical models of motor control and motor learning. In W. Gollhofer, W. Taube & J. N. Nielsen (Hrsg.), *Routledge Handbook of Motor Control and Motor Learning*. Abingdon: Routledge. (Einführender Überblick der computationalen Aspekte von Bewegungssteuerung und sensomotorischem Lernen; ▶ http://blam-lab.org/wp-content/uploads/2013/01/HaithKrakauer_TheoreticalModels-1.pdf)

Hardwick, R. M., Rottschy, C., Miall, R. C. & Eickhoff, S. B. (2012). A quantitative meta-analysis and review of motor

learning in the human brain. *NeuroImage*, *67*, 283–297. (Metaanalyse aus 70 fMRT-Studien, die sich mit den neuronalen Korrelaten des sensomotorischen Lernens von Handbewegungen befasst haben.)

Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer. (Kompakter Überblick über die psychologische Forschung im Bereich des sensomotorischen Lernens in den 1950er bis 1970er Jahren.)

Schmidt, R. A. & Lee, T. (2011). *Motor Control and Learning* (5. Auflage). Champaign: Human Kinetics. (Ausgezeichnetes Lehrbuch, das den gegenwärtigen Kenntnisstand in der eher psychologisch orientierten Bewegungswissenschaft didaktisch gut aufbereitet darstellt, inklusive einer ausführlicheren Darstellung des Fertigkeitserwerbs. Wird kontinuierlich durch neue Ausgaben aktualisiert.)

Shadmehr, R. (2005). *The Computational Neurobiology of Reaching and Pointing: a Foundation for Motor Learning*. Cambridge: MIT Press. (Ebenfalls ein ausgezeichnetes Lehrbuch, das sich aus der Perspektive der computationalen Neurowissenschaft auf das Erlernen von Zeige- und Greifbewegungen konzentriert; mathematische und physiologische Grundlagen sind als Appendix enthalten. Leider nur eine Auflage.)

Summers, J. J. & Anson, G. (2009). Current status of the motor program: revisited. *Human Movement Science*, *28*, 566–577. (Überblicksartikel zur Entwicklung der motorischen Programmtheorien in Experimenteller Psychologie, Bewegungswissenschaft und Neurophysiologie.)

Welch, R. B. (1978). *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. New York: Academic Press. (Sehr lesenswerte Zusammenfassung der frühen Forschung zu sensomotorischer Adaptation an unterschiedlichste optische Verzerrungen, inklusive eines eigenen Modells, in dem Habituation und Adaptation gegenübergestellt werden.)

Webseiten

- http://www.hp-research.com – Homepage der Firma Human Performance Research des kürzlich verstorbenen Prof. Dr. Richard Schmidt mit einer umfangreichen Sammlung seiner Artikel zu Themen wie Feedback, Übungsvariabilität, Schematheorie, generalisierten motorischen Programmen etc.
- http://www.ted.com/talks/daniel_wolpert_the_real_reason_for_brains – Link zum TED-Talk von Prof. Dr. Daniel Wolpert (Cambridge) „The real reasons for brains".
- http://www.shadmehrlab.org/ – Homepage des Laboratory for Computational Motor Control von Prof. Dr. Reza Shadmehr mit den üblichen Inhalten (Mitarbeiter, Forschungsprojekte), aber auch einer Reihe von Online-Vorlesungen zu sensomotorischer Kontrolle und Lernen, einem Journal Club mit hochaktuellen Artikeln und einem lesenswerten Blog von Reza Shadmehr.

Literatur

Abeele, S., & Bock, O. (2001). Sensorimotor adaptation to rotated visual input: different mechanisms for small versus large rotations. *Experimental Brain Research*, *140*, 407–410.

Abeele, S., & Bock, O. (2003). Transfer of sensorimotor adaptation between different movement categories. *Experimental Brain Research*, *148*, 128–132.

Abrahamson, D., & Trninic, D. (2015). Bringing forth mathematical concepts: signifying sensorimotor enactment in fields of promoted action. *ZDM – International Journal on Mathematics Education*, *47*, 295–306.

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *3*, 111–150.

Adams, J. A. (1976). Issues for a closed-loop theory of motor learning. In G. E. Stelmach (Hrsg.), *Motor Control: Issues and Trends* (S. 87–107). New York: Academic Press.

Adams, J. A., Goertz, E. T., & Marshall, P. H. (1972). Response feedback and motor learning. *Journal of Experimental Psychology*, *92*, 391–397.

Agostini, T., Righi, G., Galmonte, A., & Bruno, P. (2004). The relevance of auditory information on optimizing hammer thrower performance. In P. B. Pascolo (Hrsg.), *Biomechanics and Sports* Proceedings of the XI Winter Universidads. (S. 67–74). New York: Springer.

Ammons, R. B. (1950). Acquisition of motor skill: III. Effects of initially distributed practice on rotary pursuit performance. *Journal of Experimental Psychology*, *40*, 777–787.

Annese, J., Schenker-Ahmed, N. M., Bartsch, H., Maechler, P., Sheh, C., et al. (2014). Postmortem examination of patient H.M.'s brain based on histological sectioning and digital 3D reconstruction. *Nature Communications*, *5*, 3122.

Asaka, T., Wang, Y., Fukushima, J., & Latash, M. L. (2008). Learning effects on muscle modes and multi-mode synergies. *Experimental Brain Research*, *184*, 323–338.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Hrsg.), *Recent advantages in learning and motivation* (S. 47–89). New York: Academic press.

Barnett, M. L., Ross, D., Schmidt, R. A., & Todd, B. (1973). Motor skills learning and the specificity of training principle. *Research Quarterly*, *44*, 440–447.

Bastian, A. J., Zackowski, K. M., & Thach, W. T. (2000). Cerebellar ataxia: torque deficiency or torque mismatch between joints? *Journal of Neurophysiology*, *83*, 3019–3030.

Battig, W. F. (1966). Facilitation and interference. In E. A. Bilodeau (Hrsg.), *Acquisition of Skill*. New York: Academic Press.

Battig, W. F. (1979). The flexibility of human memory. In L. S. Cermak, & F. I. M. Craik (Hrsg.), *Levels of processing in Human Memory* (S. 23–44). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Beach, F. A. (1955). The descent of instinct. *Psychological Review*, *62*, 401–410.

Bedford, F. L. (1994). Of computer mice and men. *Cahier de Psychologie Cognitive*, *13*, 405–426.

Beilock, S. L. (2010). *Choke: What the secrets of the brain reveal about getting it right when you have to*. New York: Simon and Schuster.

Beilock, S. L., & Carr, T. H. (2001). On the fragility of skilled performance: What governs choking under pressure? *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*, 701–725.

Beilock, S. L., & Gray, R. (2007). Why do athletes „choke" under pressure? In G. Tenenbaum, & R. C. Eklund (Hrsg.), *Handbook of sport psychology* (3. Aufl. S. 425–444). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Beilock, S. L., Carr, T. H., MacMahon, C., & Starkes, J. L. (2002). When paying attention becomes counterproductive: Impact of divided versus skill-focused attention on novice and experienced performance of sensorimotor skills. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *8*, 6–16.

Bernier, P. M., Chua, R., & Franks, I. M. (2005). Is proprioception calibrated during visually guided movements? *Experimental Brain Research*, *167*, 292–296.

Bernstein, N. A. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press.

Bilodeau, E. A. (1966). *Acquisition of Skill*. New York: Academic Press.

Bizzi, E., Tresch, M. C., Saltiel, P., & d'Avella, A. (2000). New perspectives on spinal motor systems. *Nature Reviews Neuroscience*, *1*, 101–108.

Bock, O. (1990). Load compensation in human goal-directed arm movements. *Behavioural Brain Research*, *41*, 167–177.

Bock, O. (1992). Adaptation of aimed arm movements to sensory-motor discordance: Evidence for direction-independent gain control. *Behavioral Brain Research*, *51*, 41–50.

Bock, O., & Burghoff, M. (1997). Visuo-motor adaptation: Evidence for a distributed amplitude control system. *Behavioral Brain Research*, *89*, 267–273.

Bond, K. M., & Taylor, J. A. (2015). Flexible explicit but rigid implicit learning in a visuomotor adaptation task. *Journal of neurophysiology*, *113*(10), 3836–3849.

Boyd, L., & Winstein, C. J. (2003). Impact of explicit information on implicit motor-sequence learning following middle cerebral artery stroke. *Physical Therapy*, *83*, 976–989.

Boyd, L., & Winstein, C. J. (2004). Providing explicit information disrupts implicit motor learning after basal ganglia stroke. *Learning & Memory*, *11*, 388–396.

Brashers-Krug, T., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1996). Consolidation in human motor memory. *Nature*, *382*, 252–255.

Broderick, M. P., & Newell, K. A. (1999). Coordination patterns in ball bouncing as a function of skill. *Journal of Motor Behavior*, *31*, 165–188.

Brown, L. E., Wilson, E. T., Goodale, M. A., & Gribble, P. L. (2007). Motor force field learning influences visual processing of target motion. *Journal of Neuroscience*, *27*, 9975–9983.

Buch, E. R., Young, S., & Contreras-Vidal, J. L. (2003). Visuomotor adaptation in normal aging. *Learning & Memory*, *10*, 55–63.

Caithness, G., Osu, R., Bays, P., Chase, H., Klassen, J., Kawato, M., Wolpert, D., & Flanagan, J. R. (2004). Failure to consolidate the consolidation theory of learning for sensorimotor adaptation tasks. *Journal of Neuroscience*, *24*, 8662–8671.

Carey, B. (2008). H.M., an unforgettable amnesiac, dies at 82. New York Times. http://www.nytimes.com/2008/12/05/us/05hm.html. Zugegriffen: 12. April 2016

Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*, 69–74.

Cepeda, N. J., Vul, E., Rohrer, D., Wixted, J. T., & Pashler, H. (2006). Spacing effects in learning. A temporal ridgeline of optimal retention. *Psychological Science*, *19*, 1095–1102.

Cepeda, N. J., Coburn, N., Rohrer, D., Wixted, J. T., Mozer, M. C., & Pashler, H. (2009). Optimizing distributed practice. Theoretical analysis and practical implications. *Experimental Psychology*, *56*, 236–246.

Classen, J., Liepert, J., Wise, S. P., Hallett, M., & Cohen, L. G. (1998). Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *Journal of Neurophysiology*, *79*, 1117–1123.

Conditt, M. A., Gandolfo, F., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1997). The motor system does not learn the dynamics of the arm by rote memorization of past experiences. *Journal of Neurophysiology*, *78*, 554–560.

Cruse, H., Dean, J., Heuer, H., & Schmidt, R. A. (1990). Utilisation of sensory information for motor control. In O. Neumann (Hrsg.), *Relationships between Perception and Action*. Berlin: Springer.

Cuddy, L. J., & Jacoby, L. L. (1982). When forgetting helps memory. An analysis of repetition effects. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *21*, 451–467.

Cunningham, H. A. (1989). Aiming error under transformed spatial mappings suggests a structure for visual-motor maps. Journal of Experimental Psychology. *Human Perception and Performance*, *15*, 493–506.

Curran, T., & Keele, S. W. (1993). Attentional and nonattentional forms of sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*, 189–202.

Cziko, G. A. (2000). *The Things We Do. Using the Lessons of Bernard and Darwin to Understand the What, How, and Why of Our Behavior*. Cambridge, MA.: MIT Press.

Darainy, M., Vahdat, S., & Ostry, D. J. (2013). Perceptual learning in sensorimotor adaptation. *Journal of Neurophysiology*, *110*, 2152–2162.

Debicki, D. B., Watts, S., Gribble, P. L., & Hore, J. (2010). A novel shoulder-elbow mechanism for increasing speed in a multijoint arm movement. *Experimental Brain Research*, *203*, 601–613.

Dempster, F. N. (1989). Spacing effects and their implications for theory and practice. *Educational Psychology Review*, *1*, 309–330.

Dewar, R. (1971). Adaptation to displaced vision: variations on the 'prismatic shaping' technique. *Perception and Psychophysics*, *9*, 155–157.

Diedrichsen, J., White, O., Newman, D., & Lally, N. (2010). Use-dependent and error-based learning of motor behaviors. *Journal of Neuroscience*, *30*, 5159–5166.

Domkin, D., Laczko, J., Jaric, S., Johansson, H., & Latash, M. L. (2002). Structure of joint variability in bimanual pointing tasks. *Experimental Brain Research*, *143*, 11–23.

Donovan, J. J., & Radosevich, D. J. (1999). A meta-analytic review of the distribution of practice effect: Now you see it, now you don't. *Journal of Applied Psychology*, *84*, 795–805.

Doyon, J., Owen, A. M., Petrides, M., Sziklas, V., & Evans, A. C. (1996). Functional anatomy of visuomotor skill learning in human subjects examined with positron emission tomography. *European Journal of Neuroscience*, *8*, 637–648.

Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot.

Ericsson, Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological Review*, *100*, 363–406.

Estes, W. K. (1955). Statistical theory of spontaneous recovery and regression. *Psychological Review*, *62*, 145–154.

Fernández-Ruiz, J., Hall, C., Vergara, P., & Diaz, R. (2000). Prism adaptation on normal aging: Slower adaptation rate and larger aftereffects. *Cognitive Brain Research*, *9*, 223–226.

Fitts, P. M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A. W. Melton (Hrsg.), *Categories of Human Learning* (S. 243–285). New York: Academic Press.

Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human Performance*. Belmont, CA: Brooks/Cole.

Frensch, P. A., Buchner, A., & Lin, J. (1994). Implicit learning of unique and ambiguous serial transitions in the presence and absence of a distractor task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*, 567–584.

Gandolfo, F., Mussa-Ivaldi, F. A., & Bizzi, E. (1996). Motor learning by field approximation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(9), .

Gelfand, I. M., & Tsetlin, M. L. (1966). Mathematical modeling of mechanisms of the central nervous system. In I. M. Gelfand, V. S. Gurfinkel, & S. V. Fomin (Hrsg.), *Models of the Structural-Functional Organization of Biological Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.

Gentile, A. M. (1972). A working model of skill acquisition with application to teaching. *Quest*, *17*, 3–23.

Gerbier, E. & Toppino, T. C. (im Druck). The effect of distributed practice: Neuroscience, cognition, and education. *Trends in Neuroscience and Education*.

Gesell, A. (1929). Maturation and infant behavior pattern. *Psychological Review*, *36*, 307–319.

Ghez, C., Krakauer, J. W., Sainburg, R. L., & Ghilardi, M. F. (2000). Spatial representations and internal models of limb dynamics in motor learning. *The New Cognitive Neurosciences*, *2*, 501–514.

Glenberg, A. M. (1976). Monotonic and nonmonotonic lag effects in paired-associate and recognition memory paradigms. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *15*, 1–15.

Glenberg, A. M. (1979). Component-levels theory of the effects of spacing of repetitions on recall and recognition. *Memory & Cognition*, *7*, 95–112.

Gordon, J., Ghilardi, M. F., Cooper, S. E., & Ghez, C. (1994). Accuracy of planar reaching movements. *Experimental Brain Research*, *99*, 112–130.

Grafton, S. T., Hazeltine, E., & Ivry, R. (1995). Localization of independent cortical systems in human motor learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *7*, 497–510.

Gray, R. (2004). Attending to the execution of a complex sensorimotor skill: expertise differences, choking, and slumps. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *10*, 42–54.

Gribble, P. L., & Ostry, D. J. (1998). Independent coactivation of shoulder and elbow muscles. *Experimental Brain Research*, *123*, 355–360.

Gribble, P. L., Mullin, L. I., Cothros, N., & Mattar, A. (2003). Role of cocontraction in arm movement accuracy. *Journal of Neurophysiology*, *89*, 2396–2405.

Halsband, U., & Passingharn, R. E. (1982). The role of premotor and parietal cortex in the direction of action. *Brain Research*, *240*, 368–372.

Hambrick, D. Z., Altman, E. M., Oswald, F. L., Meinz, E. J., Gobet, F., & Campitelli, G. (2014). Deliberate practice: Is that all it takes to become an expert? *Intelligence*, *45*, 34–45.

Hardwick, R. M., Rottschy, C., Miall, R. C., & Eickhoff, S. B. (2012). A quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain. *NeuroImage*, *67*, 283–297.

Haruno, M., Wolpert, D. M., & Kawato, M. (2001). MOSAIC model for sensorimotor learning and control. *Neural Computation*, *13*, 2201–2220.

Head, H. (1926). *Aphasia and Kindred Disorders of Speech*. Cambridge, UK: University Press.

Hegele, M., & Heuer, H. (2010a). Adaptation to a direction-dependent visuomotor gain in the young and elderly. *Psychological Research*, *74*, 21–34.

Hegele, M., & Heuer, H. (2010b). Implicit and explicit components of dual adaptation to visuomotor rotations. *Consciousness & Cognition*, *19*, 906–917.

Hegele, M., & Heuer, H. (2013). Age-related variations of visuomotor adaptation result from both the acquisition and the application of explicit knowledge. *Psychology and aging*, *28*(2), 333.

Helmholtz, H. von (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Voss.

Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer.

Heuer, H. (2006). Arbeitsbewegungen und motorische Fertigkeiten. In B. Zimolong, & U. Konradt (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie* (S. 71–103). Göttingen: Hogrefe.

Heuer, H., & Hegele, M. (2008a). Adaptation to visuo-motor rotations in younger and older adults. *Psychology & Aging*, *23*, 190–202.

Heuer, H., & Hegele, M. (2008b). Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice. *Experimental Brain Research*, *185*, 101–110.

Heuer, H., & Hegele, M. (2010). The effects of mechanical transparency on adjustment to a complex visuomotor transformation at early and late working age. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *16*, 399–412.

Heuer, H., & Hegele, M. (2011). Generalization of implicit and explicit adjustments to visuo-motor rotations across the workspace in younger and older adults. *Journal of Neurophysiology*, *106*, 2078–2085.

Heuer, H., & Jäncke, L. (2005). Psychomotorik. In H. Spada (Hrsg.), *Lehrbuch Allgemeine Psychologie* (S. 553–614). Bern: Hans Huber.

Heuer, H., & Schmidtke, V. (1996). Secondary-task effects on sequence learning. *Psychological Research*, *59*, 119–133.

Heuer, H., Hegele, M., & Sülzenbrück, S. (2011). Implicit and explicit adjustments to extrinsic visuo-motor transformations and their age-related changes. *Human Movement Science*, *30*, 916–930.

Heuer, H., Klimmer, F., Luttmann, A., & Bolbach, U. (2012). Specificity of motor learning in simulator training of endoscopic-surgery skills. *Ergonomics*, *55*, 1157–1165.

Hinder, M. R., Tresilian, J. R., Riek, S., & Carson, R. G. (2008). The contribution of visual feedback to visuomotor adaptation: How much and when? *Brain Research*, *1197*, 123–134.

Hinder, M. R., Riek, S., Tresilian, J. R., Rugy, A. de, & Carson, R. G. (2010). Real-time error detection but not error correction drives automatic visuomotor adaptation. *Experimental Brain Research*, *201*, 191–207.

Hintzman, D. L., Summers, J. J., & Block, R. A. (1975). Spacing judgments as an index of study-phase retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *1*, 31–40.

Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2008). The provision of information. In M. Hughes, & I. M. Franks (Hrsg.), *The Essentials of Performance Analysis: An Introduction* (S. 21–39). London: Taylor and Francis.

Howard, I. P., Anstis, T., & Lucia, H. C. (1974). The relative lability of mobile and stationary components in a visual-motor adaptation task. *The Quarterly journal of experimental psychology*, *26*(2), 293–300.

Huang, V. S., Haith, A., Mazzoni, P., & Krakauer, J. W. (2011). Rethinking motor learning and savings in adaptation paradigms: model-free memory for successful actions combines with internal models. *Neuron*, *70*, 787–801.

Ingram, J. N., Flanagan, J. R., & Wolpert, D. M. (2013). Context-dependent decay of motor memories during skill acquisition. *Current Biology*, *23*, 1107–1112.

Jackson, R., & Beilock, S. L. (2008). Attention and performance. In D. Farrow, J. Baker, & C. MacMahon (Hrsg.), *Developing elite sports performers: Lessons from theory and practice* (S. 104–118). London: Routledge.

Jacobson, L. S., & Goodale, M. A. (1989). Trajectories of reaches to prismatically-displaced targets: evidence for 'automatic' visuomotor recalibration. *Experimental Brain Research*, *78*, 575–587.

Jordan, M. I. (1994). Komputationale Aspekte der Bewegungssteuerung und des motorischen Lernens. In H. Heuer, & S. Keele (Hrsg.), *Psychomotorik* Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Serie II: Kognition, (Bd. 3, S. 87–146). Göttingen u.a.: Hogrefe.

Kang, N., Shinohara, M., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2004). Learning multi-finger synergies: An uncontrolled manifold analysis. *Experimental Brain Research*, *157*, 336–350.

Kant, I. (1781). *Critik der reinen Vernunft*. Riga: Hartknoch.

Kantak, S. S., & Winstein, C. J. (2012). Learning-performance distinction and memory processes for motor skills: a focused review and perspective. *Behavioral Brain Research*, *228*, 219–231.

Kawato, M. (1990). Feedback-error-learning neural networks for formation and control of coordinated movement. In D. Meyer, & S. Kornblum (Hrsg.), *Attention and Performance XIV: Synergies in Experimental Psychology, artificial intelligence, and Cognitive Neuroscience – a Silver Jubilee* (S. 821–849). Cambridge, MA.: MIT Press.

Kawato, M., & Gomi, H. (1992). A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error learning. *Biological Cybernetics*, *68*, 95–193.

Keele, S. W., Ivry, R., Mayr, U., Hazeltine, E., & Heuer, H. (2003). The cognitive and neural architecture of sequence representation. *Psychological Review*, *110*, 316.

Klassen, J., Tong, C., & Flanagan, J. R. (2005). Learning and recall of incremental kinematic and dynamic sensorimotor transformations. *Experimental Brain Research*, *164*, 250–259.

Kitazawa, S., Kohno, T., & Uka, T. (1995). Effects of delayed visual information on the rate and amount of prism adaptation in the human. *Journal of Neuroscience*, *15*, 7644–7652.

Konczak, J., Velden, H. van der, & Jaeger, L. (2009). Learning to play the violin: motor control by freezing, not freeing degrees of freedom. *Journal of Motor Behavior*, *41*, 243–252.

Krakauer, J. W., Ghilardi, M. F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature Neuroscience*, *2*, 1026–1031.

Krakauer, J. W., Pine, Z. M., Ghilardi, M.-F., & Ghez, C. (2000). Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *The Journal of Neuroscience*, *20*, 8916–8924.

Kruuk, H. (2003). *Niko's Nature. The Life of Niko Tinbergen and his Science of Animal Behavior*. Oxford: Oxford University Press.

Latash, M. L. (2010). Stages in learning motor synergies: a view based on the equilibrium-point hypothesis. *Human Movement Science*, *29*, 642–654.

Latash, M. L. (2012). The bliss of motor abundance. *Experimental Brain Research*, *217*, 1–5.

Latash, M. L., Aruin, A. S., & Zatsiorsky, V. M. (1999). The basis of a simple synergy: reconstruction of joint equilibrium trajectories during unrestrained arm movements. *Human Movement Science*, *18*, 3–30.

Latash, M. L., Yarrow, K., & Rothwell, J. C. (2003). Changes in finger coordination and responses to single pulse TMS of motor cortex during practice of a multi-finger force production task. *Experimental Brain Research*, *151*, 60–71.

Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, *11*, 276–308.

Lawrence, G. P., Cassell, V. E., Beattle, S., Woodman, T., Khan, M. A., Hardy, L., & Gottwald, V. M. (2014). Practice with anxiety improves performance, but only when anxious: evidence for the specificity of practice hypothesis. *Psychological Research*, *78*, 634–650.

Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, *15*, 529–532.

Lee, J. Y., & Schweighofer, N. (2009). Dual adaptation supports a parallel architecture of motor memory. *Journal of Neuroscience*, *29*, 10396–10404.

Lee, T. D., & Genovese, E. D. (1988). Distribution of practice in motor skill acquisition: Learning and performance effects reconsidered. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *59*, 277–287.

Lee, T. D., & Magill, R. A. (1983). The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *9*, 730–746.

Lewis, B. P., & Linder, D. E. (1997). Thinking about choking? Attentional processes and paradoxical performance. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *23*, 937–944.

Lin, C.-H., Fisher, B. E., Winstein, C. J., Wu, A. D., & Gordon, J. (2008). Contextual interference effect: Elaborative processing or forgetting-reconstruction? A post hoc analysis of transcranial magnetic stimulation-induced effects on motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *40*, 578–586.

Magill, R. A. (2001). Augmented feedback in motor skill acquisition. In R. N. Singer, H. A. Hausenblas, & C. M. Janelle (Hrsg.), *Handbook of Sport Psychology* (S. 86–114). New York: John Wiley & Sons.

Magill, R., & Anderson, D. (2013). *Motor Learning and Control. Concepts and Applications*. New York: McGraw Hill.

Magill, R. A., & Wood, C. A. (1986). Knowledge of results precision as a learning variable in motor skill acquisition. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *57*, 170–173.

Magill, R. A., Chamberlin, C. J., & Hall, K. G. (1991). Verbal knowledge of results as redundant information for learning an anticipation timing skill. *Human Movement Science*, *10*, 485–507.

Mazzoni, P., & Krakauer, J. W. (2006). An implicit plan overrides an explicit strategy during visuomotor adaptation. *Journal of Neuroscience*, *26*, 3642–3645.

McCracken, H. D., & Stelmach, G. E. (1977). A test of the schema theory of discrete motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *9*, 193–201.

McDonald, P. V., Emmerik, R. E. van, & Newell, K. M. (1989). The effects of practice on limb kinematics in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, *21*, 245–264.

McIntyre, J., Mussa-Ivaldi, F. A., & Bizzi, E. (1996). The control of stable postures in the multijoint arm. *Experimental Brain Research*, *110*, 248–264.

Merz, F., Kalveram, K. T., & Huber, K. (1981). Der Einfluß kognitiver Faktoren auf Steuerleistungen. In L. Tent (Hrsg.), *Erkennen, Wollen, Handeln. Festschrift für Heinrich Düker zum 80. Geburtstag* (S. 327–335). Göttingen: Hogrefe.

Mesagno, C., Marchant, D., & Morris, T. (2009). Alleviating choking: The sounds of distraction. *Journal of Applied Sport Psychology*, *21*, 131–147.

Miall, R. C., Weir, D. J., Wolpert, D. M., & Stein, J. F. (1993). Is the cerebellum a Smith predictor? *Journal of Motor Behavior*, *25*, 203–216.

Michel, C., Pisella, L., Prablanc, C., Rodes, G., & Rossetti, Y. (2007). Enhancing visuomotor adaptation by reducing error signals: single-step (aware) versus multiple-step (unaware) exposure to wedge prisms. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*, 341–350.

Milner, B. (1962). Les troubles de la memoire accompagnant des lesions hippocampiques bilaterales. In P. Passouant (Hrsg.), *Physiologie de l'hippocampe* (S. 257–272). Paris: Centre National de la Recherche Scientifique.

Milner, B. (1964). Some effects of of frontal lobectomy in man. In J. Warren, & K. Ekert (Hrsg.), *The Frontal Granular Cortex and Behavior* (S. 313–334). New York: McGraw Hill.

Milner, T. E. (2002). Contribution of geometry and joint stiffness to mechanical stability of the human arm. *Experimental Brain Research*, *143*, 515–519.

Milner, T. E., & Cloutier, C. (1998). Damping of the wrist joint during voluntary movement. *Experimental Brain Research*, *122*, 309–317.

Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and Structure of Behavior*. New York: Holt.

Morris, C. D., Bransford, J. D., & Franks, J. J. (1977). Levels of processing versus transfer appropriate processing. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *16*, 519–533.

Moulton, C.-A. E., Dubrowski, A., MacRae, H., Graham, B., Grober, E., & Reznick, R. (2006). Teaching surgical skills: What kind of practice makes perfect? A randomized, controlled trial. *Annals of Surgery*, *244*, 400–409.

Movahedi, A., Sheikh, M., Bagherzadeh, F., Hemayattalab, R., & Ashayeri, H. (2007). A practice-specificity-based model of arousal for achieving peak performance. *Journal of Motor Behavior*, *39*, 457–462.

Moxley, S. E. (1979). Schema. The variability of practice hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, *11*, 65–70.

Newell, K. M., & Chew, R. A. (1974). Recall and recognition in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *6*, 245–253.

Newell, K. M., & Emmerick, R. E. A. van (1989). The acquisition of coordination: Preliminary analysis of learning to write. *Human Movement Science*, *8*, 17–32.

Nielsen, T. I. (1963). Volition: a new experimental approach. *Scandinavian Journal of Psychology*, *4*, 225–230.

Nissen, M., & Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, *19*, 1–32.

Ostry, D. J., Darainy, M., Mattar, A. A., Wong, J., & Gribble, P. L. (2010). Somatosensory plasticity and motor learning. *Journal of Neuroscience*, *30*, 5384–5393.

Osu, R., Franklin, D. W., Kato, H., Gomi, H., Domen, K., Yoshioka, T., & Kawato, M. (2002). Short- and long-term changes in co-contraction associated with motor learning as revealed from surface EMG. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 991–1004.

Paulsen, J. S., Butters, N., Salmon, D. P., Heindel, W. C., & Swenson, M. R. (1993). Prism adaptation in Alzheimer's and Huntington's disease. *Neuropsychology*, *7*, 73–81.

Pew, R. W., & Rupp, G. L. (1971). Two quantitative measures of skill development. *Journal of Experimental Psychology*, *90*, 1–7.

Pine, Z. M., Krakauer, J. W., Gordon, J., & Ghez, C. (1996). Learning of scaling factors and reference axes for reaching movements. *NeuroReport*, *7*, 2357–2361.

Pisella, L., Rode, G., Farnè, A., Tilikete, C., & Rossetti, Y. (2006). Prism adaptation in the rehabilitation of patients with visuo-spatial cognitive disorders. *Current Opinions in Neurology*, *19*, 534–542.

Poulton, E. C. (1973). *Tracking skill and manual control*. New York: Academic Press.

Proteau, L., Marteniuk, R. G., Girouard, Y., & Dugas, C. (1987). On the type of information used to control and learn an aiming movement after moderate and extensive training. *Human Movement Science*, *6*, 181–199.

Proteau, L., Marteniuk, R. G., & Lévesque, L. (1992). A sensorimotor basis for motor learning: Evidence indicating specificity of practice. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *44A*, 557–575.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1990). Effects on prism adaptation of duration and timing of visual feedback during pointing. *Journal of Motor Behavior*, *22*, 209–224.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1993). Adaptive coordination and alignment of eye and hand. *Journal of motor behavior*, *25*(2), 75–88.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1996). Adaptive spatial alignment and strategic perceptual-motor control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*(2), 379.

Redding, G. M., & Wallace, B. (1997). Prism adaptation during target pointing from visible and nonvisible starting locations. *Journal of motor behavior*, *29*(2), 119–130.

Redding, G. M., & Wallace, B. (2006). Generalization of prism adaptation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*, 1006–1022.

Redding, G. M., Rossetti, Y., & Wallace, B. (2005). Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *29*, 431–444.

Richter, H., Magnusson, S., Imamura, K., Fredrikson, M., Okura, M., Watanabe, Y., et al. (2002). Long-term adaptation to prism-induced inversion of the retinal images. *Experimental Brain Research*, *144*, 445–457.

Rodger, M. W. M., Young, W. R., & Craig, C. M. (2014). Synthesis of walking sounds for alleviating gait disturbances in Parkinson's disease. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *22*, 543–548.

Rosenkranz, K., & Rothwell, J. C. (2012). Modulation of proprioceptive integration in the motor cortex shapes human motor learning. *Journal of Neuroscience*, *32*, 9000–9006.

Rossetti, Y., Rode, G., Pisella, L., Farné, A., Li, L., Boisson, D., & Perenin, M. T. (1998). Prism adaptation to a rightward optical deviation rehabilitates left hemispatial neglect. *Nature*, *395*(6698), 166–169.

Rossum, J. H. A. van (1990). Schmidt's schema theory: The empirical base of the variability of practice hypothesis. A critical analysis. *Human Movement Science*, *9*, 387–435.

Roth, K., & Willimczik, K. (Hrsg.). (1999). *Bewegungswissenschaft*. Reinbek/Hamburg: Rowohlt.

Rubens, A. B. (1985). Caloric stimulation and unilateral visual neglect. *Neurology*, *35*, 1019–1024.

Sakai, K., Hikosaka, O., & Nakamura, K. (2004). Emergence of rhythm during motor learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(12), 547–553.

Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, *95*, 355–386.

Saunders, J. A., & Knill, D. C. (2003). Humans use continuous visual feedback from the hand to control fast reaching movements. *Experimental Brain Research*, *152*, 341–352.

Schenk, T., & McIntosh, R. D. (2010). Do we have independent visual streams for perception and action? *Cognitive Neuroscience*, *1*, 52–62.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*, 225–260.

Schmidt, R. A. (1982). The schema concept. In J. A. Kelso (Hrsg.), *Human Motor Behavior* (S. 219–235). London: Taylor & Francis Books Ltd.

Schmidt, R. A., & Lee, T. (2011). *Motor Control and Learning* (5. Aufl.). Champaign: Human Kinetics.

Schmidt, R. A., & White, J. L. (1972). Evidence for an error detection mechanism in motor skills: A test of Adams' closed-loop theory. *Journal of Motor Behavior*, *4*, 143–153.

Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, *126*, 289–306.

Schweighofer, N., Lee, J. Y., Goh, H. T., Choi, Y., Kim, S. S., Campbell Stewart, J., Lewthwaite, R., & Winstein, C. J. (2011). Mechanisms of the contextual interference effect in individuals poststroke. *Journal of Neurophysiology*, *106*, 2632–2641.

Scoville, W. B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *20*, 11–21.

Seidler, R. D., Bo, J., & Anguera, J. A. (2012). Neurocognitive contributions to motor skill learning: the role of working memory. *Journal of Motor Behavior*, *44*, 445–453.

Seitz, R. J., Roland, P. E., Bohm, C., Greitz, T., & Stone-Elander, S. (1990). Motor learning in man: a positron emission tomographic study. *Neuroreport*, *1*, 57–60.

Senders, J. W., & Cruzen, M. (1952). *Tracking performance on combined compensatory and pursuit tasks*. USAF WADC Technical Report, Bd. 52–39. Ohio: Wright Patterson Air Force Base.

Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, *14*, 3208–3224.

Shadmehr, R., & Wise, S. P. (2005). *Computational Neurobiology of Reaching and Pointing: A Foundation for Motor Learning*. Cambridge: MIT Press.

Shanks, D. R., & Cameron, A. (2000). The effect of mental practice on performance in a sequential reaction time task. *Journal of Motor Behavior*, *32*, 305–313.

Shea, J. B., & Morgan, R. L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *5*, 179–187.

Shea, J. B., & Titzer, R. C. (1993). The influence of reminder trials on contextual interference effects. *Journal of Motor Behavior*, *25*, 264–274.

Shea, J. B., & Zimny, S. T. (1983). Context effects in memory and learning movement information. In R. A. Magill (Hrsg.), *Memory and Control of Action* (S. 345–366). Amsterdam:: Elsevier.

Slater, P. J. B. (1985). *An introduction to ethology*. Cambridge: University Press.

Smith, S. M., & Vela, E. (2001). Environmental context-dependent memory: a review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, *8*, 203–220.

Song, S., Howard, J. H., & Howard, D. V. (2007). Implicit probabilistic sequence learning is independent of explicit awareness. *Learning & Memory*, *14*, 167–176.

Stadler, M. A. (1995). Role of attention in implicit learning. *Journal of Experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 674–685.

Stagg, C. J., Bachtiar, V., & Johansen-Berg, H. (2011). The role of GABA in human motor learning. *Current Biology*, *21*, 480–484.

Stelmach, G. E. (1970). Kinaesthetic recall and information reduction activity. *Journal of Motor Behavior*, *3*, 183–194.

Stratton, G. (1897). Vision without inversion of the retinal image. *Psychological Review*, *4*, 361–360.

Sülzenbrück, S., & Heuer, H. (2009a). Learning the visuomotor transformation of virtual and real sliding levers: simple approximations of complex transformations. *Experimental Brain Research*, *195*, 153–165.

Sülzenbrück, S., & Heuer, H. (2009b). Functional independence of explicit and implicit motor adjustments. *Consciousness and Cognition*, *18*, 145–159.

Sülzenbrück, S., & Heuer, H. (2010). The trajectory of adaptation to the visuomotor transformation of virtual and real sliding levers. *Experimental Brain Research*, *201*, 549–560.

Suzuki, M., Shiller, D. M., Gribble, P. L., & Ostry, D. J. (2001). Relationship between cocontraction, movement kinematics and phasic muscle activity in single-joint arm movement. *Experimental Brain Research*, *140*, 171–181.

Swinnen, S. P. (1996). Information feedback for motor skill learning: A review. In H. N. Zelaznik (Hrsg.), *Advances in Motor Learning and Control* (S. 37–66). Champaign, IL: Human Kinetics.

Taylor, J. A., & Ivry, R. B. (2012). The role of strategies in motor learning. *Annals of the New York Academy of Science*, *1251*, 1–12.

Thoroughman, K. A., & Shadmehr, R. (1999). Electromyographic correlates of learning an internal model of reaching movements. *Journal of Neuroscience*, *19*, 8573–8588.

Tong, C., Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2002). Kinematics and dynamics are not represented independently in motor working memory: evidence from an interference study. *Journal of Neuroscience*, *22*, 1108–1113.

Uhlarik, J. J. (1973). Role of cognitive factors on adaptation to prismatic displacement. *Journal of Experimental Psychology*, *98*, 223–232.

Vahdat, S., Darainy, M., & Ostry, D. J. (2012). Structure of plasticity in human sensory and motor networks due to perceptual learning. *Journal of Neuroscience*, *34*, 2451–2463.

Verkoeijen, P. P. J. L., Rikers, R. M. J. P., & Schmidt, H. G. (2005). Limitations to the spacing effect: Demonstration of an inverted u-shaped relationship between interrepetition spacing and free recall. *Experimental Psychology*, *52*, 257–263.

Verrel, J., Pologe, S., Manselle, W., Lindenberger, U., & Woollacott, M. (2013). Coordination of degrees of freedom and stabilization of task variables in a complex motor skill: Expertise-related differences in cello bowing. *Experimental Brain Research*, *224*, 323–334.

Verstynen, T., & Sabes, P. N. (2011). How each movement changes the next: an experimental and theoretical study of fast adaptive priors in reaching. *Journal of Neuroscience*, *31*, 10050–10059.

Verwey, W. B., & Heuer, H. (2007). Nonlinear visuomotor transformations: locus and modularity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*, 1629–1659.

Vindras, P., & Viviani, P. (1998). Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*, 569–591.

Vindras, P., Desmurget, M., & Viviani, P. (2005). Error parsing in visuomotor pointing reveals independent processing of amplitude and direction. *Journal of Neurophysiology*, *94*, 1212–1224.

Wang, J., & Sainburg, R. L. (2005). Adaptation to visuomotor rotations remaps movement vectors, not final positions. *Journal of Neuroscience*, *25*, 4024–4030.

Weiner, M. J., Hallett, M., & Funkenstein, H. H. (1983). Adaptation to lateral displacement of vision in patients with lesions of the central nervous system. *Neurology*, *33*, 766–772.

Welch, R. B. (1978). *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. New York: Academic Press.

Wigmore, V., Tong, C., & Flanagan, J. R. (2002). Visuomotor rotations of varying size and direction compete for a single internal model in a motor working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 447.

Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review*, *105*, 558–584.

Willingham, D. B., & Goedert-Eschmann, K. (1999). The relation between implicit and explicit learning: Evidence for parallel development. *Psychological Science*, *10*, 531–534.

Willingham, D. B., Nissen, M., & Bullemer, P. (1989). On the development of procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *15*, 1047–1060.

Willingham, D. B., Hollier, J., & Joseph, J. (1995). A Macintosh analogue of a pursuit tracking task. *Behavioral Research Methods, Instrumentation, and Computers*, *27*, 491–495.

Willingham, D. B., Salidis, J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Direct comparison of neural systems mediating conscious and unconscious skill learning. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 1451–1460.

Winstein, C. J., & Schmidt, R. A. (1990). Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *16*, 677–691.

Wolpert, L. (2003). Causal beliefs and the origin of technology. *Philosophical Transaction of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *361*, 1709–1719.

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience Supplement*, *3*, 1212–1217.

Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*, 1317–1329.

Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 338–347.

Wong, J., Wilson, E. T., & Gribble, P. L. (2011). Spatially selective enhancement of proprioceptive acuity following motor learning. *Journal of Neurophysiology*, *105*, 2512–2521.

Wulf, G. (1991). The effect of type of practice on motor learning in children. *Applied Cognitive Psychology*, *5*, 123–134.

Wulf, G., & Shea, C. H. (2004). Understanding the role of augmented feedback: The good, the bad, and the ugly. In A. M. Williams, & N. J. Hodges (Hrsg.), *Skill Acquisition in Sport: Research, Theory and Practice* (S. 121–144). London: Routledge.

Wulf, G., Shea, C. H., & Matschiner, S. (1998). Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *Journal of Motor Behavior*, *30*, 180–192.

Yan, J. H., Thomas, J. R., & Thomas, K. T. (1998). Children's age moderates the effect of practice variability: a quantitative review. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *69*, 210–215.

Zatsiorsky, V. M. (2002). *Kinetics of Human Motion*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Ziemann, U., Muellbacher, W., Hallett, M., & Cohen, L. G. (2001). Modulation of practice-dependent plasticity in human motor cortex. *Brain*, *124*, 1171–1181.

Zubiaur, M., Ona, A., & Delgado, J. (1999). Learning volleyball serves: a preliminary study of the effects of knowledge of performance and of results. *Perceptual Motor Skills*, *89*, 223–232.

Motorische Kontrolle

Jürgen Konczak

20.1 Einleitung – 750

20.2 Theorien und Modelle der menschlichen Bewegungskontrolle – 750

20.2.1 Regelung und Steuerung sind die zwei grundlegenden Arten der motorischen Kontrolle – 751

20.2.2 Die Idee einer zentralen Repräsentation von Bewegung – 752

20.2.3 Generalisierte motorische Programme – 753

20.2.4 Interne Modelle der Motorik – 754

20.3 Neuronale Repräsentationen von Bewegung – 756

20.3.1 Der motorische Cortex – 757

20.3.2 Die motorische Funktion der Basalganglien – 760

20.3.3 Das Kleinhirn – 763

20.4 Anwendungsbeispiele – 766

20.5 Ausblick – 767

20.6 Weiterführende Informationen – 767

Literatur – 769

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_20

Im Blickfang

Bewusste und unbewusste Handlungen

Die belgische Tennisspielerin Kim Clijsters retourniert gekonnt einen Ball ihrer Gegnerin mit einem Rückhandschlag. ◘ Abb. 20.1 zeigt aber weit mehr als diese, ihr bewusste und dem Beobachter vertraute, Handlung. Vergleicht man die Haltung beider Arme, so fällt auf, dass der linke Arm gegengleiche Bewegungen zum „aktiven" rechten Arm ausführt. Während Kim den Schläger mit der rechten Hand kraftvoll umgreift (Flexion), sind die Finger ihrer linken Hand weit voneinander gestreckt (Extension). Weiterhin ist der rechte Arm fast vollständig gestreckt, aber der linke Arm ist nahezu komplett gebeugt. Dieses gegengleiche Bewegen ist weder eingeübt, noch ist es biomechanisch erforderlich, um beispielsweise eine besonders präzise oder harte Rückhand zu schlagen. Diese merkwürdig anmutende Position des linken Armes ist die Antwort eines sogenannten *gekreuzten Extensorenreflexes*. Das Bewegungsmuster des linken Armes ist Kim unbewusst und nicht willentlich ausgelöst worden. Spinale Neurone und entsprechende Verschaltungen im Rückenmark haben diese komplexe Bewegungssequenz getriggert. Eine solche Reflexantwort ist sinnvoll, wenn wir z. B. mit dem Fuß auf einen scharfen Gegenstand treten, der uns verletzen könnte. Der ausgelöste gekreuzte Extensorenreflex sorgt in diesem Fall dafür, dass der Fuß hochgehoben und das andere Bein gestreckt wird, um das Gleichgewicht auszugleichen. Bei willkürlichen Bewegungen werden solche Reflexantworten in der Regel durch das Gehirn inhibiert. Bei hoher nervlicher Anspannung oder bei Verletzungen des Gehirns können diese unbewussten Bewegungsantworten jedoch ausgelöst werden, wie dieses Beispiel veranschaulicht.

◘ **Abb. 20.1** Rückhandschlag der belgischen Tennisspielerin Kim Clijsters beim French-Open-Turnier 2001

20.1 Einleitung

Während ▶ Kap. 18 darauf abhob, wie Menschen Handlungen planen, wird in diesem Kapitel erläutert, wie geplante Handlungen vom Nervensystem in koordiniertes und zielgerichtetes Verhalten umgesetzt werden. Zunächst wird dargestellt, welche grundlegenden Formen der Bewegungskontrolle dem menschlichen Nervensystem zur Verfügung stehen. Im Anschluss werden Modellvorstellungen zur neuronalen Repräsentation von Bewegung diskutiert: Das in der Psychologie etablierte Konzept der motorischen Programmierung wird kontrastiert mit der Theorie der internen motorischen Modelle. Anschließend wird erläutert, welche Teile des Gehirns an sensomotorischen Prozessen beteiligt und wie neue Bewegungen und Handlungssequenzen im zentralen Nervensystem abgelegt sind. In diesem Zusammenhang wird auch darauf eingegangen, welche neurologischen Defizite bei der Schädigung motorischer Hirnareale auftreten. Diese klinische Betrachtung wird die Notwendigkeit einer integrativen Betrachtung von Hirnfunktionen verdeutlichen, da Läsionen in klassischen „motorischen" Arealen auch zu Defiziten in der Wahrnehmung und Kognition führen können.

20.2 Theorien und Modelle der menschlichen Bewegungskontrolle

Unser Alltag ist geprägt von zielgerichteten Handlungen. Wir trinken aus einem Glas, schneiden ein Brot, schreiben auf einer Tastatur, gehen zur Bushaltestelle. All diese beobachtbaren Handlungen sind das Ergebnis komplexer neuronaler Prozesse, die durch innere und äußere Einflüsse bestimmt sind. Sensorische Reize, emotionale und intentionale Faktoren haben alle Einfluss auf die Formulierung eines Handlungszieles. Um entsprechende zielgerichtete, willentliche Handlungen zu realisieren, wird in einer bestimmten Phase des Kontrollprozesses ein Bewegungsplan entworfen, in dem eine Bewegungssequenz bestimmt wird (◘ Abb. 20.2). Die geplante Abfolge muss dann in entsprechende motorische Kommandos transformiert werden, damit der Bewegungsapparat (Muskel-Skelett-System) die intendierten Bewegungen auch tatsächlich ausführt.

Diese Beschreibung des sensomotorischen Prozesses ist sicherlich vereinfachend und wird seiner tatsächlichen Komplexität nicht gerecht. Aber sie verdeutlicht, dass es sich im Ganzen um einen seriellen Prozess handelt, in dem intentionale, sensorische und motorische Planungsprozesse dem eigentlichen Kontrollprozess zeitlich vorausgehen (◘ Abb. 20.2). Die Kontrolle der *Willkürmotorik* wird hier kybernetisch definiert als ein Prozess,

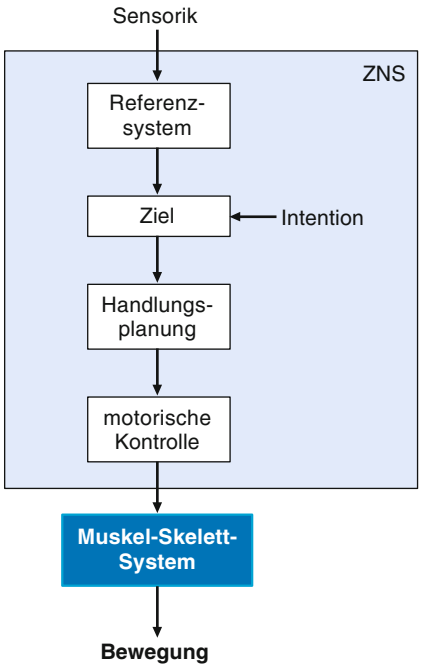


Abb. 20.2 Schema der sensomotorischen Verarbeitung innerhalb des zentralen Nervensystems (ZNS). Die eigentliche motorische Kontrolle der Willkürmotorik steht am Ende eines seriellen Prozesses. Die Verarbeitung sensorischer Information, die Integration multimodaler sensorischer Information in ein Referenzsystem, die Formulierung eines Handlungszieles und die anschließende Planung sind notwendige Vorstufen der motorischen Kontrolle

der einen motorischen Plan bzw. ein Handlungsziel in Bewegung umsetzt. Willkürmotorik unterscheidet sich von *Reflexmotorik*, bei der sensorische Reize eine definierte Bewegungsantwort auslösen. Dieses Kapitel thematisiert vor allem die Kontrolle der willentlichen Motorik, wobei auch darauf abgehoben wird, dass reflex- und willkürmotorische Prozesse parallel ablaufen und sich wechselseitig bedingen.

20.2.1 Regelung und Steuerung sind die zwei grundlegenden Arten der motorischen Kontrolle

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Prozesse der motorischen Kontrolle: Steuerung (*feedforward control*) und Regelung (*feedback control*). Während die **Feedforwardkontrolle** auf einem motorischen Plan basiert, benötigt die **Feedbackkontrolle** einen oder mehrere sensorische Eingänge, um eine bestimmte Ist-Größe einer vorgegebenen Soll-Größe anzugleichen (z. B. räumliche Abweichung der Hand von einem zu ergreifenden Gegenstand). Im menschlichen zentralen Nervensystem laufen beide Prozesse parallel, sodass in den meisten Fällen die beobachtbare Bewegung immer das Produkt beider Kontrollmodi ist. Eine notwendige Voraussetzung für motorische Regelung ist die kontinuierliche Verfügbarkeit sensorischer Information über den augenblicklichen Zustand des motorischen Apparats. Man spricht daher auch von einem Closed-Loop-Prozess (Abb. 20.3A). Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie auf Veränderungen in der Umwelt während der Bewegungsausführung reagieren kann und die momentane Bewegung mit dem Bewegungsziel abgleicht (z. B. beim Ergreifen eines Gegenstands die momentane Position der Hand im Hinblick auf die Position des Gegenstands zu ändern, wenn sich der Gegenstand bewegt). Da aber alle **afferenten** Signale eine bestimmte Zeit brauchen, bis sie von sensorischen Rezeptoren zu den relevanten Hirnarealen gelangen, ist diese Information immer zeitverzögert. Daraus folgt, dass der tatsächliche Zustand der Peripherie und der Zustand, der den motorischen Zentren im Gehirn zur gleichen Zeit „bekannt" ist, während der Bewegungsausführung niemals exakt übereinstimmen. Diese Zeitverzögerung bedingt, dass negativ geregelte Systeme zu unkontrollierten Schwingungen neigen (*negative* Regelung impliziert, dass die Ist-Größe von der Soll-Größe abgezogen wird und dadurch ein bestimmter Fehler minimiert wird; Abb. 20.3A). Das heißt, würde motorische Kontrolle allein auf Regelung eines augenblicklichen Bewegungsfehlers basieren, würden menschliche Bewegungstrajektorien weniger glatt sein. Dies lässt sich bei vielen visuomotorischen Aufgaben beobachten, bei denen hohe Präzision erforderlich ist. Bei Zeigebewegungen mit der Hand auf kleine Ziele oder noch ausgeprägter bei visuellen **Tracking-Aufgaben** sind diese Oszillationen im Geschwindigkeits- oder Positionsprofil der Hand zu finden. Darüber hinaus stößt die Leistungsfähigkeit motorischer Regelung besonders dann an seine Grenzen, wenn sehr schnelle Bewegungen ausgeführt werden sollen. In solchen Fällen bekommen die relevanten motorischen Zentren im Gehirn eine sensorische Rückmeldung mit zu hoher Zeitverzögerung, um eine adäquate Bewegungsantwort zu geben. Die Ursache für diese Verzögerungen liegt in der Verarbeitungsgeschwindigkeit des neuromuskulären Systems, das durch eine Reihe physiologischer Latenzen (z. B. Nervenleitgeschwindigkeit, elektromechanische Verzögerung) determiniert ist.

Neuronale Steuerungsprozesse können diesen Nachteil der Regelung überwinden, da sie nicht auf sensorische Rückmeldung während der Bewegungsausführung angewiesen sind. Man spricht hier auch von einem Open-Loop-Prozess, da der Regelkreis nicht geschlossen ist (Abb. 20.3B). Der Nachteil einer reinen Steuerung ist, dass eventuelle Planungsfehler oder plötzlich auftretende externe Störungen nicht berücksichtigt werden können. Nur „vorhersehbare" Veränderungen im Systemzustand können kompensiert werden, indem der motorische Plan in der nachfolgenden Bewegung entsprechend abgeändert wird. Die genaue Beschaffenheit und die neuroanatomische Lokalisation eines neuronalen Feedforward-Controller, in Abb. 20.3B nur schematisch als Rechteck mit Eingang und Ausgang skizziert, ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Unabhängig davon kann aber festgestellt werden, dass die menschlichen Bewegungen sowohl über Steuerung als auch über Regelung kontrolliert werden, d. h., im menschlichen Organismus sind beide Kontrollmodi etabliert und werden parallel betrieben (Abb. 20.3C; Überblick der beiden grundlegenden Arten der motorischen Kontrolle in Tab. 20.1).

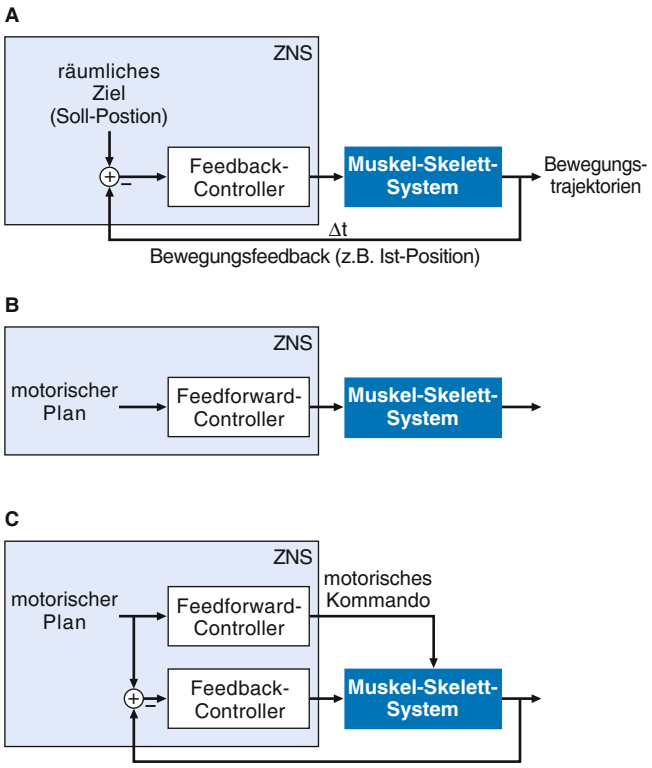


Abb. 20.3 Systemdiagramme verschiedener sensomotorischer Kontrollprozesse im zentralen Nervensystem. (**A**) Motorische Regelung (*feedback control*). Der Regler (*feedback controller*) ist Teil eines geschlossenen Regelkreises (*closed-loop control*), der einen Ist-Zustand mit dem geplanten Zustand vergleicht. Hier wird die tatsächliche von der momentan geplanten Position (eines Gelenks oder Endeffektors wie der Hand) abgezogen. Man spricht daher von negativer Regelung (*negative feedback control*), da der Systemfehler minimiert wird. Das Symbol Δ*t* zeigt an, dass die Rückmeldung zeitverzögert ist. (**B**) Motorische Steuerung (*feedforward control*). Ein solches System führt einen motorischen Plan aus und ist unabhängig von sensorischer Rückmeldung (*open-loop control*). (**C**) Sensomotorisches Kontrollsystem mit paralleler Informationsverarbeitung in einem Feedback- und Feedforwardmodul. Ein solches System entspricht der menschlichen Motorik. Die Abbildung ist vereinfachend und soll nicht suggerieren, dass es nur ein neuroanatomisch exakt lokalisierbares sensomotorisches Feedback- bzw. Feedforwardmodul im Nervensystem gibt. Neurobiologische Befunde sprechen dafür, dass mehrere dieser „Module" als funktionale Netzwerke auf verschiedenen Verarbeitungsebenen im Nervensystem existieren

Tab. 20.1 Charakteristika der beiden motorischen Kontrollarten

	Regelung	Steuerung
Benötigt sensorische Information	Vor und während der Bewegung	Vor Bewegungsbeginn
Korrektur von Planungsfehlern oder externen Störungen während der Ausführung möglich?	Ja	Nein
Schnelle Willkürbewegungen möglich?	Nein	Ja

20.2.2 Die Idee einer zentralen Repräsentation von Bewegung

In einem 1947 erschienenen Beitrag schrieb der russische Physiologe Nicolai Bernstein (1988) seinen Namen mit seiner dominanten rechten Hand, mit ausgestrecktem Arm, mit der linken Hand und mit dem Mund. Die resultierenden Unterschriften waren alle lesbar und zeigten eindeutige kinematische Ähnlichkeiten (Abb. 20.4). Bernstein wollte darauf aufmerksam machen, dass diesen Bewegungsspuren eine zentrale Bewegungsrepräsentation zugrunde liegt, die unabhängig von den aktivierten Muskeln ist. Das heißt, eine neuronale Repräsentation einer Bewegungssequenz ist nicht einfach eine Aneinanderkettung von gespeicherten Kommandos an bestimmte Muskeln.

Die Idee einer zentralen Repräsentation von Bewegung war schon 1874 von Wilhelm Wundt in Leipzig und anschließend von William James an der Harvard University als notwendig angenommen worden, um motorische Kontroll- und Lernprozesse erklären zu können (James 1890/1977). Bernstein bezeichnete diese Grundbausteine der Willkürmotorik als **motorische Engramme**. Er erkannte, dass diese Engramme unabhängig von propriozeptiver Information sein mussten, da seit Lashleys (1917) Studien an **deafferentierten** Affen bekannt war, dass erlernte Bewegungen auch ohne periphere Rückmeldung durchgeführt werden können. Der amerikanische Kognitionspsychologe Steven Keele griff die Idee einer zentral gespeicherten Bewegungssequenz Ende der 1960er Jahre erneut auf und postulierte, dass die relevanten motorischen Kommandos an die Muskulatur bereits vor Bewegungsbeginn als **motorisches Programm** abgelegt sind. Die zentrale Annahme der Theorie ist, dass erlernte Bewegungen als motorische Programme (▶ Kap. 18) – ähnlich dem prozeduraler Code eines Computerprogramms – im Gehirn gespeichert und jederzeit abrufbar sind. Keele und Posner (1968) definierten das motorische Programm als strukturierten Satz zentraler Kommandos zur Durchführung von willkürlichen Bewegungen. Das Programm läuft nach Bewegungsbeginn ohne Rückgriff auf sensorische Rückmeldung ab (Abb. 20.3B). Mögliche Fehler in der Bewegungsausführung können frühestens nach einer Reaktionszeitperiode (ca. 180–200 ms) durch ein aktualisiertes Programm korrigiert werden. Aus kontrolltheoretischer Sicht beschreibt Keeles Konzept der motorischen Programmierung einen reinen Steuerungsmechanismus. Schon bald zeigte sich, dass der Ansatz zwei entscheidende Schwächen hatte. Erstens konnte die Theorie nicht erklären, wie das Gehirn neue Programme erstellt, also wie motorisches Lernen möglich ist. Zweitens wurde nicht klar, wie spezifisch ein motorisches Programm ist. Sind beispielsweise beim Sprechen jeder ausgesprochene Vokal und jeder Konsonant ein eigenes Programm? Wenn ja, sind Silben dann als eine Aneinanderkettung von Programmen zu begreifen? Und wie sind dann Wörter und Sätze einzuordnen? Diese Fragen weisen alle auf ein zentrales Problem des Programmansatzes hin: Was ist die kleinste Repräsentation von Bewegung, die im Gehirn abgelegt wird? Diese Frage ist nicht trivial. Nimmt man an, dass nur simple Bewegungen oder isolierte Bewegungssegmente gespeichert sind, müssen diese Programme bei komplexen Bewegungen erst zu einem Gesamtprogramm zusammen gebaut werden. Ein solcher Vorgang würde natürlich die Verarbeitungszeit mit steigen-

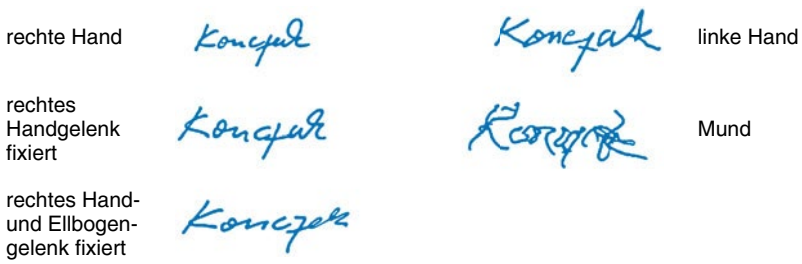


Abb. 20.4 Eine mit verschiedenen Effektoren ausgeführte Unterschrift. Man beachte die Ähnlichkeit der Schreibweise, obwohl die Bewegungen durch die Aktivierung verschiedener Muskelgruppen generiert worden und durch die Bewegung unterschiedlicher Gelenke und Extremitäten entstanden sind. Dies unterstreicht Bernsteins Auffassung, dass den verschiedenen Bewegungen ein gemeinsames motorisches Engramm (kinematisches Muster) zugrunde liegt

der Bewegungskomplexität erhöhen (▶ Kap. 18). Wird dagegen angenommen, dass komplexe Bewegungsmuster als spezifische Programme gespeichert sind, bedeutet dies, dass im Gehirn Millionen dieser Programme abgespeichert sind, die jeweils situativ ausgewählt werden müssen. Diese zweite Möglichkeit, motorische Programme abzulegen, führt unter Umständen zu Speicherproblemen, argumentierten Kritiker (MacNeilage, 1970). Obwohl es bis heute keinen eindeutigen Beweis für eine begrenzte Speicherkapazität des Gehirns für Bewegungssequenzen gibt, würde die Speicherung jeder einzelnen Bewegung hohe Anforderungen an neuronale Suchalgorithmen stellen. Eine schnelle und situativ korrekte Auswahl abgelegter Bewegungsmuster ist aber notwendig für eine effiziente Bewegungssteuerung.

20.2.3 Generalisierte motorische Programme

Die aufgezeigte Problematik mit der traditionellen Konzeption des motorischen Programms veranlasste Richard Schmidt an der University of California in Los Angeles in den 1970er Jahren, die Programmtheorie zu modifizieren. Im Unterschied zum ursprünglichen Ansatz, in dem alle relevanten physiologischen und biomechanischen Parameter eindeutig festgelegt sind, ist sein Modell der generalisierten motorischen Programme (GMP) als eine Art Bewegungsschablone aufzufassen. Ein generalisiertes motorisches Programm ist daher nicht mehr an bestimmte Muskeln, Gelenke oder Körpersegmente gebunden, sondern es spezifiziert invariante kinematische und dynamische Bewegungsmerkmale (Schmidt 1975, 1986). Die invarianten Parameter sind (1) die Reihenfolge der Bewegungskomponenten, (2) deren zeitliche Struktur und (3) der relative Kraftaufwand. Ein GMP enthält also lediglich ein abstraktes Muster der auszuführenden Bewegung. Es bestimmt nicht die präzise Aktivierung verschiedener Muskelgruppen, sondern die kinematische Reihenfolge von Aktionen. Das gesamte Konzept der GMP beschreibt einen sequenziellen algorithmischen Verarbeitungsweg der sensomotorischen Information. Es entspricht in gewisser Hinsicht Bernsteins Vorstellung eines *motorischen Engramms*.

Im Vergleich zum ursprünglichen Programmkonzept war der Vorteil des GMP-Ansatzes, dass nicht mehr jede Bewegung oder Bewegungssequenz als ein spezifisches motorisches Programm vorliegen muss. Auch das Problem des Neuerwerbs von Bewegung schien gelöst, denn schon die Änderung eines Parameters im GMP resultiert in einer neuen Bewegung. Allerdings erklärt die Theorie nicht genau, wie die GMPs selbst erworben werden. Schmidt nahm an, dass verschiedene Bewegungskomponenten zu einem GMP „verkettet" werden bzw. dass angeborene „Subroutinen" zu größeren Einheiten zusammengefasst werden.

Aus heutiger Sicht lassen sich folgende entscheidende Schwächen des GMP-Ansatzes identifizieren: Die empirischen Befunde, die den Gedanken eines generalisierten Programms mit invarianten Merkmalen und modifizierbaren Parametern unterstützen, sind uneindeutig. Es gibt indirekte Evidenz für die Existenz von GMPs, aber auch dagegen (Kelso 1982). Das GMP-Konzept macht kaum konkrete Aussagen über das neurobiologische Korrelat motorischer Programme. Wo sind sie abgelegt? Welche Teile des Nervensystems sind an der Bildung von GMPs beteiligt? Neuroanatomische Befunde (Dum und Strick 1991), die zeigen, dass auch klassische motorische Planungsareale starke direkte Projektionen zu spinalen Motorneuronen haben, sind nur schwer vereinbar mit der vom GMP-Ansatz angenommenen Konvergenz der corticalen Verarbeitungswege. Aus kontrolltheoretischer und biomechanischer Sicht muss festgestellt werden, dass die Parameter, die in einem GMP spezifiziert werden, nicht ausreichen, um den menschlichen Körper zielgerichtet und koordiniert zu bewegen. Um von kinematischen Invarianten und globalen Kraftparametern zu Muskelkräften und Gelenkdrehmomenten zu gelangen, sind eine Reihe motorischer Transformationen notwendig, die im Programmkonzept überhaupt nicht thematisiert werden. Diese Transformationen sind aber zwingend notwendig, denn ohne die Generierung entsprechender Kräfte am Gelenk kann eine Intention des Organismus nicht in Bewegung umgesetzt werden. Aus systemtheoretischer Sicht beschreibt das Konzept der motorischen Programmierung daher nur den ersten Teil des motorischen Steuerungsprozesses, nämlich den der Bildung und der möglichen Speicherung eines Bewegungsplanes (▶ Kap. 18). Der Ansatz der motorischen Programmierung bildet somit keine vollständige Theorie der motorischen Kontrolle.

Der GMP-Ansatz entstammt der Kognitiven Psychologie und hat in den vergangenen Jahrzehnten eine große Verbreitung in anderen Disziplinen wie der Robotik und der Neurobiologie erfahren. Als Folge dieser Verbreitung ist der Begriff „motorisches Programm" heute je nach Disziplin und wissenschaftlicher Ausrichtung sehr unterschiedlich besetzt und bildet kein einheitliches integratives Konzept in der Motorikforschung. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Interpretationen zum motorischen Programmbegriff, die leider zu einer terminologischen Verschwommenheit geführt haben. Oft ist es nicht leicht zu erkennen, ob Autoren eine „programmierte Bewegung" im Sinne eines des traditionellen Ansatzes als GMP oder als bloße Metapher für motorisches Gedächtnis verstehen. Hier liegt das Problem der Konzeption des motorischen Programms. In seiner allgemeinen Form ist das Konzept nicht falsifizierbar. Wird es aber nur bildhaft verwendet, hat es keinen besonderen Erklärungswert für das Problem der motorischen Kontrolle und bleibt inhaltsleer (Konczak 1996). Neuere kognitionspsycho-

logische Theorien des Embodiment (auch *embodied cognition* oder verkörperte Kognition; ▶ Kap. 21) stehen dem Konzept des motorischen Programms sehr kritisch gegenüber. Die zentrale These von Embodiment ist, dass die Psyche stets in einen Körper eingebettet ist und kognitive Prozesse nicht loslösbar von der Körperlichkeit sind (Pfeifer und Bongard 2006). In diesem Sinne sind Wahrnehmung und Handlung nur als Einheit betrachtbar. Sie sind durch einen gemeinsamen Code verbunden (*perception-action coupling*) (Common-Coding-Theorie; Prinz 1997; ▶ Kap. 22). Ein Ansatz wie das Konzept der motorischen Programmierung, das die Existenz einer zentralen, von der Sensorik unabhängigen Repräsentation von Bewegung annimmt, sind im Sinne von Embodiment daher fehlgeleitet und irreführend, weil sie einen Dualismus von Gehirn und Körper annehmen, der so nicht existiert (Wilson und Golonka 2013). Während die Einsichten von Embodiment einen anhaltenden Einfluss auf die Kognitionsforschung haben, muss man allerdings auch konzedieren, dass der Embodiment-Ansatz bis heute keine schlüssige Theorie zur motorischen Kontrolle hervorgebracht hat.

20.2.4 Interne Modelle der Motorik

Ein alternativer Ansatz, motorische Kontrollfunktionen umfassend zu beschreiben, ist das sogenannte Konzept der internen motorischen Modelle, das eine weite Verbreitung in der Neurowissenschaft (*computational neuroscience*) gefunden hat. Ursprünglich entstammt es aus der systemtheoretischen Kontrolltheorie, die in den Ingenieurswissenschaften routinemäßig Anwendung findet, um beispielsweise die Bewegungen von Automaten und Robotern zu kontrollieren. Der Begriff „Modell" bezeichnet in diesem Zusammenhang einen Typus von neuronalem Controller, der Sensorik und Motorik mittels festgelegter Regeln oder Algorithmen verknüpft. Ausgangspunkt des internen Modellkonzepts der menschlichen Sensomotorik sind zwei grundsätzliche Fragen:

1. Was muss eigentlich kontrolliert werden, um ein mechanisches System wie den menschlichen Bewegungsapparat zielgerichtet und koordiniert zu bewegen?
2. Wie muss das dazugehörige Kontrollsystem beschaffen sein, das einem Organismus erlaubt, sich autonom zu bewegen, und das darüber hinaus fähig ist, auf Veränderungen in der Umwelt zu reagieren und zu adaptieren?

Die Antwort auf die erste Frage: Die **Dynamik** des mechanischen Systems muss kontrolliert werden. (Dynamik wird hier im Sinne der Newton'schen Mechanik verwendet und bezeichnet die am System wirkenden Kräfte, z. B. Muskelkräfte, Schwerkraft, Zentrifugal- und **Coriolis-Kräfte**.) Die Antwort auf die zweite Frage lautet: Eine neuronale Instanz, die ein exaktes Wissen über diese am System wirkenden Kräfte hat, stellt einen idealen Controller dar. Eine genauere Erklärung für diese Antworten wird in den folgenden Abschnitten gegeben.

Vorwärtsmodelle und inverse Modelle

Generell lassen sich zwei Formen von internen Modellen unterscheiden: **Vorwärtsmodelle** und **inverse Modelle** (▶ Kap. 21). Für die motorische Kontrolle sind beide Modelle von Nutzen. Ein *inverses motorisches Modell* ist Teil der motorischen Steuerung (Feedforwardkontrolle). Sein *Input* ist ein motorischer Plan mit der geplanten **Kinematik**, d. h. Informationen darüber, wie sich bewegt werden soll (z. B. welche räumliche Trajektorie, welche Geschwindigkeit). Sein *Output* ist ein motorisches Kommando. Erhält der Bewegungsapparat ein solches Signal, werden genau die Kräfte am Gelenk (**Drehmomente**) erzeugt, die notwendig sind, um den Bewegungsplan umzusetzen. Vereinfacht gesagt, ein inverses motorisches Modell ist eine neuronale Repräsentation der Biomechanik des Muskel-Skelett-Systems, das durch physikalische Parameter wie Steifigkeit, Trägheit oder Schwerkraft bestimmt ist (◘ Abb. 20.5). Es repräsentiert also implizites Wissen über die Dynamik des Systems. Daher kann es die Funktion eines neuronalen Controller annehmen, der einen Bewegungsplan in adäquate motorische Kommandos überführt (kinematisch-dynamische Transformation; ◘ Abb. 20.3B). Ein inverses Modell ist nicht mit einem motorischen Programm zu verwechseln. Es enthält nicht die Anweisung für eine bestimmte Bewegungssequenz. Es ist keine Repräsentation von Bewegung. Es arbeitet wie ein Transformator, der die geplanten Bewegungsmuster als Eingangsgröße erhält und dann die notwendigen Kräfte und entsprechenden Muskelaktivierungen für die geplanten Bewegungen erzeugt.

Vorwärtsmodelle haben für die Motorik eine andere Funktion. Sie sind kein Controller im herkömmlichen Sinne. Ihre Hauptaufgabe ist die Prädiktion, die Vorhersage der zu erwartenden Sensorik, wenn ein bestimmtes motorisches Kommando ausgeführt wird. Eingangssignal eines Vorwärtsmodells sind die **efferenten** motorischen Kommandos, Ausgangssignal die zu erwartenden sensorischen Konsequenzen der geplanten Bewegung (z. B. wie schnell die geplante Bewegung sein wird und welche Beschleunigungen zu erwarten sind; ◘ Abb. 20.5). Das heißt, ein sensomotorisches Vorwärtsmodell führt die umgekehrte Transformation eines inversen internen Modells durch (dynamisch-kinematische Transformation). Die Vorhersage der zu erwartenden Sensorik ist zum einen wichtig für die Kontrolle von sehr schnellen Bewegungen, wenn die Latenzen für sensorisches Feedback länger sind als die Bewegung selbst. Zum anderen kann das Vorwärtsmodell in Verbindung mit der tatsächlich erfahrenen Sensorik ein Fehlersignal generieren, um das inverse Modell zu präzisieren, wenn dieses nur ungenaue Schätzungen der am System wirkenden Kräfte hat.

Der Nachweis für die Existenz interner Modelle kommt von Experimenten zum adaptiven Lernen

Evidenz für die Existenz neuronaler interner Modelle zur Motorik stammt aus Experimenten, in denen Probanden Armbewegungen zu verschiedenen Zielen in einem unbekannten äußeren Kraftfeld durchführen mussten (z. B. Gandolfo et al. 1996). Unter normalen Bedingungen führten die Trajektorien der Hand geradlinig zum Ziel. Nach dem Aufschalten einer für die Probanden unbekannten, viskösen Kraft zeigten die Handtrajektorien eine starke Krümmung in Richtung der wirkenden Kraft (◘ Abb. 20.6). (Eine *viskose Kraft* ist eine geschwindigkeitsabhängige äußere Kraft. Je schneller der Proband den Arm bewegte, desto mehr wurde der Arm „von hinten angeschoben".) Nach

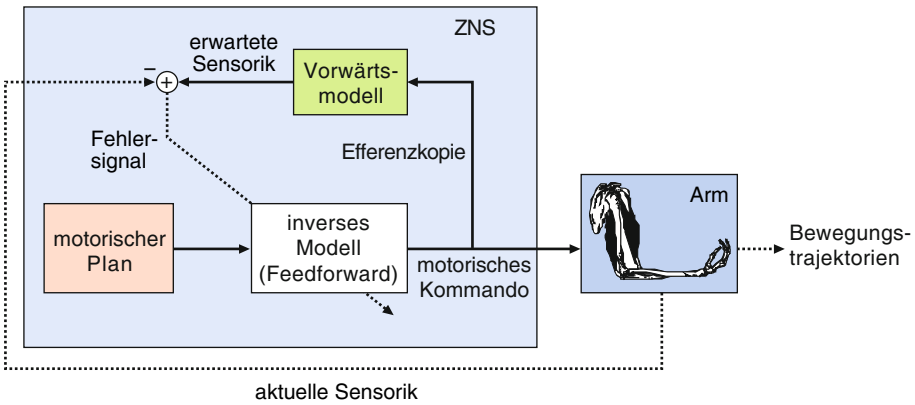


Abb. 20.5 Inverse und Vorwärtsmodelle der Motorik. Das inverse Modell fungiert hier als Feedforward-Controller, dessen Output ein motorisches Kommando ist, das an die Skelettmotorik (hier ein Arm) geleitet wird. Eine Kopie dieses motorischen Kommandos (Efferenzkopie) ist das Eingangssignal für das neuronale Vorwärtsmodell, das auf der Basis des motorischen Kommandos die zu erwartende Sensorik vorhersagt. Der schräge gestrichelte Pfeil deutet an, dass das inverse Modell durch dieses Signal aktualisiert werden kann

längerem Üben (ca. 750 Versuchen) wurden die Trajektorien wieder geradlinig. Als dann das äußere Kraftfeld abgeschaltet wurde, wiesen die Trajektorien eine Abweichung in die umgekehrte Richtung auf. Dieser *motorische Nacheffekt* entspricht dem visuellen Nacheffekt bei der Prismenadaptation (▶ Kap. 19). Die Tatsache, dass die Probanden versuchten, unter dem neuen Kraftfeld dieselben Trajektorien zu formen wie unter normalen Verhältnissen, weist darauf hin, dass die Probanden ihren kinematischen Plan beibehielten und versuchten, das zusätzliche Kraftfeld zu kompensieren. Der motorische Nacheffekt entstand dadurch, dass nach Abschalten der äußeren Kraft die Probanden weiterhin versuchten, die jetzt nicht mehr existierende Kraft auszugleichen.

Elementar für die Annahme, dass ein Modell der am Körper wirkenden Kräfte erlernt wurde, war der Nachweis, dass sich diese Kompensationsfähigkeit nicht nur auf die erlernten Ziele erstreckte, sondern auch auf benachbarte Regionen generalisiert, in denen nie trainiert worden war. Eine solche Fähigkeit zur Generalisierung spricht gegen einen rein assoziativen Lernmechanismus, sondern dafür, dass die Probanden Regeln lernten. Diese Regeln über das dynamische Verhalten des Armes konnten sie in Teilen des Arbeitsbereichs anwenden, in denen sie nicht geübt hatten. Bei einem reinen assoziativen Verknüpfen zwischen räumlicher Bewegungstrajektorie und erfahrenem Kraftfeld würde man geradlinige Trajektorien nur zu den trainierten Zielen erwarten, aber nicht im angrenzenden Arbeitsbereich. Das spricht dafür, dass die Probanden ein neuronales Modell der inversen Dynamik gebildet hatten. Allerdings war das erlernte Modell nicht global, sondern lokal. Es erstreckte sich nicht über den gesamten Arbeitsbereichs des Armes, sondern nahm beidseits mit Entfernung zum erlernten Ziel ab.

Zur neuroanatomischen Lokalisation interner motorischer Modelle gibt es zurzeit kaum gesicherte Ergebnisse aus Bildgebungs- oder tierexperimentellen Studien. Theoretische Überlegungen und psychophysische Befunde sprechen heute dafür, dass nicht ein, sondern eine Anzahl interner motorischer Modelle Teil des motorischen Kontrollsystems sind und Kleinhirn und motorischer Cortex an der Speicherung und Modifikation interner Modelle beteiligt sind (Wolpert et al. 1998; ▶ Kap. 19). Die Fähigkeit zur motorischen **Adaptation** an veränderte dynamische Verhältnisse ist die notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Handlungssteuerung. Wäre das motorische Kontrollsystem nicht in der Lage, Veränderungen in der Dynamik zu kompensieren,

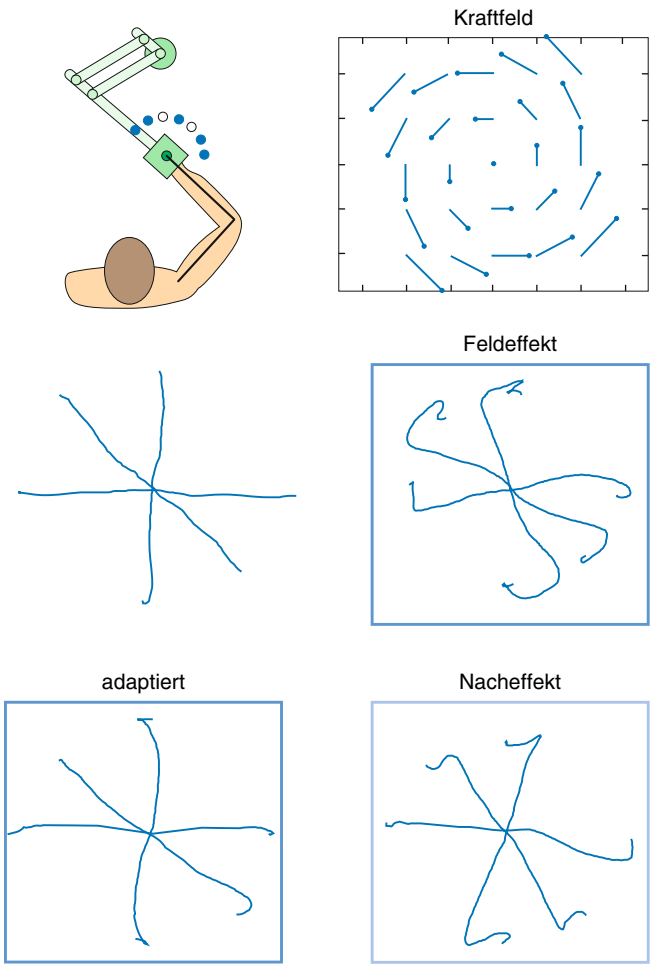


Abb. 20.6 Die Adaptation von Handtrajektorien an ein viskoses Kraftfeld. Die Probanden führten sternförmige Bewegungen zu unterschiedlichen Zielen aus. Ohne viskose Kraft waren die Trajektorien fast geradlinig (Baseline). Nach Aufschalten der Kraft waren sie nach links verschoben (Feldeffekt). Der Bewegungsfehler wurde gegen Ende der Bewegung visuell korrigiert (daher die hakenförmige Trajektorie). Nach Abschluss des adaptativen Lernens produzierten Probanden wieder geradlinige Trajektorien auch unter dem Einfluss des Kraftfeldes. Nach Abschalten der Kraft sieht man einen kinematischen Nacheffekt. Die Trajektorien waren in Gegenrichtung der nicht mehr wirkenden Kraft verschoben. (Aus Gandolfo et al. 1996)

könnten beispielsweise Astronauten im All wegen der Schwerelosigkeit keine zielgerichteten Aufgaben durchführen. Sie würden weiterhin muskuläre Kräfte generieren, die zu adäquaten Bewe-

gungsantworten unter Bedingungen der Schwerkraft führen, aber in überschießenden Bewegungen unter Schwerelosigkeit resultieren würden.

Vergleicht man abschließend das Konzept der internen motorischen Modelle mit dem motorischen Programmkonzept, so lässt sich feststellen:

- Interne motorische Modelle können als Brücke zwischen Planungsprozessen und beobachtbarer Bewegung verstanden werden. Das heißt, sie erklären, welche sensomotorischen Transformationen notwendig sind, um intendierte Bewegungen koordiniert auszuführen. Motorische Programmierung thematisiert mehr den Planungsprozess und macht wenige Aussagen darüber, wie diese Planungen umgesetzt werden.
- Der Modellansatz gibt einen Mechanismus für motorische Adaptation. Dieser motorische Lernprozess ist die notwendige Voraussetzung für den Erwerb motorischer Fertigkeiten. Bei der motorischen Programmierung steht der Fertigkeitserwerb im Vordergrund, und andere Formen des impliziten Lernens (z. B. Adaptation, Habituation, Konditionierung) werden nicht angesprochen.
- Wie bei der motorischen Programmierung ist bisherige Evidenz für die Existenz interner motorischer Modelle indirekt. Ergebnisse aus psychophysischen Untersuchungen zum adaptiven Lernen zeigen, dass motorische Adaptationsprozesse mit dem Erwerb eines Körpermodells kompatibel sind.
- Wie viele motorische Modelle im Nervensystem abgelegt sind, ist nicht geklärt. Gibt es eine Reihe von invers dynamischen Modellen in verschiedene Hirnregionen, die als Controller fungieren? Sind diese redundant? Gibt es Controller für jedes Körpersegment, das eigenständig bewegt werden kann (z. B. linker und rechter Arm)? Auf all diese Fragen gibt es keine abschließenden Antworten. In diesem Sinne zeigt Konzept der internen motorischen Modelle ähnliche Schwächen wie das Konzept der motorischen Programmierung. In seiner allgemeinen Form ist der Ansatz lediglich eine Metapher für eine motorische Repräsentation.

20.3 Neuronale Repräsentationen von Bewegung

Große Teile des menschlichen Großhirns (Cerebrum) sind während des motorischen Kontrollprozesses aktiv. Der prämotorische und der primärmotorische Cortex (M1), die supplementär motorische Area (SMA) und der posteriore parietale Cortex (Brodmann-Areale 5 und 7) partizipieren alle an motorischer Planung und Ausführung von Willkürmotorik (Abb. 20.7 und 20.9A). Neben dem Großhirn sind das Kleinhirn (Cerebellum), das Stammhirn (Basalganglien, Nuclei basales) und das Spinalmark weitere wichtige sensomotorische Subsysteme. Generell lassen sich drei Klassen von Bewegungen unterscheiden, die neuronaler Kontrolle unterliegen:

Reflexe: Es gibt eine große Anzahl von stereotypen Bewegungsmustern, die in der Regel durch somatosensorische Stimuli ausgelöst werden. Die ausgelösten Bewegungsantworten sind unwillkürlich, d. h., sie können gar nicht oder nur eingeschränkt durch den Willen beeinflusst werden. Husten, Lidschluss- und Kniesehnenreflex sind nur einige Beispiele. (Der Kniesehnenreflex ist ein sogenannter Dehnungsreflex. Eine plötzliche Dehnung der Sehne z. B. durch einen Schlag auf die Sehne ist der Stimulus, die Reflexantwort ist eine Verkürzung des gedehnten Muskels.) Reflexe sind die am schnellsten auslösbaren motorischen Reaktionen (Latenzen variieren je nach Reflex zwischen 20 und 120 ms). Sie gelten als subcorticale Bewegungsmuster, die spinal oder durch den Hirnstamm aktiviert werden. Das Ausmaß und die Stärke einer Reflexantwort können allerdings durch supraspinale Zentren beeinflusst werden. Bei Neugeborenen beobachtet man in den ersten sechs bis acht Monaten eine Reihe sogenannter primitiver oder infantiler Reflexe (z. B. **Babinski-Antwort**, die Spreizung der Zehen nach Berührung der Fußsohle, oder der Fechterreflex; Abb. 20.8). Diese Reflexe werden mit zunehmender neuronaler Reifung durch supraspinale motorische Zentren inhibiert bzw. in willkürmotorische Bewegungsmuster integriert. Nach Schädel-Hirn-Traumen, bei denen der motorische Cortex oder dessen deszendierende Bahnen beschädigt worden sind, sind diese Reflexe unter Umständen wieder auslösbar und sind daher wichtig für die klinische Diagnostik von Rückenmarksschädigungen.

3. *Automatische Bewegungen:* In der Regel sind dies rhythmische oder zyklische Bewegungsmuster wie Gehen, Laufen oder Kauen. Diese Bewegungen kennzeichnet eine geringe kinematische Variabilität. Durch deszendierende corticale Signale werden Neuronenpopulationen im Rückenmark und im Hirnstamm aktiviert (*central pattern generators*), die dann ihrerseits zyklische, efferente motorische Signale generieren. Diese Bewegungen erscheinen uns automatisch, da wir sie in der Regel „unbewusst" und ohne gerichtete Aufmerksamkeit ausführen können.
4. *Willkürbewegungen:* Dies sind intendierte, geplante Bewegungen wie Greifen, Zeigen, Schreiben oder Sprechen. Willkürbewegungen gehen einher mit der Aktivierung der sensomotorischen Areale im Neocortex. Hocherlernte willkürliche Bewegungen wie Sprechen und Schreiben bekommen eine automatische Qualität. Dies bedeutet aber nicht, dass sie unbewusst werden und ausschließlich durch subcorticale motorische Zentren realisiert werden.

Diese Einteilung soll nicht suggerieren, dass es drei distinkte, neuroanatomisch eingrenzbare Formen der neuronalen Kontrolle gibt. Selbstverständlich sind während Willkürbewegungen auch Strukturen im Hirnstamm und im Spinalmark aktiv. Ebenso wird das Großhirn über aufsteigende Bahnen über die Aktivierung spinaler Reflexe informiert. Wir wissen heute, dass die willkürmotorische Kontrolle kein streng serieller Prozess ist, in dem bestimmte Hirnareale nacheinander aktiviert werden. Sie ist kein typisch hierarchischer Top-down Prozess, sondern erfordert die parallele Aktivierung von neuronalen Strukturen auf allen Ebenen. Eine Parallelverarbeitung im Nervensystem impliziert aber nicht, dass der gesamte motorische Kontrollprozess keine zeitliche Ordnung hat und ausschließlich heterarchisch

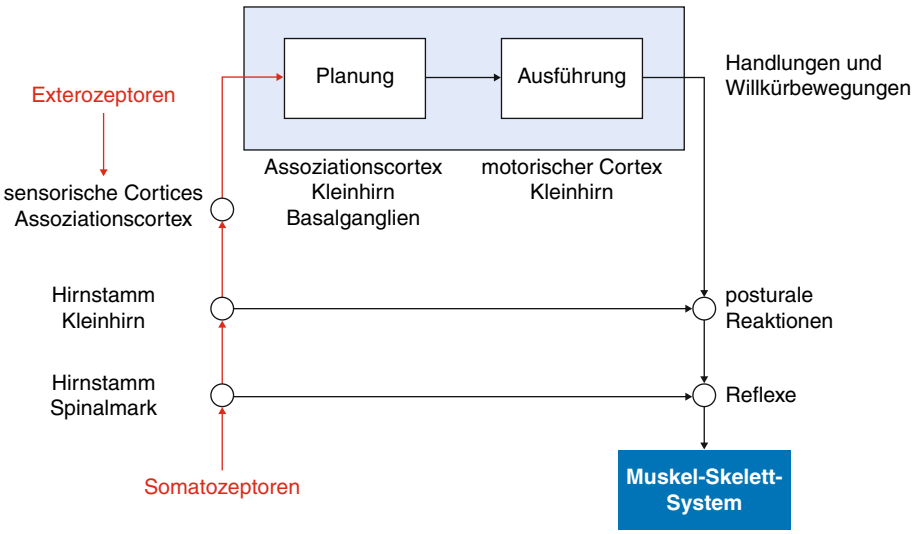


Abb. 20.7 Die Hierarchie und Heterarchie der sensomotorischen Kontrollprozesse und der neuronalen Strukturen, die an diesen Prozessen beteiligt sind. Neuroanatomisch und funktional kann man drei hierarchische Ebenen der Kontrolle unterscheiden. Spinale Dehnungs- und Eigenreflexe bilden die unterste Ebene. Posturale Reaktionen sind automatisierte Antwortmuster zur Regulation des Gleichgewichts. Beide Ebenen sind Teil der unbewussten motorischen Kontrolle. Willentliche Bewegungen oder Handlungen erfordern die Aktivierung des Cortex, der Basalganglien und des Kleinhirns. Sie bilden die oberste Ebene. Die verschiedenen Ebenen operieren nicht unabhängig voneinander, sondern bedingen und beeinflussen sich gegenseitig. Aus Gründen der Anschaulichkeit sind zahlreiche afferente und efferente Verbindungen zwischen den Ebenen nicht berücksichtigt. Exterozeptoren sind Rezeptoren für die Wahrnehmung der Umwelt, Somatozeptoren bezeichnen hier Rezeptoren für die Körperwahrnehmung (z. B. Muskelspindeln)

strukturiert ist. Passender ist daher das Bild einer hierarchischen Organisation des sensomotorischen Systems, in dem bestimmte motorische corticale und subcorticale Subsysteme in einzelnen Phasen des Planungs- und Exekutivprozesses gleichzeitig aktiv sind (Abb. 20.7).

20.3.1 Der motorische Cortex

Der motorische Cortex enthält eine zusammenhängende sensomotorische Karte des Körpers

Im Jahr 1870 entdeckten die deutschen Neurologen Gustav Fritsch und Eduard Hitzig, dass beim Hund die elektrische Stimulation der Großhirnrinde (Cortex cerebri) Muskelkontraktionen auf der kontralateralen Seite auslöste. Nahezu zeitgleich entdeckte der englische Neurologe Hughlings Jackson, dass bestimmte epileptische Anfälle, die heute als Jackson-Anfälle bekannt sind, durch Läsionen der motorischen Rinde des Großhirns verursacht werden. In nachfolgenden Untersuchungen an Affen konnte der englische Neurophysiologe Charles Sherrington (1906) nachweisen, dass die Reizung des präzentralen Gyrus (Brodmann-Areal 4) Muskelkontraktionen am leichtesten und mit der geringsten Stimulusintensität induziert. Dieser Bereich des Cortex wird heute als primärmotorischer Cortex bezeichnet (M1, Abb. 20.9A). Für Neurologen war dieser Befund besonders interessant, da eine corticale motorische Repräsentation klinische Phänomene wie Lähmung und muskuläre Schwäche nach Hirninfarkten erklären konnte. Um die „Herde" epileptischer Hirnaktivität zu bestimmen, begann der kanadische Neurochirurg Wilder Penfield in den 1930er Jahren des letzten Jahrhunderts den freigelegten Cortex von Epilepsiepatienten mit Mikroelektroden zu stimulieren. Bei der Reizung des

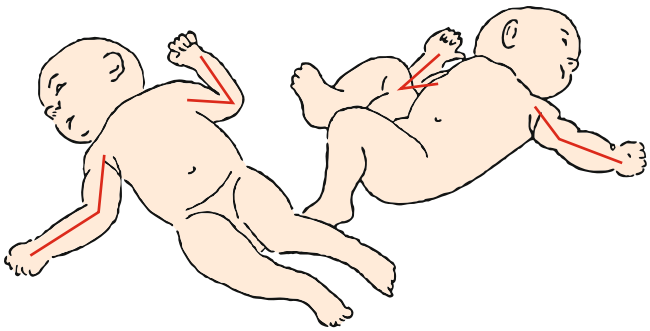


Abb. 20.8 Fechterreflex bei drei Monate alten Zwillingen. Der sensorische Reiz entsteht durch das Zur-Seite-Drehen des Kopfes. Die Bewegungsantwort besteht in der Streckung des ipsilateralen und der Beugung des kontralateralen Armes. Die Position ähnelt der eines Fechters. Der Reflex ist bei den meisten Kindern nur zwischen dem ersten und vierten Monat nach der Geburt auslösbar und „erlischt" dann. Der genaue Zweck ist unbekannt. Es wird angenommen dass er die frühe Auge-Hand-Koordination bei Säuglingen unterstützt

präzentralen Gyrus zeigte sich, dass mediale Reizorte Bewegungen der Beine induzieren, während Reizung der lateralen motorischen Hirnrinde Handbewegungen auslösen oder die Gesichtsmuskulatur aktivieren. Dies bestätigte, dass der bei Primaten gefundene Befund auch für den Menschen gilt – der primärmotorische Cortex enthält eine **somatotopische** Karte des Körpers (Penfield und Boldrey 1937). Diese Karte wird auch als *Homunculus* bezeichnet (Abb. 20.9B). Auch die Rindenareale, die unmittelbar anterior zu M1 liegen (Brodmann-Areal 6), sowie der somatosensorische Cortex enthalten somatotopische Repräsentationen, d. h., der Homunculus ist nicht spezifisch für den primärmotorischen Cortex. Den mesialen Anteil des Brodmanns-Areals 6 nannte Penfield supplementär motorisches Areal (SMA), der laterale Anteil wird als prämotorischer Cortex bezeichnet (Abb. 20.9A).

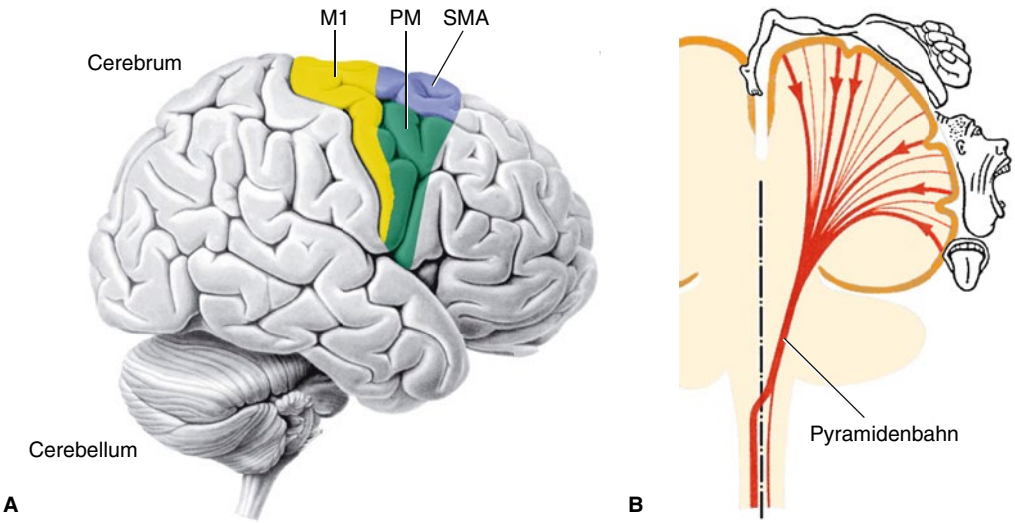


Abb. 20.9 (**A**) Motorische Rindenfelder des menschlichen Neocortex. Der primärmotorische Cortex (M1) ist im Gyrus praecentralis lokalisiert. Das supplementär motorische Areal (SMA) und der prämotorische Cortex liegen anterior zu M1. (**B**) Der Homunculus im primärmotorischen Cortex. Die anatomisch verzerrte Darstellung des Homunculus macht deutlich, dass die Größe der Rindenfelder nicht mit der Größe der kontrollierten Körperteile oder der Anzahl der innervierten Muskeln assoziiert ist, sondern dass sie der Komplexität der motorischen Funktion entsprechen (z. B. großflächige Repräsentation der Feinmotorik der Hand). (Nach Penfield und Rasmussen 1950)

Untersuchungen an Primaten zeigen, dass Neuronenpopulationen in M1 eine Reihe motorischer Parameter codieren. Wenn ein Affe Armbewegungen zu verschiedenen Zielen ausführt, verändert sich die Aktivität einer Population von Neuronen im „Armareal" von M1 etwa 100–200 ms vor Bewegungsbeginn. Die Arbeitsgruppe um den amerikanischen Neurowissenschaftler Apostolos Georgopoulos registrierte die Aktivität dieser Neurone und fand, dass ein einzelnes Neuron am stärksten auf eine bestimmte Richtung anspricht (Vorzugsrichtung) und mit niedrigeren Frequenzen bei benachbarten Zielen feuert. Betrachtet man aber die Summe der Aktivitäten aller Neurone, dann entspricht der Richtungsvektor der gesamten Population ziemlich genau der tatsächlichen Bewegungsrichtung. Vereinfacht ausgedrückt: Diese Neurone codieren die Bewegungsrichtung des Armes. Aber M1-Neurone feuern auch, wenn keine Bewegung sichtbar ist, sondern lediglich eine bestimmte Kraft erzeugt werden soll. Bei isometrischen Kraftaufgaben (z. B. Greifen eines Gegenstands mit der Hand, ohne ihn anzuheben) wird die Kraftrichtung und Kraftrate codiert (Georgopoulos et al. 1992). Diese tierexperimentellen Befunde sprechen dafür, dass eine Funktion von M1 die Codierung globaler kinematischer und dynamischer Bewegungsparameter ist. Der Homunculus in M1 ist in diesem Sinne keine zusammenhängende Karte der Skelettmuskulatur. Andere Studien unterstützen diese Bewertung: Die systematische Stimulation des Handareals bei Primaten konnte keine somatotope Repräsentation der Handmuskeln nachweisen, sondern zeigte, dass innerhalb dieses Areals die Handmuskulatur in einer frakturierten Karte repräsentiert ist (Schieber 1999). Die wiederholte Reizung desselben M1-Neurons bei unterschiedlichen motorischen Aufgaben aktiviert nicht zwangsläufig dieselben Muskelfasern (Georgopoulos et al. 1999), d. h., es besteht keine 1:1-Verknüpfung von M1-Neuron zu einer bestimmten Gruppe von Muskelfasern.

Dies wirft die Frage auf, warum es diese somatotopischen Karten im motorischen Cortex gibt und was sie neuronal repräsentieren. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich die somatotopische Organisation einfach ergibt, weil so die Länge der Axone reduziert wird, um funktional ähnliche Neurone zu größeren Netzwerken zu verbinden. Dies wird indirekt bestätigt durch neuere Studien mit optophysiologischen Bildgebungsverfahren, die Zellaktivitäten an vielen Stellen im Gehirn gleichzeitig erfassen. Zum Beispiel konnte gezeigt werden, dass sich im motorischen Cortex von Mäusen eng begrenzte Neuronencluster (~ 100 µm) befinden (Dombeck et al. 2009), die sich nach bestimmten motorischen Aktivitäten formen (z. B. Laufen oder Fellpflege). Die Aktivierungsmuster dieser Cluster zeigen eine definierte zeitliche Ordnung, die bestimmten Phasen einer Bewegungssequenz entsprechen (Hira et al. 2013). Wie breit die Aktivierung dieser Neuronencluster streut, wird deutlich, wenn man beobachtet, dass die **optogenetische** Stimulation von kaum 60 Neuronen im Mäusecortex ein weit verzweigtes corticales und corticothalamisches Netzwerk aktiviert (Stroh et al. 2013).

Während die frühen Versuche der kurzeitigen Mikrostimulation der motorischen Hirnrinde nur relativ rudimentäre Bewegungsmuster wie Muskelzucken oder einfache Bewegungen wie Beugung oder Streckung eines Gelenks hervorbrachten, haben neuere Untersuchungen am Affen gezeigt, dass längere Stimulationszeiten komplexere Bewegungssequenzen triggern können. Beispielsweise kann die Stimulation des corticalen Handareals in über mehrere Hundert Millisekunden andauernden Episoden (*pulsed trains*: 150–500 ms) Handbewegungen hervorbringen, die dem des Greifens von Gegenständen ähnlich sind (Overduin et al. 2012). Das heißt, eine länger andauernde Stimulation der motorischen Hirnrinde, die mehr dem natürlichen Feuerungsverhalten dieser Neurone bei willentlichen Bewegungen entspricht, kann funktionelle Bewegungen hervorbringen. Diese neueren Ergebnisse haben große Auswirkung auf unser Verständnis der Funktion der motorischen Cortices. Es zeigt sich in der Tat, dass corticale Neurone im motorischen Cortex, die Teil eines weit verzweigten corticalen und extracor-

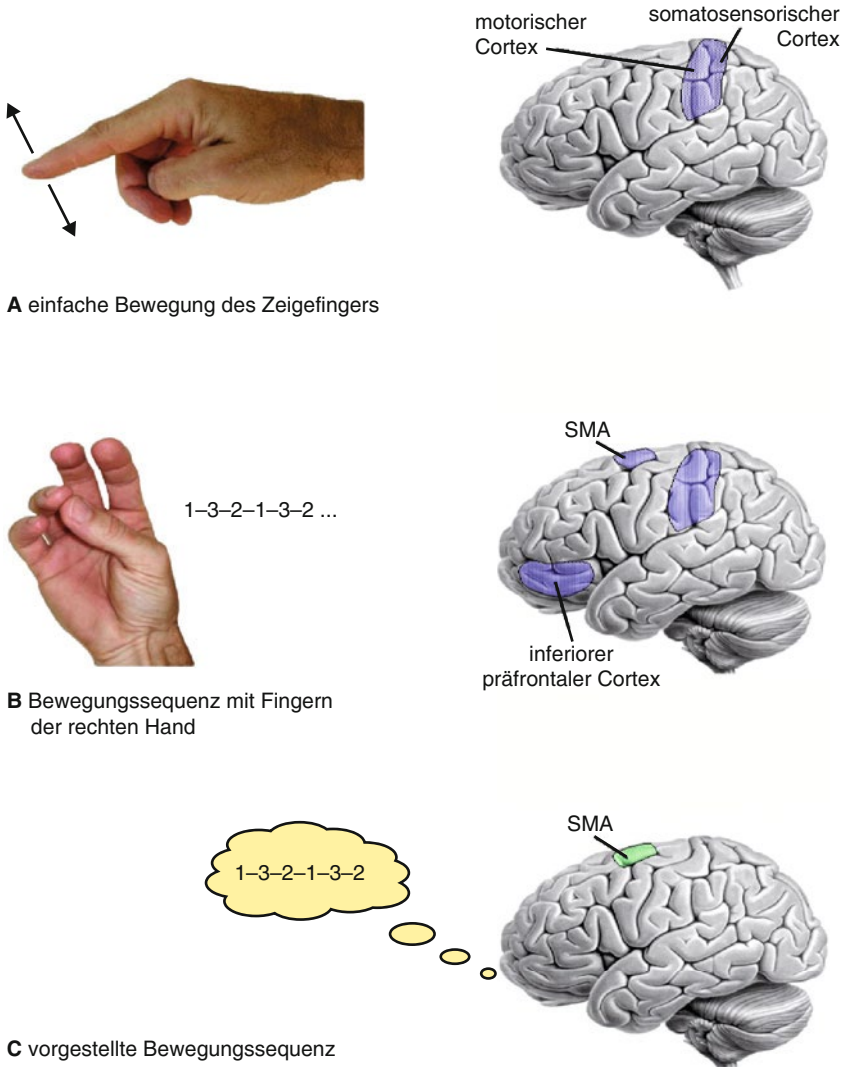


Abb. 20.10 Erhöhte metabolische Aktivität im Cortex bei motorischen Kontrollprozessen. (**A**) Bei der Ausführung von einfachen Bewegungen des rechten Zeigefingers zeigt sich eine erhöhte Aktivität in den Rindenfeldern des linken primären somatosensorischen und motorischen Cortex. (**B**) Wenn die gleichen Probanden eine komplizierte Fingersequenz der rechten Hand erlernen und ausführen, zeigen sich zusätzliche Aktivierungen im linken inferioren präfrontalen Cortex und bilateral im supplementären motorischen Areal (SMA). (**C**) Wird die gleiche Bewegungssequenz nur mental vorgestellt, kommt es zu einer beidseitigen erhöhten Aktivierung der SMA. Der Metabolismus in den primärmotorischen Rindenfeldern steigt in diesem Fall nicht signifikant. Das heißt, motorische corticale Areale werden aktiviert, ohne dass eine tatsächliche Bewegung ausgeführt wird. (Nach Roland 1993)

ticalen Netzwerks sind, sehr wohl komplexe Bewegungsmuster abbilden können.

Darüber hinaus gibt es genügend Evidenz für die Beteiligung der gesamten motorischen Cortices (M1, SMA, PM) an motorischer Kontrolle und Planung (für die Neuroanatomie s. Abb. 20.9). Per Roland (1993) und Kollegen vom Karolinska-Institut in Stockholm wiesen bereits Mitte der 1990er Jahre mithilfe von SPECT-Messungen (SPECT = *single photon emission computed tomography*) nach, dass die verschiedenen motorischen Areale der Großhirnrinde jeweils Teil eines Netzwerks sind, das während der Planung und Ausführung von Bewegung aktiv ist. Bei der Ausführung hocherlernter einfacher Bewegungen konnten sie einen erhöhten Metabolismus in den primären motorischen und somatosensorischen Rindenfeldern nachweisen. Mussten aber komplexe Bewegungssequenzen mit den Fingern ausgeführt werden, wurden zusätzliche Areale aktiviert. Neben den kontralateralen prämotorischen und supplementärmotorischen Arealen fanden sich erhöhte Aktivierungen im Kleinhirn und den Basalganglien. Stellten sich die Probanden vor, die Bewegungssequenz auszuführen, ohne ihre Muskeln zu aktivieren, konnte man noch immer eine erhöhte bilaterale Aktivität in der supplementärmotorischen Area feststellen (Abb. 20.10). Diese Ergebnisse unterstreichen, dass wir zwar formal und zeitlich zwischen Handlungsplanung und Handlungsausführung unterscheiden können (Abb. 20.7), dies aber nicht bedeutet, dass es im Gehirn zwei anatomisch streng getrennte Areale für diese beiden Funktionen gibt. Vielmehr sprechen die Ergebnisse von zahlreichen Bildgebungsstudien dafür, dass es zumindest eine teilweise Überlappung der Aktivierungen gibt.

Die motorischen Rindenfelder sind plastisch

Zahlreiche klinische und tierexperimentelle Studien belegen, dass motorische Lernprozesse das Ausmaß von neuronalen Repräsentationen in der motorischen Großhirnrinde verändern können (z. B. Nudo et al. 1996; Sanes et al. 1992; Übersicht in Monfils et al. 2005). Werden beispielsweise der Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand zusammengebunden, sodass diese beiden Finger wie ein „einziger" Finger agieren, dann verändert sich auch die Fläche dieser beiden Rindenfelder im motorischen Cortex. Die beiden Felder verschmelzen. Statt fünf gibt es nur noch vier Fingerrepräsentationen der rechten Hand. Werden nach einiger Zeit die Finger wieder getrennt, so bilden sich wieder getrennte Repräsentationen der beiden Finger. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer *neuronalen Plastizität moto-*

rischer corticaler Karten. Sie sind ein neurobiologisches Korrelat für motorisches Lernen.

Während des Erlernens einer neuen Bewegung ist nicht nur die motorische Hirnrinde aktiviert, sondern auch das Kleinhirn und das sensorische Areal im Parietal- und Temporallappen des Großhirns. Beim Übergang von der Lern- zur Könnensphase zeigt sich, dass die neuronale Aktivität auf die motorischen Areale des Neocortex konvergiert. Beispielsweise zeigen beim Erlernen einer Sequenz von Fingerbewegungen der rechten Hand die somatosensorischen Cortices einen erhöhten Metabolismus (Seitz et al. 1990), der jedoch abnimmt, wenn die Sequenz erlernt ist. Ebenso verringert sich die Aktivität im Frontallappen (Gyrus inferior frontalis) mit zunehmender Bewegungsautomatisation; die Probanden berichteten, dass sie in dieser Phase nicht mehr auf verbale Instruktionen angewiesen waren. Diese Verengung der corticalen Aktivität auf die primärmotorischen Areale ist auch tierexperimentell nachgewiesen. Bei Katzen ist der somatosensorische Cortex notwendig, um eine neue Folge von Supinationsbewegungen der Vorderpfote zu erlernen (um an eine verborgene Futterquelle zu gelangen). Ist eine Bewegungssequenz einmal erlernt, bleibt sie auch nach Entfernung des somatosensorischen Cortex erhalten (Asanuma und Keller 1991). Dies spricht dafür, dass diese neuronalen Bewegungsrepräsentationen nicht im Parietallappen abgelegt sind und nicht der Aktivierung des somatosensorischen Cortex bedürfen, um abrufbar zu sein.

- **Eine Schädigung der primärmotorischen Hirnrinde führt zur Lähmung, während Läsionen im Assoziationscortex den Bewegungsentwurf beeinträchtigen**

Lähmungen und Apraxie sind Zeichen einer Schädigung der motorischen Rindenfelder bzw. der Assoziationscortices, die auf die motorische Hirnrinde projizieren. Läsionen innerhalb des primärmotorischen Cortex führen zu Lähmung auf der kontralateralen Seite. Eine leichtere Lähmung wird als *Parese*, eine schwere bis vollständige Lähmung als *Plegie* oder *Paralyse* bezeichnet. Bei Paresen ist die Bewegungsausführung stark eingeschränkt. Die Reaktionszeiten dieser Patienten sind verlängert, sie bewegen sich langsamer, und die Koordination zwischen den einzelnen Gliedmaßen ist gestört. Bei Schädigungen des parietalen Assoziationscortex treten keine Lähmungen, sondern komplexe motorische Störungen auf, die man als **Apraxien** bezeichnet. Bei einer Apraxie ist nicht die Koordination der Einzelbewegungen gestört, sondern die ausgeführte Bewegung entspricht nicht den äußeren Gegebenheiten. Die Patienten können mit Gegenständen oder Werkzeugen nicht richtig umgehen, beispielsweise wird versucht, einen Hammer wie einen Schraubenzieher zu benutzen oder eine Kronkorkenflasche mit einem Korkenzieher zu öffnen. Es handelt sich also um ein Problem der motorischen Planung oder des Bewegungsentwurfs. Bei Kindern können in der Entwicklung Apraxien auftreten, die Sprech- und Feinmotorik beeinträchtigen. Ursache für diese kindlichen Apraxien sind in der Regel Komplikationen bei der Geburt.

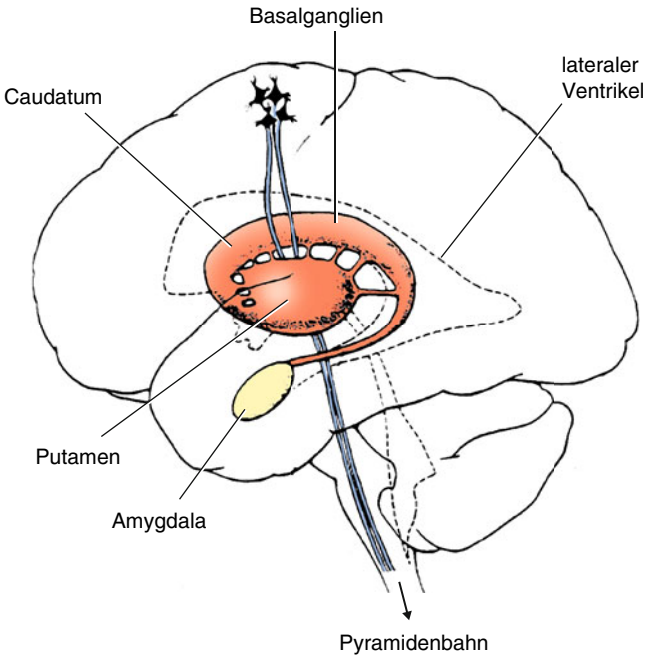


Abb. 20.11 Seitenansicht der großen Basalganglienkerne: Caudatum und Putamen. (Modifiziert nach Kandel und Schwartz 1985)

20.3.2 Die motorische Funktion der Basalganglien

Die Basalganglien (Stammhirn) sind eine Ansammlung von fünf subcorticalen Kernen. Die drei größten Kerne sind das Caudatum, das Putamen und der Globus pallidus. Sie sind verbunden mit zwei kleineren Kernen, der Substantia nigra und dem Nucleus subthalamicus und bilden mit diesen eine funktionelle Einheit. Das Caudatum (Nucleus caudatus) und das Putamen haben identische Zelltypen und werden zusammen auch als Striatum bezeichnet (Abb. 20.11).

- **Die Basalganglien, Großhirnrinde und Thalamus bilden Funktionsschleifen, in der sensorische, motorische und kognitive Information verarbeitet werden**

Die *Basalganglien* erhalten starke afferente Projektionen von nahezu allen Rindenfeldern im Großhirn. Alle corticalen und thalamischen Afferenzen erreichen die Basalganglien über das Striatum. Funktionell kann man entsprechend dem corticalen Ursprungsgebiet vier verschiedene Schleifen unterscheiden: eine skelettmotorische, eine okulomotorische, eine limbische und eine assoziative Schleife. Die assoziative Schleife hat ihren Ursprung im orbitofrontalen Cortex und im dorsolateralen Präfrontalcortex. In den Basalganglien bleiben diese Schleifen topografisch getrennt, und die entsprechenden afferenten Signale werden parallel verarbeitet und an die ursprünglichen Rindenfelder zurückprojiziert (Abb. 20.12). Die Existenz der limbischen und assoziativen Schleifen weist darauf hin, dass die Basalganglien keineswegs ausschließlich mit der Kontrolle von Willkürmotorik befasst sind, sondern auch eine kognitive Funktion besitzen und eine wichtige Rolle für die Motivation, Intention und Planung von Handlungen spielen.

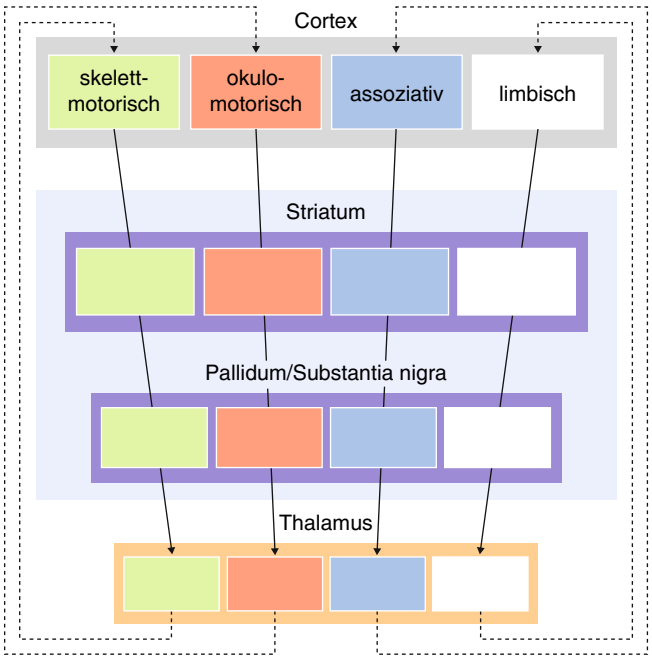


Abb. 20.12 Schema der getrennten und parallelen Verarbeitung von corticaler Information in den Basalganglien (Striatum, Pallidum, Substantia nigra). Die skelettmotorische Schleife ist nur eine von vier getrennten Funktionsschleifen. Der Output der Basalganglien wird über den Thalamus auf die entsprechenden corticalen Areale geleitet. (Nach Alexander 1995)

Das *Putamen* ist der Eingang der skelettmotorischen Funktionsschleife zu den Basalganglien. Es erhält Afferenzen von prämotorischen, primärmotorischen und somatosensorischen Rindenfeldern. Das Putamen hat wie der motorische Cortex eine somatotope Organisation. Eine wichtige Aufgabe des Putamen scheint die Integration der multiplen sensomotorischen Signale vom Cortex zu sein. Beispielsweise werden alle Signale, die Armbewegungen betreffen, in einer rostrocaudalen Säule im Putamen abgebildet (Übersicht in Wiesendanger 1998). Die Aktivität dieser Neurone korreliert ausschließlich mit Bewegungen des Arms und codiert motorische Parameter wie Bewegungsrichtung, Bewegungsamplitude und Kraft.

Die efferenten Projektionen der skelettmotorischen Basalganglienschleife gehen vom internen Globus pallidus (GPi) über den ventrolateralen Thalamus an präfrontale und prämotorische corticale Areale (Brodmann-Areal 6; Abb. 20.13). Die Basalganglien haben keine direkten efferenten Verbindungen zum Spinalmark und können die Aktivität der α-Motorneurone daher nur indirekt beeinflussen. Dieser indirekte Einfluss wird allerdings nicht nur über die Funktionsschleife Großhirn – Basalganglien ausgeübt, sondern kann auch über eine in der letzten Zeit stärker beachtete Projektion zum pedunculopontinen Nucleus (PPN) geschehen. Der PPN ist nicht Teil der Basalganglien, hat aber starke reziproke Verbindungen mit dem GPi und dem Nucleus subthalamicus. Der PPN wiederum projiziert auf reticulospinale Neurone. Daher können die Basalganglien über diese Projektion einen deszendierenden Einfluss auf spinalmotorische Aktivität ausüben (Abb. 20.13).

Die Schädigung der Basalganglien führt zu spezifischen motorischen und kognitiven Defiziten

Ein großer Teil unseres Wissens über die mögliche motorische Funktion der Basalganglien stammt aus zahlreichen Beobachtungen und Studien der klinischen Neurologie. Schädigungen der Basalganglien-Großhirn-Schleife führen zu einer Reihe von recht unterschiedlichen motorischen Störungen:

- *Bradykinese:* Verlangsamung von Bewegung.
- *Tremor:* Unwillkürliche, rhythmische Oszillationen des Körpers (z. B. Handtremor, Beintremor, Lippentremor).
- *Rigor:* Erhöhte Muskelsteifigkeit.
- *Chorea:* Schnelle, abgehackte, unwillkürliche Bewegungen.
- *Athetose:* Langsame, schlangenförmige oder kreisende Bewegungen der distalen Extremitäten.
- *Ballismus:* Heftige, großamplitudige Bewegungen.

Das Bild der beobachtbaren motorischen Symptome unterscheidet sich je nach pathophysiologischem Mechanismus

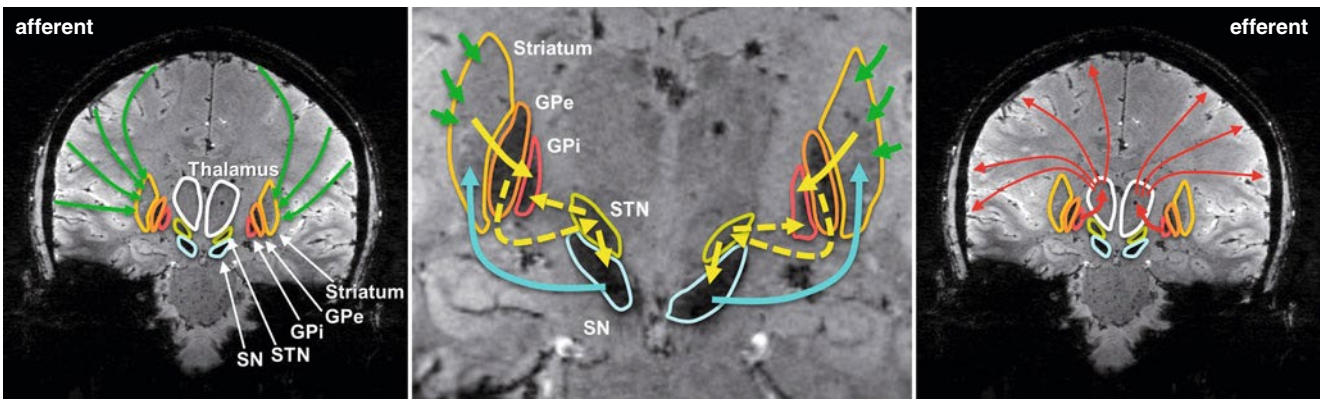


Abb. 20.13 Koronaransicht des Gehirns mit Basalganglien. Diese hochauflösende 7 T-Kernspintomografie erlaubt die Identifikation der verschiedenen Strukturen der Basalganglien. Sensorische und motorische afferente Projektionen erreichen das Striatum als Eingangsstruktur der Basalganglien. Innerhalb der Basalganglien gibt es einen direkten Pfad (Striatum – GPe – GPi) und einen indirekten Pfad (Striatum – GPe – STN – GPi). Die dopaminergen Projektionen von der Substantia nigra (SN) modulieren die Neuronenaktivität des Striatums. Der GPi ist der alleinige Ausgang der Basalganglien, dessen Efferenzen inhibitorisch auf den Thalamus wirken, der wiederum starke Projektionen zu den motorischen Arealen des Großhirns (Areal 6) aussendet. Eine weitere efferente Projektion des GPi projiziert über die pendunculopontinen Kerne auf das Spinalmark. GPe = Globus pallidus externus, GPi = Globus pallidus internus, STN = Nucleus subthalamicus, SN = Substantia nigra. (Kernspinaufnahme und Identifikation von N. Harel und C. MacKinnon, Center for Magnetic Resonance Research, University of Minnesota)

Tab. 20.2 Motorische Zeichen bei Basalganglienstörungen

Diagnose	Klinische Zeichen	Pathophysiologie	Behandlung
Parkinson'sche Krankheit	4- bis 6-Hz-Tremor bei Ruhe Bradykinese, Rigor (erhöhte Steifigkeit), verkrümmte Haltung	Degeneration der Substantia nigra verursacht Dopaminmangel	L-Dopa Dopaminagonisten Anticholinergika
Huntington'sche Krankheit	Chorea Gang- und Standinstabilität	Degeneration von cholinergen und GABAergen Neuronen im Striatum	Keine spezifische Therapie; Dopaminantagonisten
Ballismus	Heftige unwillkürliche Bewegungen	Läsion des Nucleus subthalamicus	Neuroleptika

(Tab. 20.2). Im Folgenden wird näher auf die Symptome der *Parkinson'schen Krankheit* (Morbus Parkinson) eingegangen, eine Erkrankung, die mit neurodegenerativen Veränderungen in den Basalganglien verbunden ist.

James Parkinson beschrieb 1817 in seinem *Essay on the Shaking Palsy* ein Krankheitsbild, dessen Kennzeichen stark verlangsamte Bewegungen, ein kleinschrittiges Gangbild, ein Ruhetremor und eine erhöhte Steifigkeit der Muskeln waren. Diese einzelnen Symptome waren den Medizinern seiner Zeit zwar bekannt, aber Parkinson war der Erste, der erkannte, dass diese verschiedenen Symptome die Manifestation einer einzigen Krankheit sind, die heute seinen Namen trägt. Auch Wilhelm von Humboldt, der preußische Reformer und ein Zeitgenosse von Parkinson, litt an der Parkinson'schen Krankheit (Abb. 20.14). Er hat in vielen Briefen seine motorischen Probleme eindrucksvoll geschildert. Humboldt sah „die Schwäche und das Zitterhafte" seiner Hand nicht als Ausdruck einer Krankheit, sondern meinte, seine Symptome seien lediglich Ausdruck eines überschnellen Alterungsprozesses (Brief an Charlotte Diede vom 3. Juni 1831).

Die Parkinson'sche Krankheit ist eine der häufigsten neurologischen Erkrankungen. Die neurophysiologische Ursache der Krankheit ist der Untergang der dopaminproduzierenden Neurone in der Substantia nigra (Abb. 20.13). Dopamin ist ein **Neurotransmitter**, der von vielen Neuronen in den Basalganglien und im präfrontalen Cortex benutzt wird – ca. 80 % des verfügbaren Dopamins sind in den Basalganglien lokalisiert (Bertler und Rosengren 1959). Bei den meisten Patienten wird die Krankheit im Alter von 55 bis 65 Jahren diagnostiziert. Schätzungen für Westeuropa und die USA gehen davon aus, dass ca. 1 % der Bevölkerung über 60 Jahre und 2 % der Bevölkerung über 80 Jahre die Parkinson'sche Krankheit haben (Lang und Lozano 1998). Zum Zeitpunkt der Diagnose sind bereits 70–90 % der dopaminproduzierenden Neurone in der Substantia nigra untergegangen. Aus neueren Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren (PET, SPECT) weiß man, dass der Zelluntergang etwa fünf Jahre vor dem Auftreten der ersten Symptome beginnt und im Hirnstamm beginnt (Braak et al. 2006). Der Pathomechanismus bzw. die genaue Ursache, warum diese Zellen frühzeitig absterben, ist derzeit unbekannt. Zentraler Bestandteil der Morbus-Parkinson-Therapie ist die Einnahme von Levodopa, einer chemischen Vorstufe von Dopamin. Die Einnahme von Levodopa hilft allerdings nur, die Symptome der Krankheit zu bekämpfen. Entgegen der ursprünglichen Erwartung wird der Zellverfall der nigratalen Neurone nicht aufgehalten.

Motorisch gesehen steht bei den meisten Patienten die **Bradykinese** (Verlangsamung) im Vordergrund. Die Verlangsamung

Abb. 20.14 Statuette von Wilhelm von Humboldt, die ihn in seinen späten Lebensjahren zeigt. Die vornübergebeugte Haltung ist typisch für einen Parkinson-Patienten. (Staatliche Gipsformerei Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz)

bei Parkinson-Patienten manifestiert sich durch verlängerte Reaktionszeiten auf visuelle und auditorische Stimuli und durch geringere Spitzengeschwindigkeiten und längere Bewegungszeiten bei nahezu allen repetitiven und zielgerichteten Bewegungen (z. B. beim Gehen, Sprechen, Greifen, Zeigen). Weiterhin haben die Patienten Probleme, Objektbewegungen zu antizipieren, Bewegungen zu initiieren und komplexere Bewegungssequenzen zu koordinieren (Abb. 20.15). Trotz dieser motorischen Defizite sind sie in der Lage, durch Übung ihre motorische Leistungsfähigkeit zu verbessern. Dies gilt eingeschränkt auch für Patienten mit *Morbus Huntington*, bei denen aber eine gestörte Raumwahrnehmung die motorischen Probleme überlagert. Die Lernrate bei visuomotorischen Aufgaben ist bei beiden Patientengruppen verlangsamt. Als Ursache dieser Verlangsamung werden aber eine gestörte Raumwahrnehmung und Defizite des Arbeitsgedächtnisses postuliert, nicht ein motorisches Lerndefizit (Postle et al. 1997). Neben den motorischen Symptomen können Parkinson-Patienten eine Reihe von neuropsychologischen

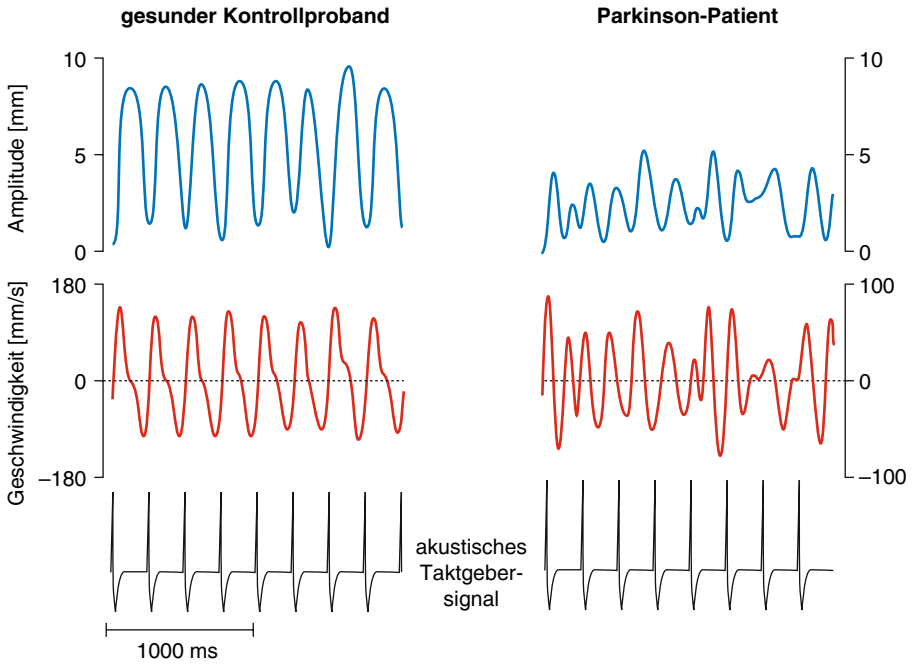


Abb. 20.15 Verlangsamte Lippenbewegungen beim Morbus Parkinson. Kontrastiert werden die Bewegungsspuren eines Patienten mit einem neurologisch gesunden Probanden gleichen Alters. Die Probanden sprachen die Silbe „pa" und hatten die Aufgabe, Silbenproduktion und den Rhythmus eines Tonsignals zu synchronisieren. Die Bewegungsamplitude und Spitzengeschwindigkeit sind beim Parkinson-Patienten stark reduziert. (Aus Konczak et al. 1997)

Auffälligkeiten zeigen. Depression und verflachter Affekt sind am häufigsten – zwischen 30 und 40 % aller Patienten werden im Krankheitsverlauf depressiv (Lang und Lozano 1998). Demenz wird bei Parkinson-Patienten 6,6-mal häufiger diagnostiziert als bei neurologisch Gesunden gleichen Alters (Mayeux et al. 1990).

Unser heutiges Verständnis über die genaue Funktion der Basalganglien für die Kontrolle der Willkürmotorik ist unvollständig. Eine zentrale These aktueller Modelle ist es, dass die efferenten Signale der Basalganglien die Aktivität von Neuronen in den Zielgebieten in ventrolateralen Thalamusbahnen enthemmen (*focused disinhibition*). Diese thalamische Neuronenaktivität moduliert wiederum die Erregbarkeit von M1. Verringerungen in der neuronalen Transmission im direkten Pfad bzw. verstärkte Aktivität im indirekten Pfad der Basalganglien, wie beim Morbus Parkinson beobachtbar, würde den inhibitorischen Einfluss auf den Thalamus drastisch erhöhen und dessen erregenden Einfluss auf den Cortex verringern. (Beide Pfade beeinflussen die Aktivität der Ausgangsneurone der Basalganglien im Globus pallidus internus; Abb. 20.13.) Ein solcher Mechanismus könnte damit auf indirektem Wege willkürmotorische Aktionen hemmen oder deren Geschwindigkeit reduzieren (Alexander 1995), d. h., er kann den klinischen Befund der motorischen Verlangsamung bei der Parkinson'schen Krankheit erklären.

20.3.3 Das Kleinhirn

- **Das Kleinhirn ist an Prozessen der sensomotorischen Integration beteiligt**

Über die genaue Funktion und Aufgabe des Kleinhirns (Cerebellum) innerhalb des Nervensystems wird bis heute kontrovers diskutiert. Seit den anatomischen und physiologischen Studien des 19. Jahrhunderts (Flourens 1824) galt es als gesichert, dass das Kleinhirn eine besondere Rolle für die Kontrolle von Bewegung besitzt. Im Gegensatz zu Flourens Sicht vom Kleinhirn als „Sitz der Koordination", glaubte Luciani (1891), dass das Kleinhirn keine spezielle motorische Funktion besitze. Luciani hatte Schwimmbewegungen bei Hunden untersucht, denen eine cerebelläre Hemisphäre entfernt worden war. Er beobachtete, dass die grundlegenden Bewegungsmuster an allen vier Extremitäten erhalten geblieben waren. Jedoch waren die Bewegungssequenzen auf der behinderten Seite unregelmäßig, unkoordiniert und hatten ihren Bewegungsfluss verloren. Luciani folgerte daraus, dass das Kleinhirn Extremitätenbewegungen nicht im eigentlichen Sinne kontrolliert, sondern lediglich einen modulierenden Einfluss auf die Willkürmotorik hat. An dem grundlegenden Befund von Luciani, dass Schädigungen des Kleinhirns nicht zu Lähmungen führen und es somit nicht zu einem kompletten Ausfall motorischer Kontrolle kommt, hat sich bis heute nichts geändert. Allerdings muss Lucianis Interpretation, dass das Kleinhirn die Willkürmotorik lediglich unterstützt, auf der Grundlage neuerer neurobiologischer und klinischer Studien wesentlich differenzierter betrachtet werden. Stand der heutigen Forschung ist, dass das Kleinhirn sowohl an motorischen als auch an zahlreichen perzeptuellen und kognitiven Prozessen beteiligt ist (Baumann et al. 2014). Befunde aus der Evolutionsbiologie weisen darauf hin, dass die überproportionale Vergrößerung des Kleinhirns des Menschen im Vergleich zu nichthumanen Primaten die Basis für eine verbesserte sensomotorische Kontrolle gewesen ist. Dies wiederum hat wesentlich die menschlichen Fähigkeiten beeinflusst, Werkzeuge zu bauen und Technologien zu erfinden und anzuwenden, um unsere Umwelt zu verändern (Barton und Venditti 2014).

Um die Funktion des Kleinhirns für sensomotorische und kognitive Prozesse zu verstehen, ist es daher sinnvoll, dessen afferente und efferente Projektionen zu kennen. Das Kleinhirn erhält umfangreiche Afferenzen von fast allen sensorischen Arealen des Großhirns (außer vom Riechhirn) und propriozeptive Information über aktuelle Gelenkpositionen und den Zustand der Skelettmuskulatur über aufsteigende spinocerebelläre Bahnen im

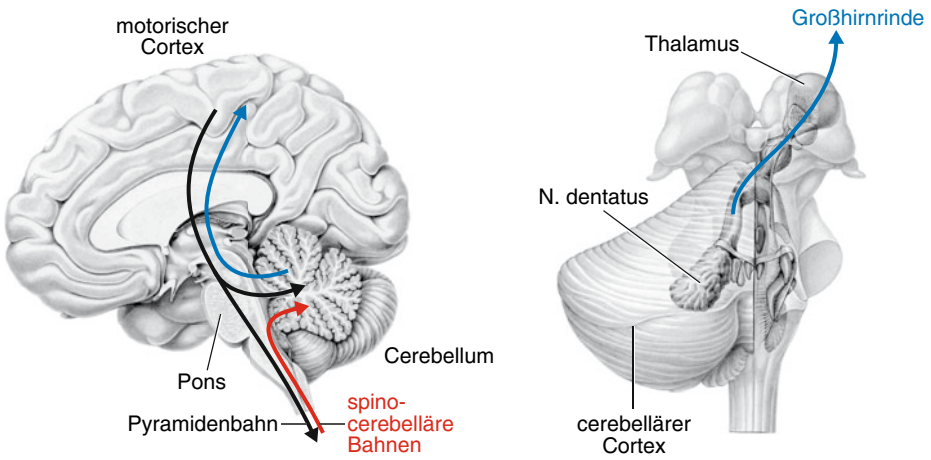


Abb. 20.16 Vereinfachtes Schema der afferenten und efferenten Verbindungen des Kleinhirns. Eine Efferenzkopie der motorischen Kommandos erreicht das Kleinhirn vom Großhirn. Signale über Körperorientierung und Gliedmaßenposition von der Peripherie werden über spinocerebelläre Bahnen zum Kleinhirncortex geleitet. Das Ergebnis cerebellärer Prozesse wird über die tiefen Kleinhirnkerne größtenteils auf Neurone der Großhirnrinde im Frontallappen projiziert. (Nach Nieuwenhuys und van Huijzen 1988)

Rückenmark. Zusätzlich innervieren etwa 20 Mio. corticobulbäre Nervenfasern die pontinen Kerne im Hirnstamm, die über Moosfasern auf das Kleinhirn projizieren (Towe 1973; Wiesendanger 1969). Das heißt, neben sensorischer Information erhält das Kleinhirn bewegungsrelevante Information direkt von den motorischen Rindenarealen des Großhirns. Im Vergleich dazu enthält die gesamte **Pyramidenbahn**, die Signale vom motorischen Cortex direkt zum Rückenmark leitet, nur maximal 1 Mio. Fasern, von denen die meisten pyramidalen Fasern auch kollaterale Fasern über die Brückenkerne an das Kleinhirn abgeben. Setzt man also die Größe dieser corticocerebellären Projektion in Relation zur Pyramidenbahn, wird deutlich, dass ein enormer sensomotorischer Informationsstrom ins Kleinhirn geleitet wird.

Alle efferenten Signale des Kleinhirns werden über die tiefen Kleinhirnkerne fast ausschließlich zum Großhirn geleitet (primär zum Assoziations- und Motorcortex). Lediglich die Nuclei fastigii projizieren bevorzugt auf die Vestibulariskerne im Hirnstamm, was darauf hinweist, dass das Kleinhirn auch an der Gleichgewichtsregulation beteiligt ist. Die übrigen Kerne entsenden überwiegend Faserbündel zu Arealen im Thalamus, die mit präfrontalen und motorischen Rindenfeldern des Großhirns kommunizieren (Abb. 20.16). Das Größenverhältnis von cerebellärem Ein- und Ausgangssignal ist ungefähr 40:1 (Tomasch 1968), d. h., cerebelläre Prozesse integrieren bzw. filtern in massiver Weise sensomotorische Information.

Das Kleinhirn ist sowohl in motorische Regelungs- als auch in Steuerungsprozesse eingebunden. Wenn die Bewegungen eines Objekts im visuellen Feld verfolgt werden, müssen die Augen dieses Objekt fixieren können. In dieser Situation codieren Neurone im Paraflocculus des Kleinhirns von Affen ein Fehlersignal für das okulomotorische System, das hilft, die retinale Bildverschiebung zu kompensieren. Somit übernehmen diese Neurone die Funktion eines Reglers (Feedbackkontrolle) bei Augenfolgebewegungen. Darüber hinaus gibt es Evidenz, dass Populationen von **Purkinje-Zellen** im cerebellären Cortex die Dynamik von Augenbewegungen codieren. Regeltechnisch ist dies konsistent mit einem neuronal codierten inversen Modell des okulomotorischen Systems (Abb. 20.2; Übersicht in Wolpert et al. 1998). Nachfolgende Untersuchungen bestätigten, dass die Aktivierungsmuster von Neuronen des okulomotorischen Systems im Hirnstamm (Nucleus prepositus hypoglossus) mit dem Output eines inversen motorischen Modells vereinbar sind. Jedoch ist deren Aktivierung nahezu identisch zu dem Feuerungsverhalten der okulomotorischen Motorneurone (Green et al. 2007). Das heißt, es ist nicht eindeutig, ob dieses neuronale Verhalten dem Verhalten eines inversen Modells entspricht oder ob es einfach einer Vorstufe oder Kopie eines motorischen Kommandos entspricht, das an die Augenmuskulatur geschickt wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Hauptaufgabe des Kleinhirns die Integration von sensomotorischer Information ist. Diese „aufbereitete" Information wird großenteils an den Hirnstamm und den Neocortex weitergeleitet, wo sie für die Kontrolle der Augenmotorik, der Gleichgewichtskontrolle und der Kontrolle der Extremitäten benutzt wird. Der Verlust dieser Information führt zu dezidierten motorischen Defiziten, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Die neuronale Aktivität des Kleinhirns ist bei motorischen Lernprozessen erhöht

Von allen Hirnarealen, die als mögliche Zentren des motorischen Lernens diskutiert werden, hat das Kleinhirn die größte Aufmerksamkeit erfahren. Als zentraler Lernmechanismus wird angenommen, dass der sensomotorische Input, der über den Pfad Moosfasern – Körnerzellen – Parallelfasern zu den Purkinje-Zellen des cerebellären Cortex gelangt und durch die afferenten Signale eines zweiten Pfades (untere Olive – Kletterfasern – Purkinje-Zellen) modifiziert wird (Albus 1971; Marr 1969). Da benachbarte Purkinje-Zellen durch Parallelfasern verbunden sind, aber jeweils nur Input von einer Kletterfaser bekommen, kann auf diese Weise die massiv konvergierende sensorische und motorische Information, die jede Purkinje-Zelle erreicht, integriert werden und durch das „Fehlersignal" der jeweiligen Kletterfaser verändert werden. Das Ergebnis dieser Operationen wird vornehmlich an motorische und präfrontale Anteile des Großhirns projiziert und kann so mittelbar zur Behebung eines „Bewegungsfehlers" benutzt werden (Abb. 20.17). Im Einklang mit diesem vorgeschlagenen Lernmechanismus stehen die Ergebnisse tierexperimenteller Studien zur Reflexkonditionierung. Nach cerebellärer Läsion ist die klassische Konditionierung des Lidschluss- und des vestibulookulären Reflexes nicht möglich und die Verstärkung dieser Reflexe nicht normal. (Der vestibulookuläre Reflex ermöglicht eine stabile visuelle Wahrnehmung bei Bewegungen des Kopfes. Bei Kopfdre-

hungen werden die Augen mit gleicher Geschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung bewegt, sodass ein Objekt weiterhin fixiert werden kann). Ein weiteres Indiz für die spezielle Rolle der unteren Olivekerne (Nucleus olivaris inferior) als „Lehrer" ist, dass ihre neuronale Aktivität während der Lernphase höher ist als in der Könnensphase (Übersicht in Thompson et al. 1998). Auch andere Formen des impliziten Lernens können bei Patienten mit Kleinhirnschädigung beeinträchtigt sein.

Zum Beispiel ist adaptives Lernen bei einer Dysfunktion des Kleinhirns beeinträchtigt. Experimente zur Prismenadaptation zeigen, dass diese Form der Adaptation bei Kleinhirnpatienten extrem gestört sein kann. Wenn gesunde Probanden rechtsverschiebende Prismengläser tragen, werfen sie beim Dart-Spiel die Pfeile zunächst rechts am Ziel vorbei. Durch mehrmaliges Üben können sie diesen Fehler verringern und die Verschiebung des visuellen Feldes nahezu vollständig kompensieren. Patienten mit Läsionen der unteren Olive, des Pedunculus inferior oder der unteren Regionen des Kleinhirncortex zeigen keine oder nur eine unvollständige Prismenadaptation. Bei Schädigung der superior-anterioren Anteile des cerebellären Cortex bleibt die visuomotorische Adaptionsfähigkeit erhalten (Martin et al. 1996). Auch propriozeptiv-motorisches Lernen ist bei Patienten mit einer Kleinhirndegeneration oder mit Läsionen im cerebellären Thalamus gestört. Solche Patienten können ihre Bewegungen gar nicht oder nur eingeschränkt an veränderte Kräfte in ihrer Umwelt anpassen (Maschke et al. 2004; Chen et al. 2006).

Schädigungen des Kleinhirns führen zu einem Verlust an Bewegungskoordination und Gleichgewichtskontrolle

Die klinischen Untersuchungen des englischen Neurologen Gordon Holmes (1917; 1939), der im Ersten Weltkrieg Soldaten mit Schusswunden im Kleinhirn untersuchte, zeigen eindrücklich, dass das Kleinhirn sowohl an der Regulation des Muskeltonus, der Kontrolle der Stütz- und Gangmotorik als auch an der Koordination einzelner Bewegungssegmente beteiligt ist. Kleine Läsionen, besonders im cerebellären Cortex, können relativ gut kompensiert werden, und die funktionelle Erholung der Patienten dauert oft nur wenige Wochen oder Monate. Größere Läsionen im Cortex und besonders die Beschädigung der tiefer gelegenen Kleinhirnkerne (Abb. 20.17) und deren efferenter Faserbündel verursachen eindeutige ataktische Bewegungsstörungen, die schlecht oder gar nicht kompensiert werden (Konczak et al. 2005). Klinisch betrachtet ist eine **Ataxie** definiert als der Mangel an Koordination ohne erkennbare muskuläre Schwäche. Das ungeordnete Zusammenspiel einzelner Bewegungsabläufe kann sich insbesondere in der Augen-, Sprech-, Rumpf- und Extremitätenmotorik zeigen (**Nystagmus**; Probleme beim Sprechen oder Sitzen; unsicherer, breitbeiniger Gang; Diener und Dichgans 1992). Die verschiedenen Symptome können als spezielle Formen der Ataxie verstanden werden:

- *Dysmetrie:* Die Unfähigkeit bei zielgerichteten Bewegungen adäquate Bewegungsimpulse zu produzieren. Das Ergebnis sind unter- oder überschießende Bewegungen.
- *Dysdiadochokinese:* Die Unfähigkeit schnelle, alternierende Bewegungen auszuführen, die ein präzises Umschalten von Agonisten- und Antagonistenmuskulatur erfordern.

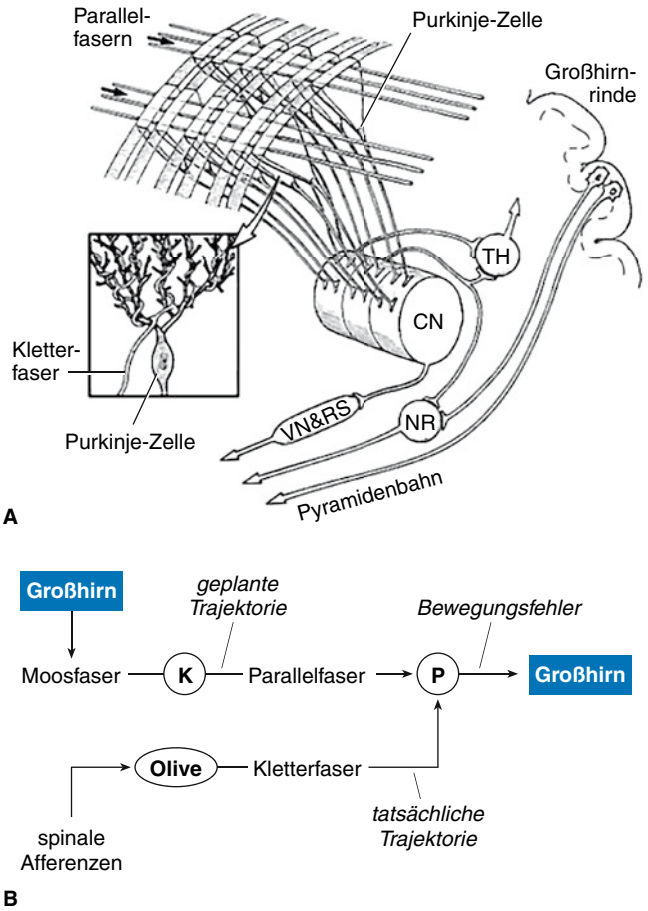


Abb. 20.17 (**A**) Interne Verbindungen des Kleinhirns. CN = cerebelläre Nuclei, NR = Nucleus ruber, TH = Thalamus, RS = reticulospinaler Trakt, VN = vestibuläre Nuclei. (**B**) Schematische Darstellung der cerebro-cerebellären Schleife. Eine Efferenzkopie der geplanten Bewegung erreicht über die Achse Moosfasern – Körnerzellen – Parallelfasern den Kleinhirncortex. Es wird angenommen, dass die kurzfristige Aktivierung der Kletterfasern die Übertragung von den Parallelfasern auf die Purkinje-Zellen bahnt. Diese Aktivität der Kletterfaser könnte so den Ist-Zustand (tatsächliche Trajektorie; augenblickliche Bewegung) des Systems codieren, der mit dem Soll-Zustand (geplante Trajektorie) verglichen wird. K = Körnerzelle, P = Purkinje-Zelle (vgl. mit Abb. 20.3A). (Aus Bloedel 1992)

- *Intentionstremor:* Im Gegensatz zum Ruhetremor beim Parkinson-Syndrom tritt dieser Tremor während der Bewegungsausführung auf. Häufig ist besonders die Endphase der Bewegung betroffen, wenn die Anforderungen an die Genauigkeit am größten sind.
- *Dysarthrie:* Verlangsamte, stockende Sprache mit ungleicher Silbenbetonung und schlechter Artikulation.

Darüber hinaus kommt es bei Läsionen in den mittleren Anteilen des Kleinhirns (Wurm, lat. *vermis*) häufig zu Problemen der Gleichgewichtsregulation, die sich durch verstärktes Schwanken beim Stand und Gang manifestiert und das Fallrisiko erhöht. In der klinischen Diagnostik kann der Grad des Verlusts an Gleichgewichtskontrolle mit der Methode der dynamischen Posturografie bestimmt werden, in der die Schwankungen des Körperschwerpunktes unter verschiedenen sensorischen Bedingungen gemessen werden. Bei diesem System kann die Standfläche oder das visuelle Umfeld dem natürlichen Schwanken des Probanden

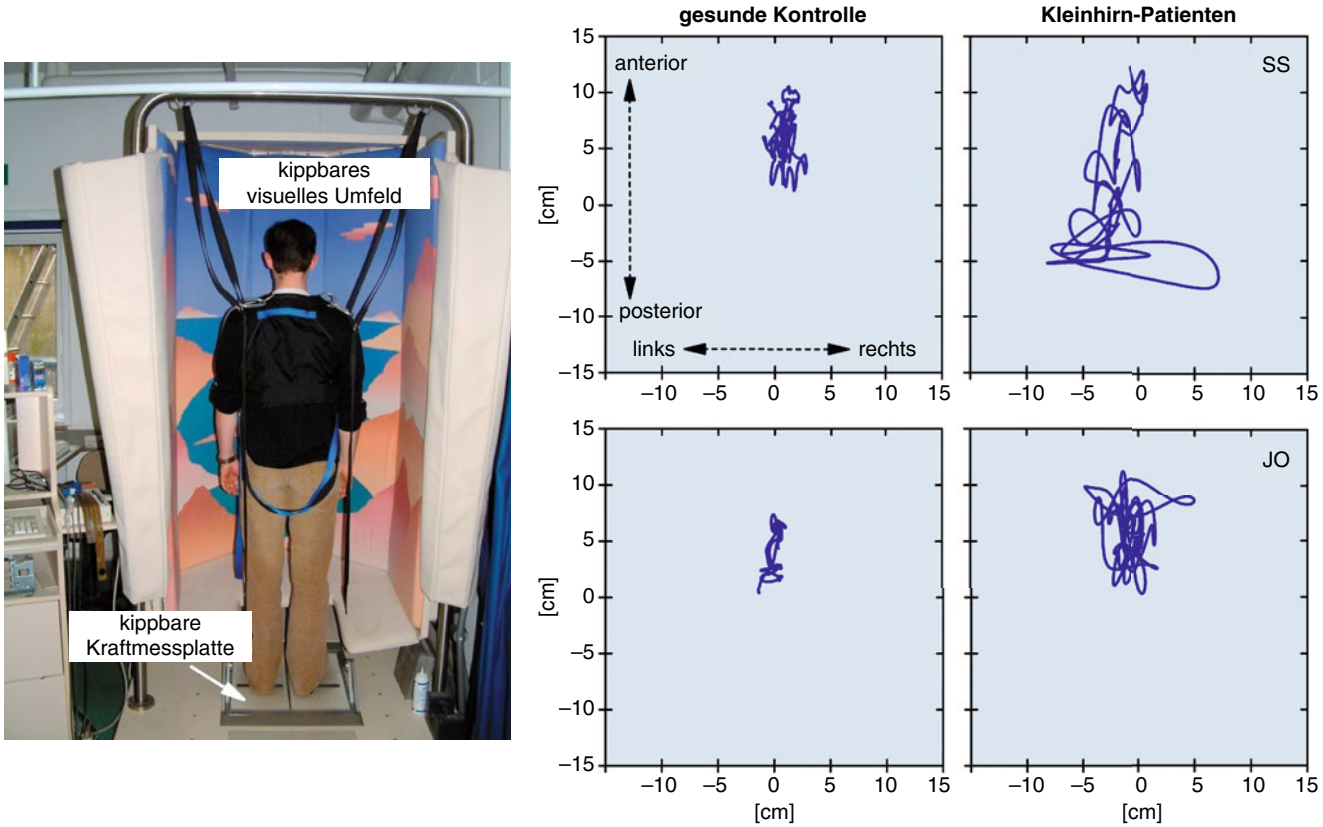


Abb. 20.18 Gleichgewichtsstörungen bei Patienten mit Kleinhirnschädigung. Die vier rechten Abbildungen zeigen den Pfad des Körperschwerpunkts über 20 s von zwei gesunden Kontrollprobanden und zwei Patienten mit Läsionen im Kleinhirnvermis nach Tumorresektion. Beim Testen waren die Augen geschlossen, und die Kraftmessplatte war *sway-referenced*. Man sieht besonders bei der Patientin SS das stark erhöhte Schwanken in alle Richtungen. Bei SS war die Messung sechs Jahre nach der Operation aufgenommen worden. (Modifiziert nach Konczak et al. 2005)

angepasst werden (*sway-referenced*) und reduziert so die postural relevante visuelle und/oder propriozeptive Information von den Knöchelgelenken (Abb. 20.18).

Außer den beschriebenen motorischen Defiziten scheinen cerebelläre Patienten in der Regel normale kognitive Fähigkeiten zu besitzen. Sie wissen um ihre Behinderung und versuchen, gezielt Strategien zu entwickeln, um Bewegungsaufgaben im Alltag trotz ihrer „eigenwilligen" Arme und Beine zu bewältigen. Da das Kleinhirn neben den motorischen Rindenfeldern auch auf präfrontale, parietale und temporale Area projiziert, wird vermutet, dass es neben seiner Funktion für die Motorik auch Kognition und Wahrnehmung beeinflusst. In der Tat gibt es vermehrt Anzeichen, dass cerebelläre Störungen die Fähigkeit zur visuellen Reizdiskriminierung sowie andere kognitive Leistungen beeinträchtigen (Schmahmann 1998).

20.4 Anwendungsbeispiele

Motorische Signale des Cortex für die direkte Steuerung von Maschinen

Die neuro- und ingenieurswissenschaftliche Forschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht, Schnittstellen zu entwickeln, in der gerichtete Hirnaktivität des Menschen direkt eine Maschine steuern soll. Die Steuerung von Maschinen mittels eines Brain-Machine-Interface (Hirn-Maschine-Schnittstelle) basiert darauf, dass schon die Vorstellung eines Verhaltens oder einer zielgerichteten Bewegung messbare Veränderungen der elektrischen Hirnaktivität auslöst. Beispielsweise führt die Vorstellung, eine Hand oder einen Fuß zu bewegen, zu spezifischen Aktivierungen des motorischen Cortex. Daher kommt der Decodierung motorischer Signale des Cortex (▶ Abschn. 20.3) eine besondere Bedeutung zu. Es ist keine Utopie mehr, sich vorzustellen, dass in Zukunft komplexe Maschinen in Echtzeit durch corticale Signale kontrolliert werden können. Die Anwendung dieser Technologie würde z. B. Amputierten helfen, „intelligente" Prothesen zu kontrollieren, oder Tetraplegikern (Querschnittlähmung aller vier Gliedmaßen) ermöglichen, einen Rollstuhl selbstständig zu bewegen.

Tiefe Hirnstimulation verbessert die Symptomatik bei Bewegungsstörungen

Die elektrische Stimulation bestimmter Zentren in den Basalganglien führt zu einer Verbesserung der Symptome bei der Parkinson'schen Krankheit. Hierzu ist ein neurochirurgischer Eingriff nötig, in dem in der Regel eine Elektrode in eine oder beide Hirnhälften implantiert wird. Ähnlich einem Herzschrittmacher werden die Elektroden durch eine im Brustkorb implantierte Batterie versorgt. Durch die Stimulation kommt es zu einer schnellen und dauerhaften Reduzierung des Tremors und zu einer Verbesserung der Bewegungsgeschwindigkeit. Die tiefe Hirnstimulation kommt auch zur Anwendung bei anderen moto-

rischen Erkrankungen, z. B. der Dystonie (nicht willentliche, abnormale Erhöhung des Muskeltonus), aber auch bei Epilepsien. Sie kann zu beträchtlichen Verbesserungen der Lebensqualität des Patienten führen.

Externe Hirnstimulation fördert die neuronale Plastizität von Patienten mit Schlaganfall

Der Schlaganfall ist eine der zahlreichsten neurologischen Erkrankungen und die dritthäufigste Todesursache in Deutschland mit ca. 63.000 Todesfällen (Heuschmann et al. 2010). Je nach Ursache und Schwere des Schlaganfalls kommt es zu einer Reihe von kognitiven, sensorischen oder motorischen Störungen. Unser gewachsenes Verständnis über die möglichen plastischen Veränderungen von corticalen und subcorticalen Netzwerken durch sensomotorische Lernprozesse hat großen Einfluss auf die Entwicklung neuerer Verfahren und Therapien in der neurologischen Rehabilitation. Es gibt heute eine Reihe von neuen, nichtinvasiven Technologien zur Neurostimulation, die versuchen, physiotherapeutische Maßnahmen zu unterstützten. Zum Beispiel werden bei der transkraniellen Magnetstimulation (TMS) über eine Spule in Kopfnähe kurzzeitig starke Magnetfelder erzeugt, die corticale Bereiche des Gehirns stimulieren oder hemmen. Ziel dieser Verfahren ist es, neuroplastische Prozesse zu fördern, um so eine schnellere oder komplettere Erholung nach Hirnstörungen zu erlangen.

20.5 Ausblick

Eine der Grundlagen empirischer Forschung in der Psychologie ist die Messbarkeit von Verhalten. Verhalten ist im engeren Sinne eine Aneinanderreihung motorischer Äußerungen. Das Studium der Kontrolle dieser motorischen Äußerungen ist von den Gründern der psychologischen Forschung als essenziell für unser Verständnis der menschlichen Psyche angesehen worden. Mit der verstärkten Vernetzung von Neurowissenschaften und Psychologie in den letzten Jahren und der Einsicht, dass zielgerichtetes Handeln immer auch intakte willkürmotorische Mechanismen erfordert, ist das Interesse an der neuronalen Grundlage motorischer Kontrollprozesse in der Psychologie gewachsen. Dieses Kapitel versucht zu verdeutlichen, welche grundlegenden Probleme vom Nervensystem gelöst werden müssen, um geplante Handlungen in intendiertes Verhalten umzusetzen, und wie komplex die neuronalen Prozesse der sensomotorischen Kontrolle beim Menschen sind. Motorische Kontrolle kann nicht auf den Abruf eines motorischen Programms aus einem imaginären Speicher im Großhirn reduziert werden. Motorische Kontrolle ist vielmehr das Ergebnis eines distributiven neuronalen Prozesses, der durch die parallele Aktivierung der cerebro-cerebellären und der Basalganglienschleife sowie des spinalen Pools von Motorneuronen charakterisiert ist.

Dem aufmerksamen Leser wird auffallen, dass in diesem Kapitel theoretische Konzepte und neurobiologische Befunde getrennt dargestellt sind. Dies hat gute Gründe. Es liegt zum einen daran, dass motorische Theorien die neuronalen Korrelate der motorischen Kontrolle oft nur ungenau bestimmen. Der motorische Programmansatz behandelt die neuronale Basis der motorischen Kontrolle großenteils wie eine Black Box. Kognitionspsychologische Ansätze wie Embodiment thematisieren das Thema der motorischen Kontrolle wenig oder gar nicht. Die Vertreter des internen Modellansatzes sind bemüht, die neuronalen Strukturen zu identifizieren, die bestimmte Funktionen des motorischen Kontrollprozesses erfüllen könnten. Dennoch erweist es sich als enorm schwierig, bestimmte Prozessphasen der motorischen Kontrolle wie Planung und Handlungsausführung eindeutig definierbaren neurophysiologischen Prozessen und Strukturen zuzuordnen. Am Beispiel des Kleinhirns wird deutlich, dass viele neuroanatomisch eingrenzbare Strukturen multifunktional sind. Das Kleinhirn ist sowohl an motorischer Regelung als auch an motorischen Steuerungsprozessen beteiligt. Es spielt eine wichtige Rolle für implizites Lernen. Sein afferenter „Output" ist, je nach Aufgabe, kongruent mit dem Output eines inversen oder eines Vorwärtsmodells. Für die Zukunft bedeutet dies, dass die Frage der Lokalisation von sensomotorischer Funktion neu gestellt werden muss. Motorische Funktion ist nicht an einem bestimmten neuroanatomischen Ort zu finden, sondern sie ergibt sich aus der Aktivität und Architektur eines neuronalen Netzwerks. Hierbei kann ein bestimmter neuroanatomischer Ort ein Teil von mehreren Netzwerken sein. Darüber hinaus sind diese Netzwerke plastisch, d. h., sie verändern sich je nach Input. Das bedeutet: Um die sensomotorische Kontrolle und seine Anbindung an kognitive Prozesse zu verstehen, müssen wir diese Netzwerke und seine Determinanten verstehen.

20.6 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Es gibt zwei Modi der motorischen Kontrolle: Regelung und Steuerung. Regelung basiert auf sensorischem Feedback, die Steuerung ist unabhängig von Feedback, benötigt aber einen Handlungsplan als Eingangssignal.
- Es lassen sich grob drei Klassen von Bewegungen unterscheiden, die das motorische System kontrollieren muss: Reflexe, automatische und Willkürbewegungen.
- Das Konzept der motorischen Programmierung thematisiert nur den ersten Teil eines Steuerungsprozesses, nämlich den der Bildung und Speicherung eines Bewegungsplanes.
- Interne motorische Modelle sind keine motorischen Programme. Sie enthalten keine konkreten Handlungsanweisungen, sondern Regeln über Verknüpfung sensomotorischer oder motosensorischer Daten für die Kontrolle oder die Vorhersage geplanter Bewegung. Sie sind Transformatoren sensomotorischer Information, keine abgespeicherte Bewegungsabfolge.
- Inverse motorische Modelle repräsentieren ein implizites Wissen über die am Körper wirkenden Kräfte (Dynamik). Sie können theoretisch dazu benutzt werden, das Muskel-Skelett-System zu steuern.
- Vorwärtsmodelle benutzen eine Kopie des motorischen Kommandos (Efferenzkopie), um die zu erwartende Sensorik vorauszusagen.
- Neurophysiologische und psychophysische Studien deuten darauf hin, dass die menschliche Bewegungssteuerung

auf internen Modellen der Motorik basieren kann. Es gibt jedoch keine eindeutige neurowissenschaftliche Evidenz für diese Annahme.
- Der motorische Cortex ist nicht der alleinige Ort motorischer Repräsentationen im Nervensystem. Motorisches Gedächtnis oder die Speicherung erlernter motorischer Bewegungsmuster ist nicht auf den motorischen Cortex reduziert.
- Läsionen im motorischen Cortex führen zu Lähmungen auf der kontraläsionalen Seite (Parese oder Plegie).
- Die intakte Funktionsschleife zwischen den Basalganglien und Großhirn ist notwendig, um Bewegung zu initiieren bzw. zu unterdrücken.
- Das Kleinhirn ist an motorischer Regelung und Steuerung und an motorischem Lernen beteiligt. Eine seiner Hauptfunktionen ist die Integration sensomotorischer Information für die Bewegungskontrolle und das Bewegungslernen.
- Läsionen im Kleinhirn führen zu einem Verlust an Bewegungskoordination (Ataxie).
- Motorisches Lernen ist bei Störungen der Basalganglien und des Kleinhirns beeinträchtigt.

Schlüsselbegriffe

Adaptation (*adaptation*) Physiologische Anpassung des Organismus an spezifische Umwelteinflüsse oder Reize. Adaptation darf nicht mit Habituation, einer Form der Anpassung an einen wiederholten, aber für den Organismus als unwichtig erkannten Reiz, verwechselt werden.

Afferent (*afferent*) Hinführend zu einem Organ oder einer bestimmten Struktur des Nervensystems, z. B. sensorische Information von Gelenkrezeptoren wird über periphere Nerven an spinale Neurone geleitet.

Apraxie (*apraxia*) Unter Ataxie (vom griechischen *apraxia* für „Untätigkeit“) wird die Unfähigkeit, sinnvolle und zweckentsprechende Bewegungen auszuführen, verstanden. Die Koordination ist nicht gestört, aber die Bewegung selbst ist der Situation nicht angemessen und falsch ausgewählt.

Ataxie (*ataxia*) Unter Ataxie (vom griechischen *ataxia* für „Unordnung“, „Verwirrung“) wird ein Mangel an Koordination ohne erkennbare muskuläre Schwäche verstanden. Das ungeordnete Zusammenspiel einzelner Bewegungsabläufe kann sich in der Augen-, Sprech-, Rumpf- und Extremitätenmotorik zeigen.

Babinski-Antwort (*Babinski sign*) Nach dem polnisch-französischen Neurologen Joseph Babinski (1857–1932) bezeichnete reflektorische Rückwärtsbewegung der großen Fußzehe, wenn der seitliche Rand des Fußes bestrichen wird. Der Babinski-Reflex ist bei Kindern im ersten Lebensjahr auslösbar. Bei Erwachsenen ist der Reflex pathologisch und tritt nur als Folge einer Pyramidenbahnschädigung auf.

Bradykinese (*bradykinesia*) Verlangsamung des Bewegungsablaufs. Bradykinese kann sich auch in verlängerten motorischen Reaktionszeiten ausdrücken.

Closed-Loop-Kontrolle (*closed-loop control*) Siehe Feedbackkontrolle.

Coriolis-Kraft (*Coriolis force*) Benannt nach Gustav Coriolis (1792–1843). Trägheitskraft, die neben der Zentrifugalkraft auf einen Körper wirkt, der sich in einem rotierenden Bezugssystem selbst bewegt. Beispiel: Bewegt sich ein Körper nördlich vom Äquator nach Norden, so lenkt ihn die Coriolis-Kraft nach Osten aus (Drehrichtung der Erde).

Deafferentierung (*deafferentation*) Unterbrechung des afferenten Informationsflusses, z. B. nach Durchtrennung eines peripheren Nervs.

Drehmoment (*torque*) Produkt aus wirkender Kraft und Kraftarm (Abstand der Kraft von der Drehachse).

Dynamik (*dynamics*) Teilgebiet der Mechanik, das sich mit der Wirkung von Kräften befasst.

Efferent (*efferent*) Aus einem Organ oder einer bestimmten Struktur des Nervensystems herausführend, z. B. motorische Signale vom Cortex an die spinalen Motorneurone.

Feedbackkontrolle (*feedback control*) Form der Systemkontrolle, die eine Rückmeldung benötigt, um ein Fehlersignal für den Regler zu generieren. Synonyme: Regelung und Closed-Loop-Kontrolle. Man unterscheidet positive und negative Feedbackkontrolle. Bei der negativen Feedbackkontrolle wird der Ist-Wert vom Soll-Wert abgezogen. Bei positiver Feedbackkontrolle werden beide Werte addiert.

Feedforwardkontrolle (*feedforward control*) Form der Kontrolle, die keiner Rückmeldung bedarf, sondern auf der Ausführung eines vorher formulierten Plans basiert. Synonyme: Steuerung und Open-Loop-Kontrolle.

Inverses Modell (*inverse model*) Kybernetisches Modell, das die umgekehrte Transformation durchführt wie das System, das es abbildet. In der Motorik vollziehen inverse Modelle eine kinematisch-dynamische Transformation. Sie berechnen aus einem raumzeitlichen Plan (Kinematik) die Kräfte (Dynamik), die notwendig sind, um den Körper der Intention entsprechend zu bewegen.

Kinematik (*kinematics*) Teilgebiet der Physik, das untersucht, wie sich die Lage eines Körpers über die Zeit verändert, ohne nach den Ursachen der Bewegung zu fragen. Typische kinematische Variable sind Position (des Körpers), Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Motorisches Engramm (*motor engram*) Begriff, der in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts geläufig war, um motorische Repräsentationen im Gehirn zu bezeichnen. Das Bild, das hinter diesen „Bewegungsspuren“ steht, ist die Schallplatte mit ihren mechanisch aufgebrachten Tonspuren.

Motorisches Programm (*motor program*) Ein Satz im Gehirn gespeicherter Bewegungsanweisungen, die abrufbar sind, bevor die Bewegung beginnt. Kognitionspsychologisches Konzept, das in den 1960er Jahren in den USA entwickelt wurde, um Bewegungssteuerung zu erklären. Es wurde von Richard Schmidt in den 1970er Jahren weiterentwickelt (generalisierte motorische Programme).

Neurotransmitter (*neurotransmitter*) Substanz, die bei der Übertragung von Erregung zwischen Synapsen freigesetzt wird (z. B. Dopamin, Acetylcholin).

Nucleus ruber (*nucleus ruber*) Rotgelblicher Kern im Mittelhirn. Sammelt Faserbahnen, die aus Kleinhirn und Großhirn zusammenströmen.

Nystagmus (*nystagmus*) Augenzittern, sichtbar als unwillkürliche Bewegungen des Augapfels in horizontaler oder vertikaler Richtung. Oft Begleitsymptom bestimmter neurologischer Erkrankungen.

Open-Loop-Kontrolle (*open-loop control*) Siehe Feedforwardkontrolle.

Optogenetik (*optogenetics*) Forschungsgebiet, das sich mit der Kontrolle von genetisch modifizierten Zellen mittels Licht beschäftigt. Fluoreszierende Calciumindikatorproteine werden in das Genom des Organismus eingebaut. Die leuchtenden Substanzen ermöglichen eine wesentlich höhere zeitliche und räumliche Auflösung als bisherige nichtinvasive Methoden wie funktionelle Kernspintomografie (fMRI) oder Positronenemissionstomografie (PET). Anders als die Stimulation von Neuronen über Mikroelektroden, die lokal begrenzt sind, können optogenetische Verfahren die Aktivität eines neuronalen Netzwerks darstellen.

Purkinje-Zelle (*Purkinje cell*) Nach dem tschechischen Physiologen J. E. von Purkinje (1787–1869) benannte birnenförmige Nervenzelle der Kleinhirnrinde.

Pyramidenbahn (*pyramidal tract*) Allgemeine Bezeichnung für den Tractus corticospinalis. Großes Nervenfaserbündel, das von der motorischen Rinde des Großhirns zu den Motorneuronen im Spinalmark zieht.

Somatotopie (*somtotopy*) Der Begriff „Somatotopie" (vom griechischen *soma* für „Körper" – im Gegensatz zu „Geist" – und *topos* für „Ort", „Platz") bezieht sich auf die anatomische Darstellung der einzelnen Körperregionen und bezeichnet im Allgemeinen eine zusammenhängende Karte des Körpers.

Tracking-Aufgabe (*tracking*) Bei Tracking-Aufgaben muss der Proband ein bewegliches Ziel mit den Augen und/oder der Hand verfolgen. Beliebtes Paradigma, um die Integration von visuellen und motorischen Prozessen zu studieren.

Vorwärtsmodell (*forward model*) Kybernetisches Modell, das die gleichen Transformationen durchführt wie das System, das es abbildet. In der Motorik vollziehen Vorwärtsmodelle eine motorisch-sensorische Transformation. Sie berechnen z. B. die zu erwartende Sensorik auf der Basis einer Kopie der motorischen Kommandos.

Weiterführende Literatur

Bernstein, N. A. (1988). Bewegungsphysiologie. Leipzig: Barth. (Ein Klassiker, der noch heute aktuell ist. Auch für Einsteiger gut lesbar.)

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J. (Eds.) (2012). Principles of neural science. 5. Aufl. New York: McGraw-Hill. (Zahlreiche sehr gut verständliche und gut illustrierte Kapitel zur Neuromotorik.)

Karnath, H.-O. & Thier, P. (Hrsg.) (2003). Neuropsychologie. Heidelberg: Springer-Verlag. (Lehrbuch zur gesamten Neuropsychologie. Enthält mehrere übersichtliche Kapitel zur Sensomotorik, Handlungssteuerung und zu neuromotorischen Störungen.)

Lehmann-Horn, F. (2011) Motorische Systeme. In R.F. Schmidt, Lang, F., & Heckmann, M. Physiologie des Menschen. Berlin-Heidelberg: Springer. (Sehr guter Überblick zur gesamten Motorik aus neurophysiologischer Sicht. Guter Einstieg für physiologisch Interessierte.)

Wiesendanger, M. (1998). Paths of discovery in human motor control. In M. C. Hepp-Reymond & G. Marini (Eds.). Perspectives of motor behavior and its neural basis (pp. 103 –134). Basel: Karger. (Kurzer historischer Abriss zur theoretischen und empirischen Sensomotorikforschung. Sehr anschaulich geschrieben unter besonderer Beachtung des Beitrags von deutschsprachigen Wissenschaftlern.)

Literatur

Albus, J. S. (1971). A theory of cerebellar function. *Mathematical Bioscience*, *10*, 25–61.

Alexander, G. E. (1995). Basal Ganglia. In M. Arbib (Hrsg.), *Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (S. 139–143). Cambridge, MA: MIT Press.

Asanuma, H., & Keller, A. (1991). Neural mechanisms of motor learning in mammals. *Neuroreport*, *2*, 217–224.

Barton, R. A., & Venditti, C. (2014). Rapid evolution of the cerebellum in humans and other great apes. *Current Opinion in Biology*, *24*(20), 2440–2444.

Baumann, O., Borra, R. J., Bower, J. M., Cullen, K. E., Habas, C., Ivry, R. B., Leggio, M., Mattingley, J. B., Molinari, M., Moulton, E. A., Paulin, M. G., Pavlova, M. A., Schmahmann, J. D., & Sokolov, A. A. (201). Consensus Paper: The Role of the Cerebellum in Perceptual Processes. *Cerebellum*, *6*, Cerebellum. 2015 Apr;14(2):197–220. doi: 10.1007/s12311-014-0627-7. Epub ahead of print

Bernstein, N. A. (1988). *Bewegungsphysiologie*. Leipzig: Barth. Original: (1947) Koordinacija dvizenj v ontogeneze (Ueber die Koordination der Bewegungen in der Ontogenese). Psichologija: Voprosy vosstanovlenija psichofiziolgceskich funkcij (Psychologie. Fragen der Wiederherstellung psychophysiologischer Funktionen. Bd. 2 Ucenye zapiski MGU, Bd. 111, S. 48–57. Moskau

Bertler, A., & Rosengren, E. (1959). Occurrence and distribution of dopamine in the brain and other tissues. *Experientia*, *15*, 10–11.

Bloedel, J. R. (1992). Functional heterogeneity with structural homogeneity: how does the cerebellum operate? *Behavioral and Brain Sciences*, *15*, 666–678.

Braak, H., Müller, C. M., Rüb, U., Ackermann, H., Bratzke, H., Vos, R. A. de, & Del Tredici, K. (2006). Pathology associated with sporadic Parkinson's disease-where does it end? *Journal of Neural Transmission*, *70*, 89–97.

Chen, H., Hua, S. E., Smith, M. A., Lenz, F. A., & Shadmehr, R. (2006). Effects of human cerebellar thalamus disruption on adaptive control of reaching. *Cerebral Cortex*, *16*(10), 1462–1473.

Crick, F. H. (1979). Thinking about the brain. *Scientific American*, *241*, 219–232.

Diener, H. C., & Dichgans, J. (1992). Pathophysiology of cerebellar ataxia. *Movement Disorders*, *7*, 95–109.

Dombeck, D. A., Graziano, M. S., & Tank, D. W. (2009). Functional clustering of neurons in motor cortex determined by cellular resolution imaging in awake behaving mice. *Journal of Neuroscience*, *29*, 13751–13760.

Dum, R. P., & Strick, P. L. (1991). The origin of corticospinal projections from premotor areas in the frontal lobe. *Journal of Neuroscience*, *11*, 667–689.

Flourens, P. (1824). *Recherches expérimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux dans les animaux vertébrés*. Paris: Crevot.

Fritsch, G., & Hitzig, E. (1870). Über die elektrische Erregbarkeit des Großhirns. *Archiv der Anatomischen und Physiologischen Wissenschaften der Medizin*, *37*, 300–332.

Gandolfo, F., Mussa-Ivaldi, F. A., & Bizzi, E. (1996). Motor learning by field approximation. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, *93*, 3843–3846.

Georgopoulos, A. P., Ashe, J., Smyrnis, N., & Taira, M. (1992). The motor cortex and the coding of force. *Science*, *256*, 1692–1695.

Georgopoulos, A. P., Pellizzer, G., Poliakov, A. V., & Schieber, M. H. (1999). Neural coding of finger and wrist movements. *Journal of Computational Neuroscience*, *6*, 279–288.

Green, A. M., Meng, H., & Angelaki, D. E. (2007). A reevaluation of the inverse dynamic model for eye movements. *Journal of Neuroscience*, *27*(6), 1346–1355.

Heuschmann, P. U., Busse, O., Wagner, M., Endres, M., Villringer, A., Röther, J., Kolominsky-Rabas, P. L., & Berger, K. (2010). Schlaganfallhäufigkeit und Versorgung von Schlaganfallpatienten in Deutschland. *Aktuelle Neurologie*, *37*, 333–340.

Hira, R., Ohkubo, F., Ozawa, K., Isomura, Y., Kitamura, K., Kano, M., Kasai, H., & Matsuzaki, M. (2013). Spatiotemporal dynamics of functional clusters of neurons in the mouse motor cortex during a voluntary movement. *Journal of Neuroscience*, *33*, 1377–1390.

Holmes, G. (1917). The symptoms of acute cerebellar injuries due to gunshot injuries. *Brain*, *40*, 463–535.

Holmes, G. (1939). The cerebellum of man. *Brain*, *62*, 1–30.

James, W. (1890/1977). Radical empiricism. In J. J. McDermott (Ed.). *The writings of William James* (pp. 134–310). Chicago: Chicago University Press.

Kandel, E. R., & Schwartz, J. H. (1985). *Principles of neural science*. Amsterdam: Elsevier.

Keele, S. W., & Posner, M. I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, *77*, 155–158.

Kelso, J. A. S. (1982). *Human motor behavior: An Introduction*. Hillsdale: Erlbaum.

Konczak, J. (1996). Benutzt das Gehirn „Motorische Programme" zur Steuerung von Bewegung? In R. Daugs, K. Blischke, F. Marschall, & H. Müller (Hrsg.), *Kognition und Motorik* (S. 41–58). Sankt Augustin: Academia.

Konczak, J., Ackermann, H., Hertrich, I., Spieker, S., & Dichgans, J. (1997). Control of repetitive lip and finger movements in Parkinson's disease: Influence of external timing signals and simultaneous execution on motor performance. *Movement Disorders*, *12*, 665–676.

Konczak, J., Schoch, B., Dimitrova, A., Gizewski, E., & Timmann, D. (2005). Functional recovery of children and adolescents after cerebellar tumour resection. *Brain*, *128*(6), 1428–1441.

Lang, A. E., & Lozano, A. M. (1998). Medical Progress: Parkinson's disease. *The New England Journal of Medicine*, *339*, 1044–1053.

Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation of a moving organ. *American Journal of Physiology*, *43*, 169–194.

Luciani, L. (1891). *Il cervelletto*. Firenze: Successori Le Monnier.

MacNeilage, P. F. (1970). Motor control of serial ordering of speech. *Psychological Review*, *77*, 182–196.

Marr, C. D. (1969). A theory of the cerebellar cortex. *Journal of Physiology (London)*, *202*, 437–470.

Martin, T. A., Keating, J. G., Goodkin, H. P., Bastian, A. J., & Thach, W. T. (1996). Throwing while looking through prisms. I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain*, *119*, 1183–1198.

Maschke, M., Gomez, C. M., Ebner, T. J., & Konczak, J. (2004). Hereditary cerebellar ataxia progressively impairs force adaptation during goal-directed arm movements. *Journal of Neurophysiology*, *91*, 230–238.

Mayeux, R., Chen, J., & Mirabello, E. (1990). An estimate of the incidence of dementia in Parkinson's disease. *Neurology*, *40*, 1513–1517.

Monfils, M. H., Plautz, E. J., & Kleim, J. A. (2005). In search of the motor engram: motor map plasticity as a mechanism for encoding motor experience. *Neuroscientist*, *11*(5), 471–483.

Nieuwenhuys, R., & Huijzen, C. van (1988). *The human central nervous system* (3. Aufl.). Heidelberg: Springer-Verlag.

Nudo, R. J., Milliken, G. W., Jenkins, W. M., & Merzenich, M. M. (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *Journal of Neuroscience*, *16*(2), 785–807.

Overduin, S. A., d'Avella, A., Carmena, J. M., & Bizzi, E. (2012). Microstimulation activates a handful of muscle synergies. *Neuron*, *76*, 1071–1077.

Parkinson, J. (1817). *An essay on the shaking palsy*. London: Whittingham & Rowland.

Penfield, W., & Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, *60*, 389.

Penfield, W., & Rasmussen, T. (1950). *The cerebral cortex of man*. New York: Macmillan.

Pfeifer, R., & Bongard, J. C. (2006). *How the body shapes the way we think. A new view of intelligence*. Cambridge: MIT Press.

Postle, B. R., Locascio, J. J., Corkin, S., & Growdon, J. H. (1997). The time course of spatial and object learning in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, *35*, 1413–1422.

Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, *9*, 129–154.

Roland, P. E. (1993). *Brain Activation*. New York: Wiley-Liss.

Sanes, J. N., Wang, J., & Donoghue, J. P. (1992). Immediate and delayed changes of rat motor cortical output representation with new forelimb configurations. *Cerebral Cortex*, *2*, 141–152.

Schieber, M. H. (1999). Somatotopic gradients in the distributed organization of the human primary motor cortex hand area: Evidence from small infarcts. *Experimental Brain Research*, *128*, 139–148.

Schmahmann, J. D. (1998). Dysmetria of thought: Clinical consequences of cerebellar dysfunction on cognition and affect. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 362–371.

Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*, 225–260.

Schmidt, R. A. (1986). *Motor Control and Learning* (2. Aufl.). Urbana-Champaign, Illinois, USA, Urbana. Champaign: Human Kinetics

Seitz, R. J., Roland, E., Bohm, C., Greitz, T., & Stone-Elander, S. (1990). Motor learning in man: a positron emission tomographic study. *Neuroreport*, *1*, 57–60.

Sherrington, C. (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven: Yale University Press.

Stroh, A., Adelsberger, H., Groh, A., Rühlmann, C., Fischer, S., Schierloh, A., Deisseroth, K., & Konnerth, A. (2013). Making waves: initiation and propagation of corticothalamic ca(2+) waves in vivo. *Neuron*, *77*, 1136–1150.

Thompson, R. F., Thompson, J. K., Kim, J. J., Krupa, D. J., & Shinkman, P. G. (1998). The nature of reinforcement in cerebellar learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, *70*, 150–176.

Tomasch, J. (1968). The overall information carrying capacity of the major afferent and efferent cerebellar cell and fiber systems. *Confinia Neurologica*, *30*, 359–367.

Towe, A. (1973). Motor cortex and pyramidal system. In J. D. Maser (Hrsg.), *Efferent organization and the integration of behavior* (S. 67–97). New York: Academic Press.

Wiesendanger, M. (1969). The pyramidal tract. Recent investigations on its morphology and function. *Ergebnisse der Physiologie, Biologie, Chemie und experimentellen Pharmakologie*, *61*, 72–136.

Wiesendanger, M. (1998). Paths of discovery in human motor control. In M. C. Hepp-Reymond, & G. Marini (Hrsg.), *Perspectives of motor behavior and its neural basis* (S. 103–134). Basel: Karger.

Wilson, A. D., & Golonka, S. (2013). Embodied cognition is not what you think it is, 12. *Frontiers in Psychology*, *4*, 58.

Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 338–347.

Wundt, W. (1874). *Grundzüge der physiologischen Psychologie*. Leipzig: Engelmann.

Embodiment und Sense of Agency

Martina Rieger und Dorit Wenke

21.1 Einleitung – 774

21.2 Handlungsvorstellungen – 777
21.2.1 Gemeinsamkeiten von vorgestellten und ausgeführten Handlungen – 778
21.2.2 Faktoren, die die Dauer von vorgestellten im Vergleich zu ausgeführten Handlungen beeinflussen – 779
21.2.3 Unterschiede von vorgestellten und ausgeführten Handlungen – 783
21.2.4 Fazit – 784

21.3 Handlungsbeobachtung – 785
21.3.1 Handlungssimulation und automatische Imitation – 786
21.3.2 Vorhersage von Handlungen anderer Personen – 787
21.3.3 Handlungssimulation und Handlungsvorhersage im sozialen Kontext – 789
21.3.4 Handlungserfahrung und Expertise – 790
21.3.5 Sind biologische Bewegungen wirklich besonders? – 791
21.3.6 Fazit – 792

21.4 Sense of Agency – 793
21.4.1 Untersuchungsmethoden – 794
21.4.2 Vorhersagbarkeit von Handlungskonsequenzen – 795
21.4.3 Flüssigkeit der Handlungsauswahl – 797
21.4.4 Valenz der Handlungskonsequenzen – 798
21.4.5 Fazit – 799

21.5 Handlungsbezogene Sprache – 800
21.5.1 Theoretische Annahmen – 800
21.5.2 Befunde – 801
21.5.3 Flexibilität und Kontextabhängigkeit – 803
21.5.4 Handlungserfahrung und Expertise – 804
21.5.5 Ebene der Handlungssimulationen – 805
21.5.6 Verständnis abstrakter Sprache und nicht handlungsbezogener Sprache – 805
21.5.7 Fazit – 806

21.6 Anwendungsbeispiele – 806

21.7 Ausblick – 808

21.8 Weiterführende Informationen – 809

Literatur – 811

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_21

Im Blickfang

Wie motorische Einfachheit Präferenzen beeinflusst

Tritt unterschwellige motorische Simulation von Handlungen auf, wenn Personen nicht planen, auf Reize zu reagieren, die sie sehen? Beeinflusst dies affektive Urteile über die Reize? Diese Fragen stellten sich Beilock und Holt (2007) in Experimenten, in denen Experten und Novizen im Zehnfingersystem beurteilen sollten, welche von zwei unterschiedlichen Buchstabenkombinationen sie bevorzugen. Eine der beiden Buchstabenkombinationen bestand aus Buchstaben, die auf einer englischen Standardtastatur (QUERTZ) gewöhnlich mit dem gleichen Finger getippt werden (z. B. F und V). Die andere Buchstabenkombination bestand aus Buchstaben, die mit unterschiedlichen Fingern getippt werden (z. B. F und J; ◘ Abb. 21.1). Zwei Buchstaben hintereinander mit dem gleichen Finger zu tippen, erzeugt motorische Interferenz und dauert gewöhnlich länger, als zwei Buchstaben mit unterschiedlichen Fingern zu tippen, d. h. Letzteres ist einfacher. Bei Experten im Zehnfingersystem aktiviert das Sehen von Buchstaben die mit dem Buchstaben assoziierte motorische Aktivität automatisch. Dies sollte dazu führen, dass Experten Buchstabenkombinationen, die mit unterschiedlichen Fingern getippt werden, gegenüber Buchstabenkombinationen, die mit den gleichen Fingern getippt werden, bevorzugen, da bei Buchstabenkombinationen, die mit unterschiedlichen Fingern getippt werden, keine motorische Interferenz entsteht.

Dies zeigte sich auch. Der Effekt trat nur bei Experten auf, jedoch nicht bei Novizen. Novizen verfügen nicht über die spezifischen Assoziationen zwischen Buchstaben und Fingern. Somit entsteht keine motorische Interferenz, wenn sie Buchstabenkombinationen sehen, die mit den gleichen Fingern getippt werden.

In weiteren experimentellen Bedingungen sollten Personen eine Zweitaufgabe ausführen. Zu Beginn eines Durchganges wurden Personen instruiert sich bestimmte Fingerbewegungen zu merken. Dann wurden Ihnen zwei Buchstabenkombinationen gezeigt, und sie gaben ein Präferenzurteil ab. Im Anschluss führen sie die zuvor instruierten Fingerbewegungen aus. Wenn die Zweitaufgabe Bewegungen der Finger beinhaltete, die verwendet werden, um die gezeigten Buchstabenkombinationen zu tippen, trat die Präferenz für Buchstabenkombinationen, die mit unterschiedlichen Fingern getippt werden, auch bei Experten nicht auf. Daraus folgt, dass dem beobachteten Präferenzeffekt tatsächlich motorische Simulation zugrunde liegt. Diese kann nicht stattfinden, wenn das motorische System anderweitig beschäftigt ist. Beinhaltete die Zweitaufgabe jedoch Bewegungen mit anderen Fingern, zeigte sich bei Experten wiederum eine Präferenz für Buchstaben, die mit unterschiedlichen Fingern getippt werden. Dies zeigt, dass motorische Simulation die spezifischen Finger beinhaltet, die zum Tippen der Buchstaben verwendet werden.

Insgesamt legen die Befunde nahe, dass bei Experten im Zehnfingersystem das Sehen von Buchstaben eine unterschwellige motorische Simulation, diese zu tippen, aktiviert. Diese wiederum kann affektive Urteile über Buchstabenkombinationen beeinflussen.

FV FJ

◘ **Abb. 21.1** Welche der beiden Buchstabenkombinationen bevorzugen Sie?

21.1 Einleitung

Lange Zeit wurde in der Kognitiven Psychologie und in den Kognitionswissenschaften Kognition als die Verarbeitung von abstrakten Repräsentationen verstanden. Wahrnehmung (als *Input*) und Motorik (als *Output*) wurden zwar als wichtige Prozesse in sich angesehen, aber nicht als relevant für das Verständnis „zentraler" oder „höherer" kognitiver Prozesse betrachtet. Nach dieser Sicht hat Wahrnehmung die Aufgabe, Rohdaten zu sammeln. Diese Rohdaten sind nicht kognitiv, sondern müssen erst in Kognitionen übersetzt werden, um weiterverarbeitet zu werden. Die Ergebnisse der kognitiven Prozesse werden wiederum in Handlungen, d. h. Bewegungen der Effektoren, übersetzt. Wahrnehmung und Handlung selbst sind demnach keine kognitiven Prozesse. Sensorische und motorische Codes können nicht direkt miteinander kommunizieren, sondern kognitive Prozesse vermitteln zwischen ihnen. Bedeutung haben kognitive Repräsentationen nur durch arbiträre Konventionen (Pylyshyn 2002; Fodor 1975). So kann beispielsweise der ursprüngliche Stimulus ein Bild eines Stuhls sein, im kognitiven System wird der Inhalt jedoch von der visuellen Modalität abstrahiert und liegt dann in einem nichtvisuellen Format vor, d. h., der Inhalt ist amodal. Wenn man sich auf den gesehenen Stuhl setzen will, müssen kognitive Repräsentationen wiederum in motorische Repräsentationen übersetzt werden, damit die Handlung ausgeführt werden kann. Diese Sichtweise kann als „kognitive Psychologie der ersten Generation" betrachtet werden (Lakoff und Johnson 1999) (◘ Abb. 21.2A).

Im Gegensatz dazu werden nach **Embodiment** *(embodied cognition*, auch verkörperte Kognition) körperliche Signale und Prozesse, innere Zustände und Handlungen als wichtiger oder obligatorischer Bestandteil kognitiver Prozesse betrachtet. Viele Embodiment-Ansätze betonen dabei vor allem, dass kognitive Prozesse durch Handlungen, Handlungsmöglichkeiten und handlungsbezogene Prozesse beeinflusst werden. Andere Ansätze (z. B. Herbert und Pollatos 2012) fassen Embodiment jedoch weiter. Insbesondere wird der Einfluss von Interozeption auf Emotionen und kognitive Prozesse betrachtet. Interozeption bezieht sich auf zwei Arten der Wahrnehmung: *Propriozeption* (Signale vom Muskelskelett) und *Viscerozeption* (Signale von den inneren Organen). Die meisten Embodiment-Ansätze beziehen Propriozeption zumindest teilweise mit ein (z. B. das kinästhetische Gefühl bei Handlungsvorstellungen). Viscerozeption wird in vielen Embodiment-Ansätzen jedoch vernachlässigt. Beispielsweise scheint es große individuelle Unterschiede in Bezug auf die Fähigkeit zu geben, den eigenen Herzschlag im

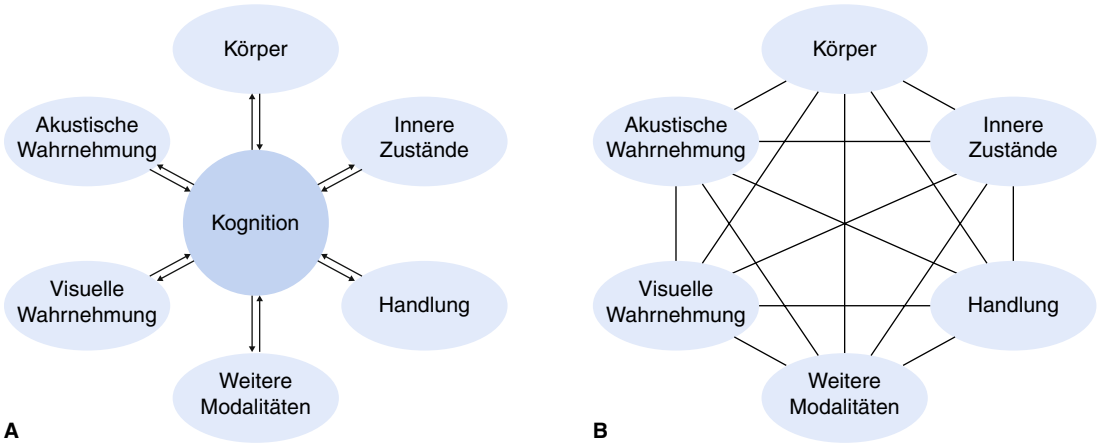


Abb. 21.2 **A** Traditionelle Sichtweise der Kognition. Kognition arbeitet separat von Wahrnehmung, inneren Zuständen und Handlung. Informationen aus verschiedenen Modalitäten müssen zur kognitiven Verarbeitung in amodale Symbole übersetzt werden. Ergebnisse kognitiver Verarbeitung müssen ebenso übersetzt werden, um Handlungen zu steuern oder top-down auf die Wahrnehmung einzuwirken. **B** Kognition aus der Sicht einer radikalen Variante von Embodiment oder verankerter Kognition. Kognition findet direkt in verschiedenen Modalitäten statt. Eine weniger radikale Position von Embodiment beinhaltet zusätzlich noch modalitätsunabhängige kognitive Prozesse

Ruhezustand wahrzunehmen, ohne nach dem Puls zu fühlen (*interozeptive Bewusstheit*). Interozeptive Bewusstheit ist sowohl für die Intensität emotionaler Reaktionen (Herbert und Pollatos 2012) und die Verarbeitung emotionaler Stimuli (Herbert et al. 2007) als auch für kognitive Prozesse wie beispielsweise Entscheidungsfindung (Werner et al. 2009; Herbert und Pollatos 2012) von Bedeutung.

Eine Erweiterung von Embodiment ist verankerte Kognition (*grounded cognition*). Verankerte Kognition betont, dass Kognition nicht immer auf körperlichen Zuständen oder Handlungen beruht, sondern auch in anderen Modalitäten verankert sein kann (wobei der Begriff „Modalität" nicht auf Sinnesmodalitäten beschränkt ist). Barsalou (1999, 2008, 2009) beispielsweise unterscheidet die modalen Systeme nach den Kategorien Wahrnehmung (z. B. Sehen, Hören), Handlung (z. B. Bewegung, Propriozeption) und Introspektion. Introspektion beinhaltet die Wahrnehmung, Überwachung und Nutzung von internen Zuständen wie Affekten, Motivation, Intentionen und Metakognition (Barsalou 2009). Auch wird gelegentlich die Verankerung von Kognition in der physischen Umgebung und in der sozialen Umgebung betont (Kiefer und Barsalou 2013).

Embodiment kann als „kognitive Psychologie der zweiten Generation" betrachtet werden (Lakoff und Johnson 1999). Kognition ist nach diesen Ansätzen modal. Modalität bezieht sich hierbei im Wesentlichen auf den Inhalt und weniger auf den Input. Embodiment sagt beispielsweise nicht, dass die Repräsentation von Bedeutung im semantischen Gedächtnis notwendigerweise von der Form des Inputs (gesprochenes Wort, gelesenes Wort oder Sehen eines Gegenstands) abhängt. Jedoch ist die Repräsentation des Inhalts modal, d. h., sie beruht auf den perzeptuellen und motorischen Charakteristiken, die mit dem dargestellten Gegenstand einhergehen. Egal ob jemand das Wort „Stuhl" sagt, liest oder ein Bild davon sieht: Es wird eine modale Repräsentation eines Stuhles aktiviert, die auf unseren visuellen Erfahrungen mit dem Aussehen von Stühlen und unserer Handlungserfahrung mit Stühlen (wir können darauf sitzen) beruht. Zusätzlich werden zur Repräsentation des Objekts Stuhl auch weitere Systeme, die im Kontext der Erfahrung mit diesem oder einem ähnlichen Objekt aktiviert wurden, zu seiner Repräsentation genutzt (Abb. 21.2B).

Weitgehende Einigkeit besteht im Hinblick auf die allgemeine Definition von Embodiment bezüglich der Annahme, dass Kognition in körperlichen Prozessen und Handlungen verankert ist und dass der Körper und Handlungen zentral für das Verständnis kognitiver Prozesse sind. Dies sind wohl auch die am meisten untersuchten Aspekte von Embodiment und das zentrale Thema dieses Kapitels. Darüber hinausgehend besteht jedoch keine Einigkeit darüber, was Embodiment genau ist (Wilson 2002). Verschiedene Ansätze lassen sich schwächeren und radikaleren Versionen von Embodiment zuordnen (Clark 1999). Die schwächere Sichtweise besagt, dass körperliche Signale und Handlungen eine bedeutende Rolle für kognitive Prozesse spielen. Der Körper und Handlungen werden als kontextuelle Faktoren gesehen, die kognitive Prozesse einschränken, welche jedoch auch ohne sie stattfinden können (vgl. auch Gallese 2008). Diese Version von Embodiment ist noch relativ nahe an die klassische Sichtweise von abstrakter Kognition angelehnt. Implizit werden hier der Körper und Handlungen nur als weitere Informationsquellen gesehen. Embodiment kann je nach Situation und Person in unterschiedlichem Ausmaß genutzt werden. Radikalere Positionen fassen Embodiment weiter und fordern ein grundsätzliches Überdenken der Sichtweise von Kognition und wie Kognition untersucht wird, da aus dieser Sicht traditionellen Konzepten der Kognition eine falsche Modellvorstellung kognitiver Prozesse zugrunde liegt (Clark 1999). Nach dieser Sicht sind alle kognitiven Repräsentationen in perzeptuellen oder motorischen Modalitäten verankert, sie sind kausal für Kognition, und es gibt darüber hinaus keine separaten kognitiven Prozesse (z. B. Barsalou 1999, 2008, 2009; Barsalou et al. 2003).

Als theoretische Grundlage ist Embodiment seit Mitte der 1990er Jahre in der Philosophie, Psychologie und den kognitiven Neurowissenschaften populär geworden (Barsalou 1999, 2008, 2009; Clark 1999; Gibbs 2005; Lakoff und Johnson 1999; Nie-

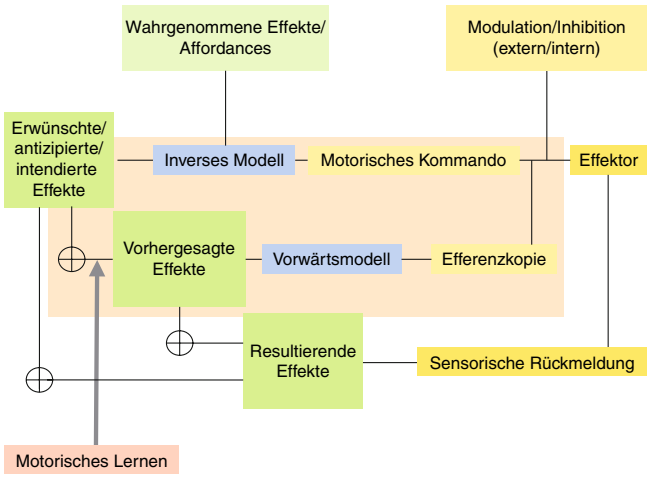


Abb. 21.3 Das Komparatormodell der Handlungskontrolle

denthal 2007; Smith und Sheya 2010; Wilson 2002). Zunehmend werden komplexe kognitive Prozesse wie Sprache, nonverbale Kommunikation und Sozialverhalten im Rahmen dieses theoretischen Ansatzes erklärt. Die Ideen, die von Embodiment vertreten werden, sind nicht grundlegend neu. Bereits Piaget (1967) betonte, dass kognitive Fähigkeiten sich aus sensomotorischen Fähigkeiten entwickeln. Im ökologischen Ansatz der Wahrnehmung (Gibson 1979) wird Objektwahrnehmung als die Wahrnehmung von Affordances (in der Umgebung bereitgestellte Handlungsmöglichkeiten; ▶ Kap. 2) verstanden. Auch theoretische Ansätze, die sich mit der Interaktion zwischen Wahrnehmung und Handlung beschäftigen, betonen, dass, im Kontrast zu traditionellen kognitiven Ansätzen, Wahrnehmung und Handlung nicht als separat betrachtet werden sollten. Beispielsweise wird im Prinzip der gemeinsamen Codierung (*common coding principle*; Prinz 1997) und in der Theorie der Ereigniscodierung (*theory of event coding*; Hommel et al. 2001) betont, dass Wahrnehmung und Handlung zumindest teilweise gemeinsame Repräsentationen und direkte Verbindungen haben (▶ Kap. 18 und 22).

Es gibt jedoch keinen einheitlichen theoretischen Rahmen, in dem sich Theorien zu Embodiment fassen lassen (Überblick in Gentsch et al. 2016). Oft werden in verschiedenen Ansätzen dieselben Begriffe für unterschiedliche Mechanismen verwendet. Ebenso werden unterschiedliche Begriffe für gleiche Phänomene oder ähnliche Mechanismen verwendet. Der Begriff **Simulation** wird beispielsweise verwendet, um die Aktivierung motorischer Prozesse zu beschreiben, die bei der Beobachtung von Handlungen anderer Personen auftritt, aber auch, um Nachdenken über die mentalen Zustände anderer Personen zu beschreiben. Ebenso wird motorische Aktivierung während der Handlungsbeobachtung „Spiegeln", „Simulieren" oder „Mentalisieren" genannt (Gentsch et al. 2016). Verschiedene theoretische Vorstellungen sind darüber hinaus bereichsspezifisch. Aus diesem Grund werden Details theoretischer Vorstellungen in den einzelnen Abschnitten zu Embodiment bei verschiedenen Handlungsphänomenen dargestellt. Dabei gibt es jedoch einen Ansatz, auf den Erklärungen für alle der in diesem Kapitel dargestellten verkörperten Handlungsphänomene mehr oder weniger stark zurückgreifen, nämlich das **Komparatormodell**.

Das Komparatormodell (Abb. 21.3) wurde ursprünglich entwickelt, um sensomotorische Kontrolle eigener Handlungen zu beschreiben (▶ Kap. 20). Inzwischen wurde dieses Modell jedoch erweitert, um Handlungssimulation in Situationen, in denen man sich selbst nicht bewegt, zu beschreiben und um zu beschreiben, wie es dazu kommt, dass man sich selbst als Autor eigener Handlungen erlebt (Frith 2012). Es beruht auf der Annahme interner Modelle (**inverser Modelle** und **Vorwärtsmodelle**) zur Handlungssteuerung (Wolpert und Miall 1996). Intendierte Handlungseffekte (z. B., man will, dass ein Licht angeht), antizipierte Handlungseffekte (z. B. die Erwartung, dass ein Licht angeht, wenn man auf einen Lichtschalter drückt), wahrgenommene Handlungseffekte (z. B., ein Pianist hört Klaviertöne in einem Konzert) oder Affordances (z. B. Sehen eines greifbaren Objekts) führen dazu, dass unter Verwendung von inversen Modellen die dazugehörigen motorischen Kommandos berechnet werden. Die aktivierten motorischen Kommandos führen gewöhnlich zu den intendierten, antizipierten oder wahrgenommenen Handlungseffekten oder stimmen mit den wahrgenommenen Affordances überein. Bevor ein motorisches Kommando zu den Effektoren gesendet wird, findet eine Modulation oder sogar Inhibition des motorischen Kommandos statt. Dies dient dem angemessenen Verhalten in einer Situation, ansonsten würde man ständig auf Stimuli aus der Umgebung, die Handlungstendenzen aktivieren, reagieren (*utilization behavior*, Lhermitte 1983). Wenn ein motorisches Kommando an die Effektoren gesendet wird, wird eine Efferenzkopie erstellt. Diese Efferenzkopie wird von Vorwärtsmodellen verwendet, um die Konsequenzen der Handlung für den Körper und die Umgebung zu berechnen, d. h. eine **Vorhersage** zu treffen (*vorhergesagte Effekte*). Vorhergesagte und intendierte/antizipierte Handlungseffekte können dann verglichen werden. Falls notwendig, können Diskrepanzen (Fehler) korrigiert werden, bevor eine Handlung (vollständig) ausgeführt ist. Wenn eine Handlung ausgeführt wird, treten auch tatsächliche Handlungseffekte (*resultierende Handlungseffekte*) auf. Diese können mit vorhergesagten und intendierten/antizipierten Handlungseffekten verglichen werden. Motorisches Lernen wird als eine Optimierung interner Modelle verstanden. Lernen durch wiederholte Handlungsausführung bewirkt, dass fortschreitend immer geringere Diskrepanzen zwischen verschiedenen Arten von Handlungseffekten bestehen.

Viele Befunde, die in anderen Kapiteln dieses Buches dargestellt werden, können als Belege oder Beispiele für Embodiment angesehen werden. Beispielsweise wird Wahrnehmung von Handlungsmöglichkeiten beeinflusst (▶ Kap. 22). Im vorliegenden Kapitel steht die zentrale Einsicht von Embodiment, dass Kognition einen engen Bezug zum Körper und zu Handlungen aufweist, im Vordergrund, auch wenn dies nicht der einzige Aspekt von Embodiment ist. Hierbei gehen wir selektiv auf ausgewählte Themen aus dem Bereich der Handlungsforschung ein. In ▶ Abschn. 21.2 geht es um Handlungsvorstellungen. Bei willkürlichen Handlungsvorstellungen findet eine explizite Simulation der Handlung statt. Dies kann als Paradebeispiel für Embodiment angesehen werden. Handlungsvorstellungen werden aber auch implizit, d. h. spontan, gebildet, um eine Aufgabe zu lösen, ohne dass man explizit dazu aufgefordert wird. ▶ Abschn. 21.3 handelt

von der Handlungsbeobachtung. Hier spielen (implizite) Simulationsprozesse eine wichtige Rolle. Wenn eigene Handlungen, eigene vorgestellte Handlungen und beobachtete Handlungen in den gleichen Systemen repräsentiert sind, stellt sich die Frage, wie wir erkennen, dass wir Autoren unserer Handlungen sind. Hierauf und inwieweit dies von eigenen motorischen Prozessen und körperlichen Signalen abhängig ist, wird in ▶ Abschn. 21.4 zum Thema Sense of Agency eingegangen. Sense of Agency bezieht sich auf das subjektive Erleben, Urheber eigener Handlungen zu sein und durch die Handlungen Ereignisse in der umgebenden Welt zu kontrollieren. In ▶ Abschn. 21.5 wird auf Embodiment beim Verständnis von Sprache eingegangen, einen Bereich, der in der Embodiment-Forschung besondere Aufmerksamkeit erfahren hat. Der Bereich wird auszugsweise, in Bezug auf handlungsbezogene Sprache, dargestellt. Das Kapitel schließt mit Beispielen aus der Anwendung (▶ Abschn. 21.6) sowie einem Ausblick (▶ Abschn. 21.7).

21.2 Handlungsvorstellungen

Nach Embodiment sind mentale Vorstellungen eine (schwächere) Reaktivierung einer Wahrnehmung oder Handlung in Abwesenheit korrespondierender Stimuli oder der tatsächlichen Ausführung einer Handlung. Es wird angenommen, dass jede Art von Wahrnehmung eine korrespondierende Art von mentaler Vorstellung hat. Wenn es um das Thema mentale Vorstellungen geht, darf die **Imagery-Debatte** (*imagery debate*) nicht unerwähnt bleiben (▶ Zur Vertiefung 21.1). Diese entstand im Rahmen der wissenschaftlichen Forschung zu visuellen Vorstellungen. Die grundlegenden Annahmen sind jedoch auf alle Formen der Vorstellungen in verschiedenen Modalitäten anwendbar, somit auch auf Handlungsvorstellungen (Iachnini 2011).

In diesem Abschnitt geht es spezifisch um *Handlungs*vorstellungen. Mit dem Begriff **Handlungsvorstellung** (auch **Bewegungsvorstellung** oder motorische Vorstellung; *action imagery*, *motor imagery*) wird die mentale Simulation einer Handlung bezeichnet, ohne dass tatsächliche Bewegungen ausgeführt werden (Decety et al. 1989; Jeannerod 1994). Stellen Sie sich vor, Sie fahren mit dem Fahrrad auf einem Schotterweg durch den Wald. Bei dieser Vorstellung spüren Sie vielleicht, wie Sie Ihre Muskeln in den Beinen anspannen und wie Sie in die Pedale treten. Außerdem bemerken Sie vielleicht, wie sich die leichten Erschütterungen vom Schotter auf Ihren Körper übertragen. Handlungsvorstellungen können sich auf komplexe Handlungen, z. B. einen doppelten Salto beim Turmspringen, aber auch auf einfache alltägliche Handlungen wie das Aufschrauben einer Flasche oder das Drücken einer Türklinke beziehen.

Die Vorstellung einer Handlung beinhaltet zumeist verschiedene Sinnesmodalitäten, da Handlungsvorstellungen von vorgestelltem sensorischen Feedback begleitet sind oder sogar darauf basieren. Es wird nicht nur die Bewegung selbst simuliert, sondern auch Charakteristiken der Umgebung und visuelle oder auditorische Effekte, die in der Umgebung erzeugt werden. Der Anteil der verschiedenen Modalitäten bei der Handlungsvorstellung nimmt dabei mit der Komplexität der Handlung zu. Schon allein bei der Vorstellung, einen Lichtschalter zu drücken, um Licht anzumachen, stellen wir uns nicht nur die Bewegung zum Lichtschalter und das Drücken desselbigen vor, sondern mitunter auch, wie der Lichtschalter aussieht, wie er (bei einem Kippschalter) aufgrund des Druckes seine Position verändert und wie schließlich das Licht angeht. In der Literatur wird oft der Begriff „motorische Vorstellung" (*motor imagery*) und nicht der Begriff „Handlungsvorstellung" (*action imagery*) verwendet. Wir reden im Folgenden bewusst von Handlungsvorstellungen und nicht von motorischen Vorstellungen, um der multimodalen Natur von Handlungsvorstellungen gerecht zu werden.

Handlungsvorstellungen können sich auf die Vorstellungen eigener Handlungen (man stellt sich vor, selbst zu rennen) oder die Vorstellungen der Handlungen einer anderen Person (man stellt sich vor, dass eine andere Person rennt) beziehen. Im Folgenden beziehen wir uns auf die Vorstellung eigener Handlungen. Eigene Handlungen können aus zwei verschiedenen Perspektiven vorgestellt werden. Zum einen aus der eigenen Perspektive, bei der man die Umwelt aus der eigenen Sicht wahrnimmt (*Erste-Person-Perspektive*). Ein bedeutsamer Teil der Vorstellung aus dieser Perspektive ist die Kinästhetik, d. h. das mit der Bewegung assoziierte Körpergefühl, aber auch visuelle Vorstellungen spielen hier eine wichtige Rolle. Zum anderen aus der Außenperspektive, bei der man sich selbst betrachtet, ähnlich wie wenn man sich in einem Video sieht (*Dritte-Person-Perspektive*). Die Erste-Person-Perspektive wird mit einem stärkeren Ausmaß von Embodiment assoziiert (Lorey et al. 2009).

Handlungsvorstellungen können *explizit* (z. B., wenn man aufgefordert wird, sich eine Handlung vorzustellen) oder *implizit* (sie treten spontan auf und werden genutzt, um Aufgaben zu lösen, ohne dass man sich dessen bewusst ist) sein. Wenn man sich beispielsweise im Winter überlegt, nicht auf dem vereisten Teil des Gehweges zu gehen, sondern auf dem Teil, auf dem Rollsplitt liegt, wird man sich automatisch vorstellen, wie es wäre, auf den verschiedenen Untergründen zu gehen (und sich möglicherweise sogar vorstellen, wie man auf dem Eis ausrutscht). In diesem Abschnitt stehen explizite Handlungsvorstellungen im Vordergrund.

Schon lange besteht ein Interesse an Handlungsvorstellungen (z. B. Jacobson 1932) und mentalem Training (z. B. Perry 1939; ▶ Abschn. 21.6), bei dem Handlungsvorstellungen ein wesentlicher Bestandteil sind. Dennoch waren Handlungsvorstellungen lange Zeit ein vernachlässigtes Thema in der psychologischen Forschung. Dies lag wahrscheinlich an der introspektiven Natur von Handlungsvorstellungen und mentalen Vorstellungen generell. Erst seit ca. 25 Jahren nimmt dieses Thema einen festen Platz in der psychologischen Forschung ein. Im Folgenden wird auf Gemeinsamkeiten und gemeinsame Prozesse bei Handlungsvorstellung und Handlungsausführung eingegangen (▶ Abschn. 21.2.1). Danach wird ein Überblick über verschiedene Faktoren, die einen Einfluss auf die Dauer von vorgestellten im Vergleich zu ausgeführten Handlungen haben, gegeben (▶ Abschn. 21.2.2): Handlungscharakteristiken, individuelle Unterschiede und Erfahrung sowie situative Faktoren. Im Anschluss wird auf Prozesse, die sich zwischen Handlungsvorstellung und Handlungsausführung unterscheiden, eingegangen (▶ Abschn. 21.2.3). Das Thema wird mit einem Fazit abgeschlossen (▶ Abschn. 21.2.4).

Zur Vertiefung 21.1

Die Imagery-Debatte

Streitpunkt der Imagery-Debatte (*imagery debate*) war nicht die Existenz mentaler Vorstellungen, derer wir uns introspektiv bewusst sind und die in unserer subjektiven Erfahrung wahrnehmungsähnlich sind. Es ging vielmehr darum, welcher Art die Repräsentationen sind, die bewussten mentalen Vorstellungen zugrunde liegen. Dabei standen sich zwei Positionen gegenüber. Nach der *propositionalen Theorie* beruhen mentale Vorstellungen auf abstrakten, amodalen Symbolen, d. h., sie sind propositional (Pylyshyn 1981, 2002). Die Sichtweise der propositionalen Theorie entspricht der klassischen Sichtweise von Kognition, nach der kognitive und perzeptuelle Repräsentationen in getrennten Systemen verarbeitet werden, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten (Fodor 1975).

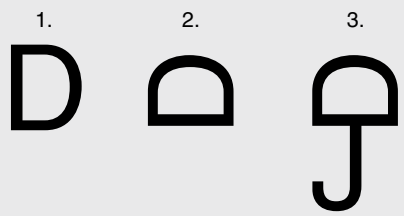
Nach der *analogen Theorie* sind mentale (visuelle) Vorstellungen wahrnehmungsähnlich, d. h. analog (Kosslyn 1981, 1994, 2005). Die sensorische Modalität ist eine wichtige und informative Eigenschaft der Repräsentationen: Charakteristiken der Modalität bestimmen, wie etwas repräsentiert wird und verarbeitet werden kann (Finke et al. 1989; Kosslyn et al. 1978; Shepard und Cooper 1986). Es wurde nicht angezweifelt, dass auch propositionale Repräsentationen existieren, sondern lediglich, dass diese allein mentalen Vorstellungen zugrunde liegen (Kosslyn 1981). Die theoretische Annahme von analogen Repräsentationen bei mentalen Vorstellungen kann als Beispiel für eine schwächere Form von Embodiment betrachtet werden, auch wenn sie ursprünglich nicht diesem theoretischen Rahmen entspringt (Iachini 2011).

Die experimentelle Forschung hat schon früh gezeigt, dass die strukturelle und funktionelle Verarbeitung von mentalen Bildern und visuellen Wahrnehmungseindrücken ähnlich sind. Beispielsweise zeigen Studien, dass sowohl das tatsächliche Scannen als auch das mentale Scannen eines Bildes umso länger dauert, je größer die zu scannende Distanz ist (Kosslyn et al. 1978). Mentale Vorstellungen sind flexibel und können transformiert werden – in der Vorstellung kann Neues geschaffen werden. Versuchen Sie es selbst:

- Stellen Sie sich den Großbuchstaben D vor.
- Drehen Sie den Buchstaben um 90° nach links.
- Jetzt platzieren Sie den Großbuchstaben J an das untere Ende.
- Was sehen Sie?

Falls Sie es nicht herausgefunden haben, sehen Sie sich ◘ Abb. 21.4 an. Im Unterschied zur analogen Sichtweise argumentieren Vertreter der propositionalen Position, derartige Befunde seien kein Beleg dafür, dass analoge Vorstellungen ursächliche Prozesse der Informationsverarbeitung darstellen, d. h. funktional sind (Pylyshyn 2002). Wenn Personen aufgefordert werden, sich etwas vorzustellen, interpretieren sie die Aufgabe als eine Aufforderung, so viele Aspekte wie möglich, die ihnen für die vorzustellende Situation relevant erscheinen, nachzubilden. Mentale Bilder entstehen somit als *Epiphänomen*, d. h. sekundäres Phänomen, das durch propositionale Repräsentationen verursacht ist und diese begleitet, selbst jedoch keinen kausalen Einfluss auf die Informationsverarbeitung hat.

Durch das Aufkommen bildgebender Verfahren entstand ein weiterer Weg zur wissenschaftlichen Erforschung mentaler Vorstellungen. Es konnte gezeigt werden, dass bei visuellen Vorstellungen und visueller Wahrnehmung ungefähr zwei Drittel der Areale überlappen (Kosslyn et al. 1997). Bei visuellen Vorstellungen beobachtet man Aktivität im Okzipitallappen, oft auch im primären visuellen Cortex (Kosslyn und Thompson 2003). Dies wird von Vertretern der analogen Position als Beleg für modalitätsspezifische Verarbeitung visueller Vorstellungen betrachtet (Kosslyn und Thompson 2003). Ähnliches wurde in der Folgezeit auch für weitere Modalitäten gezeigt: *Auditorische Vorstellungen* aktivieren auditorische Areale (z. B. Halpern et al. 2004). *Motorische Vorstellungen* aktivieren motorische Areale, oft auch den primären motorischen Cortex (z. B. Lotze et al. 1999). *Gustatorische Vorstellungen* aktivieren den gustatorischen Cortex (Kobayashi et al. 2004). Vertreter der propositionalen Position argumentieren dennoch, dass eine Aktivierung des primären visuellen Cortex noch nicht zeigt, dass diese kausal in der Informationsverarbeitung von visuellen Vorstellungen ist. Vielmehr könnte auch diese Aktivierung ein Epiphänomen sein (Pylyshyn 2002). Die Imagery-Debatte ist somit nicht letztendlich gelöst, wobei die meisten Wissenschaftler heutzutage von der Existenz funktionaler analoger Repräsentationen ausgehen.



◘ **Abb. 21.4** Beispielaufgabe aus der Studie von Finke et al. (1989). Personen werden aufgefordert, sich 1. den Großbuchstaben *D* vorzustellen, 2. diesen Buchstaben in der Vorstellung um 90° nach links zu drehen und 3. ein J an das untere Ende zu platzieren. Dann werden sie gefragt, was sie in ihrer Vorstellung sehen. Die meisten Personen haben keine Schwierigkeiten, einen Regenschirm zu erkennen

21.2.1 Gemeinsamkeiten von vorgestellten und ausgeführten Handlungen

Früher wurde davon ausgegangen, dass die kognitiven Prozesse bei Handlungsvorstellungen weitgehend mit den Prozessen der Planung und Vorbereitung von tatsächlichen Handlungen identisch sind (Decety 1996; Jeannerod 1994). Inzwischen wird jedoch angenommen, dass Handlungsvorstellungen eine komplette Simulation der Handlung beinhalten, die auch Prozesse der Handlungsausführung einschließt. Diese Annahme wird u. a. von Studien, in denen bildgebende Verfahren verwendet wurden, gestützt. Diese zeigen, dass Strukturen, die spezifisch an der Ausführung von Handlungen beteiligt sind, während Handlungsvorstellungen aktiv sind (z. B. Macuga und Frey 2012).

Einhergehend mit den Ideen von Embodiment werden Handlungsvorstellungen in der Regel als multimodale, dynamische Phänomene verstanden, die auf bewussten Simulationen beruhen. Sie basieren auf Erfahrungen, die man mit dieser oder ähnlichen Handlungen gemacht und die im (motorischen) Gedächtnisses gespeichert sind (Annett 1996). Die in ▶ Abschn. 21.1 dargestellten Prozesse im Komparatormodell können auch bei Handlungsvorstellungen stattfinden (Davidson und Wolpert 2005). Bei Handlungsvorstellungen, beispielsweise wenn man sich vorstellt, einen Handstand zu machen, werden im Gehirn zunächst unter

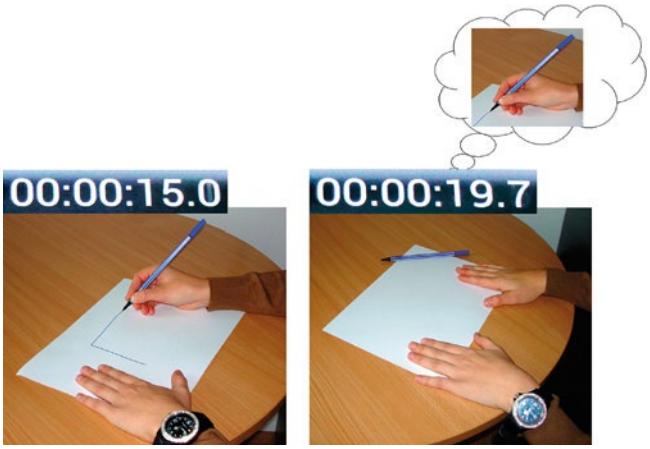


Abb. 21.5 Paradigma der mentalen Chronometrie. Versuchspersonen führen eine Handlung tatsächlich aus und stellen sich die gleiche Handlung vor. Es wird jeweils die Zeit gemessen, die dann verglichen wird

Verwendung von inversen Modellen passende motorische Kommandos gewählt, um mit dem richtigen Kraftaufwand die Bewegung einzuleiten. Diese motorischen Kommandos müssen jedoch gehemmt werden, damit keine tatsächliche Bewegung stattfindet (▶ Abschn. 21.2.3). Man führt den vorgestellten Handstand nicht tatsächlich aus. Die motorischen Kommandos könnten jedoch von Vorwärtsmodellen genutzt werden, um Veränderungen am Körper und in der Umgebung, die aufgrund der Handlung auftreten, vorherzusagen (Davidson und Wolpert 2005; Grush 2004).

Im Einklang mit theoretischen Annahmen, die von ähnlichen Prozessen bei vorgestellten und ausgeführten Handlungen ausgehen, konnten viele Gemeinsamkeiten zwischen vorgestellten und ausgeführten Handlungen beobachtet werden. Auf neuronaler Ebene konnte gezeigt werden, dass während der Vorstellung einer Handlung und während der Ausführung der gleichen Handlung eine große (wenn auch nicht vollständige) Übereinstimmung in aktivierten Hirnarealen besteht. Motorische corticale Areale, wie der prämotorische Cortex und das supplementär motorische Areal, und subcorticale Areale, wie das Cerebellum und die Basalganglien, sind während der Handlungsvorstellung aktiv (Übersicht in Decety 1996; Guillot et al. 2008; Munzert et al. 2009). Oft wird auch eine Aktivierung des primären motorischen Cortex beobachtet (z. B. Lotze et al. 1999; Porro et al. 2000). Es wurde auch gezeigt, dass der Inhalt von Handlungsvorstellungen im Muster corticaler Aktivierungen reflektiert ist: die Vorstellung von Hand-, Fuß- und Zungenbewegungen aktiviert spezifisch die korrespondierenden corticalen motorischen Bereiche (Ehrsson et al. 2003).

In den meisten Verhaltensstudien werden zeitliche Aspekte untersucht, d. h., es findet ein Vergleich der Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen statt (**Paradigma der mentalen Chronometrie**; Abb. 21.5) (Guillot und Collet 2005; Jeannerod 1994; Jeannerod und Frak 1999; McAvinue und Robertson 2008). Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass eine ähnliche Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen Ähnlichkeiten im Fortschritt der Planung und Ausführung einer Handlung reflektiert und dass ähnliche Zeiten durch ähnliche zugrunde liegende Prozesse hervorgerufen werden. Eine ähnliche Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen hat sich bei vielen unterschiedlichen Handlungen gezeigt, z. B. beim Aufsagen des Alphabets (Landauer 1962), beim Schreiben eines Satzes und beim Malen eines Würfels (Decety und Michel 1989), beim Gehen (z. B. Decety et al. 1989; Kunz et al. 2009) und Rudern (Barr und Hall 1992). Korrelationen zwischen der Dauer von Vorstellung und Ausführung, die reflektieren, dass individuelle Unterschiede in der Ausführungszeit auch in der Vorstellung zum Tragen kommen, wurden ebenfalls beobachtet, z. B. beim Tippen auf einer Tastatur (Rieger 2012) und beim Gehen (Decety et al. 1989). In ▶ Zur Vertiefung 21.2 wird eine klassische Studie beschrieben, in der das Paradigma der mentalen Chronometrie verwendet wurde (Decety et al. 1989).

Weiterhin zeigt sich, dass bei Handlungsvorstellungen eine Reihe von Faktoren und biomechanischen Begrenzungen berücksichtigt werden, die bei tatsächlichen Handlungen eine Rolle spielen. Beispielsweise beeinflussen physikalische Gesetze der Trägheit und Gravitation (Papaxanthis et al. 2002, 2003), Unterschiede in der Schreibgeschwindigkeit der rechten und der linken Hand (Decety und Michel 1989), verschiedene Bewegungsschwierigkeiten (Decety und Jeannerod 1996), Prinzipien der bimanuellen Koordination (Dahm und Rieger 2016) und Charakteristiken von Werkzeugen wie die Dicke eines Stiftes (Rieger und Massen 2014) Handlungsvorstellung auf ähnliche Art und Weise wie Handlungsausführung.

Solche Ähnlichkeiten haben dazu geführt, dass manche Forscher vorgestellte Handlungen als Ersatz für ausgeführte Handlungen verwendet haben, um komplexe Körperbewegungen mit bildgebenden Verfahren zu untersuchen. Diese Praxis ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten, da auch Unterschiede zwischen vorgestellten und ausgeführten Handlungen bestehen (kritische Diskussion in Dietrich 2008).

21.2.2 Faktoren, die die Dauer von vorgestellten im Vergleich zu ausgeführten Handlungen beeinflussen

Unterschiede in der Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen werden oft so interpretiert, dass die Person Schwierigkeiten hat, sich die Handlung angemessen vorzustellen. Auch bei Patienten mit Hirnschädigungen werden Schwierigkeiten, die zeitlichen Charakteristiken in der Vorstellung beizubehalten, oft als Beeinträchtigung der Vorstellungsfähigkeit betrachtet (Decety und Boisson 1990; Sirigu et al. 1996). Von einer Übereinstimmung bzw. Nichtübereinstimmung auf gute bzw. schlechte Vorstellungsfähigkeit zu schließen, ist jedoch nicht trivial. Viele Faktoren (natürlich auch die Vorstellungsfähigkeit) können die zeitliche Übereinstimmung von vorgestellten und ausgeführten Handlungen verändern. Zeitliche Ungenauigkeit bedeutet nicht notwendigerweise, dass die Inhalte der mentalen Vorstellung inadäquat sind (Guillot et al. 2012a).

Zeitliche Unterschiede sind manchmal subtil. Beispielsweise fanden Calmels et al. (2006), dass die Gesamtdauer eines komplexen gymnastischen Sprunges in der Handlungsvorstellung und Handlungsausführung ähnlich war. Jedoch ergab die Analyse

Zur Vertiefung 21.2

Mentale Chronometrie – eine klassische Studie

Decety et al. (1989) zeigten ihren Versuchspersonen (die alle eine gute visuelle Vorstellungsfähigkeit hatten) Ziele, die 5 m, 10 m oder 15 m entfernt waren. Nachdem eine Versuchsperson ein Ziel 5 s betrachtet hatte, wurden ihr die Augen verbunden. Sie wurde dann aufgefordert, eine mentale Repräsentation des Weges und des Zieles zu bilden. Nach weiteren 5 s wurde die Versuchsperson aufgefordert, entweder im normalen Tempo tatsächlich zum Ziel zu laufen oder sich das Laufen zum Ziel vorzustellen. Die Versuchsperson hielt eine Stoppuhr in der rechten Hand, die sie beim Start und beim Ende des vorgestellten oder tatsächlichen Gehens betätigte. Die Zeiten waren nur für den Experimentator sichtbar. Je zehn Trials pro Zielentfernung und Handlungsmodus wurden in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Zeiten beim mentalen und tatsächlichen Gehen fast identisch waren (Abb. 21.6).

In einem zweiten Experiment wurde die gleiche Prozedur wiederholt; dieses Mal hatten Versuchspersonen jedoch einen 25 kg schweren Rucksack auf den Schultern. Die tatsächlichen Gehzeiten waren vergleichbar mit denen im ersten Experiment, die mentalen Gehzeiten waren jedoch 30 % länger. Dies spricht dafür, dass die Kraft, die während tatsächlicher Handlungen aufgewendet wird, um Lasten entgegenzuwirken, in der Vorstellung nicht ausreichend berücksichtigt wird.

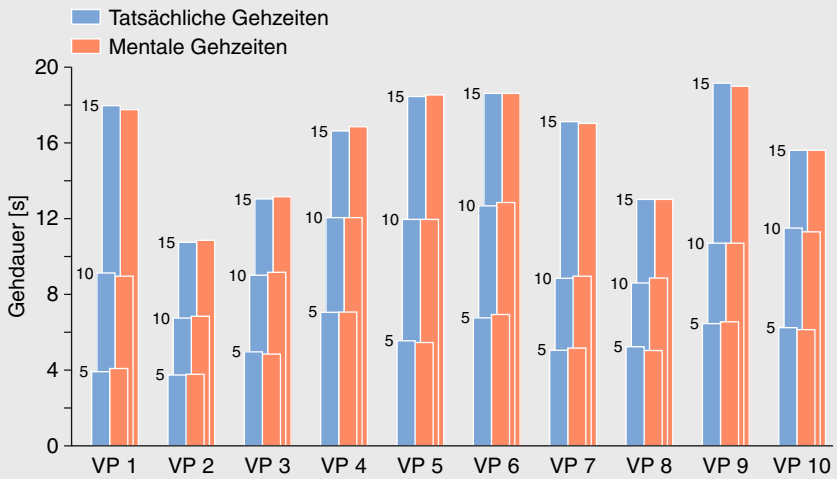


Abb. 21.6 Tatsächliche und mentale Gehzeiten (in Sekunden) von zehn Versuchspersonen (*VP*). Die Zahlen an den Säulen bezeichnen die Distanz (5, 10 und 15 m). (Modifiziert nach Decety et al. 1989. © 1989, mit Erlaubnis von Elsevier)

einzelner Komponenten der Bewegung, dass manche Komponenten in der Vorstellung kürzer dauerten als in der Ausführung, während andere in der Vorstellung länger dauerten als in der Ausführung. Ähnliches wurde bei Musikern gefunden (Clark und Williamon 2012). Diese subtilen zeitlichen Unterschiede können leicht übersehen werden, wenn nur die Gesamtdauer betrachtet wird.

Auch wenn Faktoren, die Handlungen beeinflussen (Abb. 21.7), und biomechanische Prinzipien im Allgemeinen in der Vorstellung von Handlungen berücksichtigt werden, so finden sich auch hier manchmal subtile Unterschiede, die darauf hindeuten, dass Handlungsvorstellungen weniger präzise sind als ausgeführte Handlungen. Beispielsweise folgen sowohl ausgeführte als auch vorgestellte Zeigebewegungen Fitts' Gesetz, das besagt, dass die Bewegungszeit zu einer Zielfläche eine Funktion der Distanz zu der Fläche und ihrer Größe ist. Jedoch ist die Steigung der Fitts-Funktion in der Handlungsvorstellung flacher als in der Handlungsausführung (Macuga et al. 2012). Auch sind längere Bewegungszeiten der nichtdominanten Hand im Vergleich zur dominanten Hand bei vorgestellten Handlungen ausgeprägter als bei ausgeführten Handlungen (Maruff et al. 1999).

Im Folgenden wird eine Übersicht über verschiedene (ausgewählte) Faktoren gegeben, die einen Einfluss auf die zeitliche Übereinstimmung von Handlungsvorstellung und Handlungsausführung haben. Diese sind in drei Bereiche gegliedert: Handlungscharakteristiken, individuelle Unterschiede und Erfahrung sowie situative Faktoren (alternative Kategorisierung in Guillot et al. 2012a).

Handlungscharakteristiken

Handlungsdauer Bewegungen, die in der Ausführung kürzer als ein paar Sekunden dauern, sind in der Vorstellung oft länger als in der Ausführung (Guillot und Collet 2005; Guillot et al. 2012a). Dies ist allerdings nicht immer der Fall: Auch bei kurzen Bewegungen (unter 2 s) tritt manchmal eine gute zeitliche Übereinstimmung zwischen Vorstellung und Ausführung auf (Dahm und Rieger 2015). Handlungen, die in der Ausführung länger als 30 s dauern, sind in der Vorstellung oft kürzer als in der Ausführung (Guillot und Collet 2005; Guillot et al. 2012a). Während beispielsweise Decety et al. (1989) beim tatsächlichen und vorgestellten Gehen (5 m, 10 m oder 15 m) eine sehr gute Übereinstimmung der Dauer fanden, zeigen andere Daten, dass mit zunehmend längeren Strecken (die eine längere Handlungsdauer implizieren) die zeitliche Übereinstimmung von vorgestelltem und ausgeführtem Gehen abnimmt (Grealy und Shearer 2008). Unklar ist, ob das Erreichen zeitlicher Genauigkeit bei der Vorstellung von sehr kurzen und sehr langen Handlungen für Personen generell schwieriger ist als bei der Vorstellung mittellanger Handlungen. Alternativ ist auch denkbar, dass hier weitere Prozesse eine Rolle spielen könnten. So könnte bei der Handlungsvorstellung die Initiierung der Vorstellung kognitiven Auf-

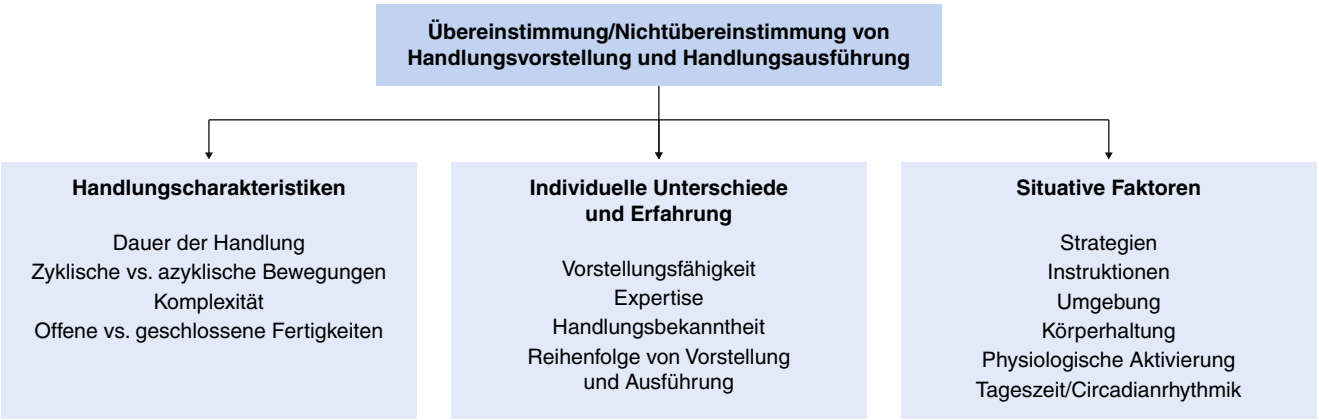


Abb. 21.7 Faktoren, die die Übereinstimmung/Nichtübereinstimmung von Handlungsvorstellung und Handlungsausführung beeinflussen

wand erfordern und so zur Verlängerung von Vorstellungszeiten beitragen. Solche Initiierungskosten machen sich vor allem bei kürzeren Vorstellungszeiten bemerkbar, während sie bei längeren Handlungen nicht ins Gewicht fallen. Bei langen Handlungen hingegen könnte die Vorstellung ab einem gewissen Zeitpunkt beschleunigt werden: Wenn man beispielsweise bereits einige Meter mental gegangen ist, wird die Vorstellung vertrauter und möglicherweise langweilig.

Zyklische vs. azyklische Bewegungen Es wird oft angenommen, dass die Zeiten von Vorstellung und Ausführung insbesondere bei automatischen und zyklischen Bewegungen eine gute Übereinstimmung zeigen (Guillot und Collet 2005; Guillot et al. 2012a). Beispiele hierfür sind Gehen (Decety et al. 1989) und Rudern (Barr und Hall 1992). Weniger gute Übereinstimmung findet man manchmal bei azyklischen Bewegungen, wie sie beispielsweise in der Gymnastik üblich sind (Guillot et al. 2005).

Komplexität Aufmerksamkeitsfordernde und komplexe Anteile einer Handlung scheinen die Handlungsvorstellung im Vergleich zur Handlungsausführung zu verlängern. Beispielsweise dauern „weniger wichtige" Anteile eines gymnastischen Sprunges, wie der Anlauf, in der Vorstellung nicht so lange wie in der Ausführung, während schnelle und komplexe Anteile des Sprunges, d. h. die Phase, in der ein Handstandüberschlag über einen Sprungtisch gemacht wird, in der Vorstellung länger dauern als in der Ausführung (Calmels et al. 2006).

Offene vs. geschlossene Fertigkeiten Zeitliche Äquivalenz tritt eher bei geschlossenen Fertigkeiten auf als bei offenen Fertigkeiten (Munzert 2008). Bei geschlossenen Fertigkeiten sind die Bedingungen, unter denen die Handlung ausgeführt wird, relativ konstant, und das Tempo ist unter eigener Kontrolle. Beispiele hierfür sind Rennen und Schwimmen. Bei offenen Fertigkeiten muss auf Veränderungen reagiert werden, und zeitliche Charakteristiken entstehen während der Aufgabe selbst. Beispiele hierfür sind Tennis, Badminton und Handball. Bei diesen Fertigkeiten variiert auch bei der Ausführung die Dauer einzelner Handlungsphasen, wie das Rennen von einer Position zur anderen im Spielfeld, zwischen Spielsituationen. Bei offenen Fertigkeiten ist zeitliche Äquivalenz von Handlungsvorstellung und Handlungsausführung somit nicht unbedingt zu erwarten (Munzert 2008).

Individuelle Unterschiede und Erfahrung

Vorstellungsfähigkeit Die zeitliche Übereinstimmung von Vorstellung und Ausführung wird oft als ein Indikator für die Fähigkeit zur adäquaten Vorstellung betrachtet. Allerdings sagt der Vergleich der Zeiten noch nichts über den Inhalt und die Lebendigkeit von Vorstellungen aus. Eine stark ausgeprägte Vorstellungsfähigkeit zeichnet sich dadurch aus, dass Vorstellungen leichter generiert, aufrechterhalten und kontrolliert (z. B. in Bezug auf die Geschwindigkeit der Handlung) werden können. Sie werden auch subjektiv als lebhafter empfunden, d. h. als klarer und reichhaltiger, und beinhalten oft mehrere Sinnesmodalitäten (z. B. McAvinue und Robertson 2008; Naito 1994). Vorstellungsfähigkeit wird oft über Fragebogenverfahren erfasst. Bekannte Verfahren sind der Vividness of Movement Imagery Questionnaire 2 (VMIQ-2; Roberts et al. 2008) und der Movement Imagery Questionnaire 3 (MIQ-3; Williams et al. 2012). Der VMIQ-2 und der MIQ-3 erfassen jeweils interne visuelle Vorstellungen (Erste-Person-Perspektive), externe visuelle Vorstellungen (Dritte-Person-Perspektive) und kinästhetische Vorstellungen. Beim VMIQ-2 geschieht dies anhand von zwölf Handlungen wie z. B. gehen oder einen Stein ins Wasser werfen. Diese Handlungen sollen jeweils in der entsprechenden Perspektive/sensorischen Modalität vorgestellt werden, und Personen schätzen auf einer fünfstufigen Skala die Klarheit der Vorstellung ein. Beim MIQ-3 geschieht dies jeweils anhand von vier Bewegungen. Derartige Verfahren weisen allerdings oft nur geringe bis keine Korrelation mit der Übereinstimmung der Dauer von Vorstellung und Ausführung auf (McAvinue und Robertson 2008; Williams et al. 2015). Dies könnte darauf hindeuten, dass Fragebogenmaße und mentale Chronometrie unabhängige Komponenten von Handlungsvorstellungen erfassen (Williams et al. 2015). In Studien werden teilweise auch spezifische, ad hoc erstellte Fragebögen eingesetzt, mit denen die Lebhaftigkeit oder Stärke der Vorstellung spezifisch für die untersuchte Aufgabe erfasst wird (z. B. Rieger und Massen 2014). Letzteres Vorgehen macht insofern Sinn, als dass die Vorstellungsfähigkeit sich zwischen Personen in Abhängigkeit von der vorgestellten Handlung unterscheiden kann. Dies wird

deutlich, wenn man sich Effekte von Handlungsexpertise und Handlungsbekanntheit ansieht.

Expertise Wenn Handlungsvorstellungen auf Inhalten des (motorischen) Gedächtnisses beruhen (Annett 1996) oder (aus der Sicht des Komparatormodells) auf internen Modellen für die Handlung (Davidson und Wolpert 2005), dann sollten Experten für eine Handlung im Gegensatz zu Novizen bereits bestehende interne Modelle für Handlungsvorstellungen nutzen können. Entsprechend zeigen sich sowohl neuronale (z. B. Guillot et al. 2009; Lotze et al. 1999) als auch behaviorale (z. B. Barr und Hall 1992; Reed 2002) Unterschiede zwischen Experten und Novizen bei der Handlungsvorstellung. In den meisten Fällen findet sich bei Experten eine bessere neuronale und behaviorale Übereinstimmung von Vorstellung und Ausführung als bei Novizen. Dies deutet darauf hin, dass sie in der Lage sind, sich die relevanten Aspekte einer Handlung besser vorzustellen. Die Dauer der Handlungsvorstellung verhält sich dabei aber nicht notwendigerweise linear zur Expertise: Bei Experten und Novizen im Turmspringen finden sich vergleichbare Zeiten von Vorstellung und Ausführung, während Turmspringer auf einem mittleren Niveau längere Vorstellungs- als Ausführungszeiten aufweisen (Reed 2002). Experten haben sehr gutes technisches Wissen, was sich in einer angemessenen Vorstellung niederschlägt. Auf einem mittleren Niveau haben Turmspringer zwar Bewegungswissen, brauchen aber länger, um die unterschiedlichen Elemente in eine kohärente Vorstellung zu integrieren; das Wissen ist noch nicht automatisiert. Anfänger hingegen haben nur begrenztes Wissen über die Bewegung, sodass sie auf der einen Seite zwar länger brauchen, um eine kohärente Vorstellung zu bilden, auf der anderen Seite jedoch nicht alle Aspekte der Bewegung berücksichtigen – was zusammengenommen in vergleichbaren Zeiten von Vorstellung und Ausführung resultiert (Reed 2002).

Handlungsbekanntheit Die Bedeutsamkeit der Vertrautheit mit einer Handlung zeigt sich nicht nur bei Handlungen, bei denen hoch spezialisiertes Training notwendig ist, sondern auch bei einfachen Alltagshandlungen. Bekommen Personen Aufgaben, die sich nur geringfügig von alltäglichen Aufgaben unterscheiden, kann es vorkommen, dass diese nicht mehr angemessen vorgestellt werden können. So wird die Anstrengung, die während ausgeführter Handlungen zur Kompensation für zusätzliche Gewichte aufgebracht wird, nicht spontan vorgestellt: Vorgestelltes Gehen mit einem 25 kg schweren Rucksack verlängert mentale Gehzeiten (Decety et al. 1989), und das Hinzufügen eines Gewichts am Arm verlangsamt vorgestellte Zeigebewegungen (Cerritelli et al. 2000), aber die Ausführung wird durch das Gewicht nicht oder weniger beeinflusst. Weniger bekannte Handlungen könnten auch in kürzeren Vorstellungs- als Ausführungszeiten resultieren, z. B. Bewegungen zu unangenehmen oder ungewöhnlichen Positionen (Parsons 1994) oder beim Tippen in einem ungewohnten Tippstil (Rieger 2012). Es gibt Hinweise, dass Personen Fertigkeitswissen von bekannten Handlungen verwenden, um sich unbekannte Handlungen vorzustellen (Rieger 2012). Nicht immer zeigen sich bei unbekannten Handlungen jedoch Unterschiede zwischen Vorstellung und Ausführung (Munzert 2002).

Reihenfolge von Ausführung und Vorstellung Wenn die Ausführung einer Handlung kurz vor der Vorstellung derselbigen stattfindet, kann dies einen positiven Einfluss auf die Genauigkeit der Vorstellung haben (Campos et al. 2009; Decety 1991; Courtine et al. 2004). Während der Ausführung findet eine Aktualisierung der Repräsentationen im motorischen Gedächtnis bzw. interner Modelle statt, was in einer adäquateren Vorstellung resultiert. Effekte der Reihenfolge von Vorstellung und Ausführung werden aber nicht immer gefunden (Papaxanthis et al. 2002; Rieger und Massen 2014).

▪ Situative Faktoren

Willentliche Veränderung der Vorstellungsgeschwindigkeit Es wird oft angenommen, dass ohne spezifische Instruktionen Handlungsvorstellung (näherungsweise) genauso lange wie Handlungsausführung dauert (Guillot et al. 2012a). Diese implizite Annahme sollte jedoch hinterfragt werden. Personen sind in der Lage, die Geschwindigkeit einer Vorstellung willentlich im Vergleich zur Echtzeit zu ändern (Guillot et al. 2012a) und machen dies auch in Abhängigkeit von ihren Zielen und der Situation (Munroe et al. 2000). Bei Sportlern variieren die Vorstellungszeiten beispielsweise während des Trainings, in der Freizeit und kurz vor einem Wettkampf. Kurz vor einem Wettkampf finden Handlungsvorstellungen in der Regel beschleunigt statt (Guillot et al. 2012a). Wenn Athleten eine Bewegung als sehr einfach empfinden, tendieren sie eher dazu, die Geschwindigkeit in der Vorstellung zu beschleunigen; wenn sie eine Bewegung als schwierig empfinden, nehmen sie sich mehr Zeit (Calmels und Fournier 2001). Athleten verwenden in der Regel auch mehr Zeit darauf, wenn sie sich neue Bewegungen vorstellen, als wenn sie sich Fertigkeiten vorstellen, die sie bereits können (O und Hall 2009). Die Genauigkeit des Ablaufs einzelner Elemente der Bewegung in der Vorstellung ist somit wichtiger als zeitliche Genauigkeit (Calmels et al. 2006).

Instruktionen Eine Vorstellung in Echtzeit ist am ehesten zu erwarten, wenn Personen auch instruiert werden, sich eine Handlung in Echtzeit vorzustellen. Instruktionen sind jedoch in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich und mehr oder weniger spezifisch. So wird beispielsweise instruiert, auf die Details der Bewegung oder auf bestimmte Sinnesmodalitäten wie die Kinästhetik zu achten – manchmal aber auch nicht. Der Einfluss unterschiedlicher Instruktionen ist bisher kaum systematisch untersucht worden. Interessanterweise verändert die Veränderung der Geschwindigkeit einer Handlung in der Vorstellung auch die Dauer von nachfolgend ausgeführten Bewegungen. Wenn Personen eine Handlung entweder langsamer oder schneller als in der bevorzugten Geschwindigkeit vorstellen, führen sie anschließend die Handlung entsprechend langsamer oder schneller aus (Boschker et al. 2000; Louis et al. 2008). Die Zeit, die für Handlungsvorstellungen zur Verfügung steht, beeinflusst auch die nachfolgende Performanz: Wenn Novizen und Experten sich Golfabschläge entweder unter Zeitdruck oder ohne Zeitdruck vorstellen, sind Novizen anschließend in der Ausführung weniger genau, wenn sie sich den Abschlag unter Zeitdruck vorgestellt hatten, während Experten nach der Vorstellung unter Zeitdruck genauer sind (Beilock und Gonso 2008).

Umgebung Wenn Handlungsvorstellungen in einer Umgebung stattfinden, die der Umgebung der tatsächlichen Ausführung der Handlung ähnlich ist, könnte dies positive Einflüsse auf die Vorstellung haben. Beispielsweise fällt es Tischtennisspielern leichter, sich einen Vorhandschlag vorzustellen, wenn die Vorstellung in einer entsprechenden Umgebung stattfindet und sie Sportbekleidung tragen, als wenn die Vorstellung in einer neutralen Umgebung ohne Sportbekleidung stattfindet (Guillot et al. 2005). Der Kontext dient als Hinweisreiz für handlungsrelevante Schemata im motorischen Gedächtnis, die in einem handlungsspezifischen Kontext leichter abrufbar sind.

Körperhaltung Handlungsvorstellungen sind einfacher, wenn Personen eine Körperhaltung einnehmen, die mit der vorgestellten Handlung kompatibel ist (Vargas et al. 2004; Sirigu und Duhamel 2001). Beispielsweise baten Sirigu und Duhamel (2001) Versuchspersonen, sich verschiedene Handpositionen vorzustellen und anschließend zu beurteilen, auf welcher Seite z. B. der kleine Finger ist. Zum einen sollten die Versuchspersonen dabei die Hände auf den Schoß legen (kompatible Bedingung), zum anderen sollten sie die Hände hinter den Rücken legen (inkompatible Bedingung). In der kompatiblen Bedingung wurden kürzere Beurteilungszeiten beobachtet. Hier war die Handposition gut mit der mentalen Vorstellung vereinbar, was in der inkompatiblen Bedingungen nicht der Fall war. Konvergierende Evidenz für die Bedeutung der Körperhaltung während Handlungsvorstellungen zeigt sich auf neuronaler Ebene: Die motorische Aktivierung im Gehirn hängt bei Handlungsvorstellungen von der momentanen Stellung der Gliedmaßen ab (de Lange et al. 2006).

Physiologische Aktivierung Uneinigkeit besteht darüber, welchen Einfluss die physiologische Erregung einer Person, d. h. ob sie entspannt oder erregt ist, auf die Vorstellungsgenauigkeit hat. Manchmal wird argumentiert, dass Entspannung eine wichtige Vorbedingung für angemessene Handlungsvorstellungen darstellt (Harvey et al. 1994), während andere davon ausgehen, dass dies nicht relevant sei (Guillot und Collet 2008). Wiederum andere gehen davon aus, dass Entspannung zu Beginn der Handlungsvorstellung von Bedeutung ist, aber nicht während der gesamten Vorstellung aufrechterhalten werden sollte (Janssen und Sheikh 1994). Bisher gibt es nur wenige solide empirische Daten. Erste Evidenz deutet jedoch darauf hin, dass die zeitliche Übereinstimmung von vorgestellten und ausgeführten Handlungen im erregten und neutralen Zustand größer ist als im entspannten Zustand, vermutlich da Entspannung in der Regel nicht der Aktivierung bei der Ausführung der meisten Handlungen entspricht (Louis et al. 2011).

Circadianrhythmus Vorgestellte Handlungen unterliegen genauso wie ausgeführte Handlungen circadianen Schwankungen. Schreiben und Gehen (Gueugneau et al. 2009) sowie Zeigebewegungen (Gueugneau und Papaxanthis 2010) weisen am Nachmittag eine kürzere Vorstellungs- und Ausführungsdauer auf als am Vormittag und Abend. Kürzere Bewegungszeiten treten nahe am Maximum der Köpertemperatur auf (Gueugneau und Papaxanthis 2010). Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Aufgabenkomplexität ab (Debarnot et al. 2012). Die zeitliche Übereinstimmung von vorgestellten und ausgeführten Handlungen ist im circadianen Verlauf ebenfalls nicht konstant: Am Nachmittag findet sich eine größere zeitliche Übereinstimmung als am Vormittag oder Abend (Gueugneau et al. 2009; Gueugneau und Papaxanthis 2010).

21.2.3 Unterschiede von vorgestellten und ausgeführten Handlungen

Trotz der vielen Gemeinsamkeiten bei vorgestellten und ausgeführten Handlungen (▶ Abschn. 21.2.1) werden auch (manchmal subtile) Unterschiede zwischen vorgestellten und ausgeführten Handlungen auf Verhaltensebene beobachtet, die von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden (▶ Abschn. 21.2.2). Auch bildgebende Verfahren zeigen zwar eine Überlappung der Areale von Handlungsvorstellung und Handlungsausführung, aber die Überlappung ist nicht komplett. Eine Aktivierung des primären motorischen Cortex wird manchmal beobachtet (z. B. Lotze et al. 1999; Porro et al. 2000), aber nicht immer (Gerardin et al. 2000; Hanakawa et al. 2008). Gehirnaktivität bei vorgestellten und ausgeführten Handlungen findet auch nicht ausschließlich in den gleichen Arealen statt. Vielmehr gibt es Areale, die in der Handlungsausführung aktiv sind, aber nicht in der Handlungsvorstellung. Auch das Umgekehrte ist der Fall: Es gibt Areale, die eine stärkere Aktivierung bei der Handlungsvorstellung zeigen oder nur während der Handlungsvorstellung aktiv sind (Übersicht in Guillot et al. 2012b). Hier wird auf die Mechanismen eingegangen, die Unterschieden von vorgestellten und ausgeführten Handlungen zugrunde liegen können.

Ein offensichtlicher Unterschied ist, dass bei Handlungsvorstellungen hemmende (inhibitorische) Prozesse verhindern müssen, dass motorische Kommandos zu den Effektoren gesendet werden (Decety 1996; Guillot et al. 2012b). Es ist unklar, wann diese hemmenden Prozesse auftreten und ob sie in allen Situationen ähnlich sind. Gegenwärtig werden für explizite Handlungsvorstellungen drei Mechanismen, die auf unterschiedlichen Ebenen des zentralen Nervensystems operieren, diskutiert (Übersicht in Guillot et al. 2012b):

1. Weil Personen bereits im Voraus wissen, dass sie eine Handlung vorstellen und nicht ausführen, könnte Hemmung (Inhibition) in die Bewegungsvorbereitung selbst integriert werden. Nur unterschwellige motorische Aktivität wird generiert, und die Notwendigkeit für aktive Inhibition entsteht nicht. Handlungsvorstellung ist demnach eine schwächere Form der Handlungsausführung, die Inhibition ist Teil der Handlungsvorstellung.
2. Motorische Aktivität könnte aktiv gehemmt werden, nachdem sie generiert wurde. Inhibition könnte spezifisch für die vorgestellte Handlung oder den Effektor, mit dem die Handlung ausgeführt wird, sein.
3. Inhibition könnte global sein, d. h., alle motorische Aktivität wird gehemmt. Auch dies beinhaltet einen aktiven Inhibitionsprozess.

Die verschiedenen Mechanismen schließen sich nicht notwendigerweise gegenseitig aus. Sie könnten zusammenarbeiten oder

unter verschiedenen Umständen, in denen Handlungsvorstellungen stattfinden, auftreten (Guillot et al, 2012b; Rieger et al. 2016).

Inhibition der Handlung während der Handlungsvorstellung ist allerdings nicht immer vollständig, manchmal beobachtet man unterschwellige Muskelaktivität (Guillot et al. 2012b). Bereits Jacobson (1932) zeigte, dass während der Handlungsvorstellung Aktivität in Muskeln der Effektoren auftritt, die in der Handlungsvorstellung verwendet werden. Auch in Studien, in denen Transkranielle Magnetstimulation (TMS) verwendet wird, beobachtet man, dass die motorische Schwelle für Muskeln, die in der Vorstellung verwendet werden, niedriger ist (Facchini et al. 2002; Kasai et al. 1997). Theoretisch stellt sich die Frage, ob Handlungsvorstellung wirklich eine „reine" Vorstellung ist, wenn muskuläre Aktivität stattfindet. Entsprechend wird in einigen Studien Wert darauf gelegt, dass keinerlei Muskelaktivität stattfindet, um die „reinen" Effekte der Vorstellung zu erfassen.

Wie auch immer Inhibition von Handlungen bei Handlungsvorstellungen stattfindet, fest steht, dass durch das Nichtausführen der Handlung kein Feedback vom eigenen Körper und der Umgebung vorhanden ist. Entsprechend wird auch in vielen Studien argumentiert, dass Unterschiede zwischen Handlungsvorstellung und Handlungsausführung durch dieses mangelnde Feedback zustande kommen (Campos et al. 2009; Rieger und Massen 2014; Rieger et al. 2011). Beispielsweise findet die Aktualisierung der eigenen räumlichen Position beim vorgestellten Gehen nicht angemessen statt, selbst wenn Vorstellungs- und Ausführungszeiten identisch sind (Campos et al. 2009).

Nach dem Komparatormodell könnte die Efferenzkopie von motorischen Kommandos genutzt werden, um Veränderungen am Körper und in der Umgebung in der Vorstellung vorherzusagen (Courtine et al. 2004; Davidson und Wolpert 2005; Grush 2004; ► Abschn. 21.1). Werden Vorwärtsmodelle bei Handlungsvorstellungen genutzt? Wenn Vorwärtsmodelle Handlungskonsequenzen bei Handlungsvorstellungen vorhersagen, könnten vorhergesagte und intendierte Konsequenzen verglichen werden. Bei ausgeführten Handlungen ermöglicht dieser Vergleich, dass Handlungsfehler entdeckt werden, bevor eine Handlung (vollständig) ausgeführt ist, auch wenn einige der so entdeckten Fehler trotzdem auftreten (Maidhof et al. 2009). In der Vorstellung ist dies aber nicht immer der Fall. In einer Studie sollten Versuchspersonen Sprichwörter entweder tatsächlich oder in ihrer Vorstellung abtippen (Rieger et al. 2011). Es zeigte sich, dass Handlungsfehler und deren Korrektur nur zum Teil und selten spontan vorgestellt werden. Insbesondere Ausführungsfehler wurden in der Vorstellung kaum berichtet. Planungsfehler traten jedoch genauso häufig wie in der Ausführung auf. Daraus folgt, dass das Erkennen von Fehlern durch einen Vergleich von intendierten und vorhergesagten Handlungskonsequenzen in der Handlungsvorstellung nicht bzw. nicht häufig auftritt. Dies kann verschiedene Ursachen haben:

1. Es könnte sein, dass Vorwärtsmodellen nicht die präzisen motorischen Kommandos zur Verfügung stehen (da diese gehemmt wurden).
2. Es ist möglich, dass Vorwärtsmodelle nicht alle Aspekte einer Handlung vorhersagen.
3. Vorwärtsmodelle könnten während der Handlungsvorstellung ungenau sein und einen relativ großen Fehlerbereich für Diskrepanzen zwischen intendierten und vorhergesagten Effekten zulassen.
4. Es könnten Fehlersignale auftreten, die aber nicht in ausreichendem Ausmaß beachtet werden. Dies könnte ein Prozess sein, der zusätzliche Ressourcen erfordert und während Handlungsvorstellungen nicht obligatorisch stattfindet.

Auch wenn die Annahme, dass Vorwärtsmodelle Konsequenzen auf den Körper und die Umgebung während Handlungsvorstellungen vorhersagen, intuitiv plausibel ist, so ist dies empirisch keineswegs eindeutig erwiesen. Alternativ ist denkbar, dass Repräsentationen, die frühere Erfahrungen mit dieser oder ähnlichen Handlungen beinhalten, aus dem Langzeitgedächtnis abgerufen werden (Annett 1996; Frank et al. 2014), ohne dass eine Simulation zur Vorhersage der Effekte auf den Körper und die Umgebung unter Verwendung von Vorwärtsmodellen stattfindet.

Auch Begrenzungen des Arbeitsgedächtnisses könnten für Unterschiede zwischen Handlungsvorstellung und Handlungsausführung verantwortlich sein. Wenn man Handlungen ausführt, verändert sich die Umgebung konsistent mit der Handlung. Bügelt man beispielsweise ein Hemd oder eine Bluse, kann man den Fortschritt des Bügelns daran erkennen, welche Teile des Kleidungsstücks glatt und welche verknittert sind. Während der Handlungsvorstellung wird diese Information nicht von der Umgebung bereitgestellt, sondern man muss sich diese Information merken. Wenn dies die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses übersteigt, könnte die Repräsentation des Fortschritts der Handlung ungenau sein, sodass Teile der Handlung in der Vorstellung vergessen oder sogar doppelt ausgeführt werden. Im Einklang damit fanden Rieger und Massen (2014), dass das vorgestellte Ausmalen eines Vierecks kürzer dauerte als die tatsächliche Ausführung. Ebenso war die Ausführung der Handlung ohne visuelles Feedback kürzer als die Ausführung mit visuellem Feedback. Eine wahrscheinliche Erklärung für diese Befunde ist, dass Personen sich ohne visuelles Feedback merken müssen, welche Bereiche noch nicht ausgemalt sind, und hierbei kleinere Bereiche vergessen. Sie wissen nur so ungefähr, was sie noch ausmalen müssen.

Ein weiterer Unterschied zwischen vorgestellten und ausgeführten Handlungen besteht darin, dass, zumindest bei hoch automatisierten Handlungen, in der Vorstellung die Aufmerksamkeit auf Aspekte der Bewegung gerichtet wird, die normalerweise durch automatisierte Kontrollstrukturen für die Bewegung gesteuert werden, die außerhalb expliziter, bewusster Aufmerksamkeitsprozesse arbeiten. Wenn Aufmerksamkeit auf solche automatischen Prozesse gelenkt wird, kann dies die Performanz stören (Beilock und Carr 2001). Es ist gut möglich, dass unter bestimmten Umständen solche automatischen Prozesse während der Vorstellung gestört werden (Rieger 2012).

21.2.4 Fazit

Es wurde gezeigt, dass bei vorgestellten und ausgeführten Handlungen auf Verhaltensebene und auf neuronaler Ebene viele Gemeinsamkeiten bestehen. In Verhaltensstudien wird oft die Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen verglichen. Die

zeitliche Übereinstimmung wird von verschiedenen Faktoren wie Handlungscharakteristiken, individuellen Unterschieden und Erfahrung mit der Handlung sowie situativen Faktoren beeinflusst. Trotz aller Gemeinsamkeiten darf nicht übersehen werden, dass auch Unterschiede in den Mechanismen von vorgestellten und ausgeführten Handlungen bestehen. Die genauen Mechanismen, die für diese Unterschiede verantwortlich sind, bedürfen in der Zukunft noch einer Präzisierung.

Aufgrund ihrer introspektiven Natur sind explizite Handlungsvorstellungen schwer zu untersuchen. In der überwiegenden Anzahl von experimentellen Studien zu expliziten Handlungsvorstellungen werden die Zeiten von vorgestellten und ausgeführten Handlungen verglichen. Die Interpretation einer zeitlichen Übereinstimmung bzw. Nichtübereinstimmung ist nicht trivial. Da die zeitliche Übereinstimmung von vielen Faktoren abhängt, besteht viel Raum für unterschiedliche Interpretationen. Auch findet man gelegentlich zwar übereinstimmende Zeiten in der durchschnittlichen Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen, jedoch geht dies nicht immer mit einer Korrelation zwischen Vorstellungs- und Ausführungsdauer einher. Abgesehen davon, dass keine bzw. eine geringe Korrelation manchmal durch sehr homogene Stichproben zustande kommen kann, kann dies auch darauf hindeuten, dass individuelle Unterschiede der Ausführungsdauer nicht in den Vorstellungszeiten reflektiert sind (Rieger 2012). Der Fokus auf zeitliche Übereinstimmung vernachlässigt außerdem den Aspekt der Lebendigkeit der Vorstellung.

Im Wesentlichen wurde auf bewusste, explizite Handlungsvorstellungen eingegangen. Handlungsvorstellungen werden jedoch auch implizit, automatisch gebildet, um Entscheidungen zu treffen oder Aufgaben zu lösen. In ▶ Abschn. 21.3 wird dies am Beispiel von Handlungsbeobachtung und in ▶ Abschn. 21.5 am Beispiel der handlungsbezogenen Sprache erörtert. Auch in anderen Kapiteln dieses Buches finden sich Hinweise auf implizite Handlungsvorstellungen. Beispielsweise beeinflusst die implizit simulierte Anstrengung einer Handlung, wie steil ein Hügel oder wie lang ein Weg wahrgenommen wird (Proffitt 2006; ▶ Kap. 22). Bisher gib es kaum Untersuchungen, die sich systematisch mit Gemeinsamkeiten und Unterschieden von expliziten und impliziten Handlungsvorstellungen befassen.

Die bisher in der psychologischen Grundlagenforschung gewonnenen Erkenntnisse über Handlungsvorstellungen haben zwei wichtige Anwendungen. Die erste Anwendung ist mentales Training, bei dem Handlungsvorstellungen systematisch und wiederholt eingesetzt werden, um die motorische Leistung zu verbessern (▶ Abschn. 21.6). Die zweite wichtige Anwendung besteht in der Entwicklung von *brain computer interfaces*. Diese ermöglichen es beispielsweise Personen mit einem Locked-in-Syndrom, mit der Außenwelt zu kommunizieren (Kübler et al. 2001). Bei einen Locked-in-Syndrom sind Personen bei Bewusstsein, jedoch fast vollständig gelähmt, sodass sie nicht sprachlich oder durch Bewegungen kommunizieren können. Das Rational der Anwendung von Handlungsvorstellungen ist zumeist, dass Handlungsvorstellungen ähnliche neuronale Mechanismen zugrunde liegen wie ausgeführten Handlungen. Entsprechend hat man sich in der Forschung oft auf die Gemeinsamkeiten von vorgestellten und ausgeführten Handlungen konzentriert. Unterschiede, wie die Inhibition von Handlungen in Handlungsvorstellungen, wurden bisher wenig beachtet.

21.3 Handlungsbeobachtung

Stellen Sie sich vor, Sie sind Zuschauer bei einem Fußballspiel. Sie sind voll und ganz dabei. Wenn ein Spieler Ihrer Mannschaft am Ball ist, möchten Sie am liebsten selbst den Ball kicken und spüren, wie sich die Muskeln in Ihrem Bein auch darauf vorbereiten. Wenn ein Spieler einen Ball kickt, wissen Sie schon, ehe der Ball losrollt, ob er sein Ziel erreichen wird. Das Spiel endet. Ihre Mannschaft hat gewonnen. Sie sehen an der expressiven Körperhaltung der Spieler, wie diese sich freuen, und Sie freuen sich mit ihnen. In der Literatur spricht man in solchen Situationen von *Handlungswahrnehmung* oder *Handlungsbeobachtung*. Diese beiden Begriffe werden in der Literatur weitgehend austauschbar verwendet.

Was ist das Besondere an der Beobachtung von Handlungen anderer Personen im Vergleich zur Beobachtung von Objektbewegungen? Es gibt Hinweise, dass Handlungen von anderen Personen auf besondere Weise verarbeitet werden. Beispielsweise werden Scheinbewegungen (Bewegungseindruck, der aufgrund der Präsentation von sequenziellen Bildern entsteht; Wertheimer 1912) bei biologischen Bewegungen (menschlichen Bewegungen) anders wahrgenommen als bei nichtbiologischen Bewegungen (Objektbewegungen). Bei *Objektbewegungen* folgen Scheinbewegungen in der Wahrnehmung dem kürzesten/direkten Weg (Regel des kürzesten Weges). Bei *menschlichen Bewegungen* (bei denen der kürzeste Weg biologisch nicht plausibel ist) geschieht dies jedoch nur bei einem kurzen Bildfolgeintervall (*stimulus onset asynchrony*). Bei längeren Bildfolgeintervallen wird eine biologisch plausible Bewegung wahrgenommen. Entsprechend wird bei einem Bildfolgeintervall von unter 200 ms die Bewegung eines Armes von links nach rechts so wahrgenommen, als ob sie durch den Kopf geht (direkter Weg, biomechanisch nicht plausibel). Ab einem Intervall von 200 ms oder länger wird die Armbewegung so wahrgenommen, als ob sie um den Kopf herum geht (indirekter Weg, biomechanisch plausibel) (Shiffrar und Freyd 1990, 1993).

Menschliche Bewegungen können aufgrund von wenigen Informationen erkannt werden. Bei **Lichtpunktdarstellungen** (*point light displays*; ◘ Abb. 21.8) oder, wenn es sich um eine gehende Person handelt, **Lichtpunktläufern** (*point light walker*) werden sich bewegende Personen durch wenige Punkte auf einem einfarbigen Hintergrund dargestellt. Die Punkte sind zumeist auf den Gelenken und den Körperextremitäten platziert. Statische Bilder werden oft (je nach Anzahl und Ort der Punkte) als eine bedeutungslose Zusammenstellung von Punkten wahrgenommen. Wenn jedoch fortlaufende Lichtpunktdarstellungen einer Bewegung präsentiert werden, sehen Beobachter eine Person, die eine spezifische Handlung ausführt (Johansson 1973; Übersicht in Blake und Shiffrar 2007). Dies zeigt, dass man die Bewegung einer Person allein basierend auf der Kinematik der Körperbewegungen erkennen kann, wenn andere Hinweise fehlen. Darüber hinaus können auch viele sozial relevante Charakteristiken allein aufgrund von Lichtpunktdarstellungen erkannt werden (▶ Abschn. 21.3.3).

Es gibt Gehirnregionen, die spezifisch für die Wahrnehmung biologischer Bewegungen und die Wahrnehmung menschlicher

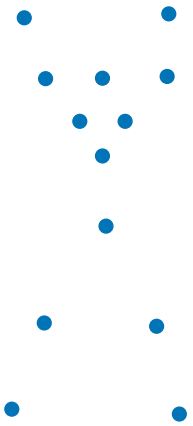


Abb. 21.8 Statisches Bild einer Lichtpunktdarstellung einer Person, die die Arme hochhebt

Körper zuständig sind (▶ Zur Vertiefung 21.3). Darüber hinaus wird im Sinne von Embodiment davon ausgegangen, dass Beobachter spontan die Handlungen, die sie beobachten, simulieren, d. h., Handlungsbeobachtung beruht ebenso wie Handlungsvorstellungen (▶ Abschn. 21.2) auf internen Simulationen, die das motorische System einbeziehen (Blakemore und Decety 2001; Jeannerod 2001). Bei Handlungsvorstellungen ist diese Simulation intern generiert, freiwillig und unter bewusster Kontrolle. Simulationsprozesse bei der Handlungsbeobachtung werden durch externe Ereignisse generiert, sind automatisch, erfordern keine bewusste Kontrolle und sind zeitlich an die beobachtete Handlung gekoppelt.

Im Folgenden wird spezifisch darauf eingegangen, dass bei beobachteten Handlungen im Sinne von Embodiment eine Simulation dieser Handlung durch Rekrutierung des eigenen motorischen Systems erfolgt. Zunächst werden Theorien und Befunde zu motorischer Resonanz und automatischer Imitation dargestellt (▶ Abschn. 21.3.1) und argumentiert, dass Handlungen anderer vorhergesagt werden (▶ Abschn. 21.3.2). Diese Mechanismen sind von großer Bedeutung für soziale Interaktionen (▶ Abschn. 21.3.3). Im Anschluss wird die Rolle von Handlungserfahrung und Expertise für die dargestellten Mechanismen diskutiert (▶ Abschn. 21.3.4). Danach wird die Frage aufgeworfen, ob biologische Bewegungen wirklich auf besondere Art und Weise verarbeitet werden (▶ Abschn. 21.3.5). In ▶ Abschn. 21.3.6 wird ein kurzes Fazit gezogen.

21.3.1 Handlungssimulation und automatische Imitation

Theoretische Ansätze wie das Prinzip der gemeinsamen Codierung (*common coding principle*; Prinz 1997) und die Theorie der Ereigniscodierung (*theory of event coding*; Hommel et al. 2001; ▶ Abschn. 21.1, ▶ Kap. 18 und 22) implizieren, dass sich die sensorischen Repräsentationen bei der Handlungsbeobachtung mit motorischen Repräsentationen der Handlungsplanung überlappen (Blake und Shiffrar 2007; Prinz 2005). Ebenso gehen viele weitere Autoren davon aus, dass die Beobachtung einer anderen Person automatisch interne Handlungsrepräsentationen oder motorischer Programme beim Beobachter aktiviert, die denen entsprechen, die aktiv wären, wenn der Beobachter selbst diese Handlung ausführen würde (z. B. Decety und Grèzes 2006; Jeannerod 2001, 2006; Wilson und Knoblich 2005). Der Beobachter simuliert, möglicherweise unter Verwendung inverser Modelle und Vorwärtsmodelle (▶ Abschn. 21.1) die Handlung (Blakemore und Decety 2001). Für diese Annahmen gibt es vielfältige Belege.

Auf Verhaltensebene zeigt sich motorische Aktivierung in **automatischer Imitation** einer beobachteten Handlung. Beispielsweise führen Personen eine Fingerbewegung auf einen Hinweisreiz hin schneller aus, wenn gleichzeitig eine irrelevante, aber mit der Reaktion übereinstimmende Fingerbewegung gezeigt wird (Brass et al. 2000; Abb. 21.9). Ähnliches findet sich, wenn Personen auf ein visuelles Go-Signal hin eine vorher festgelegte Fingerbewegung (mit dem Finger tippen oder diesen anheben) ausführen sollen und das Go-Signal eine Fotografie eines Fingers ist, der entweder die gleiche (kompatible Bedingung) oder die andere (inkompatible Bedingung) Bewegung impliziert. Die Reaktionszeit ist in der inkompatiblen Bedingung langsamer als in der kompatiblen Bedingung (Brass et al. 2001a).

Vergleichbare Effekte zeigen sich auch bei anderen Bewegungen, und sie treten sowohl auf, wenn kinematische Aspekte der Bewegung beobachtet werden, als auch, wenn nur die Endposition der Bewegung präsentiert wird (Stürmer et al. 2000). Kompatibilitätseffekte sind nicht allein auf räumliche Kompatibilität zurückzuführen (Brass et al. 2001a). Die Effekte können auch nicht allein durch die Aktivierung von konzeptuellen Repräsentationen wie „öffnen" oder „schließen" erklärt werden. Wäre dies der Fall, würde man erwarten, dass die Beobachtung einer sich öffnenden Hand gleichermaßen das Öffnen der Hand und

Zur Vertiefung 21.3

Visuelle Areale bei der Wahrnehmung menschlicher Handlungen

Bei der Beobachtung von menschlichen Handlungen ist der superiore temporale Sulcus (STS), vor allem in der rechten Hemisphäre, aktiv (z. B. Grèzes et al. 2001; Grossman et al. 2000). Aktivität im STS wird beim Vergleich der Beobachtung von Lichtpunktläufern (biologischen Bewegungen) und sich kohärent bewegenden Punkten (nichtbiologischer Bewegung; Grossman et al. 2000) und dem Vergleich der Beobachtung von biologischen Bewegungen mit Objektbewegungen (Grèzes et al. 2001) beobachtet. Der STS spielt auch eine wichtige Rolle bei der perzeptuellen Analyse sozialer Aspekte von Handlungen (z. B. Allison et al. 2000; Übersicht in Blake und Shiffrar 2007).

Auch das extrastriäre Körperareal (*extrastriate body area*, EBA) spielt bei der Beobachtung anderer Personen eine Rolle. Das EBA ist aktiv, wenn man menschliche Körper oder Körperteile sieht. Obwohl eine Bewegung der Körperteile keine Voraussetzung für die Aktivität ist, können Körperbewegungen starke EBA-Aktivierung hervorrufen (Downing et al. 2001). Interessanterweise ist die EBA auch bei Eigenbewegungen aktiv, selbst wenn man diese Bewegungen nicht sieht (Astafiev et al. 2004). Dies impliziert, dass die EBA Input von motorischen Arealen erhält, die für die Generierung von Handlungen verantwortlich sind, aber auch auf wahrgenommene Bewegungen reagiert. Über diesen Mechanismus könnten Eigenbewegungen eines Beobachters das visuelle System bei der Beobachtung von Handlungen anderer Personen beeinflussen.

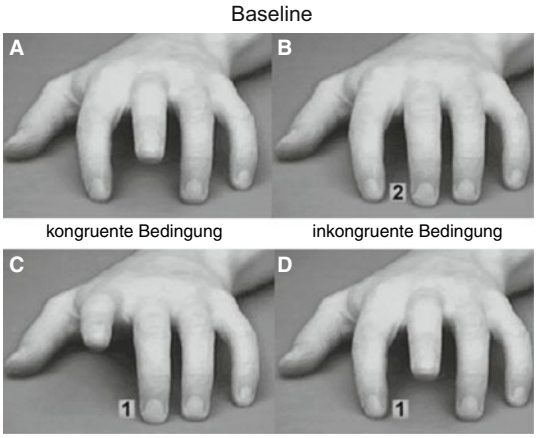


Abb. 21.9 Bedingungen in dem Experiment von Brass et al. (2000). Es ist jeweils das letzte Bild der Videos zu sehen. In der Baseline gab es eine Bedingung, in der die Versuchspersonen mit dem gleichen Finger reagieren sollten, der sich im Video bewegte (**A**), und eine Bedingung, in der die Versuchspersonen auf einen symbolischen Hinweisreiz reagieren sollten, ohne eine Fingerbewegung zu sehen (**B**). Der symbolische Hinweisreiz bestand aus der Ziffer 1 oder 2. In den dargestellten Bedingungen sollten die Versuchspersonen bei einer 1 den Zeigefinger bewegen, bei einer 2 den Mittelfinger. Auch in der kongruenten und der inkongruenten Bedingung sollten Versuchspersonen auf den symbolischen Hinweisreiz reagieren. In der kongruenten Bedingung stimmten die Bewegungen des Fingers im Video mit dem Finger überein, mit dem die Versuchspersonen reagieren sollten (**C**), in der inkongruenten Bedingung stimmten sie nicht überein (**D**). (Nach Brass et al. 2000. © 2000, mit Erlaubnis von Elsevier)

das Öffnen des Mundes erleichtert. Dies ist aber nicht der Fall: Kompatibilitätseffekte sind größer, wenn die gleichen Effektoren verwendet werden, als wenn andere Effektoren verwendet werden (Leighton und Heyes 2010; Übersicht in Heyes 2013).

Studien, in denen TMS verwendet wurde und motorisch evozierte Potenziale (MEPs) erfasst wurden, zeigen, dass die Beobachtung von Handlungen zu unterschwelliger Muskelaktivität führt. Beim Beobachter steigt die Muskelaktivität in den Effektoren, die er beobachtet (z. B. Fadiga et al. 1995). Beispielsweise stimulierten Fadiga et al. (1995) den linken primären motorischen Cortex mit TMS, während Personen Handlungen (und andere visuelle Kontrollstimuli) beobachteten. MEPs wurden von den Handmuskeln der Person aufgezeichnet. Während der Handlungsbeobachtung zeigte sich eine Verminderung der Schwelle zur Auslösung von MEPs an den korrespondierenden Effektoren. Dies war nicht der Fall für MEPs von Muskeln, die nicht verwendet werden würden, um die beobachtete Bewegung auszuführen. Das periphere motorische System bereitet sich darauf vor, die beobachteten Bewegungen auszuführen. Wahrscheinlich führt Handlungsbeobachtung zunächst zu einer frühen, nichtspezifischen Erleichterung cortical-spinaler Aktivität, gefolgt von späterer Modulation, die spezifisch für die an der beobachteten Handlung beteiligten Muskeln ist (Naish et al. 2014). Motorische Aktivierung zeigt sich auch in Parametern der Peripherphysiologie. Wenn beispielsweise eine sitzende Person eine andere Person auf einem Laufband beobachtet, steigt die Atmungsrate des Beobachters mit der Geschwindigkeit des Laufbandes und entsprechend der Anstrengung des Rennenden (Paccalin und Jeannerod 2000).

Die enge Verbindung von Handlungsausführung und Handlungsbeobachtung wird auf der neuronalen Ebene durch die Entdeckung von **Spiegelneuronen** (▶ Kap. 22) im prämotorischen Cortex (im Areal F5; Übersicht in Rizzolatti et al. 2001) und parietalen Bereichen (Areal PF im Brodmann-Areal 40; Gallese et al. 2002) des Gehirns von Makaken (eine Affenart) gestützt. Die Aktivität von Spiegelneuronen bildet sensorische Informationen einer beobachteten Handlung auf interne motorische Repräsentationen ab. Spiegelneurone feuern sowohl, wenn eine Bewegung selbst ausgeführt wird, als auch, wenn die gleiche oder eine ähnliche Bewegung bei anderen beobachtet wird. Sie feuern nur bei Sicht von zielgerichteten Bewegungen: Sie reagieren wenn der Affe eine Hand beobachtet, die ein Objekt greift, aber nicht, wenn nur die Hand oder das Objekt sichtbar ist (Rizzolatti et al. 2001). Dies impliziert, dass Spiegelneurone das Handlungsziel und nicht basale Eigenschaften der Bewegung, wie spezifische motorische Kommandos, Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsrichtung oder Muskelaktivität, codieren. Sie feuern jedoch, wenn Teile der beobachteten Handlung verdeckt sind, wenn auf das Ziel der Handlung geschlossen werden kann (Umilta et al. 2001). Sie feuern auch, wenn ein Affe nur typische Geräusche einer Handlung (z. B. zerreißendes Papier) hört, ohne dass die Handlung visuell präsentiert wird (Kohler et al. 2002).

Neurophysiologische und bildgebende Studien zeigen, dass beim Menschen ähnliche neuronale Mechanismen existieren (Übersicht in Buccino et al. 2004; Rizzolatti und Craighero 2004). Beim Menschen spricht man von einem **Spiegelsystem** und nicht von Spiegelneuronen, da in Studien am Menschen in der Regel nicht die Aktivität einzelner Neurone untersucht werden kann. (Allerdings konnten Mukamel et al. [2010] inzwischen auch die Existenz von Spiegelneuronen beim Menschen nachweisen.) Regionen des Spiegelsystems sind vor allem der prämotorische Cortex, der inferiore frontale Gyrus und der inferiore Parietallappen (Übersicht z. B. in Caspers et al. 2010; Grèzes und Decety 2001). Auch Aktivität im primären motorischen Cortex wird manchmal beobachtet (z. B. Hamilton et al. 2006; Hari et al. 1998). Sowohl bei der Ausführung von Handlungen als auch bei der Beobachtung von Handlungen ist die Aktivität in einigen Regionen somatotopisch organisiert (Buccino et al. 2001). Diese motorischen Regionen und weitere Regionen wie der STS werden gemeinsam oft als **Handlungsbeobachtungsnetzwerk** (*action observation network*, AON) bezeichnet (Grafton 2009). Weitere Regionen, wie der mediale Temporallappen und der somatosensorische Cortex, scheinen ebenfalls spiegelähnliche Eigenschaften aufzuweisen. Diese werden in Abhängigkeit von spezifischen Aufgabenanforderungen aktiviert (Keysers et al. 2004; Molenberghs et al. 2012). Die verschiedenen Areale des Handlungsbeobachtungsnetzwerkes haben reziproke Verbindungen untereinander.

21.3.2 Vorhersage von Handlungen anderer Personen

Motorische Simulation bei der Handlungsbeobachtung ist nicht nur ein motorischer Resonanzmechanismus, sondern es findet auch eine Vorhersage zukünftiger Zustände statt. Auf Verhaltensebene kann dies unter Verwendung des **Verdeckungsparadigmas** (*occlusion paradigm*) untersucht werden. Im Verdeckungsparadigma sehen Versuchspersonen eine Person,

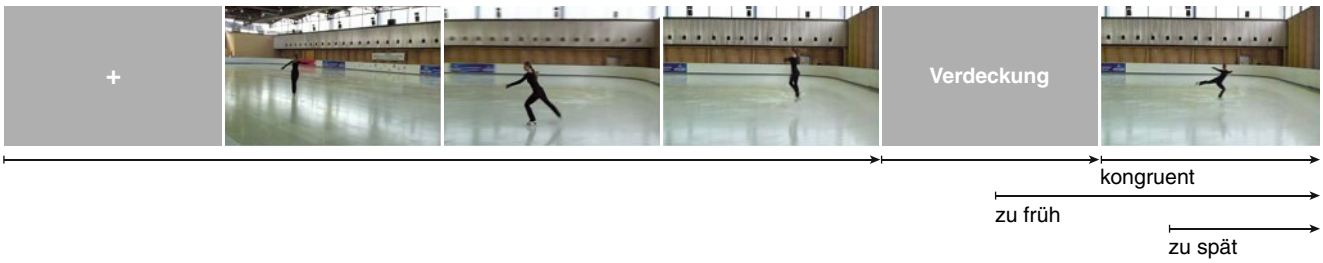


Abb. 21.10 Verdeckungsparadigma. Personen sehen ein Video einer Handlung (hier Eiskunstlaufen). Das Video wird zwischendurch für eine gewisse Zeit verdeckt und läuft dann weiter. Der Fortgang des Videos nach der Verdeckung kann zeitlich kongruent sein, d. h. so, als ob das Video die ganze Zeit weitergelaufen wäre, aber auch früher oder später einsetzen. (Video aus den Studien von Diersch et al. 2012, 2013)

die eine Handlung ausführt, z. B. in einem Video oder als eine Lichtpunktdarstellung. In einer Variante des Paradigmas wird die Handlung zu kritischen Zeitpunkten verdeckt, und die Personen müssen sagen, wie die Handlung weitergeht, bzw. den Ausgang der Handlung vorhersagen (z. B. Abernethy und Zawi 2007; Aglioti et al. 2008), beispielsweise ob beim Basketball ein Ball in den Korb geht (Aglioti et al. 2008). Die Güte dieser Vorhersagen hängt im Wesentlichen davon ab, ab wann die Handlung verdeckt wird, d. h., je früher die Handlung verdeckt wird, desto schwerer fällt die Vorhersage. Auch die Erfahrung, die man mit einer Handlung hat, spielt eine wesentliche Rolle für die Vorhersage (Aglioti et al. 2008; ▶ Abschn. 21.3.4).

In einer anderen Version des Paradigmas wird die Handlung auch zu bestimmten Zeitpunkten verdeckt, wird dann aber nach einem bestimmten Intervall fortgeführt. Die Präsentation der fortgeführten Handlung wird zeitlich manipuliert, d. h., sie wird entweder so fortgeführt, wie es dem tatsächlichen Zeitablauf entspricht, sie setzt zu einem früheren Zeitpunkt wieder ein, oder sie setzt zu einem späteren Zeitpunkt wieder ein. Versuchspersonen werden aufgefordert, die zeitliche Übereinstimmung zu beurteilen (Abb. 21.10). Dies erfordert die Simulation der Trajektorie der verdeckten Handlung und den Vergleich der darauf basierenden Vorhersage mit der tatsächlichen Fortsetzung der Handlung (z. B. Graf et al. 2007; Prinz und Rapinett 2008).

Beobachter sind in der Regel relativ gut darin zu beurteilen, wo und wann eine beobachtete Person nach der Verdeckung wieder auftauchen wird, wenn die Handlung für eine gewisse Zeit verdeckt ist. Eine interessante Frage ist, ob die Simulation während der Beobachtung in Echtzeit (d. h. in der gleichen Geschwindigkeit wie die beobachtete Handlung) abläuft. Hier divergieren die Ergebnisse verschiedener Studien. Beispielsweise präsentierten Graf et al. (2007) ihren Versuchspersonen verschiedene Handlungssequenzen von Lichtpunktläufern. Nach der Verdeckung wurde ihnen ein statisches Testbild der Handlung präsentiert. Personen sollten entscheiden, ob die Testposition der Person im Vergleich zur Handlungssequenz vor der Verdeckung rotiert war oder nicht. Die Versuchspersonen zeigten die beste Leistung, wenn die in der Testposition dargestellte Fortsetzung der Handlung zeitlich mit dem Verdeckungsintervall übereinstimmte. Dies spricht für eine Simulation in Echtzeit (vgl. auch Springer et al. 2013; Diersch et al. 2012, Exp. 2). Andere Studien fanden jedoch eine leichte zeitliche Verzögerung der Vorhersage (Prinz und Rapinett 2008; Sparenberg et al. 2012). Wiederum andere Befunde deuten darauf hin, dass die Simulation etwas schneller als in Echtzeit abläuft (Diersch et al. 2012, Exp. 1; Urgesi et al. 2010). Letzteres könnte möglicherweise funktional sein: Beobachter bilden Erwartungen und gleichen diese mit der beobachteten Handlung ab, um zu beurteilen, ob die Simulation korrekt ist (Kilner et al. 2007). Es ist jedoch noch unklar, inwieweit dies wirklich der Standardfall ist oder ob Unterschiede in verschiedenen Studien von Eigenschaften der beobachteten Handlung, wie Zielgerichtetheit oder Geschwindigkeit, abhängen (Diersch et al. 2012).

Auf neuronaler Ebene sind bei der Vorhersage beobachteter Handlungen Regionen des Handlungsbeobachtungsnetzwerkes aktiv, aber auch darüber hinausgehende Regionen, wie das Cerebellum (z. B. Cross et al. 2013; Kilner et al. 2004; Ramnani und Miall 2004). Aktivität im Cerebellum wird häufig mit der Bildung von internen Modellen (Vorwärtsmodellen und inversen Modellen; ▶ Abschn. 21.1) während der Handlungsbeobachtung in Verbindung gebracht (z. B. Blakemore und Decety 2001). Es wird angenommen, dass es bei der Beobachtung von Handlungen automatisch zur Spezifikation von inversen Modellen kommt, die die motorischen Kommandos zur Ausführung dieser Handlung berechnen. Vowärtsmodelle könnten eine Vorhersage über eintretende Handlungseffekte der beobachteten Handlung treffen (z. B. Blakemore und Decety 2001). Weitere Studien weisen auf eine Beteiligung der Basalganglien an der Vorhersage beobachteter Handlungen hin, insbesondere wenn interne Vorhersagen verletzt werden (z. B. Schiffer und Schubotz 2011).

Ein Modell, das eine Erklärung dafür liefert, wie die Vorhersage beobachteter Handlungen andere Personen durch die Interaktionen verschiedener Strukturen im Gehirn implementiert sein könnte, ist die **Vorhersagecodierung** (*predictive coding*) (Friston et al. 2011; Kilner et al. 2007). Das Modell der Vorhersagecodierung ist ein bayesianisches schlussfolgerndes System, in dem die Gehirnareale, die bei der Handlungsbeobachtung eine Rolle spielen, hierarchisch organisiert sind und reziproke Verbindungen haben. Information wird nicht nur von einem Areal zum anderen weitergereicht. Stattdessen werden auf jeder Ebene der corticalen Hierarchie, unter Verwendung von Vorwärtsmodellen (*generativen Modellen*), Vorhersagen für die darunterliegende Ebene gebildet und mit tatsächlichen Repräsentationen verglichen. Bei der Handlungsbeobachtung werden, wenn eine Erwartung über das Handlungsziel der beobachteten Person besteht, die dazugehörigen motorischen Kommandos vorhergesagt. Unter Verwendung des eigenen Handlungssystems kann dann die Kinematik der beobachteten Bewegung vorhergesagt werden. Der Vergleich der vorhergesagten Kinematik und der beobachteten Kinematik resultiert in einem Vorhersagefehler, der zurück nach oben in die corticale Hierarchie gemeldet wird. Dieser wird

verwendet, um die Repräsentation der motorischen Kommandos der beobachteten Person zu aktualisieren. Die Vorhersage wird somit durch eine Minimierung des Vorhersagefehlers realisiert, indem das generative Modell basierend auf den wahrgenommenen Konsequenzen auf jedem Niveau der corticalen Hierarchie angepasst und so die interne Handlungsrepräsentation verfeinert wird (Kilner et al. 2007; Friston et al. 2011).

21.3.3 Handlungssimulation und Handlungsvorhersage im sozialen Kontext

Aufgrund seiner Eigenschaften wird dem Spiegelsystem/Handlungsbeobachtungsnetzwerk und damit einhergehend automatischer Imitation und Handlungsvorhersage oft eine essenzielle Rolle bei sozialer Kognition zugeschrieben (z. B. Gallese et al. 2004; Iacoboni 2007; Jacob und Jeannerod 2005). Beobachter können viele sozial relevante Charakteristiken allein aus degradierten Darstellungen und Lichtpunktdarstellungen menschlicher Handlungen entnehmen, beispielsweise das Geschlecht (Barclay et al. 1978; Übersicht in Blake und Shiffrar 2007). Besonders salient für Beobachter sind emotionale Zustände beobachteter Personen, die Beobachter ebenfalls allein anhand von Lichtpunktdarstellungen erkennen können (Atkinson et al. 2004).

Allein die Beobachtung eines Verhaltens bei einer anderen Person erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass man selbst dieses Verhalten ausführt. Es kommt zu einer unbewussten Tendenz, das Verhalten anderer zu imitieren (Chartrand und Bargh 1999; Übersicht in Heyes 2013). Dieses Phänomen ist als **Chamäleon-Effekt** (*chameleon effect*) bekannt (Chartrand und Bargh 1999) und wird als ein Beleg für automatische motorische Aktivierung bei der Beobachtung der Handlungen anderer Personen betrachtet. Nicht nur bei der Beobachtung von Handlungen, sondern auch bei der Beobachtung von emotionalem Verhalten kommt es zu einer automatischen Imitationstendenz; hier spricht man von **emotionaler Ansteckung** (*emotional contagion*; Hatfield et al. 1994).

Untersucht wird der Chamäleon-Effekt, indem zwei Personen gemeinsam an einer Aufgabe arbeiten. Eine Person (Komplize des Versuchsleiters) zeigt gehäuft eine bestimmte Verhaltensweise (z. B. sich an der Nase reiben). Die andere Person ist die eigentliche Versuchsperson. Es wird dann analysiert, ob die Versuchsperson im Vergleich zu einer Baseline-Bedingung oder einer Bedingung, in der der Komplize eine andere Verhaltensweise zeigt, die beobachtete Verhaltensweise häufiger zeigt. Beispielsweise nahmen in der Studie von Chartrand und Bargh (1999) Versuchspersonen an zwei konsekutiven dyadischen Sitzungen teil, die je ungefähr 10 min dauerten und in denen sie Fotografien beschreiben sollten. In jeder Sitzung war ein anderer Komplize des Versuchsleiters anwesend. Der Komplize rieb sich entweder im Gesicht oder wackelte mit dem Fuß. Diese Verhaltensweisen wurden von den Versuchspersonen in den Sitzungen, in denen sie die jeweilige Verhaltensweise am Komplizen beobachten konnten, häufiger ausgeführt als in der anderen Sitzung, in der diese Verhaltensweise vom Komplizen nicht gezeigt wurde. Dieser Effekt ist vielfach repliziert: Personen tendieren dazu Gesten, Haltungen (z. B. Chartrand und Bargh 1999), Artikulation, Aussprache und emotionale Tonlage der Stimme (Neumann und Strack 2000) und das Atemmuster (Paccalin und Jeannerod 2000) von anderen Personen zu imitieren.

Personen tendieren auch dazu, den Gesichtsausdruck (z. B. Dimberg et al. 2000; Zajonc et al. 1987) zu imitieren. Die Imitation von Gesichtsausdrücken kann sogar permanente Spuren hinterlassen. Die Analyse von Fotografien von Paaren vor ihrer Hochzeit und 25 Jahre danach zeigt, dass die Gesichtszüge der Paare sich nach 25 Jahren ähnlicher sind als vor der Hochzeit. Die Gesichter der Partner sind einander auch ähnlicher als Gesichtern zufälliger Personen gleichen Alters (Zajonc et al. 1987). Dies wird dadurch erklärt, dass Partner, bedingt durch viele Interaktionen, sich oft gegenseitig imitieren. Dabei nimmt die Gesichtsmuskulatur ähnliche Zustände an. Über viele Jahre hinweg werden sich dadurch die Gesichter ähnlicher.

Auch wenn Imitation einer beobachteten Handlung nicht immer notwendig ist, gibt es Situationen, in denen dies hilfreich oder wichtig ist. Automatische Imitation könnte somit tatsächliche Imitation in Situation erleichtern, in denen die Imitation von anderen angemessen ist (z. B. Rizzolatti et al. 2001). Imitation ist für eine Reihe von sozialen Zielen notwendig: Imitation, Körperhaltungen und Gesten signalisieren Zugehörigkeit, Sympathie und Empathie (z. B. Bavelas et al. 1986; Lakin und Chartrand 2003) und könnten eine prosoziale Orientierung beim Beobachtenden fördern (van Baaren et al. 2004; Übersicht in Blake und Shiffrar 2007).

Die offensichtlichste Situation, in der Imitation notwendig ist, ist *Beobachtungslernen*. Beispielsweise lernen Kinder und Erwachsene kulturell angemessenes Verhalten von anderen Personen, ohne dass es ihnen aktiv beigebracht wird (z. B. Blandin et al. 1999). Der Beobachter muss dazu in der Lage sein, den Körper und die Handlungen der beobachteten Person einer mentalen Repräsentation des eigenen Körpers zuzuordnen, um die gesehenen Handlungen entweder direkt oder zu einem späteren Zeitpunkt zu reproduzieren.

Für soziale Situationen ist es von Bedeutung, dass Handlungsbeobachtung nicht nur zu motorischer Resonanz führt, sondern auch eine Vorhersage zukünftiger Zustände stattfindet. Die Vorhersage von Handlungen anderer Personen könnte zum Verständnis dieser Handlungen beitragen (z. B. Blakemore und Decety 2001; Jeannerod 2001). Spezifisch könnten Schlussfolgerungen über die Intentionen anderer Personen getroffen werden (z. B. Blakemore und Decety 2001; Blakemore und Frith 2005). Auf einer funktionellen Ebene könnten Vorwärtsmodelle die Konsequenzen beobachteter Handlungen vorhersagen. Es wird dann geschätzt, was die eigenen Intentionen wären, wenn man die Handlung im gleichen Kontext ausführen würde. Wenn wir beispielsweise beobachten, wie eine Person die Hand durch die Luft bewegt, wird dies nicht nur als eine Bewegung der der Hand gesehen, sondern als „winken“ verstanden und kategorisiert. Weiterhin könnte dies so interpretiert werden, dass die Person die Intention hat, eine andere Person zu grüßen: Solch eine basale Form einer *Theory of Mind* könnte die Voraussetzung für höhere Formen des Verständnisses anderer Personen sein. In dem Beispiel könnte dies beinhalten, dass man versteht, dass die winkende Person sich freut oder höflich sein will (Blakemore und

Decety 2001). Diese verschiedenen Funktionen kann man auf unterschiedlichen hierarchischen Ebenen anordnen. Beispielsweise schlagen Blakemore und Frith (2005) vor, dass auf der untersten Ebene automatische motorische Ansteckung stattfindet. Auf dem nächsten Niveau werden Bewegungsziele repräsentiert und auf einem weiteren Niveau Handlungsintentionen.

Das Verständnis der Handlungen anderer Personen könnte dazu beitragen, Empathie zwischen Beobachtenden und Beobachteten herzustellen. Unter Verwendung des Spiegelsystems könnten Beobachter auf affektive Zustände wie Schmerz (Jackson et al. 2005) oder Ekel (Wicker et al. 2003) schließen. Beispielsweise wurde (unter Verwendung von TMS) gezeigt, dass die Beobachtung von Nadeln, die in menschliche Hände, Füße oder ein Objekt eindringen, zu einer Reduktion der Amplitude der MEPs spezifisch an den Muskeln führt, an denen das Modell gepikst wird. Dies ist mit der subjektiven Einschätzung des Schmerzes, der dem Modell zugeschrieben wird, korreliert (Avenanti et al. 2005). Derlei Befunde legen den Schluss nahe, dass individuelle Unterschiede in der Fähigkeit, beobachtete Handlungen zu simulieren, zu individuellen Unterschieden in sozialer Kognition führen könnten.

Auch beim gemeinsamen und interaktiven Handeln könnten Vorhersagemechanismen eine wichtige Rolle spielen (z. B. Sebanz et al. 2006). Viele unserer alltäglichen Handlungen sind interaktiv, beispielsweise bei Sportarten wie Judo und Handball oder beim Überreichen eines Gegenstands. In solchen Situationen ist es notwendig, die Handlung von anderen Personen mit zu repräsentieren (Sebanz et al. 2003) und die eigenen Handlungen auf die Handlungen anderer Personen abzustimmen (Knoblich und Jordan 2003). Hierbei ist es oft wichtig, beispielsweise bei kompetitiven Sportarten, nicht nur auf die Handlungen anderer zu reagieren, sondern diese zu antizipieren. In solchen Situationen ist es interessanterweise jedoch oft wichtig, nicht zu imitieren, sondern eine Komplementärhandlung auszuführen. Auch hierbei spielt das Spiegelsystem eine wichtige Rolle (z. B. Newman-Norlund et al. 2007).

Eine sehr weitreichende Interpretation der Funktion von motorischer Resonanz und Vorhersagemechanismen ist jedoch auch mit Vorsicht zu betrachten. Es ist unbestritten, dass wir im alltäglichen Leben ständig das Verhalten anderer Personen beobachten und in Bezug auf Ziele, Intentionen und Gründe interpretieren. Es ist jedoch zweifelhaft, dass dies tatsächlich immer unter Verwendung des Handlungsbeobachtungsnetzwerkes geschieht (Brass et al. 2007; Jacob und Jeannerod 2005; de Lange et al. 2008). Wenn wir beispielsweise jemanden beobachten, der eine Haustür aufschließt, können wir allein aufgrund der Informationen, die uns vom Handlungsbeobachtungsnetzwerk zur Verfügung gestellt werden, nicht beurteilen, ob die handelnde Person dort wohnt und nach Hause möchte oder ein Dieb ist, der Dinge stehlen will.

21.3.4 Handlungserfahrung und Expertise

Wenn wir bei der Handlungsbeobachtung auf dieselben kognitiven und neuralen Mechanismen zurückgreifen, die an der Ausführung von Handlungen beteiligt sind, dann sollte die Handlungsbeobachtung in Abhängigkeit von der Erfahrung, die wir mit einer Handlung haben, variieren. Konsistent mit dieser Annahme zeigt sich, dass motorische Erfahrung zu einer adäquateren Simulation und damit zu genaueren Urteilen beispielsweise im Verdeckungsparadigma führt. Auch wird das Handlungsbeobachtungsnetzwerk bei Experten in stärkerem Ausmaß aktiviert. Der Vorteil von Experten ist spezifisch für die gelernte Handlung. Beispielsweise können Eiskunstläufer die Fortsetzung von Eiskunstlauffiguren besser vorhersagen als Novizen. Dieser Vorteil zeigt sich nicht bei einfachen Bewegungen (Diersch et al. 2012). Die Effekte von Expertise sind auch auf neuronaler Ebene zu beobachten. Beispielsweise verwendeten Calvo-Merino et al. (2005) funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI; ▶ Kap. 2), um die Gehirnaktivität während der Beobachtung von Handlungen zu untersuchen, für die Versuchspersonen entweder die Ausführungsfertigkeiten hatten oder nicht. Die Versuchspersonen waren Ballett- und Capoeiratänzer und sahen Videos, in denen Personen entweder Ballet oder Capoeira tanzten. Wenn Personen ihren eigenen Tanzstil beobachteten, zeigte sich eine stärkere Aktivität in Regionen, die dem Handlungsbeobachtungsnetzwerk zugeschrieben werden. Dies ist nicht auf visuelle Erfahrung zurückzuführen sondern spezfisch auf motorische Erfahrung (Calvo-Merino et al. 2006). Im Vergleich zu Experten sind bei Nichtexperten während der Handlungsbeobachtung hingegen visuelle Areale stärker aktiviert (Wright et al. 2011).

Ein wesentlicher Faktor für Effekte von motorischer Expertise ist das Ausmaß an Information, die Experten im Vergleich zu Novizen aus der Bewegungskinematik extrahieren können. Beispielsweise sagen Basketballspieler den Erfolg freier Würfe auf einen Korb früher und akkurater vorher als Personen mit vergleichbarer visueller Erfahrung (Trainer und Sportjournalisten) oder Novizen. Basketballspieler treffen akkuratere Vorhersagen schon bevor der Ball die Hand der beobachteten Person verlässt, was darauf hindeutet, dass Athleten das Schicksal des Balles vorhersagen, indem sie die Körperkinematik lesen (Aglioti et al. 2008; ◘ Abb. 21.11). Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich für Badminton (Abernethy und Zawi 2007) und Volleyball (Urgesi et al. 2012).

Nicht nur Expertise, die auf jahrelanger Erfahrung beruht, hat Einfluss auf die Art und Weise, wie Handlungen beobachtet werden. Auch wenn Personen in einem experimentellen Kontext trainiert werden, bestimmte Bewegungen auszuführen, führt dies zu einer besseren Leistung in einer anschließenden perzeptuellen Aufgabe, bei der die trainierte Bewegung eine Rolle spielt. Dies geschieht, auch wenn Personen während des Trainings ihre eigenen Bewegungen nicht sehen können. Wenn Personen beispielsweise ohne visuelles Feedback lernen, Armbewegungen in einem sinusoidalen zeitlichen Muster auszuführen, können sie hinterher vergleichbare, visuell präsentierte Bewegungen besser erkennen als eine Kontrollgruppe (Hecht et al. 2001; vgl. auch Casile und Giese 2006).

Wenn motorische Expertise und Erfahrung die Beurteilung von beobachteten Handlungen beeinflusst, sollten Beobachter maximale Sensitivität für Handlungen haben, mit denen sie am meisten vertraut sind, d. h. Handlungen, die sie selbst ausgeführt haben. Hier ist dasselbe System, das einst die Handlung geplant und ausgeführt hat, daran beteiligt, die Handlung wahrzuneh-

men. Es zeigt sich tatsächlich, dass Beobachter besser in der Lage sind, eigene beobachtete Handlungen vorherzusagen als die Handlungen anderer Personen. In einer Studie von Knoblich und Flach (2001) warfen Versuchspersonen Darts auf ein Dartboard. Eine Woche später sahen sie kurze Videosequenzen, die einen Arm zeigten, der einen Dartwurf ausführte. Die Videos stoppten immer in dem Moment, in dem der Dart losgelassen wurde. Versuchspersonen wurden gebeten vorherzusagen, wo der Dart auf dem Board landen würde. Die Genauigkeit der Vorhersage war am höchsten, wenn Personen ihre eigenen Würfe sahen. Ähnliches zeigt sich auch bei der Beurteilung von Schreibstrichen (Knoblich et al. 2002) und beim Tischtennisspielen (Bischoff et al. 2012). Ebenso sind Beobachter besonders gut darin zu beurteilen, ob zwei Lichtpunktanimationen denselben Handelnden darstellen, wenn die Animationen mit eigenen, Monate vorher ausgeführten Bewegungen erzeugt wurden (Loula et al. 2005). Personen sind auch besser darin, sich selbst als Lichtpunktanimationen zu identifizieren als einen Freund oder fremde Personen (Loula et al. 2005). Tatsächlich haben Personen mehr visuelle Erfahrung mit der Bewegung von Freunden als mit ihren eigenen Bewegungen. Die überlegene Identifikationsperformanz illustriert noch einmal eindrucksvoll, dass motorische Erfahrung zum visuellen Erkennen beiträgt. Interessanterweise zeigen sich ähnliche Befunde auch, wenn auditive Handlungseffekte präsentiert werden. Pianisten können Aufnahmen ihres eigenen Spielens mehrerer Monate nach dem Spielen von denen anderer Pianisten unterscheiden, auch wenn dynamische Nuancen (z. B. Tempo, Intensität) entfernt werden (Repp und Knoblich 2004).

21.3.5 Sind biologische Bewegungen wirklich besonders?

Eingangs wurde dargestellt, dass biologische, menschliche Bewegungen besonders sind und anders verarbeitet werden als Bewegungen von unbelebten Objekten. In den vorhergehenden Abschnitten sind wir darauf eingegangen, welche Mechanismen dabei eine Rolle spielen. Tatsächlich ist es jedoch so, dass Studien, in denen menschliche und nichtmenschliche Handlungen verglichen werden, und Studien, in denen biomechanisch mögliche und unmögliche Bewegungen verglichen werden, widersprüchliche Befunde ergeben.

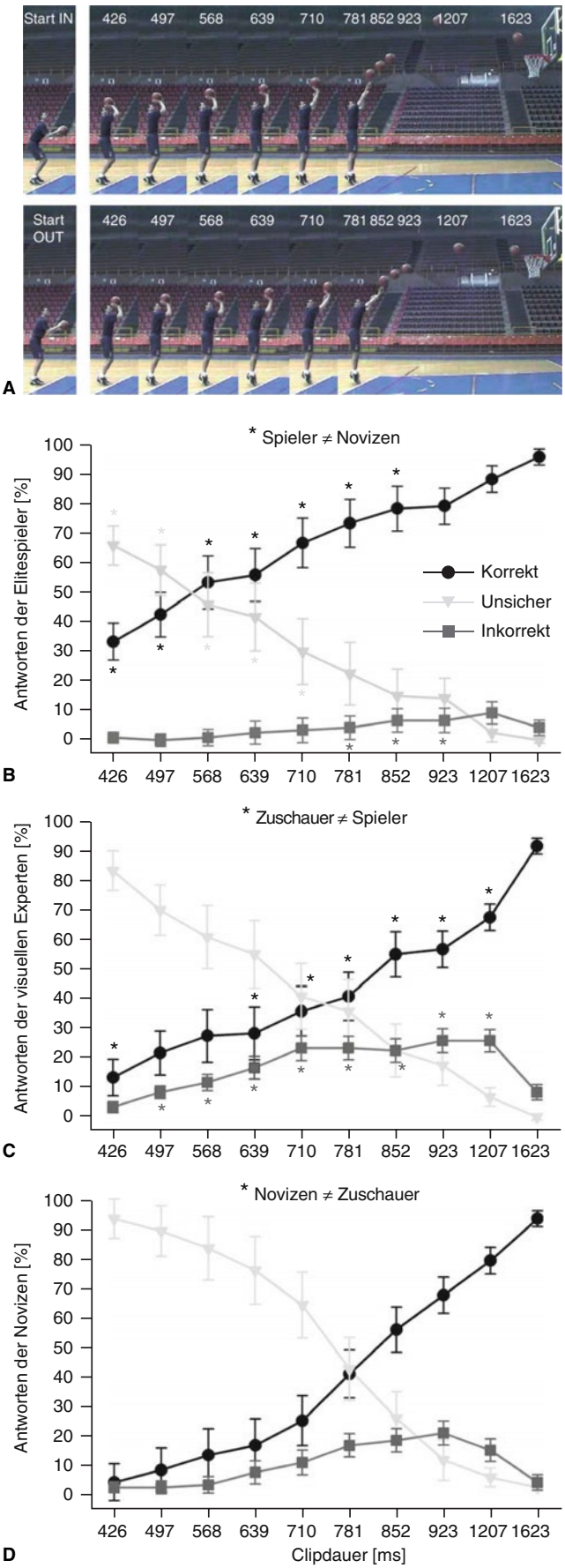


Abb. 21.11 **A** Zwei beispielhafte Videosequenzen. In einer Sequenz geht der Ball in den Korb (Start IN), in der anderen nicht (Start OUT). Die Videos wurden zu unterschiedlichen Zeiten angehalten. Versuchspersonen sollten in jedem Durchgang angeben, ob der Ball im Korb oder außerhalb des Korbes landen wird oder ob sie sich unsicher sind. Mittelwerte und Standardfehler des Prozentsatzes der richtigen, falschen und der unsicheren Antworten sind in der Abbildung zu sehen: **B** Daten der Elitespieler, **C** Daten der visuellen Experten, **D** Daten der Novizen. Der Prozentsatz korrekter und inkorrekter Antworten gibt Aufschluss über die Fähigkeit der Versuchspersonen, den Fortgang der Ballwürfe vorherzusagen. Der Punkt, an dem sich die unsicheren und korrekten Antworten kreuzen, gibt die Videoclipdauer an, bei der die korrekten Antworten häufiger als die unsicheren Antworten sind (568 ms bei Elitespielern, 710 ms bei visuellen Experten und 781 ms bei Novizen). Sternchen zeigen signifikante Vergleiche an. (Modifiziert nach Aglioti et al. 2008. © 2008, mit Erlaubnis von Nature Publishing Group)

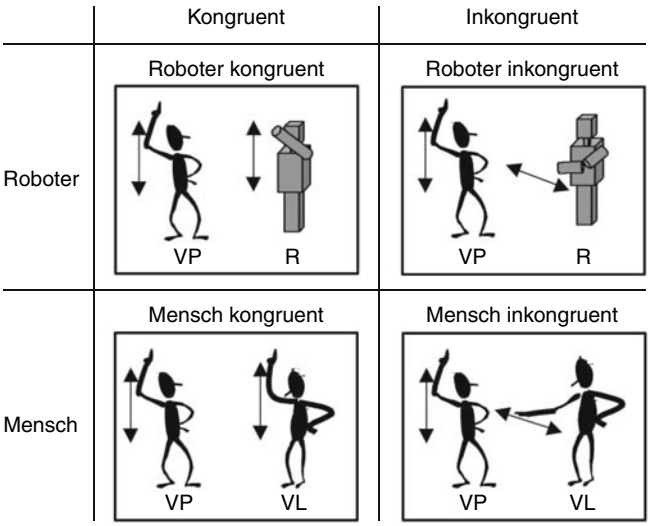


Abb. 21.12 Experimentelle Bedingungen im Experiment von Kilner et al. (2003). Die Versuchspersonen beobachteten nur die Armbewegungen. *VP* Versuchsperson, *R* Roboter, *VL* Versuchsleiter. (Nach Kilner et al. 2003. © 2003, mit Erlaubnis von Elsevier)

In einigen Studien zeigt sich, dass Bewegungen, die von Menschen ausgeführt werden, anders verarbeitet werden als Bewegungen, die von Robotern ausgeführt werden. Beispielsweise baten Kilner et al. (2003; Abb. 21.12) ihre Versuchspersonen, Bewegungen mit dem rechten Arm auszuführen, während sie horizontale oder vertikale Armbewegungen sahen, die entweder kongruent oder inkongruent mit der eigenen Bewegung waren. Die beobachtete Armbewegung wurde entweder von einem Menschen (biologisch) oder einem Roboter (nicht biologisch) ausgeführt. In der Bedingung mit menschlichem Arm führte Inkongruenz zwischen eigener und beobachteter Bewegung zu mehr Interferenz als in der Bedingung mit dem Roboterarm. Auch zeigten Jacobs et al. (2004), dass die Fähigkeit, die Geschwindigkeit von Lichtpunktläufern zu unterscheiden, in Abhängigkeit davon variiert, ob die Handlung möglich (vorwärts gehen) oder unmöglich (vorwärts gehen rückwärts abgespielt) ist.

Unterschiede in der Verarbeitung von biologischen und nichtbiologischen Bewegungen werden jedoch nicht immer gefunden. Die Größe von automatischen Imitationseffekten hängt oftmals vom Glauben der Versuchspersonen über den biologischen oder nichtbiologischen Ursprung der Stimuli und nicht von den Stimuli selbst ab. In einer Studie bekamen Versuchspersonen Zeige- und Mittelfinger einer menschlichen Hand mit Handschuh als Stimuli präsentiert. Versuchspersonen, denen vorher gesagt wurde, dass die Bewegungen von einer Holzhand erzeugt wurden, zeigten einen kleineren automatischen Imitationseffekt als Versuchspersonen, die glaubten, dass sie menschliche Bewegungen sehen würde (Liepelt und Brass 2010). Auch Unterschiede zwischen möglichen und unmöglichen Bewegungen treten manchmal nur auf, wenn Versuchspersonen in den Instruktionen explizit auf die Möglichkeit/Unmöglichkeit der Bewegung hingewiesen werden (z. B. Longo et al. 2008). Top-down-Einflüsse, möglicherweise moduliert durch Lenkung der Aufmerksamkeit auf unterschiedliche Aspekte der Bewegung (Longo et al. 2008), sind wahrscheinlich daran beteiligt, ob biomechanisch mögliche und unmögliche oder menschliche und nichtmenschliche Bewegungen unterschiedlich verarbeitet werden.

Auch auf neuronaler Ebene sind die Befunde widersprüchlich. Beispielsweise fanden Tai et al. (2004), dass die Beobachtung von Greifbewegungen eines Menschen im Vergleich zur Beobachtung von Greifbewegungen eines Roboters zu einer stärkeren Aktivität im linken prämotorischen Cortex führt. Stevens et al. (2000) fanden, dass die Aktivität motorischer Areale im Cortex bei der Beobachtung von biologisch möglichen Finger-, Hand-, Arm-, Mund- oder Fußbewegungen auftritt, nicht jedoch bei biologisch unmöglichen Körperbewegungen wie z. B. einem Arm, der sich durch ein Bein bewegt. Andere Studien zeigen jedoch, dass das Handlungsbeobachtungsnetzwerk, insbesondere der prämotorische Cortex, auf ähnliche Art auf biologische wie auf nichtbiologische Stimuli reagiert (z. B. Gazzola et al. 2007). Cross et al. (2012) fanden sogar, dass das Handlungsbeobachtungsnetzwerk stärker auf rigide, roboterartige Bewegungen als auf menschliche Bewegungen reagiert. Auch bei biomechanisch unmöglichen Bewegungen zeigt sich manchmal Aktivität in motorischen Arealen (Costantini et al. 2005). Es könnte somit sein, dass das Handlungsbeobachtungsnetzwerk nicht so spezifisch für biologische Bewegung ist wie ursprünglich gedacht.

21.3.6 Fazit

Wie dargestellt wurde, führt Handlungsbeobachtung zu motorischer Simulation beim Beobachter (▶ Abschn. 21.3.1). Diese Simulation beinhaltet eine Vorhersage über den Fortgang der Handlung (▶ Abschn. 21.3.2). Simulation spielt eine wichtige Rolle bei verschiedensten kognitiven Prozessen. Handlungsbeobachtung ist jedoch eine spezielle Situation: Während in vielen anderen Fällen Simulation „offline" geschieht, z. B. bei mentalen Vorstellungen, geschieht Simulation bei der Handlungsbeobachtung „online", d. h. gleichzeitig mit der beobachteten Handlung. Hierbei hat der Beobachtende keine zeitliche Kontrolle über das Ereignis selbst; die Simulation muss sich dem Ereignis anpassen. Es wurde auch gezeigt, dass die Qualität der Simulation und Vorhersage von der Erfahrung abhängt, die man mit einer Handlung hat (▶ Abschn. 21.3.4). Darüber hinaus wurde diskutiert, dass trotz der vielfältigen Belege, dass die Beobachtung von Handlungen anderer Personen sich wesentlich von der Beobachtung von Objektbewegungen unterscheidet, auch Befunde existieren, die zeigen, dass dies nicht immer so eindeutig ist, wie man ursprünglich gedacht hat (▶ Abschn. 21.3.5).

Es wurde darauf eingegangen, dass motorische Simulation und Vorhersage von Handlungen vermutlich eine wichtige Rolle in sozialen Kontexten spielen (▶ Abschn. 21.3.3). Eine weitere mögliche Funktion des Spiegelsystems wurde bisher noch nicht erwähnt. Das Spiegelsystem könnte eine Rolle in der evolutionären Entwicklung der Sprache gespielt haben (Corballis 2004; Rizzolatti und Arbib 1998; vgl. aber Deacon 2004). Dafür spricht, dass das Areal F5 bei Makaken (in dem Spiegelneurone gefunden wurden) und das Broca-Areal beim Menschen, das eine Rolle bei der Sprachverarbeitung spielt, physiologisch homolog sind (Binkofski und Buccino 2004). Des Weiteren wird argumentiert,

dass Personen für eine erfolgreiche Verwendung von Sprache auf die funktionelle Äquivalenz von Sprechen und Wahrnehmung gesprochener Sprache abgestimmt sein müssen. Dieses Erkennen der Äquivalenz von perzeptuellen Ereignissen und korrespondierenden motorischen Ereignissen ist der Funktion von Spiegelneuronen ähnlich. Aus diesen Gründen könnte die neuronale Hardware des Spiegelsystems eine Voraussetzung für die Entwicklung der Sprache beim Menschen sein. Auf die Rolle von Embodiment beim Sprachverständnis wird in ▶ Abschn. 21.5 eingegangen.

Ist motorische Simulation während der Handlungsbobachtung obligatorisch und funktional, wie es in einer starken/radikalen Form von Embodiment angenommen wird, oder optional, wie es in einer schwachen Variante von Embodiment angenommen wird? Die dargestellten Befunde zu Expertise und Handlungserfahrung deuten darauf hin, dass die Art und Weise, wie beobachtete Handlungen verarbeitet werden, individuellen Unterschieden unterliegt. Jedoch trägt eine motorische Simulation wesentlich zur Qualität der Beobachtung, der Vorhersage und dem Verständnis von Handlungen anderer Personen bei. Dies zeigt sich auch darin, dass es negative Auswirkungen haben kann, wenn das eigene motorische System beschäftigt ist, während man Handlungen anderer beobachtet. Beispielsweise führt die Ausführung einer bestimmten Handlung (Heben eines leichten oder schweren Kastens) zu Interferenz mit Urteilen über vergleichbare Handlungen anderer Personen (ob diese einen leichten oder schweren Kasten hochheben) (Hamilton et al. 2004).

Welche Auswirkungen die Verfügbarkeit oder Nichtverfügbarkeit des eigenen motorischen Systems hat, ist bisher weitestgehend ungeklärt. Vor allem in sozialen Situationen beobachtet man gewöhnlich nicht passiv, sondern interagiert mit anderen Personen. Beispielsweise ist während eines Fußballspieles das motorische System eines Fußballspielers mit den eigenen Bewegungen beschäftigt. Nichtsdestotrotz muss er die Bewegungen und Taktiken anderer Spieler vorhersagen, um adäquat zu handeln. Steht ein Teil dann auch noch für motorische Simulationen der anderen Spieler zur Verfügung? Wie werden die Handlungen von mehreren verschiedenen Mit- und Gegenspielern simuliert? Es scheint zweifelhaft, dass in solchen Situationen motorische Simulation einen wesentlichen Beitrag leisten kann.

Ebenso wie bei Handlungsvorstellungen kommt es bei beobachteten Handlungen nicht zu einer tatsächlichen Ausführung der Handlung. Auch bei beobachteten Handlungen muss verhindert werden, dass die beobachtete Handlung ausgeführt wird. Theoretisch ist es möglich, dass genauso wie bei Handlungsvorstellungen (▶ Abschn. 21.2.3) verschiedene hemmende Mechanismen eine Rolle spielen (Baldissera et al. 2001; Brass et al. 2001b).

21.4 Sense of Agency

Sense of Agency (SoA) bezeichnet einen wichtigen Aspekt der Wahrnehmung eigener Handlungen, nämlich das subjektive Erleben, Urheber unserer Handlungen zu sein und durch die Handlungen Ereignisse in der umgebenden Welt zu kontrollieren. Im Unterschied zu stabile(re)n Kontroll- und Selbstwirksamkeitsüberzeugungen sowie Attributionsstilen (Abramson et al. 1978; Bandura 1977; Rotter 1966) bezeichnet SoA das flüchtige subjektive Erleben von spezifischen Handlungen vor, während und nach ihrer Durchführung. Im Unterschied zu ▶ Abschn. 21.2 und 21.3 sowie 21.5 zeigt sich Embodiment bei SoA nicht primär in der Simulation vorgestellter, beobachteter oder beschriebener Handlungen, sondern vielmehr in der Überwachung und Nutzung körpereigener Signale als Indizien für SoA bei und nach der Ausführung eigener Handlungen (▶ Abschn. 21.1).

Schon Narziss Ach (1905, 1910), einer der Begründer der Volitionspsychologie, sah subjektives Handlungserleben als einen zentralen Aspekt der von ihm untersuchten „Willensakte“ und schlug zu ihrer Untersuchung das „kombinierte Verfahren“ vor, bei dem die „experimentelle Selbstbeobachtung“ ein wesentlicher Bestandteil war. Introspektion bzw. Selbstbeobachtung wurde schon zu Achs Lebzeiten von Zeitgenossen kritisiert und geriet im Zuge des Behaviorismus weiter in Verruf. So ist es vielleicht kein Wunder, dass Fragen nach dem subjektiven Handlungserleben lange Zeit in der experimentellen Handlungskontrollforschung vernachlässigt wurden, weil sie als epiphänomenal angesehen wurden. Erst in den letzten 15 bis 20 Jahren hat die Erforschung von SoA als einem zentralen Aspekt des subjektiven Handlungserlebens eine Renaissance erfahren. In der Zwischenzeit geht man davon aus, dass SoA ein Baustein des sogenannten minimalen *embodied* Selbst (*minimal self/embodied self*; Gallagher 2000) und damit wichtig für die Unterscheidung von selbst verursachten und fremdverursachten Handlungen und Handlungskonsequenzen ist. Die Frage nach Selbst-Fremd-Unterscheidung hat insbesondere angesichts der Evidenz für geteilte (Handlungs-)Repräsentationen zwischen Akteuren bzw. zwischen Akteur und Beobachter, wie beispielsweise durch das Spiegelneuronensystem (Iacoboni und Mazziotta 2007; Brass et al. 2009; ▶ Abschn. 21.3), an Bedeutung gewonnen. SoA und Selbst-Fremd-Unterscheidung scheinen in diesem Zusammenhang eine Grundvoraussetzung für adaptive Handlungskontrolle und subjektives Wohlbefinden zu sein. Sie sind bei diversen klinischen Populationen, beispielsweise bei schizophrenen Patienten mit Passivitätserleben/Kontrollwahn (Frith et al. 2000; Voss et al. 2010; ▶ Abschn. 21.6), Zwangspatienten (Gentsch et al. 2012; Reuven-Magril et al. 2008) oder Depressiven (z. B. Alloy und Abramson 1979) verändert bzw. gestört. Zusätzlich wird inzwischen mitunter vermutet, dass das Streben nach Kontrolle bzw. optimaler Vorhersagbarkeit (Friston und Kiebel 2009) sowie nach Selbstbestätigung (*self verification*) und Selbstwerterhöhung (*self enhancement*) grundlegende Bedürfnisse bzw. Motive von Menschen sind (z. B. Leary 2007), sodass SoA als ein „Informant“ für Selbstbestätigung und Kontrolle wieder stärker ins Forscherbewusstsein gerückt ist.

Wie erleben wir Agency, und worauf basiert SoA? Wir haben selten eine intensive Phänomenologie von Agency. Hingegen erkennen wir Störungen von Agency sofort, wenn unsere Handlungen sich nicht so entfalten wie erwartet oder sie nicht die gewünschten Effekte erzielen. Chambon et al. (2014; vgl. auch Frith 2013) gehen sogar so weit zu behaupten, dass unser Erleben von Urheberschaft nur dann offensichtlich wird, wenn es verletzt wird, d. h. der normalerweise erlebte „Fluss“ von der Intention zur Handlung und ihren Konsequenzen gestört ist. Um zu verste-

hen, worauf SoA basiert, ist es daher wichtig zu bestimmen, wo in der Intention-Handlung-Effekt-Kette Unterbrechungen bzw. Störungsquellen zu verorten sind – und in Bezug auf Embodiment – inwiefern sie etwas mit körpereigenen Signalen wie internen Prozessen der Handlungsvorbereitung zu tun haben. Im Folgenden werden nach der Beschreibung der grundlegenden Ansätze zur Untersuchung von SoA (▶ Abschn. 21.4.1) die wichtigsten bisher identifizierten Einflussfaktoren und „Unterbrechungen" von SoA dargelegt und die dominierenden Erklärungsansätze vorgestellt (▶ Abschn. 21.4.2, 21.4.3 und 21.4.4). Abschließend werden aktuelle und offene Fragen diskutiert (▶ Abschn. 21.4.5).

21.4.1 Untersuchungsmethoden

SoA wird üblicherweise in „operanten" Kontexten untersucht, in denen Handlungen von sensorischen Ereignissen (z. B. Tönen unterschiedlicher Tonhöhe) gefolgt werden. In Studien mit *direkten* bzw. *expliziten* SoA-Maßen wird um eine direkte Einschätzung des Agency-Erlebens gebeten. Dabei sollen Versuchspersonen meist ihr Agency-Erleben – ähnlich wie bei Untersuchungen zum Kontingenzlernen (z. B. Wassermann et al. 1993) auf einer Ad-hoc-Ratingskala verorten – entweder nach jedem Durchgang oder am Ende eines Blockes von Durchgängen einer bestimmten experimentellen Bedingung. Die exakten Urteile, die Versuchspersonen abgeben sollen, variieren von Studie zu Studie. In einigen Untersuchungen wird danach gefragt, wie viel Kontrolle sie über die sensorischen Effekte ausüben können, die ihren Handlungen folgen (z. B. Linser und Goschke 2007; Haggard und Tsakiris 2009; Wenke und Haggard 2009). In anderen wird gefragt, in welchem Umfang sie selbst diese sensorischen Ereignisse durch ihre Handlungen verursachen oder jemand/etwas anderes (z. B. Sato und Yasuda 2005). All diesen Urteilen gemeinsam ist, dass sie auf die eine oder andere Weise das Erleben von „*Ich* habe *das getan*" erfassen. Kontrollurteile zielen dabei eher auf das „habe das getan" ab, während die Kausalitätsurteile eher die Attribution auf das „Ich" im Blick haben (Engbert et al. 2008). Während die Ergebnisse aus behavioralen Studien unabhängig vom geforderten Urteil oft zu ähnlichen Schlussfolgerungen führen, bleibt abzuwarten, ob die zugrunde liegenden neurokognitiven Mechanismen tatsächlich in jedem Fall die gleichen sind.

Im Unterschied zu direkten Maßen, die explizite (Selbst-) Einschätzungen von SoA auf Ratingskalen erfordern, verlangen *indirekte Maße* weniger selbstreflexives Prozessieren des Kontrollerlebens. Deswegen wird oft argumentiert, dass sie präreflektive Korrelate von SoA erfassen, die weniger stark durch selbstreferenzielles Prozessieren und durch soziale Erwünschtheit beeinflusst sind. Die prominentesten indirekten Maße, die zur Messung von SoA eingesetzt werden, sind sensorische Dämpfung (*sensory attenuation*) und intentionale Bindung (*intentional binding*).

Zur Messung **sensorischer Dämpfung** wird nach der Intensität eines Reizes im Vergleich zu Kontrollreizen gefragt. Oft kommen dabei psychophysikalische Methoden zur Anwendung, in denen die wahrgenommene Intensität eines perzeptuellen Ereignisses (Lautstärke, taktile Intensität etc.), das einer Handlung folgt, mit der eines Vergleichsreizes verglichen werden muss (z. B. Lauter-/Leiser-Urteile). Bestimmt wird der Punkt subjektiver Gleichheit (*point of subjective equality*, PSE; ▶ Kap. 2). Hier zeigt sich oft eine Verschiebung der PSE dahingehend, dass sensorische Ereignisse, die als Effekte eigener Handlungen aufgefasst werden, als weniger intensiv wahrgenommen werden. Eine umfassende Übersicht zu Befunden sensorischer Dämpfung und ihnen mutmaßlich zugrunde liegenden Mechanismen findet sich bei Hughes et al. (2013).

Intentionale Bindung bezeichnet das Phänomen, dass das Zeitintervall zwischen eigenen Handlungen und den als Effekten eigener Handlung wahrgenommenen Konsequenzen als subjektiv komprimiert wahrgenommen wird. Diese Zeitillusion ist spezifisch für intentionale Handlungen und tritt nicht bei unfreiwilligen bzw. passiven Bewegungen auf (Haggard 2005). Intentionale Bindung wurde mit der Bindung von Intention, Handlung und Effekt zu einer einheitlichen phänomenologischen Einheit und mit Kausalattribution externer Ereignisse auf die eigene Person in Verbindung gebracht (Frith 2013). Operationalisiert wird die Messung von intentionaler Bindung auf unterschiedliche Arten. Bei der zunächst von Haggard et al. (2002) vorgeschlagenen *Methode der Ereignisurteile* beobachten Versuchspersonen, ähnlich wie in den seminalen Experimenten von Libet et al. (1983), auf einem Bildschirm eine Uhr, während sie Handlungen ausführen und deren perzeptuelle Folgen wahrnehmen. Nach jedem Durchgang soll dann entweder die Uhrzeigerposition zum Zeitpunkt der Handlung oder aber zum Zeitpunkt des Auftretens des perzeptuellen Ereignisses angegeben werden. Dies geschieht in der Regel sowohl in operanten Bedingungen, in denen ein perzeptuelles Ereignis einer Handlung folgt, als auch in Kontrollbedingungen, in denen (1) dieselben Handlungen keine perzeptuellen Ereignisse nach sich ziehen, und (2) dieselben perzeptuellen Ereignisse ohne vorherige Handlungen dargeboten werden. ◘ Abb. 21.13 illustriert das Paradigma und die verschiedenen Bedingungen.

Intentionale Bindung zeigt sich hier darin, dass in den operanten Bedingungen im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollbedingungen die Handlungen zeitversetzt nach hinten in Richtung ihrer Effekte, die perzeptuellen Handlungskonsequenzen hingegen zeitversetzt nach vorn in Richtung der sie vermeintlich erzeugenden Handlungen wahrgenommen werden. Eine populäre Alternative zur Methode der Ereignisurteile ist die *Methode der Intervallschätzung*. Hier werden Versuchspersonen gebeten, die Länge des Handlungs-Effekt-Intervalls (in Millisekunden) direkt einzuschätzen (Engbert et al. 2008). In der Zwischenzeit wurden zusätzlich auch für die Bestimmung intentionaler Bindung psychophysikalische Methoden entwickelt, die denen zur Bestimmung sensorischer Dämpfung ähneln (Cravo et al. 2011; Nolden et al. 2012), bisher jedoch wenig Anwendung finden. Eine Übersicht über Theorien und Befunde zu intentionaler Bindung findet sich bei Moore und Obhi (2012).

Obwohl sich in Experimenten mit indirekten SoA-Maßen diverse Befunde aus Studien mit direkten Maßen replizieren ließen und interessante neue Befunde zeigten (▶ Abschn. 21.4.2), ist nach wie vor weitgehend ungeklärt, wann und in welchem Umfang indirekte Maße von SoA das Gleiche messen wie (bestimmte) direkte/explizite Maße von SoA und ob sensorische Dämpfung und intentionale Bindung die gleichen präreflektiven

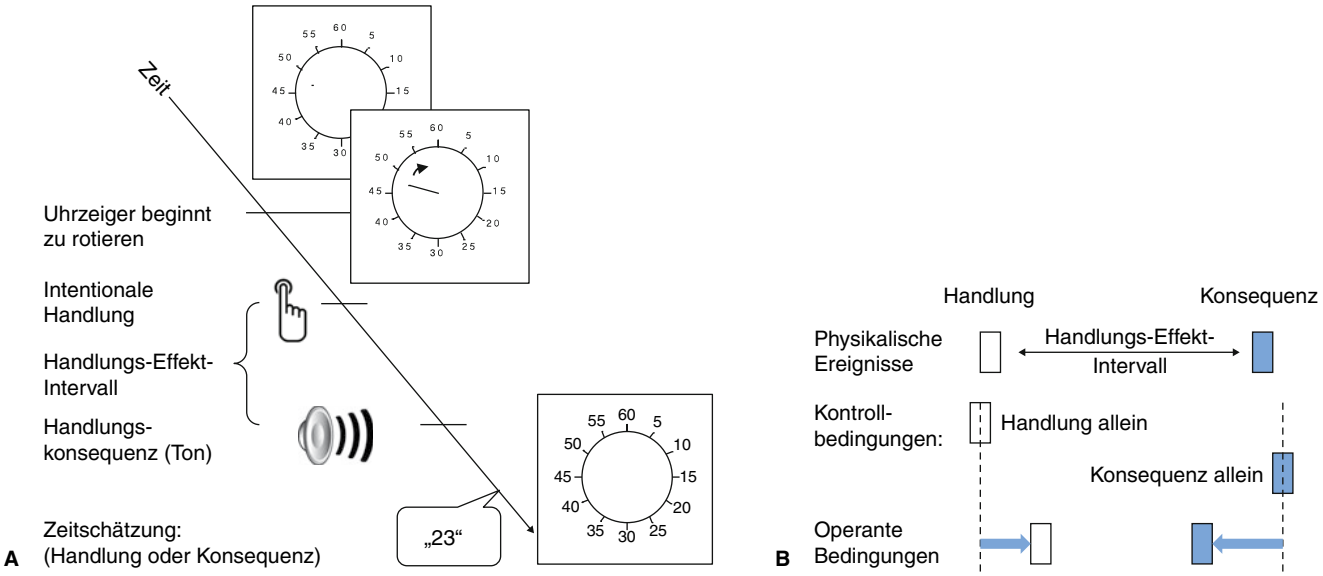


Abb. 21.13 **A** In dem von Haggard et al. (2002) entwickelten Paradigma beobachten Versuchspersonen eine Libet-Uhr mit rotierendem Uhrzeiger. In operanten Bedingungen drücken sie zu einem Zeitpunkt ihrer Wahl eine Taste. Der Handlung folgt sofort oder mit Verzögerung eine perzeptuelle Konsequenz, z. B. ein Ton. In den Kontrollbedingungen wird entweder nur eine Handlung ausgeführt (kein Ton) oder ein Ton ohne Handlung dargeboten. Am Ende des Durchgangs geben die Versuchspersonen die Uhrzeigerposition zum Zeitpunkt der Handlung oder zum Zeitpunkt des Tones an. In der Regel sind die Urteilsbedingungen geblockt, d. h., in einem Block geben Versuchspersonen entweder nur die Zeit der Handlung oder nur die Zeit des Effekts an, und zwar entweder in der operanten Bedingung oder in der Kontrollbedingung. **B** Intentionale Bindung wird bestimmt als Differenz der Zeitangaben in den operanten Bedingungen im Vergleich zu den Kontrollbedingungen – hier illustriert durch die *blauen Pfeile*

Korrelate von SoA erfassen. Studien, die gleichzeitig unterschiedliche SoA-Maße erhoben und systematisch verglichen haben, sind rar (für eine Ausnahme vgl. Ebert und Wegner [2010], die direkte Urteile und intentionale Bindung in unterschiedlichen Versuchsbedingungen verglichen; eine kritische Diskussion der Validierung indirekter Maße anhand der Korrelation indirekter und direkter SoA-Maße findet sich in Moore und Obhi [2012]). Im Folgenden werden die – mithilfe der geschilderten Methoden – bisher identifizierten Einflussfaktoren und die damit verknüpften Erklärungsansätze geschildert.

21.4.2 Vorhersagbarkeit von Handlungskonsequenzen

Einer Sicht zufolge basiert SoA in erster Linie auf einem Abgleich zwischen vorhergesagten und tatsächlich wahrgenommenen sensorischen Konsequenzen von Handlungen. Diese Sicht ist inspiriert durch das Komparatormodell, dem zufolge Handlungsintentionen unter fortwährendem Abgleich der intendierten, vorhergesagten und tatsächlich eintretenden Handlungskonsequenzen in Handlungen übersetzt werden (Wolpert et al. 1995; Wolpert und Miall 1996; ▶ Abschn. 21.1). Dieses Modell wurde im Folgenden auch verstärkt zur Erklärung von SoA herangezogen (Frith et al. 2000). Dieser Erklärung zufolge basiert SoA auf der Übereinstimmung zwischen (durch Vorwärtsmodelle) vorhergesagten sensorischen Handlungskonsequenzen und tatsächlichen Handlungskonsequenzen (sensorische Reafferenzen). Stimmen die sensorischen Ereignisse, die unseren Handlungen folgen, mit unseren Vorhersagen überein, so nehmen wir sie als Effekte unserer Handlungen wahr, und SoA ist stark und unversehrt. Demgegenüber ist das Agency-Erleben gestört, wenn Diskrepanzen zwischen vorhergesagten und wahrgenommenen Handlungskonsequenzen auftreten. Wenn wir beispielsweise einen Lichtschalter drücken, sollten wir aufgrund efferenter Vorhersagen ein stärkeres Agency-Erleben haben, wenn das Licht tatsächlich und sofort angeht, als wenn das Licht überraschenderweise nicht oder erst mit Zeitverzögerung angeht (obwohl sich im Kontext von Energiesparlampen unsere Erwartungen im Hinblick auf die Unmittelbarkeit durchaus verändert haben könnten). Geht das Licht erheblich später an als erwartet, würden wir, diesem Ansatz zufolge, das Lichtereignis bevorzugt auf eine externe Ursache zurückführen, beispielsweise dem Drücken des Lichtschalters durch eine andere Person, oder auf den Zufall. Nach dieser Auffassung wird SoA zwar durch interne efferente (motorische) Vorhersageprozesse informiert, entsteht aber erst spät durch Kausalinferenz (Kausalattribution), wenn die Handlung bereits ausgeführt wurde und die sie begleitenden sensorischen Konsequenzen verfügbar sind.

Eine Vielzahl von Befunden ist konsistent mit den Vorhersagen dieses Ansatzes. In den entsprechenden Studien wurde dabei die Vorhersagbarkeit von sensorischen Handlungskonsequenzen auf die eine oder andere Art und Weise manipuliert und SoA in Abhängigkeit von der Vorhersagbarkeit der sensorischen Ereignisse erfasst (▶ Abschn. 21.4.1). So konnten beispielsweise Sato und Yasuda (2005) mithilfe von direkten Agency-Urteilen als abhängiger Variable nachweisen, dass sowohl Vorhersagen bezüglich der Identität von Handlungskonsequenzen als auch bezüglich ihres zeitlichen Auftretens SoA beeinflussen. Versuchspersonen dieser Studie durchliefen zunächst eine Lernphase,

in der sie in jedem Durchgang eine von zwei Tasten drücken sollten. In der Lernphase folgte den Handlungen (Tastendruckreaktionen) konsistent und unmittelbar einer von zwei Tönen (z. B. linke Taste: hoher Ton; rechte Taste: tiefer Ton). Diese Lernphase diente dazu, Assoziationen zwischen Handlungen und spezifischen sensorischen Ereignissen auszubilden und so Erwartungen bezüglich der Effekte eigener Handlungen zu induzieren (▶ Kap. 18 und 22). In der Testphase wurde die Kontingenz zwischen Handlungen und Tönen aufgehoben, und außerdem wurden in einem Teil der Durchgänge zeitliche Verzögerungen unterschiedlicher Länge zwischen Handlung und Ton eingeführt, sodass der Ton und der Zeitpunkt seines Erscheinens nur noch in einem Teil der Durchgänge den zuvor erworbenen Erwartungen entsprachen. Nach jedem Durchgang sollten die Versuchspersonen auf einer Ratingskala von 0 (stimme gar nicht zu) bis 100 (stimme völlig zu) angeben, inwiefern sie der Aussage „Ich war derjenige/diejenige, die den Ton produziert hat" zustimmen (Ich-betontes Urteil; ▶ Abschn. 21.4.1). Um diese Urteile sinnvoll erscheinen zu lassen, teilten Sato und Yasuda (2005) ihren Versuchspersonen vor der Testphase mit, dass entweder sie selbst die Töne durch ihre Tastendrücke produzieren oder aber die Töne vom Versuchsleiter produziert werden. Die Ergebnisse dieses Experiments zeigen einen additiven Einfluss von Tonidentität und zeitlicher Verzögerung auf SoA: Versuchspersonen nahmen Töne eher als selbst verursacht wahr, wenn die Identität des Tones ihren Erwartungen entsprach, als wenn ihre Handlung von dem „falschen" Ton gefolgt wurde. Außerdem nahm SoA mit zunehmender zeitlicher Verzögerung des Erscheinens der Handlungskonsequenz ab. Eine Vielzahl weiterer Vorhersagbarkeitsmanipulationen führte zu vergleichbaren Effekten (z. B. Farrer et al. 2003; Leube et al. 2003; Spengler et al. 2009; Synofzik et al. 2006).

Studien, in denen bildgebende Verfahren eingesetzt wurden, um die Hirnaktivität in Abhängigkeit von der Vorhersagbarkeit und dem Ausmaß an SoA zu bestimmen, zeigen häufig Aktivierung in frontalen und parietalen Arealen (Übersicht in David et al. 2008; Sperduti et al. 2011). Konsistent und zuverlässig findet sich parietale Aktivierung bei Erwartungsverletzungen (insbesondere im inferioren Parietallappen), und zwar (1) dem temporoparitalen Übergang (*temporo-parietal junction*, TPJ) und (2) dem Gyrus angularis. Dies wird als Hinweis darauf interpretiert, dass diese Areale, in denen Aktivität auch bei anderen Aufgaben beobachtet wurde, die Selbst-Fremd-Unterscheidung erfordern, diskrepanzbezogene Einbußen in SoA codieren (Farrer et al. 2008).

Befunde zu Hirnregionen, die insbesondere bei hohem Agency-Erleben aktiv sind, sind weniger konsistent. Eine Metaanalyse von Sperduti et al. (2011) deutet jedoch darauf hin, dass in diesem Fall möglicherweise die Insel involviert sein könnte. Würde sich dies in zukünftigen Untersuchungen bestätigen, wäre dies insofern interessant, als dass Aktivierung der Insel in anderen Zusammenhängen u. a. mit Interozeption und damit einhergehenden emotionalen Zuständen in Verbindung gebracht wurde (Seth 2013).

Einflüsse der Vorhersagbarkeit von Handlungseffekten auf das Handlungserleben wurden auch in Studien beobachtet, die sogenannte indirekte bzw. implizite SoA-Maße verwenden (▶ Abschn. 21.4.1). Da indirekte Maße kein Nachdenken über Agency erfordern, wird argumentiert, dass sie präreflektive Korrelate von SoA erfassen, die weniger stark durch selbstreflexive Prozesse und durch soziale Erwünschtheit beeinflusst sind. In Studien mit sensorischer Dämpfung als abhängiger Variable konnte gezeigt werden, dass selbst verursachte, gut vorhersagbare sensorische Handlungskonsequenzen im Vergleich zu unerwarteten als weniger intensiv wahrgenommen werden. So empfindet man aufgrund der guten Vorhersagbarkeit wenig bzw. nichts Aufregendes, wenn man sich selbst kitzelt (Blakemore et al. 1998; ▶ Kap. 22). Diese und viele weitere Befunde wurden im Rahmen des Komparatormodells so interpretiert, dass im Fall guter (efferenter) Vorhersagbarkeit die sensorische Reafferenz uninformativ ist und unterdrückt werden kann.

Auch Befunde mit intentionaler Bindung als abhängiger Variable untermauern die Rolle von Kontingenz und zeitlicher Kontiguität zwischen Handlungen und ihren Effekten für SoA, und damit der Rolle von efferenten Vorhersageprozessen, bei der Entstehung von SoA (z. B. Moore und Haggard 2008; Moore et al. 2009a; vgl. aber Desantis et al. 2012a; Haering und Kiesel 2014). All diese Befunde legen nahe, dass SoA durch Prozesse der Handlungsplanung – nämlich durch efferente motorische Vorhersageprozesse im Rahmen der Planung eigener Handlungen – informiert wird und somit intrinsisch *embodied* ist, auch wenn SoA dem Komparatormodell zufolge erst eingeschätzt werden kann, wenn die Handlung bereits vollzogen ist und die sensorischen Handlungskonsequenzen prozessiert wurden.

Demgegenüber gibt es jedoch auch Studien, die darauf hindeuten, dass SoA durch externe Information, die nichts mit den Handlungs-Effekt-Verbindungen (bzw. mit Handlungs-Effekt-Kontingenzen) zu tun haben, verzerrt werden kann. Beispielsweise konnten Daniel Wegner und Kollegen zeigen, dass die (In-)Konsistenz zwischen einem vorhergehenden Gedanken (*prior thought*) und einer Handlungskonsequenz SoA beeinflussen kann, auch wenn die Handlungskonsequenz nicht kontingent mit der vorausgehenden eigenen Handlung verbunden ist (mitunter sogar, ohne dass man selbst handelt). Nachgewiesen wurde dies in Studien mit sogenanntem *Effekt-Priming*, in denen mittels Darbietung effektkonsistenter oder -inkonsistenter Bahnungsreize (*primes*) Erwartungen bezüglich der sensorischen Handlungskonsequenzen induziert wurden. Die Handlungskonsequenzen konnten jedoch nicht durch interne efferente Prozesse vorhergesagt werden. So beobachteten Versuchspersonen in einer Studie von Wegner et al. (2004) Handlungen (z. B. Winken mit der linken Hand, Schnipsen mit der rechten Hand), die von einem Komplizen des Versuchsleiters ausgeführt wurden. Die Hände des Komplizen befanden sich dabei an einer Position des ansonsten verdeckten Körpers der Versuchspersonen, wo sich deren eigene Hände üblicherweise befinden – die Situation war also visuell mehrdeutig. Es gab drei Effekt-Priming-Bedingungen:

1. In der *konsistenten Bedingung* hörten die Versuchspersonen vor der Handlung des Komplizen die passende Instruktion für die vom Komplizen ausgeführte Handlung.
2. In der *inkonsistenten Bedingung* hörten sie eine Instruktion, die nicht mit der im Folgenden vom Komplizen ausgeführten Handlung übereinstimmte.
3. In der *neutralen Bedingung* hörten sie gar keine Instruktion.

Probanden hatten ein stärkeres Agency-Erleben in der konsistenten Bedingung als in den anderen beiden Bedingungen. Dies spricht für stellvertretendes SoA bei Passung von vorhergehendem Gedanken und Handlungskonsistenz (Wegner et al. 2004). Effekte von Effekt-Priming auf SoA konnten auch mit subliminalen Effekt-Primes nachgewiesen werden (Aarts et al. 2005; Linser und Goschke 2007). Bezogen auf das bereits erwähnte Lichtbeispiel implizieren solche Befunde, dass allein der Gedanke bzw. die Intention, das Licht anzuschalten, zu Agency-Erleben, d. h. SoA, führen kann, ohne dass man selbst den Schalter gedrückt hat. Voraussetzungen dafür sind, dass der Licht„gedanke" zeitlich vor dem perzeptuellen Lichtereignis liegt (*Prinzip der Priorität*), dass der Gedanke konsistent mit dem Ereignis ist (*Prinzip der Konsistenz*; z. B. geht tatsächlich ein Licht an und nicht die Klimaanlage) und dass es keine guten Alternativerklärungen für das perzeptuelle Ereignis gibt (*Prinzip der Exklusivität*; z. B. keine andere Leute im Raum, die den Schalter gedrückt haben könnten; Wegner und Wheatley 1999).

Außerdem konnte gezeigt werden, dass Überzeugungsmanipulationen, bei denen ausschließlich die Instruktionen nahelegen, dass eher der eine als der andere Effekt selbst verursacht ist, SoA im Hinblick auf sensorische Ereignisse beeinflussen, selbst wenn indirekte SoA-Maße zur Anwendung kommen (Desantis et al. 2011; Desantis et al. 2012b; Haering und Kiesel 2012). Beispielsweise sollte in einem Experiment von Haering und Kiesel (2012) das zeitliche Intervall zwischen Handlungen (Tastendrücken) und dem Erscheinen von perzeptuellen Effekten (Rettungsringen unterschiedlicher Farbe zur Rettung von im Wasser befindlichen Personen) geschätzt werden. Zusätzlich wurde den Versuchspersonen per Instruktion suggeriert, dass sie für eine der Rettungsringfarben verantwortlich seien, obwohl ihre Handlungen tatsächlich beide Farben mit gleicher Wahrscheinlichkeit produzierten. Hier zeigte sich mehr intentionale Bindung für Rettungsringe, bei denen Versuchspersonen aufgrund der instruierten Farbe glaubten, dass sie für das Erscheinen der Rettungsringe verantwortlich seien.

Zusammengenommen legen solche Befunde nahe, dass SoA nicht nur auf körpereigenen (motorischen) efferenten Prozessen basiert, sondern auf – oft nicht bewussten – Inferenzen fußt, die die Interpretation und Gewichtung ganz unterschiedlicher Evidenz für oder gegen Agency berücksichtigen. Dies ist schwer mit dem Komparatormodell in seiner ursprünglichen Form zu vereinbaren und kann leichter und flexibler durch *Modelle bayesianischer Inferenz* erklärt werden, die die Idee von Vorhersagemodellen und Vorhersagefehlern ebenfalls beinhalten, aber allgemeiner sind (Frith 2012).

Deshalb verwundert es kaum, dass in letzter Zeit vermehrt bayesianische Erklärungen von SoA vorgeschlagen wurden (Moore und Fletcher 2012; Synofzik et al. 2009; Friston 2012). Die Grundidee dieser Erklärungsansätze ist, dass unterschiedliche Agency-Hinweisreize (*cues*) bezüglich ihrer Zuverlässigkeit (Reliabilität) gewichtet integriert werden, um zu einer bayesianisch optimalen Schätzung von Agency zu gelangen. So schlugen Moore und Fletcher (2012) vor, dass Agency-Urteile auf probabilistischen Schlussfolgerungen beruhen, bei denen die posteriore Wahrscheinlichkeit, Verursacher der Handlung und seiner Effekte (gewesen) zu sein, bestimmt wird durch Integration von internen prädiktiven Signalen einerseits und von Agency-Evidenz, die nicht durch das motorische System selbst bereitgestellt wird, andererseits. Bayesianische Ansätze nehmen an, dass die unterschiedlichen Evidenzquellen für Agency entsprechend ihrer Zuverlässigkeit in dieser Schätzung berücksichtigt werden und zudem durch die A-priori-Erwartung, Verursacher zu sein, gewichtet werden (Prior-Wahrscheinlichkeit; z. B. Kontrollüberzeugungen). Studien, in denen die efferente Vorhersagbarkeit (Handlungs-Effekt-Kontingenz) in An- oder Abwesenheit externer Agency-Cues manipuliert wurde, stützen diese Modellvorstellung (Moore und Haggard 2008; Moore et al. 2009b; Sato 2009), die weitgehend konsistent mit dem Modell der Vorhersagecodierung ist (Friston et al. 2010; Friston 2012; ► Abschn. 21.3).

21.4.3 Flüssigkeit der Handlungsauswahl

Eine Reihe von Studien legt nahe, dass nicht nur Erwartungsverletzungen den erlebten „Fluss" von der Intention zur Handlung und ihren Konsequenzen stören und damit SoA beeinträchtigen, sondern dass auch Prozesse der Auswahl von Handlungen SoA beeinflussen (z. B. Wenke et al. 2010; Übersicht in Chambon et al. 2014). Diese Studien zeigen, dass (bei konstanter Effektvorhersagbarkeit) schwierige, konfliktbehaftete Antwortauswahl SoA im Vergleich zu leichter und flüssiger Handlungsauswahl reduziert, und zwar prospektiv, d. h. bevor eine Handlung ausgeführt wird und ihre Konsequenzen erfahren werden.

Nachgewiesen wurde ein solcher Einfluss von Handlungskontrollanforderungen in Experimenten, die sich des Paradigmas subliminalen Antwort-Primings bedienten. So sollten beispielsweise die Versuchspersonen in einer Studie von Wenke et al. (2010) mit linken vs. rechten Tastendrücken auf nach links vs. rechts zeigende Pfeile reagieren. Vor den imperativen Pfeilreizen (*targets*) wurden Pfeil-Primes subliminal dargeboten. Die Richtung der Prime- und Target-Pfeile war entweder identisch (*kompatible Bedingung*) oder aber entgegengesetzt (*inkompatible Bedingung*). Mit zufällig variierendem Zeitabstand folgten den Antworten farbige Kreise als Handlungskonsequenzen. Welche Farbe dargeboten wurde, hing davon ab, ob die vorausgehende Antwort auf das Target kompatibel oder inkompatibel mit dem vorausgehenden Prime war. Sie konnte also nicht durch den Prime allein oder die Antwort vorhergesagt werden – somit war die Vorhersagbarkeit der Handlungskonsequenzen in der kompatiblen und inkompatiblen Selektionsbedingung vergleichbar. SoA wurde mittels direkter Kontrollurteile erfasst, bei denen Versuchspersonen angaben, wie viel Kontrolle sie über die verschiedenen Farben hatten (Was-Aspekt von SoA; ► Abschn. 21.4.1). Wenke et al. (2010) fanden erstens, dass inkompatible Primes im Vergleich zu kompatiblen Primes Reaktionen verlangsamten, was auf eine erschwerte Handlungsselektion durch Antwortkonflikt in der inkompatiblen Bedingung im Vergleich zu flüssiger Handlungsselektion in der kompatiblen Bedingung hindeutet (► Kap. 9 und 18). Zweitens wirkte sich die Flüssigkeit der Handlungsselektion trotz konstanter Effektvorhersagbarkeit auf SoA aus: Versuchspersonen gaben an,

mehr Kontrolle über Farben zu erleben, die Prime-kompatiblen Antworten folgten, als über Farben, die Prime-inkompatible Antworten signalisierten. Das subliminale Priming induzierte demnach Unterschiede in der Flüssigkeit der Handlungsselektion, die wiederum SoA beeinflusste: Flüssige Handlungsauswahl geht mit ausgeprägter (ungestörter) SoA einher, während eine Störung der Flüssigkeit, z. B. durch Antwortkonflikt, SoA beeinträchtigt. Dieser Effekt kann auch mittels indirekter SoA-Maße wie der sensorischen Dämpfung nachgewiesen werden (Stenner et al. 2014).

Interessanterweise zeigte sich in einer fMRI-Studie, dass Aktivierung zum Zeitpunkt der Antwortselektion im Gyrus angularis mit Einbußen in SoA in der inkompatiblen, schwierigen Selektionsbedingung einhergeht (Chambon et al. 2013; zu konvergierender Evidenz aus einer TMS-Studie vgl. Chambon et al. 2015). Wie in ▶ Abschn. 21.4.2 beschrieben, ist Aktivierung in dieser Hirnregion auch mit vermindertem SoA assoziiert, der auf mangelnde Passung zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Handlungskonsequenzen zurückgeht (z. B. Farrer et al. 2008). Möglicherweise werden im Gyrus angularis interne Signale überwacht, die „allgemein" Inkonsistenzen in der Intention-Handlung-Effekt-Kette signalisieren und zur Bestimmung von SoA genutzt werden.

Zusammengenommen legen die in diesem Abschnitt geschilderten Studien mehrere wichtige Implikationen bezüglich SoA nahe. Sie deutern darauf hin, dass eine weitere Quelle körpereigener (*embodied*) Signale zum SoA beitragen. Anders als efferente Vorhersageprozesse, die zu späten Abgleichsprozessen und zur Wahrnehmung von perzeptuellen Ereignissen als Handlungseffekten beitragen, beeinflusst die Flüssigkeit der Handlungsselektion SoA schon früh in der Intention-Handlung-Effekt-Kette, nämlich während der Transformation einer Intention in eine Handlung. Dabei reduziert schwierige Handlungsauswahl SoA prospektiv, d. h. bereits bevor die Handlung ausgeführt wird und die ihr folgenden perzeptuellen Konsequenzen vorliegen. Da in den berichteten Studien Kontrollerleben bezüglich der Handlungskonsequenzen erfasst wurde, die Vorhersagbarkeit in den unterschiedlichen Selektionsbedingungen jedoch konstant war, handelt es sich hierbei letztlich um eine Kontrollillusion. Möglicherweise fungiert wahrgenommene Selektionsflüssigkeit als ein Indikator dafür, ob eine Handlung erfolgreich sein wird in dem Sinne, dass sie die erwünschten Effekte hervorruft.

Innerhalb des geschilderten bayesianischen Erklärungsansatzes (▶ Abschn. 21.4.2) könnte man annehmen, dass die Flüssigkeit der Handlungsselektion eine weitere Informationsquelle für die Bestimmung von SoA ist, die mit anderen Hinweisreizen über die Zeit integriert wird. Konsistent mit dieser Sicht berichten Sidarus et al. (2013) in einer Studie, in der Selektionsschwierigkeit und Effektvorhersagbarkeit (Handlungs-Effekt-Kontingenz) orthogonal variiert wurden, dass inkompatibles Antwort-Priming SoA insbesondere dann reduziert, wenn die Handlungskonsequenzen unerwartet sind. Das heißt, starke SoA-Einbußen traten nur dann auf, wenn die Handlungsselektion schwer *und* der Effekt unerwartet war. Dies legt eine kompensatorische Beziehung bei der Integration dieser beiden Informationsquellen nahe.

Die in diesem Abschnitt geschilderten Befunde sind auch deshalb von Interesse, weil sie eine direkte Verbindung zwischen „kognitiver Kontrolle" (▶ Kap. 9) und subjektivem Kontrollerleben schaffen und somit dort anknüpfen, wo Narziss Ach (1905, 1910) ansetzte. Schon Ach beschäftigte sich mit dem subjektiven Erleben sogenannter Willensakte – was im Rahmen seiner Untersuchungen dem Überkommen prädominanter (überlernter und damit automatischer) Antworttendenzen durch kognitive Kontrolle gleichkommt. Interessanterweise deuten die oben geschilderten Befunde darauf hin, dass SoA nicht erfolgreiche Willensakte reflektiert, d. h. erfolgreiche Antworten in schwierigen (konfliktbehafteten) Antwortbedingungen. In dem Fall würde man in schwierigen Handlungsselektionsbedingungen höheren SoA als in leichten erwarten. Somit scheint hoher SoA auch kein Korrelat hoher Selbstwirksamkeit (Bandura 1977) zu sein. Stattdessen geht ausgeprägter SoA mit hoher Flüssigkeit einher. Dementsprechend könnte man mutmaßen, dass schwierigkeits-, sprich konfliktbedingte Einbußen in SoA Kontrollbedarf signalisieren.

Eine solche Schlussfolgerung scheint jedoch etwas voreilig angesichts der Tatsache, dass all die oben berichteten Studien Antwortschwierigkeit mittels subliminalen Primings manipuliert haben, bei dem Versuchspersonen sich der Identität des beeinflussenden (Prime-)Reizes nicht bewusst waren. Eine nach wie vor offene Frage ist, ob SoA in ähnlicher oder anderer Weise durch Antwort-Primes beeinflusst wird, wenn Versuchspersonen klar ist, warum in einigen Durchgängen die Antwortselektion schwierig ist. Während einige Studien darauf hindeuten, dass „bewusster" Antwortkonflikt mit vergleichbaren SoA-Effekten einhergeht wie subliminal induzierter Antwortkonflikt (Morsella et al. 2009; Sebanz und Lackner 2007), suggerieren andere Studien, dass bei bewusstem Antwortkonflikt bzw. bewusster Anstrengung SoA in der schwierigen Bedingung möglicherweise stärker ausgeprägt ist (Demanet et al. 2013; Damen et al. 2014). Zukünftige Studien werden hoffentlich zeigen, ob und unter welchen Umständen sich bewusste Antwortbeeinflussung bzw. Anstrengung in andersartiger Weise auf SoA auswirkt.

21.4.4 Valenz der Handlungskonsequenzen

In der Mehrzahl der Studien zu SoA waren die dargebotenen Handlungskonsequenzen komplett willkürlich und unvalenziert (z. B. Töne unterschiedlicher Tonhöhe, unterschiedliche Farben). Dies hat(te) insofern seine Berechtigung, als dass der Einfluss von Variablen wie Vorhersagbarkeit und Flüssigkeit bzw. Anstrengung „unkontaminiert" von weiteren Einflussvariablen nachgewiesen werden konnte. Im „richtigen Leben" ist es jedoch normalerweise so, dass wir erstrebenswerte Ziele verfolgen und unangenehme Handlungskonsequenzen zu vermeiden versuchen (▶ Kap. 8). Inzwischen gibt es eine Handvoll Studien, die SoA bezüglich valenzierter Handlungseffekte untersucht haben (Alloy und Abramson 1979; Takahata et al. 2012; Yoshi und Haggard 2013; Gentsch et al. 2015). Diese fanden übereinstimmend, dass SoA bei negativen Handlungskonsequenzen gegenüber positiven (und neutralen) reduziert ist, und zwar vergleichsweise unabhängig davon,

- ob es sich bei den emotional valenzierten Effekten um (monetäre) Belohnungen, um emotionale Vokalisationen

oder um Bilder mit glücklichen vs. wütenden Gesichtern handelte,
- ob die Effekte vorhersagbar waren oder nicht und
- ob direkte oder indirekte SoA-Maße verwendet wurden.

Vereinzelt zeigte sich auch eine Erhöhung von SoA bei positiven im Vergleich zu neutralen Handlungseffekten. Diese Ergebnisse deuten auf eine präreflexive, sensomotorische (*embodied*) Basis für das aus der Sozialpsychologie bekannte selbstwertdienliche Attributionsmuster hin, dem zufolge (nichtdepressive) Menschen positive Handlungskonsequenzen auf die eigene Person, negative Konsequenzen jedoch eher extern attribuieren (Greenberg et al. 1982; Miller und Ross 1975). Es wird argumentiert, dass ein solches Attributionsmuster dem Schutz des Selbstwerts bzw. dessen Erhöhung dient. Dieser Befund hat weitreichende Konsequenzen für das Verständnis der Beziehung von SoA und Verantwortungsempfinden, auch wenn bisher weitgehend ungeklärt ist, ob bzw. unter welchen Umständen der Einfluss von Valenz auf SoA vornehmlich auf efferenten Vorhersageprozessen oder aber auf Postdiktion beruht (▶ Abschn. 21.4.2).

Unabhängig von der Rolle efferenter Prozesse legen derlei Befunde die Frage nahe, in welchem Umfang SoA mit Affekt einhergeht bzw. sogar selbst als valenziert wahrgenommen wird (Gentsch und Synofzik 2014; Seth 2013). In diesem Zusammenhang ist es sicherlich auch interessant, dass Antwortkonflikte (▶ Abschn. 21.4.3) üblicherweise als aversiv wahrgenommen werden (Botvinick 2007; Dreisbach und Fischer 2012), während „flüssige" Informationsverarbeitung positiv bewertet wird (z. B. Ästhetikurteile; Reber et al. 2004). Möglicherweise werden konfliktbedingte Einbußen in SoA durch negativen Affekt vermittelt. Alternativ ist vorstellbar, dass SoA selbst positiv valenziert ist und daher konfliktbedingte Einbußen in SoA als negativ erlebt werden.

21.4.5 Fazit

Es wurde argumentiert, dass SoA bei Personen ohne psychopathologische Symptomatik der Standardfall (*default case*) ist und aus diversen Informationsquellen geschätzt wird, möglicherweise per bayesianischer Inferenz. Insbesondere Unterbrechungen im Fluss von der Handlungsintention hin zu perzeptuellen Ereignissen, die (eigenen) Handlungen folgen, geben Auskunft darüber, welche Informationsquellen zur Schätzung von SoA genutzt werden. Im Rahmen der Forschung zu SoA wurden bisher vornehmlich drei Informationsquellen identifiziert:

1. Erwartungskonformität der Handlungskonsequenzen: Hier scheinen sowohl efferente Vorhersageprozesse als auch externe Hinweisreize, die Handlungskonsequenz-Erwartungen induzieren, einen Einfluss zu haben.
2. Flüssigkeit der Handlungsauswahl: SoA ist stark und ungestört bei flüssiger Handlungsauswahl, aber reduziert, wenn die Handlungsauswahl schwierig ist – zumindest wenn die Ursache der Schwierigkeit nicht klar benennbar ist.
3. Die affektive Valenz der Handlungseffekte beeinflusst SoA dahingehend, dass negative Handlungskonsequenzen seltener als Effekte eigener Handlungen wahrgenommen werden als neutrale und positive Handlungskonsequenzen, wobei letztere SoA ggf. unter bestimmten Umständen sogar befördern.

SoA kann in dem Sinne als *embodied* angesehen werden, als dass u. a. (aber nicht nur) körpereigene Signale (z. B. motorisch-efferente Vorhersageprozesse oder Flüssigkeit der Handlungsauswahl) zur Bestimmung von SoA herangezogen werden. In diesem Sinne kann SoA als Spezialfall von Metakognition angesehen werden, bei der körpereigene Signale Informationen bezüglich des Zustands des eigenen kognitiven Systems liefern (Metcalfe und Greene 2007; Koriat et al. 2006). Interessanterweise scheinen überlappende Hirnregionen bei der Codierung unterschiedlicher diskrepanzbezogener Einbußen in SoA aktiv zu sein. Darüber hinaus werden viele Effekte sowohl mit direkten als auch mit indirekten Maßen von SoA nachgewiesen. Insbesondere bezüglich der Messung von SoA ist jedoch nach wie vor ungeklärt, in welchem Umfang und unter welchen Bedingungen die verschiedenen Maße tatsächlich vergleichbare Korrelate von SoA messen. Hier besteht demnach noch weiterer Forschungsbedarf.

Während die referierten Befunde die Rolle der Schätzung des eigenen Beitrags zu perzeptuellen Ereignissen betonen (Selbst-Fremd-Unterscheidung), wird inzwischen auch die Frage gestellt, ob und unter welchen Umständen so etwas wie gemeinsamer SoA (*joint agency*) im Kontext gemeinsamer Aufgabenbearbeitung nachgewiesen werden kann. Ausgangspunkt dieser Frage ist die Beobachtung, dass bei geteilter Aufgabenbearbeitung durch zwei Akteure oft Ergebnismuster auftreten, die denen bei alleiniger Aufgabenbearbeitung der Gesamtaufgabe mehr ähneln als der alleinigen Bearbeitung der zugewiesenen Teilaufgabe (Sebanz und Knoblich 2003, 2009). Aus derartigen Befunden wird mitunter geschlossen, dass bei gemeinsamer Aufgabenbearbeitung die Aufgabenanteile der anderen Person mitrepräsentiert werden und demnach so etwas wie eine Wir-Identität entstehen könnte (Gallotti und Frith 2013; Moore und Obhi 2012). Lange waren die Befunde zu *joint agency* sehr mehrdeutig. Inzwischen zeichnet sich – auch unter Zuhilfenahme indirekter SoA-Maße – ab, dass reine Beobachtung von Handlungs-Effekt-Kontingenzen einer anderen Person nicht ausreicht für „stellvertretendes" SoA (Engbert et al. 2007, 2008), sich aber so etwas wie eine „Wir-Identität" bezüglich SoA durchaus zeigen kann, insbesondere wenn in interaktiven Kontexten durch die Handlungen von zwei Akteuren der gleiche Effekt erzielt wird (Obhi und Hall 2011; Weiss et al. 2011).

Insbesondere im Hinblick auf valenzierte Handlungskonsequenzen stellt sich überdies die Frage nach der Beziehung zwischen SoA und Verantwortungsempfinden. Verringerter SoA bei negativen Handlungskonsequenzen erinnert an die Milgram-Experimente, bei denen Handlungen der Versuchspersonen aversive Folgen für andere hatten (Elektroschocks; Milgram 1963, 1965). Basierend auf verbalen Beschreibungen seiner Versuchspersonen schlug Milgram (1974) vor, dass es bei stärkeren Schocks zu einer Verschiebung von Agency (*agentic shift*) im Sinne verstärkter externaler Attribution komme (vgl. auch Caspar et al. 2016).

Eine weitere, besonders wichtige noch zu bewältigende Aufgabe der Forschung zu SoA besteht unserer Ansicht nach darin,

die funktionale Rolle von SoA zu klären. Bisher wurde Agency-Erleben größtenteils als Funktion bestimmter Einflussvariablen, wie der Effektvorhersagbarkeit oder der Valenz der Handlungskonsequenz, untersucht. SoA fungierte damit bis dato hauptsächlich als abhängige Variable. Damit bleibt aber weitgehend offen, in welchem Umfang SoA rein epiphänomenal ist oder aber zukünftiges Verhalten informiert bzw. beeinflusst (und wenn ja, wie). Existierende Studien, die einen Einfluss von SoA auf nachfolgendes Verhalten proklamieren, bleiben oft den Nachweis schuldig, dass sich SoA in den verschiedenen Untersuchungsbedingungen tatsächlich unterscheidet. So können beispielsweise Einflüsse von angenommenem SoA auf Verhalten und Hirnaktivität, ohne tatsächliche Abfrage von Agency-Erleben, bisher nur mit Vorsicht genossen werden (Chaminade und Decety 2002; vgl. aber Karsh und Eitam 2015).

Schließlich ist zu beachten, dass ein Großteil der Forschung zu SoA bisher im westlichen Kulturkreis stattgefunden hat (vgl. aber Sato und Yasuda 2005; Sato 2009; Takahata et al. 2012). Da SoA offensichtlich auch interpretativen/postdiktiven Einflüssen unterliegt und demnach (auch) durch Faktoren wie Überzeugungen beeinflusst wird (▶ Abschn. 21.4.2), stellt sich die Frage, wie kulturabhängig SoA ist und ob SoA beispielsweise durch Maßnahmen zur Einstellungsänderung modifiziert werden kann (Frith 2013).

21.5 Handlungsbezogene Sprache

Stellen Sie sich vor, Sie lesen in einem Roman, wie die Heldin von einem Felsen in einen kalten See springt, um Verfolgern zu entkommen. Während Sie dies lesen, erleben Sie möglicherweise die Handlung mit. Sie sehen vor Ihrem geistigen Auge den Felsen und das Wasser, Sie fühlen, wie Sie zum Sprung ansetzen, abspringen, durch die Luft fliegen und im Wasser aufkommen. Das kalte Wasser könnte möglicherweise ein leichtes Prickeln auf Ihrer Haut verursachen. Embodiment geht davon aus, dass wir sprachliche Beschreibungen von Handlungen verstehen, indem wir diese Handlungen mental simulieren (z. B. Barsalou 1999, 2009; Glenberg und Robertson 1999, 2000; Glenberg und Kaschak 2002). Wörter und Sätze reaktivieren tatsächliche Erfahrungen mit den Objekten, Ereignissen und Handlungen, auf die sie sich beziehen. Diese wahrnehmungs- und handlungsbezogenen Repräsentationen werden für eine mentale Stimulation genutzt. Embodiment kritisiert somit Ansätze, die davon ausgehen, dass Sprache Bedeutung übermittelt, indem ihre Symbole (Wörter, Morpheme) in abstrakte und amodale Repräsentationen umgewandelt werden (Barsalou 1999, 2008; Glenberg und Robertson 1999, 2000; Glenberg und Kaschak 2002). Stattdessen ist nach Embodiment linguistische Bedeutung von Wörtern und Sätzen (▶ Kap. 13 und 14) in Handlungen, dem Körper und (nach verankerter Kognition) der Sensorik verankert.

Im Rahmen von Embodiment hat insbesondere die Forschung zu handlungsbezogener Sprache viel Aufmerksamkeit erfahren. Hier wird davon ausgegangen, dass eine Simulation der sprachlich dargestellten Handlung stattfindet. Im Folgenden werden zunächst zwei dominante Theorien zum Sprachverständnis (▶ Abschn. 21.5.1) und anschließend einige Befunde dargestellt (▶ Abschn. 21.5.2). Abhängig von der theoretischen Perspektive wird entweder davon ausgegangen, eine motorische Simulation obligatorisch für das Verständnis von handlungsbezogener Sprache ist und automatisch stattfindet (z. B. Glenberg und Kaschak 2002) oder dass eine solche Simulation das Sprachverständnis unterstützt, jedoch nicht notwendig ist, um Sprache zu verstehen (z. B. Sato et al. 2008; van Dam et al. 2012). In diesem Kontext wird untersucht, wie flexibel und kontextabhängig motorische Simulationen sind (▶ Abschn. 21.5.3), welche Rolle Handlungserfahrung und Expertise spielen (▶ Abschn. 21.5.4) und auf welcher Ebene die Handlungssimulation stattfindet (▶ Abschn. 21.5.5). Darüber hinaus wird auf das Verständnis von abstrakter und nicht handlungsbezogener Sprache eingegangen (▶ Abschn. 21.5.6), da einige Autoren davon ausgehen, dass Handlungssimulation nicht nur beim Verständnis handlungsbezogener Sprache auftritt, sondern auch beim Verständnis von sprachlichen Inhalten, die auf den ersten Blick keinen Handlungsbezug aufweisen (z. B. beim Verständnis von Begriffen wie „Demokratie“ oder „Kommunikation“; Glenberg et al. 2008a; Glenberg und Kaschak 2002). Das Thema wird mit einem Fazit (▶ Abschn. 21.5.7) abgeschlossen.

21.5.1 Theoretische Annahmen

Theorie der perzeptuellen Symbole

Die **Theorie der perzeptuellen Symbole** (*perceptual symbol system*, PSS) ist nicht direkt Embodiment, sondern eher verankerter Kognition zuzuordnen. Sie bezieht sich nicht nur auf die Rolle des Körpers und von Handlungen für kognitive Prozesse. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass Kognition durch multiple, multimodale Simulationen abläuft (Barsalou 1999, 2008, 2009). Die Theorie stellt einen allgemeinen Rahmen für die Sichtweise kognitiver Repräsentationen dar und wird häufig auf das Verständnis von Sprache angewandt. Ein perzeptuelles Symbol besteht aus der Erfahrung bestimmter neuraler Aktivierungen. Nimmt man beispielsweise eine Blume wahr, aktiviert dies neuronale Netzwerke verschiedener Sinnesmodalitäten. Diese Aktivierungen werden in eine multimodale Repräsentation integriert. Im Fall der Blume könnte die multimodale Repräsentation aus visuellen Repräsentationen des Aussehens der Blume und olfaktorischen Repräsentationen ihres Geruchs bestehen. Multimodale Repräsentationen werden im Langzeitgedächtnis gespeichert. Wenn man zu einem späteren Zeitpunkt an diese (oder eine ähnliche) Blume denkt oder das Wort „Blume“ liest oder hört, wird die multimodale Repräsentation der Blume (zumindest teilweise) wieder aktiviert. Linguistische Beschreibungen rufen somit multimodale Repräsentationen ihrer Bezüge (Referenten) hervor und aktivieren die assoziierten Erfahrungen. Diese erneute Aktivierung der neuralen Erfahrung stellt eine Simulation der vorherigen Erfahrung dar und konstituiert ein perzeptuelles Symbol.

Perzeptuelle Symbole konstituieren die Basis der Kognition. Sie sind modal, da sie in den gleichen Systemen verankert sind wie die Zustände, die sie hervorgerufen haben. Sie stehen für tatsächliche Bezüge in Abwesenheit tatsächlichen Inputs. Perzeptuelle Symbole sind flexibel. Sie können an Simulationen beteiligt sein, welche stark von der ursprünglichen Erfahrung

abweichen. So kann die spätere Speicherung weiterer perzeptueller Symbole Verbindungen im ursprünglichen Muster verändern, was zu veränderten zukünftigen neuronalen Mustern führt. Auch ist die Verarbeitung während einer Simulation nicht auf den Abruf von Informationen beschränkt, vielmehr können Informationen transformiert werden. Eine Simulation beinhaltet demnach niemals eine komplette Wiederholung der ursprünglichen multimodalen Zustände, sondern sie unterliegt verschiedenen Verzerrungen; Sprache wird nach der Theorie ausschließlich durch modalitätsspezifische Systeme simuliert. Bei einem Handlungssatz sollte im Wesentlichen die Erfahrung der motorischen Zustände simuliert werden. Bei Handlungswörtern oder Handlungssätzen reaktiviert das motorische System teilweise die Zustände, die die dargestellte Handlung beinhalten, was eine Simulation der Handlung verursacht (Barsalou 1999, 2008, 2009).

Indexikalische Hypothese

Eine Theorie, die die Rolle von Handlungen für das Verständnis von Sprache in den Vordergrund stellt, ist die **indexikalische Hypothese** (*indexical hypothesis*, IH; Glenberg und Robertson 1999, 2000; Glenberg und Kaschak 2002). Die IH bezieht sich auf das Verständnis von Sätzen und nicht auf das Verständnis von einzelnen Worten. Nach der IH wird handlungsbezogene Sprache verstanden, indem die in einem Satz dargestellten Handlungen simuliert werden. Nach der IH transformieren drei Prozesse Wörter und Syntax in handlungsbasierte Bedeutungen:

1. Wörter in Sätzen aktivieren modale Repräsentationen der Objekte und Handlungen, auf die sie sich beziehen (perzeptuelle Symbole; Barsalou 1999).
2. Affordances werden von den perzeptuellen Symbolen abgeleitet. Affordances sind potenzielle Interaktionen zwischen Körpern und Objekten (Gibson 1979; ▶ Kap. 2). Der Verstehende erhält somit Zugang zu potenziellen motorischen Interaktionen mit den referierten Objekten. Es können auch neue Affordances, die nicht gelernt sind, von perzeptuellen Symbolen abgeleitet werden. Glenberg und Kaschak (2002) geben als Beispiel den Satz „Hänge den Mantel an den Staubsauger". Dieser könne als sinnvoll beurteilt werden, da aus den perzeptuellen Symbolen die Affordance abgeleitet werden kann, dass dies möglich ist.
3. Verschiedene Affordances werden in ein kohärentes, ausführbares Set von Handlungen kombiniert/integriert (*meshing*). Dies geschieht unter Berücksichtigung syntaktischer Konstruktionen. Die grammatikalische Form (Syntax) eines Satzes steuert eine kognitive Simulation, die die Affordances kombiniert. Das Ziel dieses Prozesses ist durch die Bedeutung der syntaktischen Konstruktion spezifiziert. Beispielsweise implizieren Sätze mit einer Doppelobjektkonstruktion (z. B. „Anna gibt dir das Buch") den Transfer eines Objekts (Objekt 2, „Buch") von einem Agent (Subjekt, „Anna") zu einem Empfänger (Objekt 1, „dir"). Es wird angenommen, dass syntaktische Konstruktionen generalisierte Handlungsschema oder Repräsentationen höherer Ordnung aktivieren. Diese Bedeutung, die durch die Syntax impliziert ist (im Beispiel „Transfer"), wird genutzt, um Affordances zu integrieren. Wenn die integrierten Affordances eine ausführbare Handlung darstellen, wird der Satz verstanden.

Die IH geht auch davon aus, dass das meiste, wenn nicht sogar das gesamte Sprachverständnis, in Handlungen verankert ist, auch wenn Inhalte keinen direkten Handlungsbezug aufweisen. Nach Glenberg und Kaschak (2002) wird der Satz „Dies ist ein schöner Sonnenuntergang" verstanden, indem die Handlung des Ansehens des Sonnenuntergangs aktiviert wird. Kausalsätze werden nach der IH, auch wenn es um abstrakte Inhalte geht, unter Bezugnahme auf die Handlungen Stoßen und Ziehen (*push and pull*) verstanden, d. h. als Kontraste von Agonisten und Antagonisten. Der Satz „Der Damm brach, weil es zu viel regnete" beinhaltet einen schwachen Agonisten (der Damm), der einem stärkeren Antagonisten (dem Wasser) unterliegt. Die IH nimmt an, dass Personen das Wasser, das gegen den Damm drückt, ähnlich konzeptualisieren, wie wenn sie beispielsweise selbst gegen eine Tür drücken.

21.5.2 Befunde

Empirische Belege für Embodiment beim Sprachverständnis werden durch die Demonstration motorischer Aktivierung während des Verständnisses handlungsbezogener Eigenschaften von Wörtern oder Sätzen erbracht. Auf Verhaltensebene zeigen Studien inhaltsspezifische Interaktionen zwischen dem Verständnis einer verbal beschriebenen Handlung und einer gleichzeitig ausgeführten Bewegung. Gewöhnlich tritt eine erleichterte Ausführung der Bewegung auf, wenn die Bewegung Charakteristiken mit der semantischen Bedeutung von Handlungswörtern oder Sätzen teilt (z. B. Glenberg und Kaschak 2002). Eine solche Interaktion zwischen der sprachlich beschriebenen Handlung und dem während des Sprachverständnis durchgeführten motorischen Verhalten wird als Beleg dafür gesehen, dass Sprachverständnis eine Verbindung mit Systemen aufweist, die beim Planen von Handlungen eine Rolle spielen (Barsalou 1999; Glenberg und Kaschak 2002).

Ein Beispiel für die Interaktion zwischen Sprachverständnis und gleichzeitigen Handlungen ist der **Handlungs-Satz-Kompatibilitätseffekt** (*action sentence compatibility effect*, ACE; Glenberg und Kaschak 2002). Der ACE bezieht sich auf die Kompatibilität zwischen der Richtung einer in einem Satz beschriebenen Handlung und der Richtung einer auszuführenden Bewegung. In einem typischen Experiment beurteilen Personen Handlungssätze, die eine Handlung beinhalten, die entweder einen Transfer zum eigenen Köper hin beschreibt (z. B. „Anna gibt dir das Buch") oder einen Transfer vom eigenen Körper weg (z. B. „Du gibst Anna das Buch"). Diese Sätze ergeben entweder einen Sinn oder nicht (z. B. „Du schreibst Sandra das Eis"). Versuchspersonen beurteilen die Sinnhaftigkeit der Sätze, indem sie eine Handbewegung zum Körper hin oder vom Körper weg ausführen. In verschiedenen Studien wurde gezeigt, dass bei Kompatibilität zwischen der im Satz implizierten Bewegungsrichtung und der ausgeführten Bewegungsrichtung (z. B. beide führen vom eigenen Körper weg) Reaktionen schneller sind als bei Inkompatibilität der Richtungen (Glenberg und Kaschak 2002; Borreggine und Kaschak 2006; Glenberg et al. 2008a, b; Kaschak und Borreggine 2008; ▶ Zur Vertiefung 21.4).

Es wird angenommen, dass diese Prozesse nicht nur bei einem konkreten Transfer („Anna gibt dir das Buch"), sondern auch bei abstraktem Transfer („Ernst erzählt dir die Geschichte") ablaufen. Abstrakter Transfer soll genauso wie konkreter Transfer als ein physischer Transfer eines Objekts von einer Person zu einer anderen Person simuliert werden. In Übereinstimmung mit dieser Annahme wurde gefunden, dass auch bei Sätzen mit abstraktem Transfer (z. B. „Du erteilst Sabine einen Auftrag") der ACE beobachtet werden kann. Dies wird als starker Beleg für Embodiment bewertet. Auch Theorien, die davon ausgehen, dass Sprache aufgrund abstrakter, amodaler Symbole verstanden wird, könnten erklären, dass ein Satz, der einen konkreten Transfer beinhaltet, zu einer Aktivierung von Handlungen führt. Die Handlungsaktivierung ist nach dieser Sicht jedoch nicht obligatorisch für das Satzverständnis, sondern tritt erst nach dem Satzverständnis auf. Dies könnte mit der Handlungsplanung interferieren und in einem ACE resultieren. Bei abstrakten Sätzen stehen Handlungen (z. B. erzählen, singen) jedoch nicht in direktem Kontrast mit den Handlungen, die für die Reaktion notwendig sind und sollten deshalb nach klassischen kognitiven Theorien nicht zu Interferenz führen (Glenberg und Kaschak 2002).

Es wurde auch gezeigt, dass kurzzeitige Veränderungen des motorischen Systems das Sprachverständnis beeinflussen (Glenberg et al. 2008b). Versuchspersonen wurden gebeten, 600 Bohnen einzeln von einem Container (mit einer weiten Öffnung) in einen anderen Container (mit einer engen Öffnung) zu legen. Die Bewegung zum Ziel (enger Container) führte entweder vom Körper weg oder zum Körper hin. Nachdem Versuchspersonen alle Bohnen transportiert hatten, wurde ein ACE-Experiment durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Versuchspersonen das Urteil „sinnvoll" langsamer abgaben, wenn der Satz einen Transfer in die Richtung beschrieb, die der Richtung der vorherigen Bewegung beim Transportieren der Bohnen entsprach. Dies zeigt, dass eine Ermüdung eines Effektors das Verständnis von Transfersätzen beeinträchtigt. Vermutlich werden durch Ermüdung kurz andauernde plastische Veränderungen der corticalen Repräsentation von bestimmten Handlungen erzeugt, welche die Sprachverarbeitung beeinflusst.

Zwaan et al. (2012) konnten zeigen, dass die Ausführung einer Handlung durch eine im Satz beschriebene Handlung moduliert wird, auch wenn keine Merkmalsüberlappung zwischen der verbal beschriebenen Handlung und der ausgeführten Handlung besteht. Personen wurden Sätze präsentiert, die eine Vorwärts- oder Rückwärtsbewegung implizieren (z. B. „Der Mann streichelte den kleinen Hund"). Reaktionen erforderten Bewegungen nach links oder rechts auf einem Gleichgewichtsbrett, um zu beurteilen, ob ein Satz sinnvoll ist oder nicht. Es zeigte sich, dass Bewegungen sich in Abhängigkeit vom Satzinhalt nach vorn oder hinten verlagerten. Ähnliche Kompatibilitätseffekte wurden auch in Bezug auf die Richtung von verbal beschriebenen Rotationen berichtet (Zwaan und Taylor 2006).

Auch neurophysiologische Studien zeigen, dass motorische Repräsentationen beim Verständnis von handlungsbezogener Sprache eine Rolle spielen. Das Lesen von Wörtern wie „treten", „nehmen" oder „lecken" (*kick*, *pick*, *lick*) aktiviert Areale im prämotorischen und motorischen Cortex, die die jeweils angesprochene Bewegung steuern (Hauk et al. 2004). Ähnliche Resultate treten auf, wenn man ganze Sätze untersucht. Beim Lesen von Handlungssätzen wie „Ich kicke den Ball" oder „Ich beiße in den Apfel" werden die gleichen Areale im prämotorischen Cortex aktiviert wie bei tatsächlichen Bewegungen (Tettamanti et al. 2005; vgl. auch Buccino et al. 2005).

Die Aktivierung spezifischer motorischer Areale scheint eine bedeutende Komponente beim Sprachverständnis zu sein, und nicht nur ein Nebenprodukt. Wenn das Armareal im motorischen Cortex mittels TMS stimuliert wird, werden Wörter, die Armbewegungen beschreiben (z. B. picken) schneller erkannt als Wörter, die Beinbewegungen beschreiben. Umgekehrt, wenn Beinareale stimuliert werden, werden Wörter, die Beinbewegungen (z. B. kicken) beschreiben, schneller erkannt als Wörter, die Armbewegungen beschreiben (Pulvermüller et al. 2005). Dies zeigt, dass das motorische System am semantischen Zugriff auf die Bedeutung von Handlungswörtern beteiligt ist.

Interessanterweise unterscheiden sich die Studien darin, ob Erleichterung (Pulvermüller et al. 2005) oder Interferenz (Buccino et al. 2005) der Verarbeitung durch TMS beobachtet wird.

Zur Vertiefung 21.4

Der Handlungs-Satz-Kompatibilitätseffekt (*action sentence compatibility effect*, ACE)

Glenberg und Kaschak (2002) präsentierten Versuchspersonen sinnvolle und unsinnige Sätze. Versuchspersonen sollten so schnell wie möglich entscheiden, ob ein Satz einen Sinn ergibt (Ja) oder nicht (Nein). Die sinnvollen Sätze konnten eine Bewegung zum eigenen Körper hin (z. B. „Öffne die Schublade!") oder vom eigenen Körper weg (z. B. „Schließe die Schublade!") implizieren. Unsinnige Sätze implizierten keine Bewegungsrichtung (z. B. „Koche die Luft!"). Des Weiteren wurde der Satztyp manipuliert. Es gab Imperativsätze (z. B. „Öffne die Schublade!"), Sätze mit konkretem Transfer (z. B. „Anna gab dir das Buch") und Sätze mit abstraktem Transfer (z. B. „Ernst erzählte dir die Geschichte").

Die tatsächliche Bewegungsrichtung der Versuchspersonen wurde manipuliert, indem sie sich bei sinnvollen Sätzen entweder von einer mittelweit vom Körper entfernten Taste zu einer weiter vom Körper entfernten Taste bewegten (Ja-ist-weit-Bedingung) oder zu einer Taste, die näher am Körper war (Ja-ist-nah-Bedingung). Bei unsinnigen Sätzen sollten sie die jeweils andere Taste drücken (Abb. 21.14). Abhängige Variable war die Zeit zwischen der Präsentation des Satzes und dem Loslassen der mittleren Taste; ausgewertet wurden nur sinnvolle Sätze.

Nach der IH resultieren Sätze, die eine Handlung zum eigenen Körper hin implizieren, in einer Simulation dieser Bewegung zum Körper hin, während Sätze, die eine Handlung vom Körper weg beinhalten, eine Simulation der Bewegung vom Körper weg implizieren. Bei Inkompatibilität der Bewegungsrichtungen von Satz und ausgeführter Bewegung sollte das Verständnis eines Satzes erschwert sein. Demzufolge sollte eine Interaktion zwischen Satzrichtung und Bewegungsrichtung zu beobachten sein. Diese trat auf. Sie wurde nicht durch den Satztyp moduliert. Es wurde ein ACE-Effekt gefunden (Abb. 21.15). Interessant war, dass der Effekt auch für abstrakte Sätze gefunden wurde. Dies widerlegt Alternativerklärungen. In weiteren Experimenten von Glenberg und Kaschak (2002) wurde ausgeschlossen, dass der ACE nur aufgrund von räumlicher Überlappung entsteht.

Zur Vertiefung 21.4 (*Fortsetzung*)

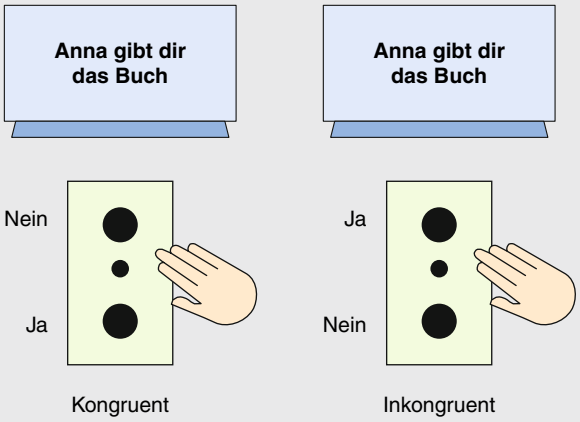


Abb. 21.14 Aufbau eines typischen ACE-Experiments

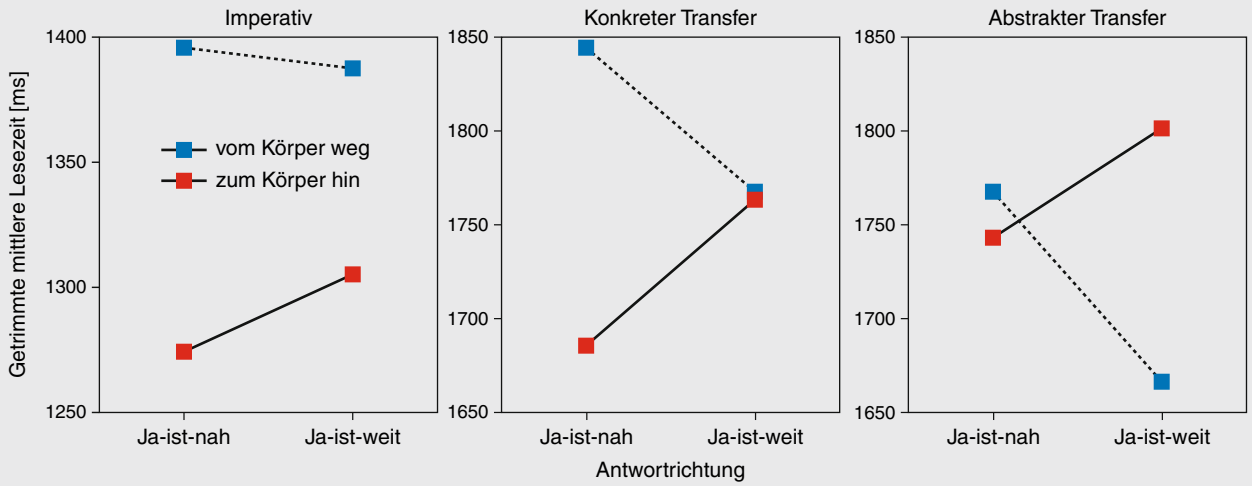


Abb. 21.15 Handlungs-Satz-Kompatibilitätseffekt für imperative Sätze, Sätze mit konkretem Transfer und Sätze mit abstraktem Transfer. Auf der x-Achse ist die Antwortrichtung abgetragen. Blaue Quadrate kennzeichnen Sätze, die eine Bewegung vom Körper weg beinhalten, rote *Quadrate* kennzeichnen Sätze, die eine Bewegung zum Körper hin beinhalten. (Glenberg und Kaschak 2002, Exp. 1. Nachdruck mit Genehmigung. © Springer)

Abgesehen von methodischen Unterschieden zwischen den Studien könnte dies am Zeitverlauf der Aktivierung motorischer Schemata liegen. Letztendlich sind jedoch die Faktoren, die dazu führen, ob Erleichterung oder Interferenz zwischen Wörtern/Sätzen und Handlungen beobachtet wird, nicht vollständig geklärt.

Nicht nur Handlungswörter und Sätze, die Handlungen beschreiben, aktivieren motorische Repräsentationen und motorische Areale, sondern auch Wörter, die sich auf manipulierbare Objekte beziehen (Chao und Martin 2002; Saccuman et al. 2006; Rueschemeyer et al. 2010). Wenn Versuchspersonen beispielsweise einen Bahnungsreiz (*prime*) präsentiert bekommen, der Objekte unterschiedlicher Größe beinhaltet (Apfel, Traube), und dann einen Holzblock greifen müssen, wird die maximale Griffweite (Distanz zwischen Daumen und Zeigefinger) während der Bewegung durch den Prime beeinflusst, obwohl dieser für die Greifaufgabe irrelevant ist (Glover et al. 2004).

21.5.3 Flexibilität und Kontextabhängigkeit

Eine wesentliche Rolle für die Aktivierung von Handlungssimulation spielt der linguistische Kontext. Raposo et al. (2009) zeigten, unter Verwendung von fMRI, dass die Aktivierung im motorischen Cortex davon abhängt, in welchem Kontext Verben präsentiert werden. Wenn Verben isoliert („kick“) oder in handlungsbezogenen Sätzen („kick the ball“) präsentiert werden, zeigt sich eine Aktivierung des motorischen Cortex. Werden sie aber in einem ideomatischen Kontext präsentiert („kick the bucket“), zeigt sich keine Aktivierung des motorischen Cortex (vgl. aber Boulenger et al. 2009).

Die Aktivierung des motorischen Systems hängt auch von der Aufgabenstellung ab. So interferieren Verben, die eine Handlung der Hand beschreiben, mit Tastendrücken, wenn Versuchspersonen eine semantische Entscheidungsaufgabe ausführen (hier die Entscheidung, ob ein Wort eine konkrete oder eine abstrakte

Handlung darstellt), aber nicht, wenn sie eine lexikalische Entscheidungsaufgabe ausführen (hier die Entscheidung, ob es sich um ein Wort oder Nonsens-Wort handelt) (Sato et al. 2008). Ähnliches wurde von Papeo et al. (2009) beobachtet. In einer TMS-Studie zeigte sich bei Handlungswörtern im Vergleich zu nicht handlungsbezogenen Wörtern eine erhöhte Aktivität im primären motorischen Cortex, wenn Versuchspersonen beurteilen sollten, ob ein Verb handlungsbezogen ist (*semantische Kategorisierungsaufgabe*). Diese Aktivierung trat nur auf, wenn TMS 500 ms nach der Präsentation des Stimulus appliziert wurde, nicht jedoch, wenn TMS früher appliziert wurde (170 oder 300 ms nach dem Stimulus). Wenn Versuchspersonen die Anzahl der Silben zählen sollten (*Silbenentdeckungsaufgabe*), war die Aktivität im primären motorischen Cortex geringer. Diese Befunde deuten darauf hin, dass Handlungsverben nicht automatisch zu einem frühen Zeitpunkt den primären motorischen Cortex aktivieren, sondern dass die Aktivität top-down, in Abhängigkeit von der spezifischen Aufgabenstellung zu einem späteren Zeitpunkt, moduliert wird.

Auch das Auftreten einer Handlungssimulation beim Verständnis von Objektnamen ist davon abhängig, in welchem Kontext Objekte präsentiert werden. Wenn vor der Präsentation von Objekten Primes präsentiert werden, die die übliche Handlung mit einem Gegenstand betonen (z. B. Durst – Tasse), kommt es zu einer Simulation der Handlung; werden jedoch Primes präsentiert, die nicht auf die übliche Handlung mit den Gegenständen hinweisen (z. B. Spülbecken – Tasse) tritt keine Handlungssimulation auf (van Dam et al. 2010). Ähnliches zeigt sich auch, wenn man die Aktivierung von motorischen Arealen im fMRI betrachtet. Wenn Versuchspersonen auf Handlungen, die man mit einem Objekt (z. B. einem Streichholz) machen kann, achten, ist die motorische Aktivierung höher als wenn Sie auf die Farbe dieses Gegenstandes achten (van Dam et al. 2012).

Motorische Simulation und Aktivierung in motorischen und prämotorischen Regionen während der Verarbeitung von Handlungswörtern hängen also davon ab, dass durch den Kontext Handlungen betont werden. Dies deutet darauf hin, dass die Repräsentationen flexibel sind. Personen scheinen zu erkennen, wann eine motorische Simulation einen Beitrag zum Sprachverständnis und/oder zur Aufgabenstellung leisten kann und wann nicht. Eine Handlungssimulation findet vor allem dann statt, wenn sie hilfreich für das Verständnis oder die gegenwärtige Aufgabe einer Person ist.

21.5.4 Handlungserfahrung und Expertise

Wenn das Verständnis handlungsbezogener Sprache in motorischen Systemen verankert ist, dann sollte die Erfahrung, die man mit einer sprachlich dargestellten Handlung hat, einen Einfluss darauf haben, wie diese repräsentiert und verarbeitet wird (Beilock 2009; Beilock et al. 2008; Holt und Beilock 2006). Um dies zu untersuchen, untersuchten Holt und Beilock (2006) das Verständnis von handlungsbezogener Sprache bei Hockeyspielern und Novizen im Hockey. Erfasst wurde das Verständnis von alltäglichen Handlungen (z. B. „Das Kind sah den Ballon in der Luft“) und hockeyspezifischen Situationen (z. B. „Der Schiedsrichter sah den Hockeyhelm auf der Bank“). Versuchspersonen lasen zunächst eine Aussage, danach wurde ein Bild mit einem Zielobjekt gezeigt. Versuchspersonen sollten beurteilen, ob das Zielobjekt im vorhergehenden Satz vorkam. Wenn das Zielobjekt im vorherigen Satz vorhanden war, konnte das Bild mit der Handlung des vorherigen Satzes übereinstimmen oder nicht. Beispielsweise stimmt das Bild eines fliegenden Ballons mit der Aussage „Das Kind sah den Ballon in der Luft“ überein, aber nicht mit der Aussage „Das Kind sah den Ballon in der Tasche“. In beiden Fällen ist das Zielobjekt jedoch im vorherigen Satz vorhanden (Abb. 21.16).

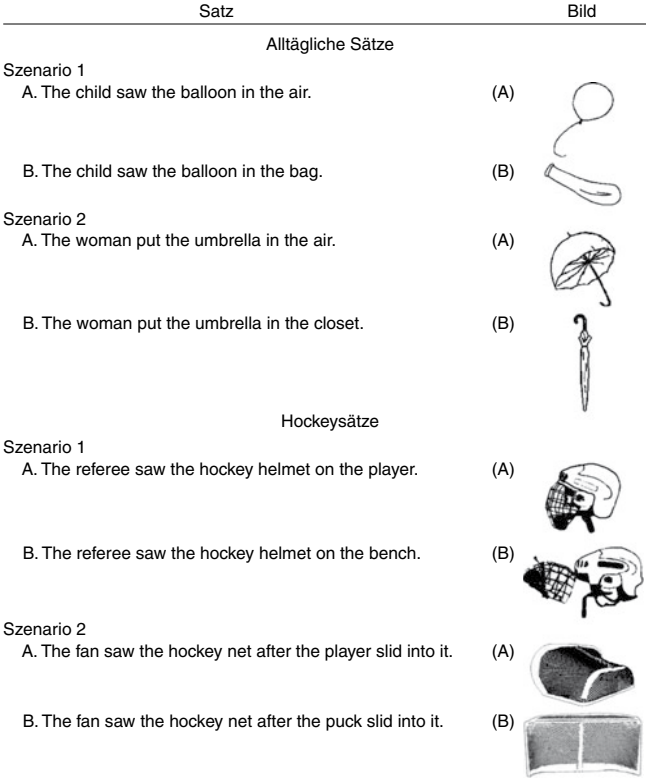


Abb. 21.16 Beispielstimuli aus der Studie von Holt und Beilock (2006). Bild A ist kongruent mit Satz A und inkongruent mit Satz B. Bild B ist kongruent mit Satz B und inkongruent mit Satz A. (Aus Holt und Beilock 2006. Nachdruck mit Genehmigung, © Springer)

Bei den alltäglichen Sätzen zeigte sich sowohl bei Hockeyspielern als auch bei Novizen, dass das Urteil schneller gefällt wurde, wenn das Bild mit der Aussage übereinstimmte, als wenn es nicht mit der Aussage übereinstimmte. Bei hockeyspezifischen Sätzen trat dieser Effekt jedoch nur bei Hockeyspielern auf. Diese Resultate stützen die Idee, dass Handlungsmöglichkeiten beim Lesen eines Satzes aktiviert werden. Sie zeigen aber auch, dass die Erfahrung mit sprachlich beschriebenen Handlungen von Bedeutung dafür ist.

Man könnte argumentieren, dass der Vorteil von Hockeyspielern bei hockeyspezifischen Sätzen durch bereichsspezifisches Wissen über Hockey zustande kommt und nicht durch die Erfahrung mit der Handlung selbst. Dies konnten Holt und Beilock (2006) in einem weiteren Experiment ausschließen. In dem Ex-

periment wurden Novizen und Experten in American Football untersucht. Hier wurde manipuliert, ob ein Satz spezifisch für American Football ist (eine Handlung, die man nur ausführen kann, wenn man Spieler ist, z. B. die Übergabe vom Quaterback an den Empfänger) oder eine Alltagshandlung, die aber im Kontext von American Football stattfindet (ein Spieler setzt sich auf die Bank). Es zeigte sich, dass sowohl Experten als auch Novizen schneller reagierten, wenn bei einer Alltagshandlung das Bild mit dem vorhergehen Satz übereinstimmte. Bei den Handlungen, die spezifisch für American Football waren, zeigten nur Experten diesen Effekt.

Wenn Handlungssimulation beim Sprachverständnis von Erfahrung und Expertise mit einer Handlung abhängt, bleibt unklar, wie Nichtexperten Handlungen verstehen, falls Handlungssimulation als obligatorisch angesehen wird. Wir können beispielsweise verbale Beschreibungen von Bewegungen von Tieren oder Robotern verstehen, auch wenn deren Art der Fortbewegung sich von unserer unterscheidet. Generell stellt dies jedoch nur ein Problem für die Annahme dar, dass motorische Simulation obligat für das Verständnis handlungsbezogener Sprache ist. Wenn man davon ausgeht, dass Simulationen multimodal sind, könnten hier andere Sinnesmodalitäten die Aufgabe übernehmen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass Handlungsverständnis erlangt wird, indem Personen auf bekannte Handlungen zurückgreifen oder Ähnlichkeiten der eigenen Motorik nutzen, um unbekannte Handlungen zu simulieren (Rieger 2012; ▶ Abschn. 21.2). De Vega (2008) geht entsprechend davon aus, dass mentale Repräsentationen der sprachlich beschriebenen Handlung reichhaltig und detailliert oder grobkörnig sein können, in Abhängigkeit von der eigenen motorischen (und auch visuellen) Erfahrung. Grobkörnige Simulationen könnten auf Handlungsrepräsentationen auf einem abstrakteren Niveau zurückgreifen. Dies könnte auch auf Simulationen bekannter Handlungen zutreffen, wenn die Details der Handlung nicht spezifiziert sind (de Vega 2008).

21.5.5 Ebene der Handlungssimulationen

Die Simulation beim Verständnis von handlungsbezogener Sprache wird oft mit der Aktivierung von spezifischen motorischen Programmen gleichgesetzt (Glenberg und Kaschak 2002). Es ist jedoch durchaus denkbar, dass noch andere Repräsentationen eine Rolle spielen. Handlungen werden im Wesentlichen in Bezug auf ihre Ziele oder Effekte in der Umgebung repräsentiert (Hommel et al. 2001; Prinz 1997; ▶ Kap. 22). In vielen Studien zu Embodiment bei handlungsbezogener Sprache wird nicht zwischen Bewegungen und Handlungseffekten unterschieden. Ausgehend von diesen Überlegungen untersuchten Diefenbach et al. (2013), ob das Satzverständnis auf Repräsentationen intendierter Handlungseffekte oder auf motorischen Repräsentationen basiert. In einem ACE-Experiment sollten Versuchspersonen beurteilen, ob Sätze, die Handlungen zum eigenen Körper hin oder vom eigenen Körper weg beinhalten, sinnvoll sind oder nicht. Um Handlungen von intendierten Effekten zu dissoziieren, führten die Versuchspersonen die Aufgabe unter zwei Bewegungs-Effekt-Verhältnissen durch: zum einen mit einem regulären räumlichen Verhältnis (z. B. bringt eine Bewegung zum Körper auf dem Bildschirm einen Stern nahe am Körper zum Leuchten) und zum anderen mit einem invertierten räumlichen Verhältnis (z. B. bringt eine Bewegung zum Körper einen weiter entfernten Stern zum Leuchten). Das Datenmuster deutete darauf hin, dass das Verständnis von Handlungssätzen die Aktivierung einer Repräsentation von Handlungseffekten beinhaltet (Diefenbach et al. 2013; zu konvergierender Evidenz vgl. Markman und Brendl 2005).

Einhergehend mit solchen Befunden nehmen manche Autoren an, dass abstraktere Handlungsrepräsentationen eine Rolle beim Verständnis handlungsbezogener Sprache spielen könnten (z. B. de Vega 2008). Insbesondere wird Handlungszielen im Gegensatz zu Eigenschaften der Bewegung selbst, z. B. Bewegungsrichtung, eine besondere Rolle zugeschrieben. Allein die Existenz des ACE könnte diese Hypothese stützen. Die Verben, die üblicherweise in ACE Untersuchungen verwendet werden, beziehen sich auf Handlungen mit sehr unterschiedlichen motorischen Programmen (z. B. einen Ball werfen, etwas geben, jemandem etwas erzählen), die sich von der motorischen Reaktion im Experiment (Tastendrücke, Hebelbewegungen) unterscheiden. Trotzdem kommt es zu richtungsbezogenen Kompatibilitäts- oder Interferenzeffekten, was darauf hindeuten könnte, dass Handlungen nicht im Sinne spezifischer motorischer Programme simuliert werden, sondern auf einer abstrakteren Ebene (de Vega 2008).

Im Rahmen multimodaler Simulation (Barsalou 2008) könnte man vermuten, dass eine Person, die einen Satz liest oder hört, in dem beschrieben wird, wie jemand einen Handlungseffekt erzeugt, in der Modalität des Handlungseffekts simuliert. Demnach würde, wenn beschrieben wird, dass jemand ein Licht anschaltet, eine visuelle Simulation stattfinden. Wird beschrieben, wie ein Klavierspieler eine Melodie spielt, würde eine auditorische Simulation stattfinden. Eine motorische Simulation der Handlung selbst könnte jedoch zusätzlich auftreten.

21.5.6 Verständnis abstrakter Sprache und nicht handlungsbezogener Sprache

Für radikale Ansätze von Embodiment ist es eine wichtige Herausforderung, das Verständnis abstrakter Konzepte und Wörter zu erklären. Die Annahme, dass das Verständnis jeglicher Sprache in motorischen Simulationen verankert ist (indexikalische Hypothese; ▶ Abschn. 21.5.1; Glenberg und Kaschak 2002), wird häufig kritisiert. Es wird angezweifelt, dass die Bedeutung von abstrakten Wörtern und abstrakter Sprache komplett von motorischen Repräsentationen abgeleitet werden kann (z. B. Mahon und Caramazza 2008; Toni et al. 2008). Während es zahlreiche Belege für Embodiment bei konkreten Konzepten gibt, ist die Befundlage hinsichtlich abstrakter Konzepte eher dünn und uneindeutig. Es wurde bereits gezeigt, dass motorische Prozesse bei abstrakten Sätzen eine Rolle spielen können (▶ Abschn. 21.5.2). Widersprüchliche Befunde zeigen sich jedoch in vielen Studien. Eine radikale Version von Embodiment ist für abstrakte Konzepte somit möglicherweise nicht haltbar.

Es könnte jedoch sein, dass das Verständnis abstrakter Konzepte in einer radikalen Version von verankerter Kognition besser erklärt werden kann. Nach der Theorie der perzeptuellen Symbole könnten beim Verständnis von Sprache auch Simulationen in visuellen, auditorischen oder anderen Systemen stattfinden (Barsalou 2008). Relativ gut untersucht ist die Aktivierung von räumlich-visuellen Repräsentationen beim Sprachverständnis. Beispielsweise wurde gezeigt, dass Personen schneller auf dargestellte Objekte reagieren, wenn das Objekt in seiner Form oder Orientierung mit einem Objekt in einem vorhergehenden Satz übereinstimmt (*appearance compatibility effect*; Standfield und Zwaan 2001). In einer Studie lasen Versuchspersonen einen Satz über einen Nagel, der entweder in die Wand oder in den Boden gehämmert wurde. Danach betrachteten sie ein Bild mit einem horizontal oder vertikal ausgerichteten Nagel. Sie sollten sagen, ob das Bild das beschrieb, was sie vorher gehört hatten. Wenn Versuchspersonen einen Satz über einen Nagel, der in die Wand gehämmert wurde, gelesen hatten, erkannten sie einen horizontal ausgerichteten Nagel schneller als einen vertikal ausgerichteten Nagel (und umgekehrt). Die Interpretation des Satzes enthält dieses perzeptuelle Detail (Standfield und Zwaan 2001).

Eine populäre Idee ist, dass abstrakte Konzepte in Form von Metaphern im Wissen verankert sind (Lakoff und Johnson 1980a, b, 1999). Metaphorische Konzepte sind Konzepte, die durch andere Konzepte verstanden werden. Diese anderen Konzepte sind dabei konkreter und beziehen sich z. B. auf Raum, Bewegung, Essen oder Objekte. Abstrakte Konzepte sind typischerweise in Bezug auf mehrere konkrete Konzepte definiert. Jede Metapher beinhaltet bestimmte Aspekte des abstrakten Konzepts. Beispielsweise verstehen wir das Konzept „Idee", indem Metaphern wie „Ich kann dieses Argument nicht schlucken", „Diese Idee starb aus", „Der Gedanke fiel auf fruchtbaren Boden", „Das kauft man dir nicht ab", „Die Idee ist Gold wert" und „Ich sehe dies anders" herangezogen werden. Die Metaphern entstehen durch physische und kulturelle Erfahrung in der Interaktion mit der Umwelt. In diesem Sinne sind sie in unseren Handlungen und in anderen Sinnessystemen verankert. Es gibt einige Belege dafür, dass Personen tatsächlich über abstrakte Konzepte unter Verwendung konkreter Metaphern reden (Boroditsky und Ramscar 2002; Gibbs 2006).

21.5.7 Fazit

In ▶ Abschn. 21.5.1 wurden zunächst zwei dominante Theorien zum Sprachverständnis und in ▶ Abschn. 21.5.2 einige Befunde zum Verständnis handlungsbezogener Sprache dargestellt. Es wurde gezeigt, dass es vielfältige Belege für eine Beteiligung des motorischen Systems beim Verständnis handlungsbezogener Sprache gibt.

Gerade im Bereich des Sprachverständnisses wird die Annahme von radikalen Embodiment-Ansätzen, in denen davon ausgegangen wird, dass motorische Simulation obligatorisch für das Verständnis von (handlungsbezogener) Sprache ist und automatisch stattfindet (z. B. Glenberg und Kaschak 2002), debattiert. Im Kontext dieser Frage wurden Studien dargestellt, in denen untersucht wird, wie flexibel und kontextabhängig motorische Simulationen sind (▶ Abschn. 21.5.3), welche Rolle Handlungserfahrung und Expertise spielen (▶ Abschn. 21.5.4), auf welcher Ebene die Handlungssimulation stattfindet (▶ Abschn. 21.5.5) und wie abstrakte und nicht handlungsbezogene Sprache verstanden wird (▶ Abschn. 21.5.6). Wie sich gezeigt hat, lassen sich viele Befunde nicht mit einer radikalen Variante von Embodiment erklären. Es gibt keine eindeutigen Belege, dass die Aktivierung des motorischen Systems beim Verstehen von Sprache, auch nicht von handlungsbezogener Sprache, obligatorisch ist. Vielmehr deuten Befunde darauf hin, dass das Verständnis verbaler Beschreibungen ein unterschiedliches Ausmaß von Embodiment aufweisen kann (z. B. Mahon und Caramazza 2008; Raposo et al. 2009; van Dam et al. 2010, 2012).

Insgesamt sprechen die Befunde eher für eine schwache Version von Embodiment. Eine Erweiterung von Embodiment stellt verankerte Kognition dar. Hier wird nicht nur von einer Rolle des Körpers und von Handlungen für das Verständnis von Sprache ausgegangen, sondern Simulationsprozesse beim Sprachverständnis finden in diversen Modalitäten statt. Die Theorie der perzeptuellen Symbole (▶ Abschn. 21.5.1) entstammt diesem theoretischen Rahmen. Befunde, die mit einer radikalen Variante von Embodiment nicht vereinbar sind, können im Rahmen dieses Ansatzes erklärt werden. Allerdings erlaubt es die Flexibilität der Theorie, fast jeden empirischen Befund zu erklären, sodass eine Falsifikation schwierig ist.

21.6 Anwendungsbeispiele

Embodiment liefert theoretische und empirische Grundlangen für vielfältige Anwendungsbereiche. Aus der Vielzahl von Anwendungen werden hier drei Anwendungen dargestellt (mentales Training, Kontrollwahn bei Schizophrenie und Lesenlernen), die auf den in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Themen beruhen.

Mentales Training

Eine wesentliche Anwendung von *Handlungsvorstellungen* ist mentales Training (auch mentale Übung, *mental practice*). Unter mentalem Training versteht man regelmäßig wiederholte und planmäßig durchgeführte Handlungsvorstellungen (Mayer und Hermann 2009). Mentales Training kann verschiedene Aspekte motorischer Performanz, z. B. Bewegungsgeschwindigkeit, Bewegungsgenauigkeit und Muskelkraft, verbessern (Überblick in Mayer und Hermann 2009). Verschiedenste Techniken werden schon seit Langem im Bereich der Sportpsychologie angewandt (Guillot et al. 2010). Bei Leistungssportlern wird mentales Training beispielsweise als Ergänzung zum physischen Training eingesetzt, während Trainingspausen bei Verletzungen oder bei Sportarten, in denen Möglichkeiten zum physischen Training begrenzt sind. Mentales Training kann auch in anderen Bereichen zum Einsatz kommen, z. B. in der chirurgischen Ausbildung (Arora et al. 2011) und bei Profimusikern (Meister et al. 2004).

Ein relativ neues und interessantestes Einsatzgebiet mentalen Trainings liegt im Bereich der neuropsychologischen und physiotherapeutischen Rehabilitation. Hier können u. a. Patienten mit Lähmungen nach einem Schlaganfall von mentalem Training (das zusätzlich zu den üblichen Interventionen durchgeführt wird) profitieren (Braun et al. 2013; Überblick in Page 2010). Page et al. (2007) untersuchten beispielsweise die Effektivität von mentalem Training in der Rehabilitation von Armbewegungen nach einem Schlaganfall. Chronische Schlaganfallpatienten mit moderaten motorischen Defiziten nahmen an einem Training teil, in dem sechs Wochen lang an zwei Tagen in der Woche in je 30-minütigen Sitzungen Aktivitäten des täglichen Lebens physisch trainiert wurden. Patienten der Experimentalgruppe erhielten nach dem physischen Training zusätzlich 30 min mentales Training. Das mentale Training wurde anhand eines Audiotape durchgeführt und bestand aus Anleitungen zu multisensorischen Vorstellungen der Handlungen, die zuvor beim physischen Training geübt wurden. Beispielsweise wurden die Patienten angeleitet, sich vorzustellen, wie sie nach einer Tasse greifen. Die Instruktion bezog sich sowohl auf visuelle Aspekte als auch auf kinästhetische und taktile Aspekte der Handlung, wie das Gefühl des Austreckens von Armen und Fingern und des Haltens einer Tasse in der Hand. Mit Personen der Kontrollgruppe wurde ein Entspannungstraining durchgeführt. In der Experimentalgruppe zeigte sich eine signifikant größere Reduktion der Beeinträchtigung des betroffenen Armes, so dass dieser auch im Alltag wieder mehr eingesetzt werden konnte. Dies zeigt, dass mentales Training in Ergänzung zum physischen Training positive Auswirkungen auf den Rehabilitationsverlauf haben kann.

Kontrollwahn bei Schizophrenie

Ein häufiges Symptom der Schizophrenie ist das Empfinden, dass eigene Gedanken und/oder Handlungen als fremd und verändert wahrgenommen werden (Kontrollwahn, *delusions of control*). Dieses Symptom wird durch folgendes Zitat illustriert: „They inserted a computer in my brain. It makes me turn to the left or right" (Frith 2005, S. 754). In dem Zitat wird deutlich, dass eigene Handlungen oft nicht als selbstinitiiert erlebt werden. Schizophrene Patienten mit Kontrollwahn und Passivitätserleben erleben sich nicht als Autor ihrer Handlungen: SoA ist gestört. Frith et al. (2000) führten solches Passivitätserleben im Rahmen von Kontrollwahn auf dysfunktionale Vorwärtsmodelle zurück. Sie propagierten, dass keine präzisen Vorhersagen über die Konsequenzen der eigenen Handlung aufgrund von eigenen motorischen Kommandos getroffen werden können. Infolgedessen führen Vergleiche zwischen vorhergesagten und tatsächlich eintretenden (sensorischen) Handlungskonsequenzen gehäuft zu Diskrepanzen. Diese Diskrepanzen werden nach der Komparatormodellerklärung für SoA bevorzugt external attribuiert (▶ Abschn. 21.4.2).

Diverse Befunde sind zumindest teilweise konsistent mit der Annahme dysfunktionaler Vorwärtsmodelle (Synofzik et al. 2010; Voss et al. 2010). Beispielsweise zeigten Voss et al. (2010), dass intentionale Bindung bei Schizophrenen weniger stark auf efferenten Vorhersageprozessen basiert als bei gesunden Kontrollpersonen. Diese Studie nutzte die Methode der Ereignisurteile (▶ Abschn. 21.4.1), um die wahrgenommene zeitliche Verschiebung eigener Handlungen (Tastendrücke) in Richtung (erwarteter) sensorischer Effekte (Töne) als indirektes Maß für SoA zu bestimmen. Variiert wurde, ob und mit welcher Wahrscheinlichkeit in einem gegebenen Durchgang ein Ton einer Handlung folgte (Zufall: 50 % Ja, 50 % Nein vs. kontingent: 75 % Ja, 25 % Nein). Voss et al. (2010) unterschieden zwischen einer prädiktiven Komponente und einer retrospektiv-inferenziellen Komponente intentionaler Bindung. Bei der Schätzung der prädiktiven Komponente wurden nur Durchgänge berücksichtigt, in denen kein Ton erschien. Für diese Durchgänge wurde die prädiktive Komponente als die Differenz zwischen den Zeitschätzungen für Handlungen in der 75:25- und der 50:50-Bedingung bestimmt. Dieser Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass in Durchgängen ohne tatsächlichen Ton etwaige Verschiebungen der zeitlichen Wahrnehmung eigener Handlungen in Richtung nichtexistentem Ton nur auf die Antizipation des Tones zurückgeführt werden kann. Bei der Schätzung der retrospektiv-inferenziellen Komponente wurden nur Durchgänge der 50:50-Bedingung berücksichtigt, in der keine auf Handlung-Ton-Kontingenz basierende (efferente) Vorhersage möglich war. Die retrospektive Komponente wurde bestimmt als Differenz zwischen 50:50-Durchgängen mit und ohne Ton. Konsistent mit den Vorhersagen des Komparatormodells fanden Voss et al. (2010), dass die prädiktive Komponente bei Schizophrenen im Vergleich zu Gesunden stark beeinträchtigt war.

Außerdem fanden Voss et al. (2010), dass intentionale Bindung insgesamt und insbesondere bezüglich der retrospektiv-inferenziellen Komponente bei Schizophrenen sogar stärker ausgeprägt war als bei gesunden Kontrollpersonen. Solche Befunde legen nahe, dass schizophrene Patienten mit *delusions of control* unter bestimmten Umständen sogar einen stärkeren SoA haben als die Gesunden. Solche Befunde sowie Dissoziationen bei schizophrenen Patienten zwischen größtenteils intakter Handlungssteuerung einerseits und trotzdem gestörter SoA andererseits (Synofzik et al. 2010) sind durch das Komparatormodell schwer erklärbar. Aus diesem Grund wurden (auch) im Zusammenhang mit der Erklärung schizophrener Symptome inzwischen bayesianische Erklärungsansätze vorgeschlagen (▶ Abschn. 20.2; vgl. auch Moore und Fletcher 2012). Danach nutzen Patienten aufgrund weniger zuverlässiger interner Signale bei der Bestimmung von Agency verstärkt externale Signale wie sensorisches Feedback.

Lesenlernen

Insbesondere im Bereich des Lernens in Erziehung und Unterricht findet Embodiment vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Embodiment betont die Rolle von Handlungserfahrung in Lernkontexten (Kontra et al. 2012). Die Idee, dass Handlungserfahrung einen wichtigen Beitrag im Lernprozess spielt, ist nicht neu (Piaget 1952), sie hat jedoch in den letzten 20 Jahren mit dem Aufkommen von Embodiment verstärkte Aufmerksamkeit erfahren. Ein Beispiel für die Anwendung von Embodiment im Lernkontext ist das Computerprogramm MbR (*moved by rea-*

Abb. 21.17 Die Bildschirmkopien illustrieren die physische Manipulation, **A** bevor der Satz „Ben hooks the cart to the tractor" gelesen wird, **B** während der Manipulation und **C** nach erfolgreicher Manipulation. (Modifiziert nach Glenberg et al. 2011. Nachdruck mit Genehmigung. © Springer)

ding; Überblick in Glenberg et al. 2013). Ausgehend von der Annahme, dass Sprachverständnis ein Simulationsprozess ist, soll Kindern beim Lesenlernen beigebracht werden zu simulieren. Wenn man eine *gesprochene* Sprache lernt, entsteht häufig eine direkte Verbindung von Symbolen (gesprochenen Wörtern und Phrasen) und sensomotorischer Aktivität. Beispielsweise sagt ein Elternteil zu einem Kind „Hier ist deine Flasche" und gibt ihm dabei die Flasche. Dies ist beim Lesenlernen nicht der Fall. Der Schlüssel zu MbR ist, Lesenlernen dem Erwerb gesprochener Sprache ähnlicher zu machen, d. h. die geschriebenen Wörter in sensomotorischer Aktivität zu verankern.

Das Computerprogramm MbR besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil, der physischen Manipulation (*physical manipulation*), lesen Kinder verschiedene Texte eines Szenarios, beispielsweise Geschichten, die auf einem Bauernhof stattfinden. Nachdem ein handlungsbezogener Satz gelesen wurde, der dem Kind durch ein grünes Verkehrslicht angezeigt wird, manipuliert das Kind Bilder auf einem Computerbildschirm, um den Inhalt des Satzes zu simulieren. Beispielsweise könnte ein Kind lesen, dass der Bauer den Traktor in die Scheune fährt. Daraufhin bewegt das Kind das Bild des Bauern zum Traktor und bewegt dann das kombinierte Bild von Traktor und Bauer in die Scheune (Abb. 21.17). Aufbauend auf dieser physischen Manipulation wird dem Kind beigebracht, das gleiche Szenario mental zu manipulieren (vorgestellte Manipulation; *imagine manipulation*). Dabei wird darauf geachtet, dass die Vorstellungen zusätzlich zu visuellen Komponenten auch motorische Komponenten beinhalten.

Das MbR Programm zielt darauf ab, das Lernen von Vokabeln zu fördern, indem Wortbedeutungen in Repräsentationen von Objekten verankert werden. Außerdem soll das Verständnis der Syntax verbessert werden (wer macht was mit wem), indem diese in eigenen Handlungen verankert wird. Schließlich soll die Integration von Wörtern in einen Satz und von Sätzen in einen Text gefördert werden, indem die visuell dargestellte Szene vom Kind in einem Modell der Situation fortlaufend aktualisiert wird. Die Effektivität von MbR zeigt sich sowohl bei trainierten als auch bei neuen Texten (Glenberg et al. 2004). Das Programm kann in kleinen Gruppen implementiert werden (Glenberg et al. 2007), auf Mathematikprobleme ausgeweitet werden (Glenberg et al. 2012) und einen Gewinn für Nichtmuttersprachler darstellen, die eine Fremdsprache lernen (Marley et al. 2010).

21.7 Ausblick

Verschiedene Ansätze von Embodiment werden in der psychologischen Forschung immer einflussreicher. Eine Stärke von Embodiment ist die Nähe zur Hirnforschung. Da körperliche und motorische Signale eine zentrale Rolle spielen, trägt das Wissen darüber, wie das Gehirn diese Signale bei kognitiven Prozessen implementiert, wesentlich zum Verständnis von Embodiment bei. Umgekehrt stellt die Hirnforschung auch einen Weg dar, die Vorhersagen von Embodiment zu testen (Barsalou 2008). Embodiment ist eher als eine generelle Sichtweise, die auf verschiedene Fragestellungen und Bereiche angewandt wird, zu verstehen denn als eine streng definierte und einheitliche Theorie. Entsprechend gibt es viele, je nach Bereich unterschiedliche, offene Fragen. In Bezug auf die hier dargestellten Bereiche wurde darauf bereits eingegangen.

Vieles in der Forschung im Bereich von Embodiment ist bisher eher beschreibend als erklärend. Empirische Überprüfung der Ideen erfolgt oft nach der Frage, ob Embodiment bei der Informationsverarbeitung eine Rolle spielt oder nicht. Es bestehen inzwischen sicherlich kaum mehr Zweifel daran, dass körperliche Signale und Handlungen wichtig für kognitive Prozesse

sind. Die Frage, die man sich stellen muss, ist deshalb nicht, ob sie von Bedeutung sind, sondern wie die Beziehung von körperlichen Signalen, Handlungen und Kognition genau aussieht. Die Forschung sollte sich in Zukunft stärker darauf fokussieren zu untersuchen, wie und wann Embodiment bei der Kognition eine Rolle spielt, und mehr spezifizierte (bereichsspezifische) Theorien formulieren (Meier et al. 2012; Willems und Francken 2012). Derzeit werden oft wenig spezifisch testbare Annahmen gemacht. Die Brauchbarkeit von Embodiment für die Erklärung von Phänomenen wird in Zukunft wesentlich von einer theoretischen Weiterentwicklung und Präzisierung des Konzepts abhängen.

Eine weitere Frage ist, in welchem Ausmaß Embodiment wirklich eine radikale Alternative zu traditionellen Ansätzen von Kognition darstellt. Radikale Ansätze von Embodiment betonen, dass die theoretische Sicht kognitiver Prozesse grundlegend verändert werden sollte und dass Embodiment bei kognitiven Prozessen obligatorisch ist. Viele der hier dargestellten Befunde sind jedoch eher mit einer schwachen Version von Embodiment vereinbar (Clark 1999; ▶ Abschn. 21.1). Nach der schwachen Version beschränken Eigenschaften des Körpers andere kognitive Prozesse. Dieser Variante von Embodiment können wohl viele zustimmen.

Abgesehen von Untersuchungen zum Einfluss von Expertise konzentriert sich die Forschung zu Embodiment in erster Linie auf fundamentale kognitive Prozesse, ohne dabei individuelle Differenzen zu berücksichtigen. Personen unterscheiden sich jedoch in ihrer Köpergröße, ihrer körperlichen Fitness, ihren metakognitiven Fähigkeiten sowie darin, wie konkret sie simulieren und welche Perspektive sie bevorzugt einnehmen. Zudem verändern sich Fähigkeiten über die Lebensspanne oder nach einer Verletzung, und Personen haben unterschiedliche kognitive Stile. In Zukunft besteht weiterer Klärungsbedarf, inwiefern sich diese Faktoren auf Embodiment auswirken.

In diesem Kapitel wurde Embodiment nur in Bezug auf ausgewählte Themen im Zusammenhang mit Handlung diskutiert. Diese thematische Fokussierung vernachlässigt andere Bereiche der Psychologie wie die Sozialpsychologie (z. B. Dijksterhuis und Bargh 2001) oder die Emotionspsychologie (z. B. Strack et al. 1988), in denen ebenfalls Embodiment-Ansätze vorgeschlagen werden.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass Embodiment einen vielversprechenden theoretischen Ansatz darstellt. Inwieweit Embodiment die Sichtweise kognitiver Prozesse grundlegend verändert, wird die Zukunft zeigen. Informationsverarbeitung im Sinne von Embodiment resultiert in reichhaltigen Repräsentationen. Dies bedeutet aber wahrscheinlich nicht, dass Informationen nicht auch auf anderen Wegen verarbeitet werden können.

21.8 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Nach Embodiment *(embodied cognition*, auch: verkörperte Kognition) sind körperliche Signale, innere Zustände und Handlungen ein wichtiger Bestandteil kognitiver Prozesse.
- Man unterscheidet schwächere und radikalere Versionen von Embodiment. Nach der schwächeren Sichtweise werden der Körper und Handlungen als kontextuelle Faktoren gesehen, die kognitive Prozesse einschränken, welche jedoch auch ohne sie stattfinden können. Nach der radikalen Sichtweise sind alle kognitiven Repräsentationen in körperlichen Signalen und Handlungen verankert, und es gibt keine separaten kognitiven Prozesse.
- Embodiment postuliert als zentralen und essenziellen Mechanismus kognitiver Aktivität Simulation. Simulation wird als ein erneutes Erleben motorischer und körperlicher Zustände, die durch Erfahrung erworben wurden, betrachtet.
- Nach Embodiment werden Handlungsvorstellungen als multimodale, dynamische Phänomene verstanden, die auf bewussten Simulationen beruhen.
- Handlungsvorstellung und Handlungsausführung weisen sowohl auf Verhaltensebene als auch auf neuronaler Ebene viele Gemeinsamkeiten auf.
- Die zeitliche Übereinstimmung von vorgestellten und ausgeführten Handlungen hängt von den Charakteristiken der Handlungen, individuellen Unterschieden und der Erfarung mit einer Handlung sowie von situativen Faktoren ab.
- Im Unterschied zu ausgeführten Handlungen verhindern bei vorgestellten Handlungen hemmende Mechanismen tatsächliche Bewegungen, und man erhält kein Feedback über die Konsequenzen der Handlungen auf den Körper und die Umgebung. Handlungsvorstellung kann eine höhere Belastung des Arbeitsgedächtnisses beinhalten als Handlungsausführung. Bei hoch automatisierten Handlungen wird in der Vorstellung die Aufmerksamkeit auf Aspekte der Bewegung gerichtet, die normalerweise außerhalb der bewussten Kontrolle liegen.
- Es wird davon ausgegangen, dass beobachtete Handlungen von anderen Personen auf besondere Weise verarbeitet werden (z. B. im Vergleich zu Bewegungen von Objekten). Die Besonderheit biologischer Bewegungen und Handlungen ist jedoch auch infrage gestellt worden.
- Die Beobachtung von Handlungen führt zu motorischer Resonanz und automatischer Imitation. Darüber hinaus wird der Fortgang der beobachteten Handlung vorhergesagt.
- Dem Spiegelsystem/Handlungsbeobachtungsnetzwerk und damit einhergehend automatischer Imitation und Handlungsvorhersage wird oft eine essenzielle Rolle bei sozialer Kognition zugeschrieben.
- Motorische Erfahrung und Expertise mit einer spezifischen Handlung führen zu einer adäquateren Simulation einer beobachteten Handlung.
- Sense of Agency ist reduziert, wenn (1) die (durch das Vorwärtsmodell) vorhergesagten Handlungskonsequenzen nicht oder zeitverzögert eintreten, (2) Handlungsselektion nicht flüssig, d. h. schwierig, ist (dies gilt zumindest für Situationen, in denen Schwierigkeiten der Handlungsauswahl nicht bewusst sind, z. B. bei subliminal induziertem Antwortkonflikt) und (3) die Handlungskonsequenzen negativ valenziert sind.
- Bayesianische Ansätze zur Erklärung von SoA nehmen an, dass unterschiedliche Hinweisreize für SoA ihrer Zuverlässigkeit entsprechend integriert und zur Schätzung von SoA genutzt werden.

- Embodiment kritisiert Ansätze, die davon ausgehen, dass Sprache Bedeutung übermittelt, indem ihre Symbole (Wörter, Morpheme) in abstrakte und amodale Repräsentationen umgewandelt werden. Stattdessen ist nach Embodiment linguistische Bedeutung in Handlungen, dem Körper und (nach verankerter Kognition) der Sensorik verankert.
- Beim Verständnis von handlungsbezogener Sprache ist Embodiment flexibel einsetzbar, kontextabhängig und hängt von der Erfahrung ab, die man mit einer Handlung hat.
- Unklar ist, inwieweit Verständnis abstrakter Sprache durch Embodiment erklärt werden kann. Viele Befunde sind mit einer schwachen Version von Embodiment vereinbar. Für eine radikale Version gibt es keine hinreichenden Belege.

Schlüsselbegriffe

Automatische Imitation (*automatic imitation*) Der Befund, dass Personen dazu tendieren, beobachtete Handlung zu imitieren, auch wenn die beobachtete Handlung nicht relevant für die eigene Handlung ist.

Chamäleon-Effekt (*chameleon effect*) Die Beobachtung eines Verhaltens bei einer anderen Person erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass man selbst dieses Verhalten ausführt.

Embodiment (*embodied cognition*) Theoretische Richtung der Kognitiven Psychologie, nach der körperliche Signale, innere Zustände und Handlungen als essenzieller Bestandteil kognitiver Prozesse betrachtet werden.

Emotionale Ansteckung (*emotional contagion*) Die Beobachtung einer Emotion bei einer anderen Person erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass man selbst diese Emotion empfindet.

Handlungsbeobachtungsnetzwerk (*action observation network*, AON) Beinhaltet Regionen des Spiegelsystems und weitere Regionen wie den superioren temporalen Sulcus.

Handlungs-Satz-Kompatibilitätseffekt (*action sentence compatibility effect*, ACE) Bei Übereinstimmung zwischen der Richtung einer in einem Satz beschriebenen Handlung und der Richtung einer auszuführenden Bewegung können Bewegungen schneller ausgeführt werden.

Handlungsvorstellung/Bewegungsvorstellung (*action imagery/motor imagery*) Mentale Simulation einer Handlung, ohne dass tatsächliche Bewegungen ausgeführt werden.

Imagery-Debatte (*imagery debate*) Theoretischer Streit darüber, welcher Art die Repräsentationen sind, die bewussten mentalen Vorstellungen zugrunde liegen. Nach der propositionalen Theorie beruhen mentale Vorstellungen auf abstrakten, amodalen Symbolen. Nach der analogen Theorie sind mentale Vorstellungen wahrnehmungsähnlich.

Indexikalische Hypothese (*indexical hypothesis*, IH) Nach der IH werden handlungsbezogene Sätze verstanden, indem die in einem Satz dargestellten Handlungen simuliert werden. Erstens aktivieren Wörter in Sätzen modale Repräsentationen (perzeptuelle Symbole). Zweitens werden Affordances von den perzeptuellen Symbolen abgeleitet. Drittens werden Affordances in ein kohärentes, ausführbares Set von Handlungen integriert. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Syntax. Die IH geht davon aus, dass auch sprachliche Inhalte, die keinen direkten Handlungsbezug aufweisen, in Handlungen verankert sind.

Intentionale Bindung (*intentional binding*) Zeitliche Illusion, der zufolge das Zeitintervall zwischen eigenen intentionalen Handlungen und den als Effekten eigener Handlung wahrgenommenen Handlungskonsequenzen als subjektiv komprimiert wahrgenommen wird. Intentionale Bindung dient als indirektes Maß für SoA.

Inverses Modell (*inverse model*) Inverse Modelle berechnen aus intendierten oder wahrgenommenen Effekten die motorischen Kommandos, die üblicherweise zu diesen Effekten führen.

Komparatormodell (*comparator model*) Das Komparatormodell beruht auf der Annahme interner Modelle (inverser Modelle und Vorwärtsmodelle) bei der Handlungssteuerung.

Lichtpunktdarstellung (*point light display*) Eine sich bewegende Person wird durch wenige Punkte auf einem einfarbigen Hintergrund dargestellt. Die Punkte sind zumeist auf den Gelenken und den Körperextremitäten platziert.

Lichtpunktläufer (*point light walker*) Wie eine Lichtpunktdarstellung. Bei Lichtpunktläufern wird eine gehende Person dargestellt.

Paradigma der mentalen Chronometrie (*mental chronometry paradigm*) Vergleich der Dauer von vorgestellten und ausgeführten Handlungen.

Sense of Agency (*Sense of Agency*, SoA) Flüchtiges subjektives Erleben, Urheber einer Handlung zu sein und durch diese eigene Handlung bestimmte Ereignisse in der Welt zu kontrollieren.

Sensorische Dämpfung (*sensory attenuation*) Die als Effekte eigener Handlungen wahrgenommenen Handlungskonsequenzen werden als weniger intensiv (z. B. leiser) erlebt als Vergleichsreize. Sensorische Dämpfung dient als indirektes Maß für SoA.

Simulation (*simulation*) Erleben von motorischen und körperlichen Zuständen oder Ereignissen, ohne tatsächlichen sensorischen Input oder tatsächliche Handlungsausführung. Simulation kann in allen Modalitäten stattfinden.

Spiegelneurone (*mirror neurons*) Neurone, die sensorische Informationen einer beobachteten Handlung auf interne motorische Repräsentationen abbilden. Spiegelneurone feuern sowohl, wenn eine Bewegung selbst ausgeführt wird, als auch, wenn die gleiche oder eine ähnliche Bewegung bei anderen beobachtet wird.

Spiegelsystem (*mirror system*) Regionen im Gehirn, die sowohl aktiv sind, wenn man eigene Handlungen ausführt, als auch,

wenn man Handlungen bei anderen beobachtet. Regionen des Spiegelsystems sind vor allem der prämotorische Cortex, der inferiore frontale Gyrus und der inferiore Parietallappen.

Theorie der perzeptuellen Symbole (*perceptual symbol system*) Ein perzeptuelles Symbol besteht aus der Erfahrung bestimmter neuraler Aktivierungen, die in eine multimodale Repräsentation integriert werden. Zu einem späteren Zeitpunkt können perzeptuelle Symbole auch in Abwesenheit von sensorischem Input durch Simulationsprozesse wieder aktiviert werden.

Verankerte Kognition (*grounded cognition*) Theoretische Richtung der Kognitiven Psychologie, nach der Kognition in verschiedenen Modalitäten verankert ist. Modale Systeme sind beispielsweise Wahrnehmung (z. B. Sehen, Hören), Handlung (z. B. Bewegung, Priopriozeption) und Introspektion (z. B. Affekte, Intention, Metakognition).

Verdeckungsparadigma (*occlusion paradigm*) In dem Paradigma wird die Darstellung einer handelnden Person zu einem bestimmten (kritischen) Zeitpunkt verdeckt. In einer Variante des Paradigmas sollen Personen den Ausgang der Handlung vorhersagen. In einer anderen Variante wird die Handlung nach einem bestimmten Intervall fortgeführt. Die Fortführung entspricht entweder dem tatsächlichen Zeitablauf, setzt zu einem früheren Zeitpunkt wieder ein oder setzt zu einem späteren Zeitpunkt wieder ein. Versuchspersonen werden aufgefordert, die zeitliche Übereinstimmung zu beurteilen.

Vorhersage (*prediction*) Simulationsprozesse beinhalten in der Regel Vorhersageprozesse. Vorhergesagt werden zukünftige sensorische Ereignisse. Bei Handlungen sind dies die Konsequenzen der eigenen Handlung oder auch die Konsequenzen der Handlung einer anderen Person.

Vorhersagecodierung (*predictive coding*) Vorhersagecodierung ist ein bayesianisches schlussfolgerndes System. Gehirnareale sind hierarchisch organisiert und haben reziproke Verbindungen. Auf jeder Ebene der corticalen Hierarchie werden unter Verwendung von Vorwärtsmodellen (generativen Modellen) Vorhersagen für die darunterliegenden Ebene gebildet. Diese Vorhersagen werden auf der darunterliegende Ebene mit tatsächlichen Repräsentationen verglichen.

Vorwärtsmodell (*forward model*) Vorwärtsmodelle berechnen aus einer Efferenzkopie des motorischen Kommandos die Konsequenzen der Handlung für den Körper und die Umgebung, d. h., sie sagen diese vorher.

■ Weiterführende Literatur

Blake, R. & Shiffrar, M. (2007). Perception of Human Motion. *Annual Review of Psychology, 58,* 47–73. (Übersicht über die Wahrnehmung biologischer Bewegungen; geht auch auf soziale Aspekte ein.)

Blakemore, S.-J. & Decety (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Review Neuroscience, 2(8),* 561–567. (Überblick über das Spiegelsystem und eine theoretische Analyse, wie unter Verwendung von internen Modellen während der Handlungsbeobachtung auf Intentionen geschlossen werden kann.)

Frith, C. D. (2013). The psychology of volition. *Experimental Brain Research, 229(3),* 289–299. (Übergreifende Betrachtungen zu Volition, SoA und Verantwortung.)

Gentsch, A., Weber, A., Synofzik, M., Vosgerau, G. & Schütz-Bosbach, S. (2016). Towards a common framework of grounded action cognition: Relating motor control, perception and cognition. *Cognition, 146*, 81–89 (Gegenüberstellung verschiedener theoretischer Ansätze im Rahmen von Embodiment.)

Glenberg, A.M., Wit, J.K. & Metcalfe, J. (2013). From the Revolution to Embodiment: 25 years of Cognitive Psychology. *Perspectives on Psychological Science, 8,* 573–585. (Einstieg in die Grundideen von Embodiment, Kritik an der klassischen Kognitiven Psychologie, mit Anwendungsbeispiel.)

Guillot, A. & Collet, C. (2010). *The Neurophysiological Foundations of Mental and Motor Imagery.* New York: Oxford University Press. (Mehrere Übersichtsartikel zum Thema Handlungsvorstellungen – von den Grundlagen bis zur Anwendung.)

Heyes, C. (2013). Imitation: Associative and Context Dependent. In Prinz, W., Beisert, M. & Herwig, A. (Hrsg.). *Action Science: Foundations of an Emerging Discipline* (S. 309–332). Cambridge, MA: MIT Press. (Überblick über automatische Imitation.)

Hughes, G., Desantis, A., & Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation: The role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological Bulletin, 139, 133–151.*

Iachini, T. (2011). Mental Imagery and Embodied Cognition: A Multimodal Approach. *Journal of Mental Imagery, 35(3),* 1–26. (Überblick über die Imagery-Debatte mit einem Bezug zu Embodiment und Handlungsvorstellungen.)

Moore, J. W., & Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency: a review. *Consciousness and Cognition, 21*, 546–561. (Relativ umfassende Übersicht zu intentionaler Bindung.)

Literatur

Aarts, H., Custers, R., & Wegner, D. M. (2005). On the inference of personal authorship: Enhancing experienced agency by priming effect information. *Consciousness and Cognition*, *14*, 439–458.

Abernethy, B., & Zawi, K. (2007). Pickup of essential kinematics underpins expert perception of movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, *39*(5), 353–367.

Abramson, L. Y., Seligman, M. E. P., & Teasdale, J. D. (1978). Learned Helplessness in Humans: Critique and Reformulation. *Journal of Abnormal Psychology*, *87*, 49–74.

Ach, N. (1905). *Über die Willenstätigkeit und das Denken*. Göttingen: Vandenhoeck & Rubprecht.

Ach, N. (1910). *Über den Willensakt und das Temperament. Eine experimentelle Untersuchung*. Leipzig: Verlag von Quelle und Meyer.

Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, *11*(9), 1109–1116.

Allison, T., Puce, A., & McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(7), 267–278.

Alloy, L. B., & Abramson, L. Y. (1979). Judgment of contingency in depressed and nondepressed students: sadder but wiser? *Journal of Experimental Psychology: General*, *108*, 441–485.

Annett, J. (1996). On knowing how to do things: a theory of motor imagery. *Cognitive Brain Research*, *3*(2), 65–69.

Arora, S., Aggarwal, R., Sirimanna, P., Moran, A., Grantcharov, T., Kneebone, R., Sevdalis, N., & Darzi, A. (2011). Mental practice enhances surgical technical skills: A randomized controlled study. *Annals of Surgery*, *253*, 265–270.

Astafiev, S. V., Stanley, C. M., Shulman, G. L., & Corbetta, M. (2004). Extrastriate body area in human occipital cortex responds to the performance of motor actions. *Nature Neuroscience*, *7*(5), 542–548.

Atkinson, A. P., Dittrich, W. H., Gemmell, A. J., & Young, A. W. (2004). Emotion perception from dynamic and static body expressions in point-light and full-light displays. *Perception*, *33*(6), 717–746.

Avenanti, A., Bueti, D., Galati, G., & Aglioti, S. M. (2005). Transcranial magnetic stimulation highlights the sensorimotor side of empathy for pain. *Nature Neuroscience*, *8*(7), 955–960.

Baaren, R. B. van, Holland, R. W., Kawakami, K., & Van Knippenberg, A. (2004). Mimicry and prosocial behavior. *Psychological Science*, *15*(1), 71–74.

Baldissera, F., Cavallari, P., Craighero, L., & Fadiga, L. (2001). Modulation of spinal excitability during observation of hand actions in humans. *European Journal of Neuroscience*, *13*(1), 190–194.

Bandura, A. (1977). Self-efficacy: toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, *84*, 191–215.

Barclay, C. D., Cutting, J. E., & Kozlowski, L. T. (1978). Temporal and spatial factors in gait perception that influence gender recognition. *Perception & Psychophysics*, *23*(2), 145–152.

Barr, K., & Hall, C. (1992). The use of imagery by rowers. *International Journal of Sport Psychology*, *23*, 243–261.

Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 577–660.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617–645.

Barsalou, L. W. (2009). Simulation, situated conceptualization, and prediction. *Philospohical Transactions of the Royal Society*, *364*, 1281–1289.

Barsalou, L. W., Niedenthal, P. M., Barbey, A. K., & Ruppert, J. A. (2003). Social embodiment. *Psychology of Learning and Motivation*, *43*, 43–92.

Bavelas, J. B., Black, A., Lemery, C. R., & Mullett, J. (1986). „I show how you feel": Motor mimicry as a communicative act. *Journal of Personality and Social Psychology*, *50*(2), 322–329.

Beilock, S. L. (2009). Grounding cognition in action: expertise, comprehension, and judgment. *Progress in Brain Research*, *174*, 3–11.

Beilock, S. L., & Carr, T. H. (2001). On the fragility of skilled performance: what governs choking under pressure? *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(4), 701–725.

Beilock, S. L., & Gonso, S. (2008). Putting in the mind versus putting on the green: expertise, performance time, and the linking of imagery and action. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(6), 920–932.

Beilock, S. L., & Holt, L. E. (2007). Embodied preference judgements: can likeability be driven by the motor system? *Psychological Science*, *18*(1), 51–57.

Beilock, S. L., Lyons, I. M., Mattarella-Micke, A., Nusbaum, H. C., & Small, S. L. (2008). Sports experience changes the neural processing of action language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(36), 13269–13273.

Binkofski, F., & Buccino, G. (2004). Motor functions of the broca's region. *Brain and Language*, *89*(2), 362–369.

Bischoff, M., Zentgraf, K., Lorey, B., Pilgramm, S., Balser, N., Baumgartner, E., & Munzert, J. (2012). Motor familiarity: Brain activation when watching kinematic displays of one's own movements. *Neuropsychologia*, *50*(8), 2085–2092.

Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion. *Annual Review of Psychology*, *58*, 47–73.

Blakemore, S. J., & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(8), 561–567.

Blakemore, S. J., & Frith, C. (2005). The role of motor contagion in the prediction of action. *Neuropsychologia*, *43*(2), 260–267.

Blakemore, S.-J., Wolpert, D., & Frith, C. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, *1*, 635–640.

Blandin, Y., Lhuisset, L., & Proteau, L. (1999). Cognitive processes underlying observational learning of motor skills. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *52*(4), 957–979.

Boroditsky, L., & Ramscar, M. (2002). The roles of body and mind in abstract thought. *Psychological Science*, *13*(2), 158–189.

Borreggine, K. L., & Kaschak, M. P. (2006). The action-sentence compatibility effect: It's all in the timing. *Cognitive Science*, *30*, 1097–1112.

Boulenger, V., Hauk, O., & Pulvermüller, F. (2009). Grasping ideas with the motor system: semantic somatotopy in idiom comprehension. *Cerebral Cortex*, *19*, 1905–1914.

Boschker, M. S., Bakker, F. C., & Rietberg, B. (2000). Retroactive interference effects of mentally imagined movement speed. *Journal of Sports Sciences*, *18*(8), 593–603.

Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *7*, 356–366.

Brass, M., Bekkering, H., Wohlschläger, A., & Prinz, W. (2000). Compatibility between observed and executed finger movements: comparing symbolic, spatial, and imitative cues. *Brain and Cognition*, *44*(2), 124–143.

Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001a). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica*, *106*(1), 3–22.

Brass, M., Zysset, S., & Cramon, D. Y. von (2001b). The inhibition of imitative response tendencies. *Neuroimage*, *14*(6), 1416–1423.

Brass, M., Schmitt, R., Spengler, S., & Gergely, G. (2007). Investigating action understanding: inferential processes versus motor simulation. *Current Biology*, *17*(24), 2117–2121.

Brass, M., Ruby, P., & Spengler, S. (2009). Inhibition of imitative behaviour and social cognition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *364*, 2359–2367.

Braun, S., Kleynen, M., Heel, T. van, Kruithof, N., Wade, D., & Beurskens, A. (2013). The effects of mental practice in neurological rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 390.

Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, *13*(2), 400–404.

Buccino, G., Binkofski, F., & Riggio, L. (2004). The mirror neuron system and action recognition. *Brain and Language*, *89*(2), 370–376.

Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2005). Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. *Cognitive Brain Research*, *24*(3), 355–363.

Calmels, C., & Fournier, J. F. (2001). Duration of physical and mental execution of gymnastic routines. *The Sport Psychologist*, *15*, 142–150.

Calmels, C., Holmes, P., Lopez, E., & Naman, V. (2006). Chronometric comparison of actual and imaged complex movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, *38*, 339–348.

Campos, J. L., Siegle, J. H., Mohler, B. J., Bülthoff, H. H., & Loomis, J. M. (2009). Imagined self-motion differs from perceived self-motion: Evidence from a novel continuous pointing method. *PLoS One*, *4*(11), e7793.

Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grezes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills: an FMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, *15*(8), 1243–1249.

Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2006). Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Current Biology*, *16*(19), 1905–1910.

Casile, A., & Giese, M. A. (2006). Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Current Biology*, *16*(1), 69–74.

Caspar, E. A., Christensen, J. F., Cleeremans, A., & Haggard, P. (2016). Coercion changes the sense of agency in the human brain. *Current Biology*, *26*, 585–592.

Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *Neuroimage*, *50*(3), 1148–1167.

Cerritelli, B., Maruff, P., Wilson, P., & Currie, J. (2000). The effect of an external load on the force and timing components of mentally represented actions. *Behavioural Brain Research*, *108*, 91–96.

Chambon, V., Moore, J. W., & Haggard, P. (2015). TMS stimulation over the inferior parietal cortex disrupts prospective sense of agency. *Brain Structure and Function*, *220*, 3627–3639.

Chambon, V., Wenke, D., Fleming, S. M., Prinz, W., & Haggard, P. (2013). An online neural substrate for sense of agency. *Cerebral Cortex*, *23*, 1031–1037.

Chambon, V., Sidarus, N., & Haggard, P. (2014). From action intentions to action effects: how does the sense of agency come about? *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 320. doi:10.3389/fnhum.2014.00320.

Chaminade, T., & Decety, J. (2002). Leader or follower? Involvement of the inferior parietal lobule in agency. *Neuroreport*, *13*, 1975–1978.

Chao, L. L., & Martin, A. (2002). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, *12*, 478–484.

Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: The perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, *76*(6), 893–910.

Clark, A. (1999). An embodied cognitive science? *Trends in Cognitive Sciences*, *3*(9), 345–351.

Clark, T., & Williamon, A. (2012). Imagining the music: Methods for assessing musical imagery ability. *Psychology of Music*, *40*(4), 471–493.

Corballis, M. C. (2004). FOXP2 and the mirror system. *Trends in cognitive sciences*, *8*(3), 95–96.

Costantini, M., Galati, G., Ferretti, A., Caulo, M., Tartaro, A., Romani, G. L., & Aglioti, S. M. (2005). Neural systems underlying observation of humanly impossible movements: an fMRI study. *Cerebral Cortex*, *15*(11), 1761–1767.

Courtine, G., Papaxanthis, C., Gentili, R., & Pozzo, T. (2004). Gait-dependent motor memory facilitation in covert movement execution. *Cognitive Brain Research*, *22*(1), 67–75.

Cravo, A. M., Claessens, P. M., & Baldo, M. V. (2011). The relation between action, predictability and temporal contiguity in temporal binding. *Acta Psychologica*, *136*, 157–166.

Cross, E. S., Liepelt, R., Hamilton, A. F. C. de, Parkinson, J., Ramsey, R., Stadler, W., & Prinz, W. (2012). Robotic movement preferentially engages the action observation network. *Human Brain Mapping*, *33*, 2238–2254.

Cross, E. S., Stadler, W., Parkinson, J., Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2013). The influence of visual training on complex action prediction. *Human Brain Mapping*, *34*(2), 467–486.

Dahm, S. F., & Rieger, M. (2016). Cognitive constraints on motor imagery. *Psychological Research*, *80*, 235–247.

Dam, W. O. van, Rueschemeyer, S.-A., Lindemann, O., & Bekkering, H. (2010). Context effects in embodied lexical-semantic processing. *Frontiers in psychology*, *1*, 150. doi:10.3389/fpsyg.2010.00150.

Dam, W. O. van, Dijk, M. van, Bekkering, H., & Rueschemeyer, S.-A. (2012). Flexibility in embodied lexical-semantic representations. *Human Brain Mapping*, *10*, 2322–2333.

Damen, T. G., Baaren, R. B. van, & Dijksterhuis, A. (2014). You should read this! Perceiving and acting upon action primes influences one's sense of agency. *Journal of Experimental Social Psychology*, *50*, 21–26.

David, N., Newen, A., & Vogeley, K. (2008). The „sense of agency" and its underlying cognitive and neural mechanisms. *Consciousness and Cognition*, *17*, 523–534.

Davidson, P. R., & Wolpert, D. M. (2005). Widespread access to predictive models in the motor system: a short review. *Journal of Neural Engineering*, *2*(3), 313–319.

Deacon, T. (2004). Monkey homologues of language areas: computing the ambiguities. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(7), 288–290.

Debarnot, U., Sahraoui, D., Champely, S., Collet, C., & Guillot, A. (2012). Selective influence of circadian modulation and task characteristics on motor imagery time. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *83*(3), 442–450.

Decety, J. (1991). Motor information may be important for updating the cognitive processes involved in mental imagery of movement. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, *11*(4), 415–426.

Decety, J. (1996). Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Cognitive Brain Research*, *3*(2), 87–93.

Decety, J., & Boisson, D. (1990). Effect of brain and spinal cord injuries on motor imagery. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, *240*(1), 39–43.

Decety, J., & Grèzes, J. (2006). The power of simulation: imagining one's own and other's behavior. *Brain Research*, *1079*(1), 4–14.

Decety, J., & Jeannerod, M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality: Does Fitts's law hold in motor imagery? *Behavioural Brain Research*, *72*, 127–134.

Decety, J., & Michel, F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks. *Brain and Cognition*, *11*, 87–97.

Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioural Brain Research*, *34*, 35–42.

Demanet, J., Muhle-Karbe, P. S., Lynn, M. T., Blotenberg, I., & Brass, M. (2013). Power to the will: how exerting physical effort boosts the sense of agency. *Cognition*, *129*(3), 574–578.

Desantis, A., Roussel, C., & Waszak, F. (2011). On the influence of causal beliefs on the feeling of agency. *Consciousness and Cognition*, *20*, 1211–1220.

Desantis, A., Hughes, G., & Waszak, F. (2012a). Intentional binding is driven by the mere presence of an action and not by motor prediction. *PLoS One*, *7*(1), e29557.

Desantis, A., Weiss, C., Schütz-Bosbach, S., & Waszak, F. (2012b). Believing and perceiving: authorship belief modulates sensory attenuation. *PLoS One*, *7*(5), e37959.

Diefenbach, C., Rieger, M., Massen, C., & Prinz, W. (2013). Action-sentence compatibility: the role of action effects and timing. *Frontiers in psychology*, *4*, 272. doi:10.3389/fpsyg.2013.00272.

Diersch, N., Cross, E. S., Stadler, W., Schütz-Bosbach, S., & Rieger, M. (2012). Representing others' actions: the role of expertise in the aging mind. *Psychological Research*, *76*(4), 525–541.

Diersch, N., Mueller, K., Cross, E. S., Stadler, W., Rieger, M., & Schütz-Bosbach, S. (2013). Action prediction in younger versus older adults: Neural correlates of motor familiarity. *PLoS ONE*, *8*(5), e64195.

Dietrich, A. (2008). Imaging the imagination: the trouble with motor imagery. *Methods*, *45*(4), 319–324.

Dijksterhuis, A., & Bargh, J. A. (2001). The perception-behavior expressway: Automatic effects of social perception on social behavior. *Advances in Experimental Social Psychology*, *33*, 1–40.

Dimberg, U., Thunberg, M., & Elmehed, K. (2000). Unconscious facial reactions to emotional facial expressions. *Psychological Science*, *11*(1), 86–89.

Downing, P. E., Jiang, Y., Shuman, M., & Kanwisher, N. (2001). A cortical area selective for visual processing of the human body. *Science*, *293*(5539), 2470–2473.

Dreisbach, G., & Fischer, R. (2012). Conflicts as aversive signals. *Brain and Cognition*, *78*(2), 94–98.

Ebert, J. P., & Wegner, D. M. (2010). Time warp: authorship shapes the perceived timing of actions and events. *Consciousness and Cognition*, *19*(1), 481–489.

Ehrsson, H. H., Geyer, S., & Naito, E. (2003). Imagery of voluntary movement of fingers, toes, and tongue activates corresponding body-partspecific motor representations. *Journal of Neurophysiology*, *90*, 3304–3316.

Engbert, K., Wohlschläger, A., Thomas, R., & Haggard, P. (2007). Agency, subjective time, and other minds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*, 1261–1268.

Engbert, K., Wohlschlager, A., & Haggard, P. (2008). Who is causing what? The sense of agency is relational and efferent-triggered. *Cognition*, *107*, 693–704.

Facchini, S., Muellbacher, W., Battaglia, F., Boroojerdi, B., & Hallett, M. (2002). Focal enhancement of motor cortex excitability during motor imagery: a transcranial magnetic stimulation study. *Acta Neurologica Scandinavica*, *105*(3), 146–151.

Fadiga, I., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, *73*, 2608–2611.

Farrer, C., Franck, N., Georgieff, N., Frith, C. D., Decety, J., & Jeannerod, M. (2003). Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study. *Neuroimage*, *18*, 324–333.

Farrer, C., Frey, S. H., Van Horn, J. D., Tunik, E., Turk, D., Inati, S., & Grafton, S. T. (2008). The angular gyrus computes action awareness representations. *Cerebral Cortex*, *18*, 254–261.

Finke, R. A., Pinker, S., & Farah, M. J. (1989). Reinterpreting visual patterns in mental imagery. *Cognitive Science*, *13*(1), 51–78.

Fodor, J. A. (1975). *The Language of Thought*. New York: Thomas Y. Crowell.

Frank, C., Land, W. M., Popp, C., & Schack, T. (2014). Mental representation and mental practice: experimental investigation on the functional links between motor memory and motor imagery. *PloS One*, *9*(4), e95175.

Friston, K. (2012). Prediction, perception and agency. *International Journal of Psychophysiology*, *83*, 248–252.

Friston, K., & Kiebel, S. (2009). Predictive coding under the free-energy principle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, *364*, 1211–1221.

Friston, K., Daunizeau, J., Kilner, J., & Kiebel, S. J. (2010). Action and behavior: a free-energy formulation. *Biological Cybernetics*, *102*, 227–260.

Friston, K., Mattout, J., & Kilner, J. (2011). Action understanding and active inference. *Biological Cybernetics*, *104*, 137–160.

Frith, C. D. (2005). The self in action: Lessons from delusions of control. *Consciousness and Cognition*, *14*, 752–720.

Frith, C. D. (2012). Explaining delusions of control: The comparator model 20 years on. *Consciousness and Cognition*, *21*, 52–54.

Frith, C. D. (2013). The psychology of volition. *Experimental Brain Research*, *229*(3), 289–299.

Frith, C. D., Blakemore, S., & Wolpert, D. M. (2000). Explaining the symptoms of schizophrenia: abnormalities in the awareness of action. *Brain Research Reviews*, *31*, 357–363.

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*, 14–21.

Gallese, V. (2008). Empathy, embodied simulation, and the brain: Commentary on Aragno and Zepf/Hartmann. *Journal of the American Psychological Association*, *56*, 769–781.

Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., & Rizzolatti, G. (2002). Action representation and the inferior parietal lobule. In W. Prinz, & B. Hommel (Hrsg.), *Attention and Performance XIX* (S. 247–266). Oxford: Oxford University Press.

Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(9), 396–403.

Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(4), 160–165. doi:10.1016/j.tics.2013.02.002.

Gazzola, V., Rizzolatti, G., Wicker, B., & Keysers, C. (2007). The anthropomorphic brain: the mirror neuron system responds to human and robotic actions. *Neuroimage*, *35*(4), 1674–1684.

Gentsch, A., & Synofzik, M. (2014). Affective coding: the emotional dimension of agency. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 608. eCollection 2014 doi:10.3389/fnhum.2014.00608.

Gentsch, A., Schütz-Bosbach, S., Endrass, T., & Kathmann, N. (2012). Dysfunctional forward model mechanisms and aberrant sense of agency in obsessive-compulsive disorder. *Biological Psychiatry*, *71*, 652–659.

Gentsch, A., Weiss, C., Spengler, S., Synofzik, M., & Schütz-Bosbach, S. (2015). Doing good or bad: How interactions between action and emotion expectations shape the sense of agency. *Social Neuroscience*, *10*, 418–430.

Gentsch, A., Weber, A., Synofzik, M., Vosgerau, G., & Schütz-Bosbach, S. (2016). Towards a common framework of grounded action cognition: Relating motor control, perception and cognition. *Cognition*, *146*, 81–89.

Gerardin, E., Sirigu, A., Lehericy, S., Poline, J. B., Gaymard, B., Marsault, C., & Le Bihan, D. (2000). Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cerebral Cortex*, *10*, 1093–1104.

Gibbs, R. W. Jr (2005). *Embodiment and cognitive science*. New York: Cambridge University Press.

Gibbs, R. W. Jr (2006). Metaphor Interpretation as embodied simulation. *Mind & Language*, *21*(3), 434–458.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.

Glenberg, A. M., & Kaschak, M. P. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(3), 558–565.

Glenberg, A. M., & Robertson, D. A. (1999). Indexical understanding of instructions. *Discourse Processes*, *28*(1), 1–26.

Glenberg, A. M., & Robertson, D. A. (2000). Symbol grounding and meaning: A comparison of high-dimensional and embodied theories of meaning. *Journal of Memory and Language*, *43*(3), 379–401.

Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S., & Kaschak, M. P. (2004). Activity and imagined activity can enhance young children's reading comprehension. *Journal of Educational Psychology*, *96*(3), 424–436.

Glenberg, A. M., Brown, M., & Levin, J. R. (2007). Enhancing comprehension in small reading groups using a manipulation strategy. *Contemporary Educational Psychology*, *32*(3), 389–399.

Glenberg, A. M., Sato, M., Cattaneo, L., Riggio, L., Palumbo, D., & Buccino, G. (2008a). Processing abstract language modulates motor system activity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(6), 905–919.

Glenberg, A. M., Sato, M., & Cattaneo, L. (2008b). Use-induced motor plasticity affects the processing of abstract and concrete language. *Current Biology*, *18*(7), 290–291.

Glenberg, A. M., Goldberg, A. B., & Zhu, X. (2011). Improving early reading comprehension using embodied CAI. *Instruction Science*, *39*, 27–39.

Glenberg, A., Willford, J., Gibson, B., Goldberg, A., & Zhu, X. (2012). Improving reading to improve math. *Scientific Studies of Reading*, *16*(4), 316–340.

Glenberg, A. M., Witt, J. K., & Metcalfe, J. (2013). From the revolution to embodiment 25 years of cognitive psychology. *Perspectives on Psychological Science*, *8*(5), 573–585.

Glover, S., Rosenbaum, D. A., Graham, J., & Dixon, P. (2004). Grasping the meaning of words. *Experimental Brain Research*, *154*, 103–108.

Graf, M., Reitzner, B., Corves, C., Casile, A., Giese, M., & Prinz, W. (2007). Predicting point-light actions in real-time. *Neuroimage*, *36*, 22–32.

Grafton, S. T. (2009). Embodied cognition and the simulation of action to understand others. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1156*(1), 97–117.

Grealy, M. A., & Shearer, G. F. (2008). Timing processes in motor imagery. *European Journal of Cognitive Psychology*, *20*, 867–892.

Greenberg, J., Pyszczynski, T., & Solomon, S. (1982). The self-serving bias: beyond self-presentation. *Journal of Experimental Social Psychology*, *18*(1), 56–67.

Grèzes, J., & Decety, J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping*, *12*(1), 1–19.

Grèzes, J., Fonlupt, P., Bertenthal, B., Delon-Martin, C., Segebarth, C., & Decety, J. (2001). Does perception of biological motion rely on specific brain regions? *Neuroimage*, *13*(5), 775–785.

Grossman, E., Donnelly, M., Price, R., Pickens, D., Morgan, V., Neighbor, G., & Blake, R. (2000). Brain areas involved in perception of biological motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12*(5), 711–720.

Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception. *Behavioral and Brain Sciences*, *27*(3), 377–396.

Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2010). Time-of-day effects on the internal simulation of motor actions: Psychophysical evidence from pointing movements with the dominant and non-dominant arm. *Chronobiology International*, *27*, 620–639.

Gueugneau, N., Mauvieux, B., & Papaxanthis, C. (2009). Circadian modulation of mentally simulated motor actions: Implications for the potential use of motor imagery in rehabilitation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, *23*, 237–245.

Guillot, A., & Collet, C. (2005). Duration of mentally simulated movement: a review. *Journal of Motor Behavior*, *37*(1), 10–20.

Guillot, A., & Collet, C. (2008). Construction of the motor imagery integrative model in sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *1*(1), 31–44.

Guillot, A., Collet, C., & Dittmar, A. (2005). Influence of environmental context on motor imagery quality. *Biology of Sport*, *22*, 215–226.

Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V. A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2008). Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery. *Neuroimage*, *41*, 1471–1483.

Guillot, A., Louis, M., & Collet, C. (2009). Neural mechanisms for expertise in mental imagery. *Cognitive Sciences*, *4*, 31–48.

Guillot, A., Debarnot, U., Louis, M., Hoyek, N., & Collet, C. (2010). Motor imagery and motor performance: evidence from the sport science literature. In C. Guillot, & C. Collet (Hrsg.), *The Neurophysiological Foundations of Mental and Motor Imagery* (S. 215–226). New York: Oxford University Press.

Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., & Collet, C. (2012a). Understanding the timing of motor imagery: recent findings and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *5*(1), 3–22.

Guillot, A., Di Rienzo, F., MacIntyre, T., Moran, A., & Collet, C. (2012b). Imagining is not doing but involves specific motor commands: a review of experimental data related to motor inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 247.

Haering, C., & Kiesel, A. (2012). Mine is earlier than yours: causal beliefs influence the perceived time of action effects. *Frontiers in Psychology*, *3*, 393.

Haering, C., & Kiesel, A. (2014). Intentional binding is independent of the validity of the action effect's identity. *Acta Psychologica*, *152*, 109–119.

Haggard, P. (2005). Conscious intention and motor cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 290–295.

Haggard, P., & Tsakiris, M. (2009). The experience of agency: feelings, judgments, and responsibility. *Current Directions in Psychological Science*, *18*, 242–246.

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, *5*, 382–385.

Halpern, A. R., Zatorre, R. J., Bouffard, M., & Johnson, J. A. (2004). Behavioral and neural correlates of perceived and imagined musical timbre. *Neuropsychologia*, *42*(9), 1281–1292.

Hamilton, A., Wolpert, D., & Frith, U. (2004). Your own action influences how you perceive another person's action. *Current Biology*, *14*(6), 493–498.

Hamilton, A. F., Wolpert, D. M., Frith, U., & Grafton, S. T. (2006). Where does your own action influence your perception of another person's action in the brain? *NeuroImage*, *29*(2), 524–535.

Hanakawa, T., Dimyan, M. A., & Hallett, M. (2008). Motor planning, imagery, and execution in the distributed motor network: a time-course study with functional MRI. *Cerebral Cortex*, *18*(12), 2775–2788.

Hari, R., Forss, N., Avikainen, S., Kirveskari, E., Salenius, S., & Rizzolatti, G. (1998). Activation of human primary motor cortex during action observation: a neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(25), 15061–15065.

Harvey, L. R., Krenz, E. W., McQueen, C., & Krenz, V. D. (1994). Optimal arousal, stress and imagery. In A. A. Sheikh, & E. R. Korn (Hrsg.), *Imagery in sports and physical performance* (S. 135–146). Amityville: Baywood Publishing.

Hatfield, E., Cacioppo, J. T., & Rapson, R. L. (1994). *Emotional contagion*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, *41*, 301–307.

Hecht, H., Vogt, S., & Prinz, W. (2001). Motor learning enhances perceptual judgment: A case for action-perception transfer. *Psychological Research*, *65*(1), 3–14.

Herbert, B. M., & Pollatos, O. (2012). The body in the mind: on the relationship between interoception and embodiment. *Topics in Cognitive Science*, *4*(4), 692–704.

Herbert, B. M., Pollatos, O., & Schandry, R. (2007). Interoceptive sensitivity and emotion processing: an EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, *65*(3), 214–227.

Heyes, C. (2013). Imitation: associative and context dependent. In W. Prinz, M. Beisert, & A. Herwig (Hrsg.), *Action science: Foundations of an emerging discipline* (S. 309–332). Cambridge: The MIT Press.

Holt, L. E., & Beilock, S. L. (2006). Expertise and its embodiment: Examining the impact of sensorimotor skill expertise on therepresentation of action-related text. *Psychonomic Bulletin & Review*, *13*(4), 694–701.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849–878.

Hughes, G., Desantis, A., & Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation: The role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological Bulletin*,*139*, 133–151.

Iachini, T. (2011). Mental imagery and embodied cognition: A multimodal approach. *Journal of Mental Imagery*, *35*(3), 1–26.

Iacoboni, M. (2007). Face to face: The neural basis of social mirroring and empathy. *Psychiatric Annals*, *37*(4), 236–241.

Iacoboni, M., & Mazziotta, J. C. (2007). Mirror neuron system: basic findings and clinical applications. *Annals of Neurology*, *62*, 213–218.

Jackson, P. L., Meltzoff, A. N., & Decety, J. (2005). How do we perceive the pain of others? A window into the neural processes involved in empathy. *Neuroimage*, *24*(3), 771–779.

Jacob, P., & Jeannerod, M. (2005). The motor theory of social cognition: a critique. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(1), 21–25.

Jacobs, A., Pinto, J., & Shiffrar, M. (2004). Experience, context, and the visual perception of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*(5), 822–835.

Jacobson, E. (1932). Electrophysiology of mental activities. *The American Journal of Psychology*, *44*, 677–694.

Janssen, J. J., & Sheikh, A. A. (1994). Enhancing athletic performance through imagery: An overview. In A. A. Sheikh, & E. R. Korn (Hrsg.), *Imagery in sports and physical performance* (S. 1–22). Amityville: Baywood Publishing.

Jeannerod, M. (1994). The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, *17*, 187–202.

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, *14*(1), 103–109.

Jeannerod, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self*. Oxford: Oxford University Press.

Jeannerod, M., & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, *9*, 735–739.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, *14*(2), 201–211.

Karsh, N., & Eitam, B. (2015). I control therefore I do: judgments of agency influence action selection. *Cognition*, *138*, 122–131.

Kasai, T., Kawai, S., Kawanishi, M., & Yahagi, S. (1997). Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery. *Brain Research*, *744*, 147–150.

Kaschak, M. P., & Borreggine, K. L. (2008). Temporal dynamics of the action-sentence compatibility effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(6), 883–895.

Keysers, C., Wicker, B., Gazzola, V., Anton, J. L., Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). A touching sight: SII/PV activation during the observation and experience of touch. *Neuron*, *42*(2), 335–346.

Kiefer, M., & Barsalou, L. W. (2013). In W. Prinz, M. Beisert, & A. Herwig (Hrsg.), *Action science: Foundations of an emerging discipline* (S. 381–407). Cambridge: The MIT Press.

Kilner, J. M., Paulignan, Y., & Blakemore, S. J. (2003). An interference effect of observed biological movement on action. *Current Biology*, *13*(6), 522–525.

Kilner, J. M., Vargas, C., Duval, S., Blakemore, S. J., & Sirigu, A. (2004). Motor activation prior to observation of a predicted movement. *Nature Neuroscience*, *7*(12), 1299–1301.

Kilner, J. M., Friston, K. J., & Frith, C. D. (2007). Predictive coding: an account of the mirror neuron system. *Cognitive Processing*, *8*(3), 159–166.

Knoblich, G., & Flach, R. (2001). Predicting the effects of actions: Interactions of perception and action. *Psychological Science*, *12*(6), 467–472.

Knoblich, G., & Jordan, J. S. (2003). Action coordination in groups and individuals: learning anticipatory control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(5), 1006–1016.

Knoblich, G., Seigerschmidt, E., Flach, R., & Prinz, W. (2002). Authorship effects in the prediction of handwriting strokes: Evidence for action simulation during action perception. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *55*(3), 1027–1046.

Kobayashi, M., Takeda, M., Hattori, N., Fukunaga, M., Sasabe, T., Inoue, N., & Watanabe, Y. (2004). Functional imaging of gustatory perception and imagery: „top-down" processing of gustatory signals. *Neuroimage*, *23*(4), 1271–1282.

Kohler, E., Keysers, C., Umilta, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, *297*(5582), 846–848.

Kontra, C., Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. L. (2012). Embodied learning across the life span. *Topics in Cognitive Science*, *4*(4), 731–739.

Koriat, A., Ma'ayan, H., & Nussinson, R. (2006). The intricate relationships between monitoring and control in metacognition: lessons for the cause-and-effect relation between subjective experience and behavior. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 36–69.

Kosslyn, S. M. (1981). The medium and the message in mental imagery: A theory. *Psychological Review*, *88*(1), 46–66.

Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain: The resolution of the imagery debate*. Cambridge, MA: MIT press.

Kosslyn, S. M. (2005). Mental images and the brain. *Cognitive Neuropsychology*, *22*, 333–347.

Kosslyn, S. M., & Thompson, W. L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychological Bulletin*, *129*, 723–746.

Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *4*(1), 47–60.

Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1997). Neural systems shared by visual imagery and visual perception: A positron emission tomography study. *Neuroimage*, *6*(4), 320–334.

Kübler, A., Kotchoubey, B., Wolpaw, J. R., & Birbaumer, N. (2001). Brain-computer communication: Unlocking the locked in. *Psychological Bulletin*, *127*, 358–375.

Kunz, R. R., Creem-Regehr, S. H., & Thompson, W. B. (2009). Evidence for motor simulation in imagined locomotion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*(5), 1458–1471.

Lakin, J. L., & Chartrand, T. L. (2003). Using nonconscious behavioral mimicry to create affiliation and rapport. *Psychological Science*, *14*(4), 334–339.

Lakoff, G., & Johnson, M. (1980a). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive Science*, *4*, 195–208.

Lakoff, G., & Johnson, M. (1980b). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press.

Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the Flesh: The embodied mind and its challenge to western thought*. New York: Basic books.

Landauer, T. K. (1962). Rate of implicit speech. *Perceptual and Motor Skills*, *15*, 646.

Lange, F. P. de, Helmich, R. C., & Toni, I. (2006). Posture influences motor imagery: An fMRI study. *Neuroimage*, *33*, 609–617.

Lange, F. P. de, Spronk, M., Willems, R. M., Toni, I., & Bekkering, H. (2008). Complementary systems for understanding action intentions. *Current Biology*, *18*(6), 454–457.

Leary, M. R. (2007). Motivational and emotional aspects of the self. *Annual Review of Psychology*, *58*, 317–344.

Leighton, J., & Heyes, C. (2010). Hand to mouth: automatic imitation across effector systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(5), 1174–1183.

Leube, D. T., Knoblich, G., Erb, M., Grodd, W., Bartels, M., & Kircher, T. T. (2003). The neural correlates of perceiving one's own movements. *Neuroimage*, *20*, 2084–2090.

Lhermitte, F. (1983). Utilization behavior and its relation to lesions of the frontral lobes. *Brain*, *106*, 237–255.

Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., & Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential) – The unconsious initiation of a freely voluntary act. *Brain*, *106*, 623–642.

Liepelt, R., & Brass, M. (2010). Top-down modulation of motor priming by belief about animacy. *Experimental Psychology*, *57*(3), 221–227.

Linser, K., & Goschke, T. (2007). Unconscious modulation of the conscious experience of control. *Cognition*, *104*, 459–475.

Longo, M. R., Kosobud, A., & Bertenthal, B. I. (2008). Automatic imitation of biomechanically possible and impossible actions: effects of priming movements versus goals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *34*(2), 489–501.

Lorey, B., Bischoff, M., Pilgramm, S., Stark, R., Munzert, J., & Zentgraf, K. (2009). The embodied nature of motor imagery: the influence of posture and perspective. *Experimental Brain Research*, *194*, 233–243.

Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hülsmann, E., Flor, H., Klose, U., & Grodd, W. (1999). Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(5), 491–501.

Louis, M., Guillot, A., Maton, S., Doyon, J., & Collet, C. (2008). Effect of imagined movement speed on subsequent motor performance. *Journal of Motor Behavior*, *40*, 117–132.

Louis, M., Collet, C., & Guillot, A. (2011). Differences in motor imagery times during aroused and relaxed conditions. *Journal of Cognitive Psychology*, *23*(3), 374–382.

Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(1), 210–220.

Macuga, K. L., & Frey, S. H. (2012). Neural representations involved in observed, imagined, and imitated actions are dissociable and hierarchically organized. *Neuroimage*, *59*, 2798–2807.

Macuga, K. L., Papailiou, A. P., & Frey, S. H. (2012). Motor imagery of tool use: relationship to actual use and adherence to Fitts' law across tasks. *Experimental Brain Research*, *218*(2), 169–179.

Mahon, B. Z., & Caramazza, A. (2008). A critical look at the embodied cognition hypothesis and a new proposal for grounding conceptual content. *Journal of Physiology – Paris*, *102*(1–3), 59–70.

Maidhof, C., Rieger, M., Prinz, W., & Koelsch, S. (2009). Nobody is perfect: ERP effects prior to performance errors in musicians indicate fast monitoring processes. *PLoS One*, *4*(4), e5032.

Markman, A. B., & Brendl, C. M. (2005). Constraining theories of embodied cognition. *Psychological Science*, *16*(1), 6–10.

Marley, S. C., Levin, J. R., & Glenberg, A. M. (2010). What cognitive benefits does an activity-based reading strategy afford young native american readers? *The Journal of Experimental Education*, *78*(3), 395–417.

Maruff, P., Wilson, P. H., De Fazio, J., Cerritelli, B., Hedt, A., & Currie, J. (1999). Asymmetries between dominant and non-dominant hands in real and imagined motor task performance. *Neuropsychologia*, *37*, 379–384.

Mayer, J., & Hermann, H. D. (2009). *Mentales Training*. Heidelberg: Springer.

McAvinue, L. P., & Robertson, I. H. (2008). Measuring motor imagery ability: a review. *European Journal of Cognitive Psychology*, *20*, 232–251.

Meier, B. P., Schnall, S., Schwarz, N., & Bargh, J. A. (2012). Embodiment in social psychology. *Topics in Cognitive Science*, *4*(4), 705–716.

Meister, I. G., Krings, T., Foltys, H., Boroojerdi, B., Müller, M., Töpper, R., & Thron, A. (2004). Playing piano in the mind – an fMRI study on music imagery and performance in pianists. *Cognitive Brain Research*, *19*(3), 219–228.

Metcalfe, J., & Greene, M. J. (2007). Metacognition of agency. *Journal of Experimental Psychology: General*, *136*(2), 184–199.

Milgram, S. (1963). Behavioral study of obedience. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, *67*(4), 371–378.

Milgram, S. (1965). Some conditions of obedience and disobedience to authority. *Human Relations*, *18*(1), 57–76.

Milgram, S. (1974). *Obedience to authority: An experimental view*. New York: Harper & Row.

Miller, D. T., & Ross, M. (1975). Self-serving biases in the attribution of causality: fact of fiction? *Psychological Bulletin*, *82*, 213–225.

Molenberghs, P., Cunnington, R., & Mattingley, J. B. (2012). Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(1), 341–349.

Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: a review of cue integration approaches. *Consciousness and Cognition*, *21*, 59–68.

Moore, J. W., & Haggard, P. (2008). Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and Cognition*, *17*, 136–144.

Moore, J. W., & Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency: a review. *Consciousness & Cognition*, *21*, 546–561.

Moore, J. W., Lagnado, D., Deal, D. C., & Haggard, P. (2009a). Feelings of control: contingency determines experience of action. *Cognition*, *110*(2), 279–283.

Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009b). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and Cognition*, *18*, 1056–1064.

Morsella, E., Wilson, L. E., Berger, C. C., Honhongva, M., Gazzaley, A., & Bargh, J. A. (2009). Subjective aspects of cognitive control at different stages of processing: Conscious conflict and double blindness. *Attention, Perception and Psychophysics*, *71*, 1807–1824.

Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current Biology*, *20*(8), 750–756.

Munroe, K. J., Giacobbi, P. R., Hall, C., & Weinberg, R. (2000). The four Ws of imagery use: Where, when, why and what. *The Sport Psychologist*, *14*, 119–137.

Munzert, J. (2002). Temporal accuracy of mentally simulated transport movements. *Perceptual and Motor Skills*, *94*, 307–318.

Munzert, J. (2008). Does level of expertise influence imagery durations in open skills? Played versus imagined durations of badminton sequences. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, *6*, 24–38.

Munzert, J., Lorey, B., & Zentgraf, K. (2009). Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representations. *Brain Research Review*, *60*, 306–326.

Naish, K. R., Houston-Price, C., Bremner, A. J., & Holmes, N. P. (2014). Effects of action observation on corticospinal excitability: muscle specificity, direction, and timing of the mirror response. *Neuropsychologia*, *64*, 331–348.

Naito, E. (1994). Controllability of motor imagery and transformation of visual imagery. *Perceptual and Motor Skills*, *78*(2), 479–487.

Neumann, R., & Strack, F. (2000). „Mood contagion": the automatic transfer of mood between persons. *Journal of Personality and Social Psychology*, *79*(2), 211–223.

Newman-Norlund, R. D., Schie, H. T. van, Zuijlen, A. M. van, & Bekkering, H. (2007). The mirror neuron system is more active during complementary compared with imitative action. *Nature Neuroscience*, *10*(7), 817–818.

Niedenthal, P. M. (2007). Embodying Emotion. *Science*, *316*, 1002–1005.

Nolden, S., Haering, C., & Kiesel, A. (2012). Assessing intentional binding with the method of constant stimuli. *Consciousness and Cognition*, *21*(3), 1176–1185.

O, J., & Hall, C. (2009). A quantitative analysis of athletes' voluntary use of slow motion, real time, and fast motion images. *Journal of Applied Sport Psychology*, *21*(1), 15–30.

Obhi, S. S., & Hall, P. (2011). Sense of agency and intentional binding in joint action. *Experimental Brain Research*, *211*, 655–662.

Paccalin, C., & Jeannerod, M. (2000). Changes in breathing during observation of effortful actions. *Brain Research*, *862*(1), 194–200.

Page, S. J. (2010). An overview of the effectiveness of motor imagery after stroke: a neuroimaging approach. In A. Guillot, & C. Collet (Hrsg.), *The neurophysiological foundations of mental and motor imagery* (S. 145–160). Oxford, UK: Oxford University Press.

Page, S. J., Levine, P., & Leonard, A. (2007). Mental practice in chronic stroke results of a randomized, placebo-controlled trial. *Stroke*, *38*(4), 1293–1297.

Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentili, R., & Pozzo, T. (2002). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental Brain Research*, *143*(4), 447–452.

Papaxanthis, C., Pozzo, T., Kasprinski, R., & Berthoz, A. (2003). Comparison of actual and imagined execution of whole-body movements after a long exposure to microgravity. *Neuroscience letters*, *339*(1), 41–44.

Papeo, L., Vallesi, A., Isaja, A., & Rumiati, R. I. (2009). Effects of TMS on different stages of motor and non-motor verb processing in the primary motor cortex. *PLOS One*, *4*(2), e4508. doi:10.1371/journal.pone.0004508.

Parsons, L. M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 709–730.

Perry, H. M. (1939). The relative efficiency of actual and imaginary practice in 5 selected tasks. *Archives of Psychology*, *4*, 5–75.

Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. New York: International Universities Press.

Piaget, J. (1967). *Biology and knowledge*. Edinburgh: Edinburgh University Press.

Porro, C. A., Cettolo, V., Francescato, M. P., & Baraldi, P. (2000). Ipsilateral involvement of primary motor cortex during motor imagery. *European Journal of Neuroscience*, *12*, 3059–3063.

Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, *9*, 129–154.

Prinz, W. (2005). An ideomotor approach to imitation. In S. Hurley, & N. Chater (Hrsg.), *Perspectives on imitation: From neuroscience to social science* (S. 141–156). Cambridge, MA: MIT Press.

Prinz, W., & Rapinett, G. (2008). Filling the gap: Dynamic representation of occluded action. In F. Morganti, A. Carassa, & G. Riva (Hrsg.), *Enacting intersubjectivity: A cognitive and social perspective on the study of interactions* (S. 223–236). Amsterdam: IOS Press.

Proffitt, D. R. (2006). Embodied perception and the economy of action. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(2), 110–122.

Pulvermüller, F., Hauk, O., Nikulin, V. V., & Ilmoniemi, R. J. (2005). Functional links between motor and language systems. *European Journal of Neuroscience*, *21*, 793–797.

Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge. *Psychological Review*, *88*(1), 16–45.

Pylyshyn, Z. W. (2002). Mental imagery: In search of a theory. *Behavioral and Brain Sciences*, *25*(2), 157–182.

Ramnani, N., & Miall, R. C. (2004). A system in the human brain for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience*, *7*(1), 85–90.

Raposo, A., Moss, H. E., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2009). Modulation of motor and premotor cortices by actions, action words and action sentences. *Neuropsychologia*, *47*(2), 388–396.

Reber, R., Schwarz, N., & Winkielman, P. (2004). Processing fluency and aesthetic pleasure: is beauty in the perceiver's processing experience? *Personality and Social Psychology Review*, *8*, 364–382.

Reed, C. L. (2002). Chronometric comparisons of imagery to action: Visualizing versus physically performing springboard dives. *Memory and Cognition*, *30*, 1169–1178.

Repp, B. H., & Knoblich, G. (2004). Perceiving action identity how pianists recognize their own performances. *Psychological Science*, *15*(9), 604–609.

Reuven-Magril, O., Dar, R., & Liberman, N. (2008). Illusion of control and behavioral control attempts in obsessive-compulsive disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, *117*(2), 334–341.

Rieger, M. (2012). Motor imagery in typing: effects of typing style and action familiarity. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*, 101–107.

Rieger, M., Dahm, S.F., & Koch, I.(2016). Inhibition in motor imagery: a novel action mode switching paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, Advance online publication. DOI: 10.3758/s13423-016-1095-5.

Rieger, M., & Massen, C. (2014). Tool characteristics in imagery of tool actions. *Psychological Research*, *78*(1), 10–17.

Rieger, M., Martinez, F., & Wenke, D. (2011). Imagery of errors in typing. *Cognition*, *121*(2), 163–175.

Rizzolatti, G., & Arbib, M. A. (1998). Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*, *21*(5), 188–194.

Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, *27*, 169–192.

Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(9), 661–670.

Roberts, R., Callow, N., Hardy, L., Markland, D., & Bringer, J. (2008). Movement imagery ability: Development and assessment of a revised version of the vividness of movement imagery questionnaire. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *30*, 200–221.

Rotter, J. B. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcement. *Psychological Monographs*, *80*(1), 1–28.

Rueschemeyer, S.-A., Rooij, D. van, Lindemann, O., Willems, R. M., & Bekkering, H. (2010). The function of words: distinct neural correlates for words denoting differently manipulable objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(8), 1844–1851.

Saccuman, M. S., Cappa, S. F., Bates, E. A., Arevalo, A., Rosa, P. D., Danna, M., & Perani, D. (2006). The impact of semantic reference on word class: An fMRI study of action and object naming. *NeuroImage*, *32*, 1865–1878.

Sato, A. (2009). Both motor prediction and conceptual congruency between preview and action-effect contribute to explicit judgment of agency. *Cognition*, *110*, 74–83.

Sato, A., & Yasuda, A. (2005). Illusion of sense of self-agency: Discrepancy between the predicted and actual consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, *94*, 241–255.

Sato, M., Mengarelli, M., Riggio, L., Gallese, V., & Buccino, G. (2008). Task related modulation of the motor system during language processing. *Brain and Language*, *105*(2), 83–90.

Schiffer, A. M., & Schubotz, R. I. (2011). Caudate nucleus signals for breaches of expectation in a movement observation paradigm. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*, 38.

Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: what, when, and where. *Topics in cognitive science*, *1*, 253–237.

Sebanz, N., & Lackner, U. (2007). Who's calling the shots? Intentional content and feelings of control. *Consciousness and Cognition*, *16*, 859–876.

Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: just like one's own? *Cognition*, *88*(3), 11–21.

Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(2), 70–76.

Seth, A. K. (2013). Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends in Cognitive Science*, *17*, 565–573.

Shepard, R. N., & Cooper, L. A. (1986). *Mental images and their transformations*. Cambridge, MA: The MIT Press.

Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1990). Apparent motion of the human body. *Psychological Science*, *1*(4), 257–264.

Shiffrar, M., & Freyd, J. J. (1993). Timing and apparent motion path choice with human body photographs. *Psychological Science*, *4*(6), 379–384.

Sidarus, N., Chambon, V., & Haggard, P. (2013). Priming of actions increases sense of control over unexpected outcomes. *Consciousness and Cognition*, *22*, 1403–1411.

Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neurosciences*, *13*, 910–919.

Sirigu, A., Duhamel, J. R., Cohen, L., Pillon, B., Dubois, B., & Agid, Y. (1996). The mental representation of hand movements after parietal cortex damage. *Science*, *273*, 1564–1568.

Smith, L. B., & Sheya, A. (2010). Is cognition enough to explain cognitive development? *Topics in Cognitive Science*, *2*, 725–735.

Sparenberg, P., Springer, A., & Prinz, W. (2012). Predicting others' actions: evidence for a constant time delay in action simulation. *Psychological Research*, *76*(1), 41–49.

Spengler, S., Von Cramon, D. Y., & Brass, M. (2009). Was it me or was it you? How the sense of agency originates from ideomotor learning revealed by fMRI. *Neuroimage*, *46*, 290–298.

Sperduti, M., Delaveau, P., Fossati, P., & Nadel, J. (2011). Different brain structures related to self- and external-agency attribution: a brief review and meta-analysis. *Brain Structure and Function*, *216*, 151–157.

Springer, A., Parkinson, J., & Prinz, W. (2013). Action simulation: time course and representational mechanisms. *Frontiers in Psychology*, *4*, 387.

Stanfield, R. A., & Zwaan, R. A. (2001). The effect of implied orientation derived from verbal context on picture recognition. *Psychological Science*, *12*(2), 153–156.

Stenner, M.-P., Bauer, M., Sidarus, N., Heinze, H.-J., Haggard, P., & Dolan, R. J. (2014). Subliminal action priming modulates the perceived intensity of sensory action consequences. *Cognition*, *130*, 227–235.

Stevens, J. A., Fonlupt, P., Shiffrar, M., & Decety, J. (2000). New aspects of motion perception: selective neural encoding of apparent human movements. *Neuroreport*, *11*(1), 109–115.

Strack, F., Martin, L., & Stepper, S. (1988). Inhibiting and facilitating conditions of the human smile: a nonobtrusive test of the facial feedback hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*, 768–777.

Stürmer, B., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2000). Correspondence effects with manual gestures and postures: a study of imitation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*(6), 1746–1759.

Synofzik, M., Thier, P., & Lindner, A. (2006). Internalizing agency of self-action: perception of one's own hand-movements depends on an adaptable prediction about the sensory action outcome. *Journal of Neurophysiology*, *96*, 1592–1601.

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Lindner, A. (2009). Me or not me – an optimal integration of agency cues? *Consciousness and Cognition*, *18*, 1056–1064.

Synofzik, M., Thier, P., Leube, D. T., Schlotterbeck, P., & Lindner, A. (2010). Misattributions of agency in schizophrenia are based on imprecise predictions about the sensory consequences of one's actions. *Brain*, *133*(1), 262–271.

Tai, Y., Scherfler, C., Brooks, D., Sawamoto, N., & Castiello, U. (2004). The human premotor cortex is „mirror" only for biological actions. *Current Biology*, *14*, 117–120.

Takahata, K., Takahashi, H., Maeda, T., Umeda, S., Suhara, T., Mimura, M., & Kato, M. (2012). It's not my fault: postdictive modulation of intentional binding by monetary gains and losses. *PLoS One*, *7*(12), e53421. doi:10.1371/journal.pone.0053421.

Tettamanti, M., Buccino, G., Saccuman, M. C., Gallese, V., Danna, M., Scifo, P., Fazio, F., Rizzolatti, G., Cappa, S. F., & Perani, D. (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(2), 273–281.

Toni, I., Lange, F. P. de, Noordzij, M. L., & Hagoort, P. (2008). Language beyond action. *Journal of Physiology – Paris*, *102*(1–3), 71–79.

Umilta, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2001). I know what you are doing. A neurophysiological study. *Neuron*, *31*, 155–165.

Urgesi, C., Maieron, M., Avenanti, A., Tidoni, E., Fabbro, F., & Aglioti, S. M. (2010). Simulating the future of actions in the human corticospinal system. *Cerebral Cortex*, *20*(11), 2511–2521.

Urgesi, C., Savonitto, M. M., Fabbro, F., & Aglioti, S. M. (2012). Long-and short-term plastic modeling of action prediction abilities in volleyball. *Psychological research*, *76*(4), 542–560.

Vargas, C. D., Olivier, E., Craighero, L., Fadiga, L., Duhamel, J. R., & Sirigu, A. (2004). The influence of hand posture on corticospinal excitability during motor imagery: A transcranial magnetic stimulation study. *Cerebral Cortex*, *14*, 1200–1206.

Vega, M. de (2008). Levels of embodied meaning: From pointing to counterfactuals. In M. de Vega, A. M. Glenberg, & A. C. Graesser (Hrsg.), *Symbols and embodiment. Debates on meaning and cognition* (S. 285–308). New York: Oxford University Press.

Voss, M., Moore, J. W., Hauser, M., Gallinat, J., Heinz, A., & Haggard, P. (2010). Altered awareness of action in schizophrenia: a specific deficit in predicting action consequences. *Brain*, *133*, 3104–3112.

Wassermann, E. A., Elek, S. M., Chatlosh, D. L., & Baker, A. G. (1993). Rating causal relations: Role of probability in judgments of response-outcome contingency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *19*(1), 174–188.

Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: Experiencing control over the movements of others. *Journal of Personality and Social Psychology*, *86*, 838–848.

Wegner, D. M., & Wheatley, T. P. (1999). Apparent mental causation: Sources of the experience of will. *American Psychologist*, *54*, 480–492.

Weiss, C., Herwig, A., & Schütz-Bosbach, S. (2011). The self in social interactions: sensory attenuation of auditory action effects is stronger in interactions with others. *PLoS One*, *6*(7), e22723. doi:10.1371/journal.pone.0022723.

Wenke, D., & Haggard, P. (2009). How voluntary actions modulate time perception. *Experimental Brain Research*, *196*(3), 311–318.

Wenke, D., Fleming, S. M., & Haggard, P. (2010). Subliminal priming of actions influences sense of control over effects of action. *Cognition*, *115*(1), 26–38.

Werner, N. S., Jung, K., Duschek, S., & Schandry, R. (2009). Enhanced cardiac perception is associated with benefits in decision-making. *Psychophysiology*, *46*(6), 1123–1129.

Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, *61*, 161–265.

Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J. P., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in my insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, *40*(3), 655–664.

Willems, R. M., & Francken, J. C. (2012). Embodied cognition: taking the next step. *Frontiers in Psychology*, *3*, 582.

Williams, S. E., Cumming, J., Ntoumanis, N., Nordin-Bates, S. M., Ramsey, R., & Hall, C. (2012). Further validation and development of the movement imagery questionnaire. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *34*, 621–646.

Williams, S. E., Guillot, A., Di Rienzo, F., & Cumming, J. (2015). Comparing self-report and mental chronometry measures of motor imagery ability. *European Journal of Sport Science*, *27*, 1–9.

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625–636.

Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin*, *131*(3), 460–473.

Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, *269*(5232), 1880–1882.

Wolpert, D. M., & Miall, R. C. (1996). Foward models for physiological motor control. *Neural Networks*, *9*, 1265–1279.

Wright, M. J., Bishop, D. T., Jackson, R. C., & Abernethy, B. (2011). Cortical fMRI activation to opponents' body kinematics in sport-related anticipation: expert-novice differences with normal and point-light video. *Neuroscience Letters*, *500*(3), 216–221.

Yoshie, M., & Haggard, P. (2013). Negative emotional outcomes attenuate sense of agency over voluntary actions. *Current Biology*, *23*, 2028–2032.

Zajonc, R. B., Adelmann, P. K., Murphy, S. T., & Niedenthal, P. M. (1987). Convergence in the physical appearance of spouses. *Motivation and Emotion*, *11*(4), 335–346.

Zwaan, R. A., & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: Motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*(1), 1–11.

Zwaan, R. A., Stoep, N. van der, Guadalupe, T., & Bouwmeester, S. (2012). Language comprehension in the balance: the robustness of the action-compatibility effect (ACE). *PLOS One*, *7*(2), e31204. doi:10.1371/journal.pone.0031204.

Handlung und Wahrnehmung

Wilfried Kunde

22.1 Einleitung – 822

22.2 Die sensomotorische Perspektive menschlichen Verhaltens – 823

22.3 Trennung oder Koppelung von Wahrnehmung und Handlung? – 825

22.3.1 Reiz-Reaktions-Kompatibilität – 825

22.3.2 Zwei-Pfade-Modelle – 826

22.3.3 Unbewusste Reaktionsbahnung – 828

22.4 Handeln verändert die Wahrnehmung – 828

22.5 Ziele bedingen Handlungen, nicht Reize – 830

22.6 Einheit von Wahrnehmung und Handlung – 831

22.6.1 Motorische Wahrnehmungstheorien – 831

22.6.2 Ideomotorik – 831

22.7 Vermittlungsversuche zwischen sensomotorischen und ideomotorischen Ansätze – 832

22.8 Anwendungsbeispiele – 833

22.9 Ausblick – 833

22.10 Weiterführende Informationen – 834

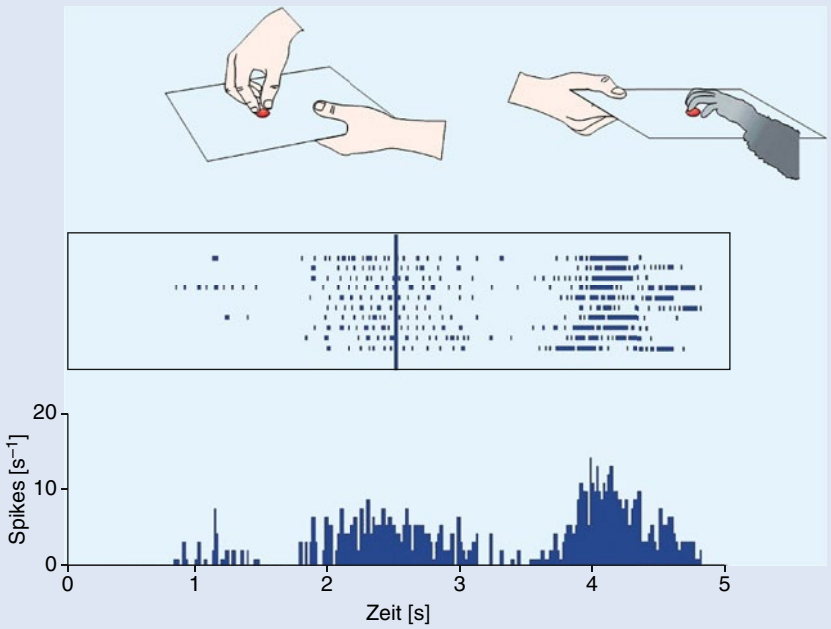
Literatur – 836

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8_22

Im Blickfang

Spiegelneurone

Im Jahre 1992 veröffentlichten Giacomo Rizzolatti und seine Mitarbeiter (di Pellegrino et al. 1992) eine Beobachtung, die sie im Rahmen ihrer Untersuchungen an Makaken-Affen gemacht hatten. Hierbei entdeckten sie Nervenzellen, die aktiv wurden wenn ein Affe eine bestimmte Handlung, wie das Ergreifen einer Nuss, ausführte. Interessanterweise feuerten dieselben Zellen aber auch, wenn der Affe diese Handlung bei einem anderen Affen oder Menschen beobachtete (◘ Abb. 22.1). Rizzolatti und Kollegen nannten diese Zellen später **Spiegelneurone**, weil sie scheinbar die Funktion hatten, das beobachtete Verhalten anderer intern zu duplizieren. Spätere Arbeiten haben gezeigt, dass ähnliche Neurone auch feuern, wenn der Affe bestimmte akustische Effekte einer Handlung wahrnimmt oder selbst produziert (z. B. das Geräusch eines Stücks Papier, wenn es zerrissen wird; Kohler et al. 2002). Insofern sollte man vielleicht besser von „Effekt"-Neuronen sprechen, also Neuronen, die repräsentieren, dass bestimmte Verhaltenseffekte in der Umwelt wahrgenommen oder selbst erzeugt werden. Die Spekulationen über die Existenz und die Funktion vergleichbarer Zellen im menschlichen Gehirn sind kaum mehr zu überblicken und wahrscheinlich an der einen oder anderen Stelle überzogen (Hickok 2009). Die Spiegelneurone machen aber eines deutlich: Es gibt offenbar neuronale Strukturen, bei denen man nicht eindeutig sagen kann, ob sie nun der Wahrnehmung oder der Handlungsplanung dienen. Offenbar tun sie beides. Die Spiegelneurone sind also ein Hinweis darauf, dass zumindest auf neuronaler Ebene Wahrnehmung und Handlung eng ineinandergreifen.



◘ **Abb. 22.1** Spiegelneurone werden in vergleichbarer Weise aktiv, wenn ein Affe ein Futterstück greift oder das Greifen bei einer anderen Person beobachtet. (Nach Rizzolatti et al. 2001)

22.1 Einleitung

Wenn wir über den Zusammenhang von Wahrnehmung und Handlung nachdenken wollen, müssen wir uns zunächst darüber verständigen, was wir unter Wahrnehmung und Handlung verstehen. Unter Wahrnehmung möchte ich im Folgenden jene Prozesse fassen, die der Verarbeitung sensorischer Informationen dienen, also Informationen, die aus der Stimulation von Sinneszellen entstammen. Das ist eine ziemlich breite Definition, die Fragen der Psychophysik oder Objektwahrnehmung einschließt, aber sich noch ausreichend klar von Fragen der Motivations- oder Denkpsychologie abgrenzt. Unter Handlungen möchte ich Körperbewegungen verstehen, die auf ein Ziel ausgerichtet sind. Ziele können natürlich sehr abstrakt sein. Ich möchte die Betrachtung pragmatisch auf solche Ziele beschränken, die innerhalb weniger Sekunden oder allenfalls Minuten erreicht werden können und die noch an spezifische Körperbewegungen gekoppelt sind. Das Betätigen einer Türklingel oder Binden einer Schleife fallen darunter, Lebensaufgaben wie „ein anständiger Mensch werden" dagegen nicht.

Was hat nun Handlung mit Wahrnehmung zu tun? Auf den ersten Blick wenig. Schließlich handeln wir, wie das Verb schon sagt, vor allem mit den Händen, und wir nehmen mithilfe unserer Sinnesorgane wie den Augen oder Ohren wahr. Und auch hinsichtlich ihrer Funktion scheint es deutliche Unterschiede zu geben. Das Endergebnis der Wahrnehmung besteht scheinbar in einem Abbild der Umwelt und das Endergebnis der Handlungsplanung aus einer zweckdienlichen Bewegung des Körpers. Die Endresultate dieser Prozesse könnten kaum unterschiedlicher sein.

Bei näherer Betrachtung wird aber deutlich, dass es wenig Sinn macht, Handlung und Wahrnehmung getrennt voneinander zu betrachten. Etwas wahrnehmen, ohne es im Handeln berücksichtigen zu können, wäre lediglich passives Erdulden und für einen Organismus ohne jeden Wert. Wir wären dazu verurteilt, die eintreffende Stimulation auszuhalten, so wie ein Kinobesucher, der, einmal in die Sitzreihe eingezwängt, auch

einen schlechten Film bis zum Ende ansehen muss. Nicht einmal die Augen zuhalten oder den Blick abwenden könnte man. Das wäre eine Handlung. Diese Funktionslosigkeit ohne Handlung gilt im Übrigen nicht nur für die Wahrnehmung, sondern für jede mentale Tätigkeit, zu der Organismen ihre Gehirne verwenden, wie Lernen, Erinnern, Denken oder Entscheiden. Diese Fähigkeiten werden nur deshalb benötigt, weil wir unseren Körper bewegen können und auch müssen, sofern wir als Individuen nicht einfach verhungern oder verdursten und als Gattung nicht aussterben wollen. Dennett (1991) hat dies einmal am Beispiel der Ascidien, einfachen Meerestieren, fast ironisch illustriert. Die Tiere verfügen über ein Nervensystem, solange sie im Ozean umherschwimmen. Irgendwann mit Erreichen der Geschlechtsreife setzen sie sich aber auf einem Stein fest und bewegen sich nie wieder fort. Das Erste, was die Tiere dann tun, ist, ihr eigenes Nervensystem zu verdauen. Ohne Bewegung braucht der Organismus keine Wahrnehmung und auch keine anderen kognitiven Leistungen.

Aber auch umgekehrt gilt, dass wir den Körper nicht einfach irgendwie bewegen können, ohne uns um die wahrnehmbaren Konsequenzen zu scheren. Das wäre zunächst einmal gefährlich. Wir würden nicht einmal merken, wenn wir irgendwo anecken, hängen bleiben oder uns verbrennen. Zum Glück registrieren wir solche Fehler aber und können unser Verhalten anpassen (▶ Kap. 9). Über solche Fehlhandlungen hinaus gilt aber ein noch wichtigeres allgemeines Prinzip: Wir bestimmen durch unser Verhalten unmittelbar, was wir wahrnehmen. Wir spüren, was wir aktiv mit der Hand berühren, und wir sehen, worauf wir unsere Augen richten. Letztlich verhalten wir uns, das heißt kontrahieren koordiniert Muskeln, um in bestimmter Weise auf unsere Umwelt einzuwirken. Diese Wirkungen nehmen wir dann wieder wahr. Kurzum, wir bewegen uns also, um bestimmte erwünschte Wahrnehmungen zu erzeugen. Wenn wir anstatt eines Italo-Westerns einen Science-Fiction-Film sehen wollen, greifen wir zur Fernbedienung und wechseln den Kanal.

Es gibt also triftige Gründe dafür, dass die kognitiven und neuronalen Prozesse der Handlungskontrolle und -wahrnehmung aufs Engste verzahnt sein sollten. Für evolutionäre Anpassungen scheint diese Verzahnung von Wahrnehmung und Verhalten ganz selbstverständlich zu gelten. Es ist nicht so, dass sich in der Evolution alle Arten einheitlich in Richtung immer sensiblerer Wahrnehmungsorgane und immer filigranerer Verhaltensmöglichkeiten entwickeln. Vielmehr kommt es darauf an, dass Wahrnehmungs- und Verhaltensmöglichkeiten aufeinander abgestimmt sind. Fledermäuse verfügen etwa über ein ausgefeiltes System der Schallortung. Die meisten von ihnen haben aber nur einen mäßig entwickelten Geruchssinn. Zecken dagegen sind Spezialisten, wenn es darum geht Milchsäureabsonderungen im Schweiß von Wirtstieren auf große Distanz zu riechen. Sie sind aber taub. Beide Arten verfügen über genau diejenigen Wahrnehmungsleistungen, die sie benötigen, um die für sie jeweils relevanten Verhaltensentscheidungen zu treffen. Die Fledermaus braucht die Schallortung, um die Flugrichtung in der Nacht zu bestimmen, und die Zecke den Geruchssinn für Milchsäure, um das nächste Wirtstier anzupeilen. Die Wahrnehmung darüber hinausgehender Umweltgegebenheiten ist für beide Tierarten nicht nötig und für sie bedeutungslos (Hoffmann 1993).

Man könnte nun meinen, dass die Psychologie Wahrnehmung und Handlung immer als eine Art Einheit betrachtet hat. Das ist aber aus bestimmten Gründen nicht der Fall. Wir wollen uns daher zunächst mit einer Beschreibung des Wahrnehmens und Verhaltens befassen, die man als sensomotorische Perspektive bezeichnen kann. Diese Perspektive hat die Allgemeine Psychologie stark beeinflusst und zu ausgefeilten Methoden der Analyse menschlicher Informationsverarbeitung beigetragen. Es folgt dann eine Beschreibung von Befunden, die mit Kernannahmen der sensomotorischen Perspektive nicht gut im Einklang stehen. Wir werden uns daher schließlich theoretischen Überlegungen zuwenden, die eine starke Überlappung von Prozessen der Wahrnehmung und Handlungsplanung postulieren.

22.2 Die sensomotorische Perspektive menschlichen Verhaltens

Im Alltag nehmen wir häufig an, dass unser Verhalten eine Reaktion auf situative Umstände sei. Wir sagen zum Beispiel, „Darauf hat er oder sie gut reagiert“ oder „Er oder sie konnte gar nicht anders reagieren“. Wir unterstellen dabei, dass wir zunächst wahrnehmen, in welcher Situation wir uns befinden, und dann mehr oder weniger sorgsam abwägen, was auf der Grundlage der wahrgenommenen Situation am besten zu tun sei, um das ausgewählte Verhalten schließlich auszuführen. Man kann dies als die sensomotorische Betrachtungsweise menschlichen Verhaltens bezeichnen.

In dieser Betrachtungsweise drückt sich eine Denktradition aus, die man auf Descartes (1664) zurückführen kann. Descartes hatte die Vorstellung, dass unsere Sinnesorgane durch kleine Fäden mit der Zirbeldrüse verbunden sind. Über diese mechanische Verbindung versetzt eine Stimulation der Sinnesorgane die Zirbeldrüse in Schwingung, die daraufhin Flüssigkeit absondert, was wiederum über ein hydraulisches System zu den Muskeln Körperbewegungen verursacht. Diese Vorstellung mutet heute abstrus an. Aber die darin enthaltene Grundstruktur, Verhalten als Reaktion auf Reize zu begreifen, hat das wissenschaftliche Denken bis heute geprägt.

Die sensomotorische Perspektive scheint besonders geeignet zu sein, wenn es um die Beschreibung des Verhaltens von Versuchspersonen in Laborsituationen geht. Ein Paradebeispiel für eine solche Laborsituation ist die Wahlreaktionsaufgabe. Hier bekommt eine Versuchsperson bestimmte Reize präsentiert, z. B. rote oder grüne Kreise, und sie antwortet darauf so schnell wie möglich mit bestimmten Reaktionen, z. B. dem Drücken einer linken oder rechten Antwortaste. Die Zeit zwischen dem Erscheinen des Reizes und der Reaktion bezeichnet man als Reaktionszeit. Die Abfolge der von außen beobachtbaren Ereignisse in dieser Situation – erst erscheint ein Reiz, dann verstreicht eine gewisse Zeit, und schließlich erfolgt eine Reaktion – scheint gut zur sensomotorischen Perspektive zu passen.

Die Kognitive Psychologie hat sich sehr darum bemüht, die mentalen Prozesse, die zwischen der Darbietung des Reizes und der beobachtbaren Reaktion liegen, zu rekonstruieren. Neisser (1967) hat dies sogar zur primären Aufgabe der Kognitiven Psychologie erhoben. Diese Rekonstruktionsversuche haben

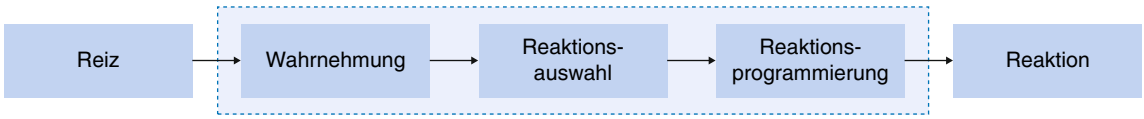


Abb. 22.2 Lineares Modell der Informationsverarbeitung

zu linearen Modellen der Informationsverarbeitung geführt (Abb. 22.2), einschließlich trickreicher Methoden der mentalen Chronometrie, mit denen geprüft werden soll, wie lange einzelne Verarbeitungsprozesse dauern und auf welche Stadien der Informationsverarbeitung eine bestimmte Veränderung von Reaktionszeiten zurückzuführen ist (▶ Zur Vertiefung 22.1).

Es sind verschiedene Varianten des linearen Modells mit mehr oder weniger Teilprozessen formuliert worden, aber die Grundstruktur ist immer ähnlich: Ein Reiz wird durch Wahrnehmungsprozesse encodiert und falls nötig identifiziert. Dann erfolgt eine Auswahl der auf den Reiz notwendigen Reaktion, gefolgt von der Programmierung der Reaktion, die schließlich in

Zur Vertiefung 22.1

Subtraktions- und additive Faktorenmethode

Wie lange dauern die einzelnen Verarbeitungsstufen die zwischen der Darbietung eines Reizes und der Reaktion darauf absolviert werden müssen? Diese Frage hat der Pionier der mentalen Chronometrie, Franz Cornelius Donders (1868), untersucht. Seine Idee war sehr einfach. Man nimmt zwei Aufgaben, die sich lediglich darin unterscheiden, dass eine der beiden Aufgaben eine Verarbeitungsstufe verlangt, die bei der anderen Aufgabe nicht nötig ist. Dann berechnet man die Differenz der Bearbeitungszeit der beiden Aufgaben (daher der Name *Subtraktionsmethode*) und erhält damit die Zeit, die die Verarbeitungsstufe benötigt, die in der einen Aufgabe zusätzlich hinzukommt.

Donders (1868) verwendete sogenannte a-, b- und c-Aufgaben (Abb. 22.3). In a-Aufgaben muss lediglich auf einen immer gleichen Reiz (z. B. das Aufleuchten einer Lampe) eine bestimmte, von vornherein bekannte Reaktion ausgeführt werden (z. B. eine Taste mit dem rechten Zeigefinger drücken). Die Annahme ist, dass diese Aufgabe die Dauer der Entdeckung des Reizes und die Initiierung der Reaktion umfasst. In c-Aufgaben soll auf einen bestimmten Reiz reagiert werden, auf einen anderen Reiz aber keine Reaktion erfolgen (z. B. wenn eine Lampe grün, aber nicht, wenn sie rot leuchtet; sogenannte Go/NoGo-Aufgabe). Die Annahme ist, dass nun im Vergleich zur a-Aufgabe ein Prozess der Reizunterscheidung (grün oder rot?) hinzutritt. In b-Aufgaben schließlich soll auf unterschiedliche Reize auch unterschiedlich reagiert werden, z. B. auf einen roten Reiz eine linke Taste und auf einen grünen Reize eine rechte Taste gedrückt werden (also eine Wahlreaktionsaufgabe). Aus der Reaktionszeitdifferenz zwischen c- und a-Aufgaben kann nun die Dauer der Reizunterscheidung abgeschätzt werden und aus der Reaktionszeitdifferenz zwischen b- und c-Aufgaben die Dauer der Reaktionsauswahl.

Die Subtraktionsmethode ist schon früh, vor allem durch den Begründer der Würzburger Schule, Oswald Külpe (1893) dahingehend kritisiert worden, dass man nicht einfach ein Stadium aus einer Aufgabe entfernen oder hinzufügen könne, ohne damit auch die anderen Prozesse zu verändern. Derartige Kritik hat zur Entwicklung der *additiven Faktorenlogik* durch Saul Sternberg (1969) geführt (Abb. 22.4A). Die Methode beruht nicht darauf, bestimmte Prozesse zu eliminieren, sondern die Dauer dieser Prozesse selektiv zu verändern. Wenn es möglich ist, die Dauer einzelner Prozesse zu verändern, und die Prozesse unabhängig voneinander arbeiten (was Donders [1868] stillschweigend unterstellt hat), müssten sich die Verlängerungen zweier Stadien um je einen bestimmten Betrag genau addieren. Verlängert man also z. B. die Dauer der Reizentdeckung um 20 ms und die Dauer der Reaktionsauswahl um 30 ms, dann muss sich die Reaktionszeit insgesamt um 50 ms verlängern. Genau dies zeigt sich für eine Reihe von Aufgabenstellungen. Verlängert man die Dauer der Reizentdeckung (z. B. durch Verringerung der Helligkeit eines Reizes) und die Dauer der Reaktionsauswahl (durch Erhöhung der Anzahl an Reaktionsalternativen), addieren sich die durch diese beiden „Faktoren" bedingten Reaktionszeitverlängerungen auf (z. B. Sternberg 1969). Ergebnismuster wie das in Abb. 22.4B dargestellte deuten also darauf hin, dass zwei unabhängige Faktoren unterschiedliche Stadien der Informationsverarbeitung verändern. Interaktionen der Faktoren, wie sie in Abb. 22.4C dargestellt sind, würden dafür sprechen, dass die Faktoren ein und dieselbe Stufe der Informationsverarbeitung betreffen. In der Forschungspraxis versucht man oft zu prüfen, mit welchen, bereits einem Stadium zugeordneten Faktor ein neuer, noch zu verortender Faktor interagiert (sich also ein Stadium teilt) bzw. nicht interagiert (sich also kein Stadium teilt; für eine Anwendung aus dem Bereich der Sportpsychologie vgl. Kunde et al. 2011).

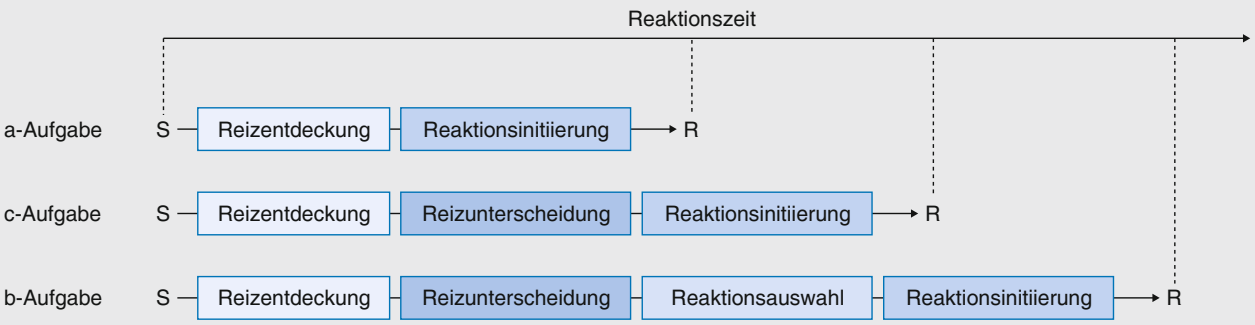


Abb. 22.3 Subtraktionsmethode. S = Stimulus, R = Reaktion. (Nach Donders 1868)

Zur Vertiefung 22.1 (*Fortsetzung*)

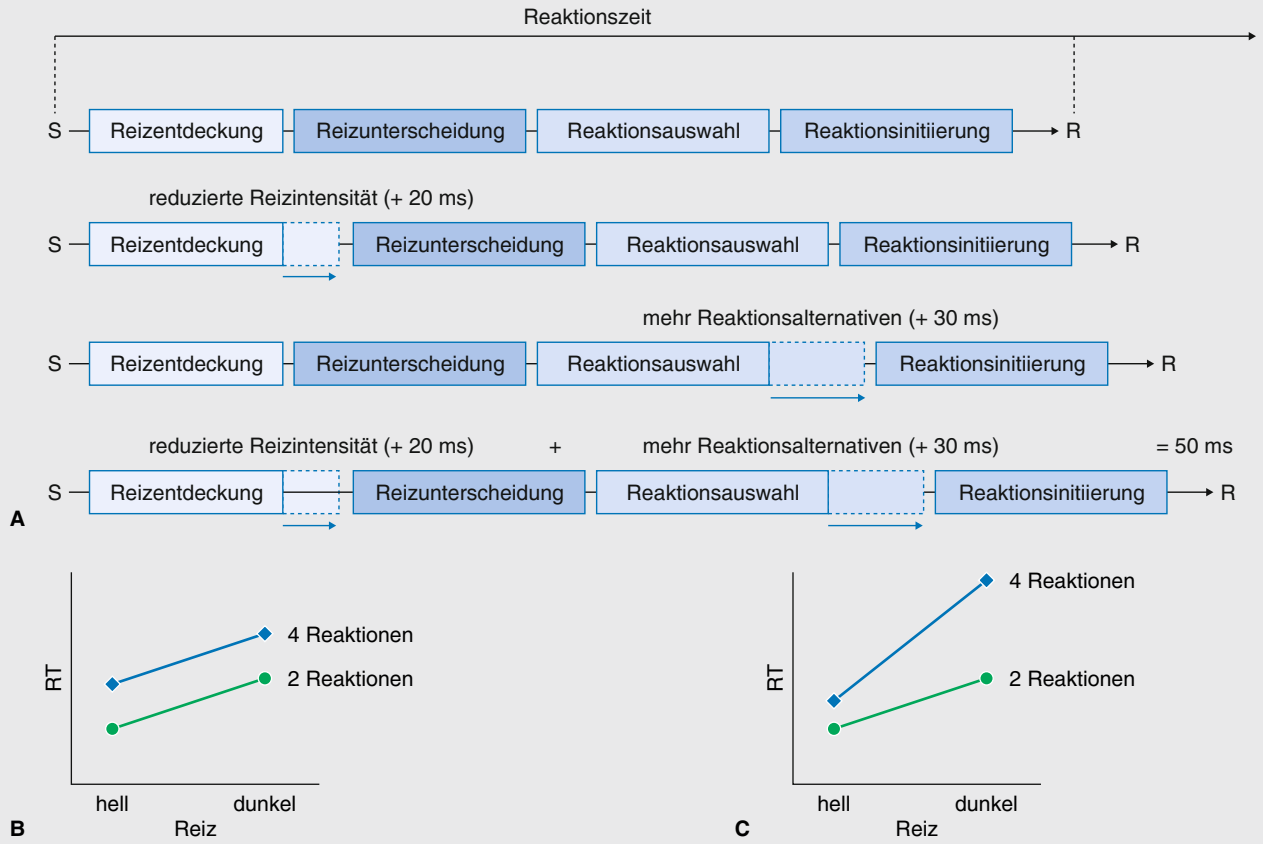


Abb. 22.4 (**A**) Additive Faktorenmethode nach Sternberg (1969). Erwartete Ergebnismuster wenn Faktoren unterschiedliche (**B**) bzw. dieselben Stadien der Informationsverarbeitung betreffen (C). S = Stimulus, R = Reaktion, RT = Reaktionszeit

einer beobachtbaren Reaktion mündet (Sanders 1980; Sternberg 1969). Das lineare Modell der Informationsverarbeitung hat dabei immer drei wichtige Charakteristika:

1. *Trennung von Wahrnehmung und Handlung:* Für die Wahrnehmung sind bestimmte sensorische Prozesse verantwortlich und für die Produktion einer Bewegung andere, motorische Prozesse. Es bedarf daher mindestens eines weiteren Prozesses der Reaktionsauswahl, der zwischen Wahrnehmung und Verhalten vermittelt.
2. *Unidirektionalität des Informationsflusses:* Die Inhalte unserer Wahrnehmung beeinflussen unser Verhalten, aber es ist im Modell nicht vorgesehen, dass, in entgegengesetzter Richtung, das Verhalten auch die Wahrnehmung verändern kann.
3. *Reizbezogene Determination des Verhaltens:* Das Modell suggeriert, die Ursache unseres Verhaltens läge in den Reizen. Wir antworten auf Stimulation, anstatt selbst Stimulation zu erzeugen. Verhalten wird als Reaktion anstatt als Handlung verstanden.

Wir wollen diese drei Charakteristika im Folgenden kritisch beleuchten.

22.3 Trennung oder Koppelung von Wahrnehmung und Handlung?

22.3.1 Reiz-Reaktions-Kompatibilität

Schon frühe Beobachtungen in Wahlreaktionsaufgaben deuten darauf hin, dass Wahrnehmung und Handlung nicht so strikt separiert sind, wie es das lineare Modell annimmt. Fitts und Seeger (1953) haben Wahlreaktionsexperimente durchgeführt, in denen sie die Art der Reize und die Art der geforderten Handlungen systematisch variierten. Sie hatten eigentlich die eher praktische Zielsetzung im Sinn, die Bedienbarkeit von technischen Apparaten zu optimieren. Dabei stießen sie aber auf eine generelle Gesetzmäßigkeit, die man als Reiz-Reaktions-Kompatibilität bezeichnet: Menschen reagieren schnell und machen kaum Fehler, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

1. Reize und Reaktionen variieren auf einer gemeinsamen Dimension, was man als **Set-Level-Kompatibilität** bezeichnet (Kornblum et al. 1990). Das ist zum Beispiel gegeben, wenn sich sowohl die Reize als auch die Reaktionen auf einer horizontalen Raumdimension als links oder rechts oder hinsichtlich ihrer Intensität als stark oder schwach beschreiben lassen.
2. Die Personen haben auf die Reize in der Weise zu reagieren, dass sich die Ausprägungen der Reize und der geforderten

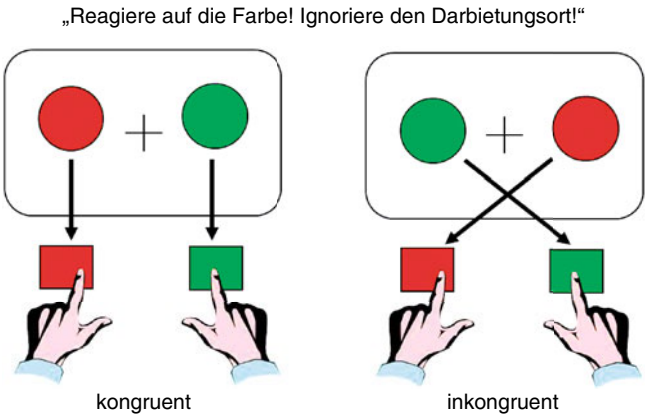


Abb. 22.5 Simon-Aufgabe. Obwohl der Reizort für die Aufgabenstellung irrelevant ist, reagieren Versuchspersonen schneller, wenn Reiz- und Reaktionsort räumlich übereinstimmen, als wenn sie nicht übereinstimmen

Reaktionen auf der gemeinsamen Dimension entsprechen. Das bezeichnet man als **Element-Level-Kompatibilität**. Bei Reizen und Reaktionen, die auf einer gemeinsamen horizontalen Raumdimension variieren, wäre dies zum Beispiel gegeben, wenn auf das Aufleuchten einer linken Lampe ein linker Knopf und auf das Aufleuchten einer rechten Lampe ein rechter Knopf zu drücken ist, verglichen mit der umgekehrten Reiz-Reaktions-Zuordnung.

Interessanterweise antworten Versuchspersonen selbst dann schneller mit kompatiblen Reaktionen, wenn der Darbietungsort der Reize irrelevant für die Aufgabenstellung ist und ignoriert werden soll. Nach dem Erfinder bezeichnet man dies als *Simon-Aufgabe* (Simon 1969; Abb. 22.5). Wenn also zum Beispiel auf rote Reize eine linke Taste und auf grüne Reize eine rechte Taste zu drücken ist, gelingen die Reaktionen schneller und mit weniger Fehlern, wenn der rote Reiz links oder der grüne Reiz rechts erscheint, als wenn der rote Reiz rechts oder der grüne Reiz links erscheint. Offenbar bahnen die links oder rechts präsentierten Reize mehr oder weniger automatisch räumlich korrespondierende Reaktionen. Ähnliches gilt, wenn sich Reize und Reaktionen hinsichtlich ihrer Dauer (Kunde und Stöcker 2002), Intensität (Mattes et al. 2002) oder Anzahl (Miller 2006) ähneln.

Kompatibilitätseffekte, wie sie von Fitts und Seeger (1953) berichtet wurden, sind schwer im Rahmen eines *linearen Stadienmodells* zu erklären. Es handelt sich ja um dieselben Reize und dieselben Reaktionen, die lediglich unterschiedlich zugeordnet sind. Die Verarbeitung derselben Reize und Reaktionen in getrennt operierenden Wahrnehmungs- und Reaktionsmodulen sollte davon nicht betroffen sein. Allenfalls könnte man annehmen, dass ein, sagen wir linker, Reiz, schneller einer linken anstatt rechten Reaktion zugewiesen werden kann. Aber selbst das ist nicht ohne Weiteres einsichtig, da beispielsweise in einer Simon-Aufgabe kompatible und inkompatible Reiz-Reaktions-Kombinationen gleich häufig auftreten und daher nicht erkennbar ist, warum nun kompatible gegenüber gleich häufigen inkompatiblen Zuordnungen bevorzugt werden sollten. Daher sind Modifikationen des linearen Modells dahingehend vorgeschlagen worden, dass es neben der willkürlichen Auswahl von Reaktionen, die im Wesentlichen so funktioniert wie in Abb. 22.2 dargestellt, noch eine „direkte Route“ geben muss, auf der Reize automatisch kompatible Reaktionen bahnen (Kornblum et al. 1990). Reaktionen fallen nach diesem Modell immer dann schnell aus, wenn die aufgrund der Reiz-Reaktions-Ähnlichkeit direkt gebahnte Reaktion derjenigen entspricht, die auch durch die willkürliche Route ausgewählt werden muss.

22.3.2 Zwei-Pfade-Modelle

Hinweise darauf, dass Wahrnehmung und Motorik auf direkte Weise ineinandergreifen können, stammen auch aus der Beobachtung von Personen nach einer Hirnverletzung. Es gibt Patienten, die nach Schädigungen des visuellen Cortex das Blindsichtphänomen zeigen (Weiskrantz 1986). Die Patienten sind meistens auf einer Seite ihres Gesichtsfeldes blind, d. h., sie nehmen dort bewusst nichts wahr und können dort keine Formen unterscheiden, Objekte erkennen usw. Bittet man diese Patienten aber, auf ein Objekt zu zeigen, das sich in ihrem blinden Halbfeld befindet, erledigen sie diese Aufgabe besser, als man erwarten würde, wenn sie einfach nur irgendwo zufällig hinzeigen würden (Abb. 22.6A). Die Patienten sind also in der Lage, objektorientierte Handlungen wie Zeigebewegungen auszuführen, ohne die Objekte zu „sehen“. Das, was an Stimulation von diesen Objekten ausgeht, wird offenbar unter Umgehung eines bewussten Perzepts in adaptives Verhalten umgesetzt. Diese Fähigkeit wird darauf zurückgeführt, dass es neben der neuronalen Weiterleitung vom Auge zum visuellen Cortex ein zweites System vom Auge zum Mittelhirn gibt, das für einfache objektorientierte Bewegung ausreicht und bei diesen Patienten unbeeinträchtigt ist (▶ Kap. 2).

Ein verblüffendes Muster gestörter und erhaltener Fähigkeiten zeigt auch die von Goodale und Milner (1992) intensiv untersuchte Patientin D. F. Sie hatte große Probleme in der Beurteilung visueller Reize. Sie konnte Objekte nicht mehr erkennen (**Objektagnosie**). Außerdem war sie weder verbal noch durch Zeigen in der Lage anzugeben, ob ein Briefschlitz horizontal oder vertikal ausgerichtet war. Gab man ihr aber eine Karte in die Hand, hatte sie keinerlei Probleme, diese durch einen Schlitz zu stecken (Abb. 22.6B). Offenbar sind also die bewussten, verbal berichtbaren visuellen Informationen, die D.F. zur Verfügung stehen, nicht diejenigen Informationen, die sie für die Kontrolle ihrer objektorientierten Körperbewegungen nutzt. Andernfalls könnte sie keinen Brief durch einen Schlitz werfen, dessen Lage sie nicht mitteilen kann.

Die Patientin D. F. hatte eine Schädigung des **ventralen Pfades** erlitten, der vom primären visuellen Cortex zum inferotemporalen Cortex führt. Interessanterweise zeigen Patienten mit Schädigungen im **dorsalen Pfad**, der vom primären visuellen Cortex zum posterioren Parietalcortex zieht, ein Muster gestörter und intakter Leistungen, das zu dem von D. F. komplementär ist. Die Patientin R.V. mit Schädigungen im dorsalen Pfad hat im Unterschied zu D. F. keine Probleme, Objekte zu erkennen oder zu beschreiben. Sie hat aber große Schwierigkeiten bei der Ausführung objektorientierter Handlungen (Milner und Goo-

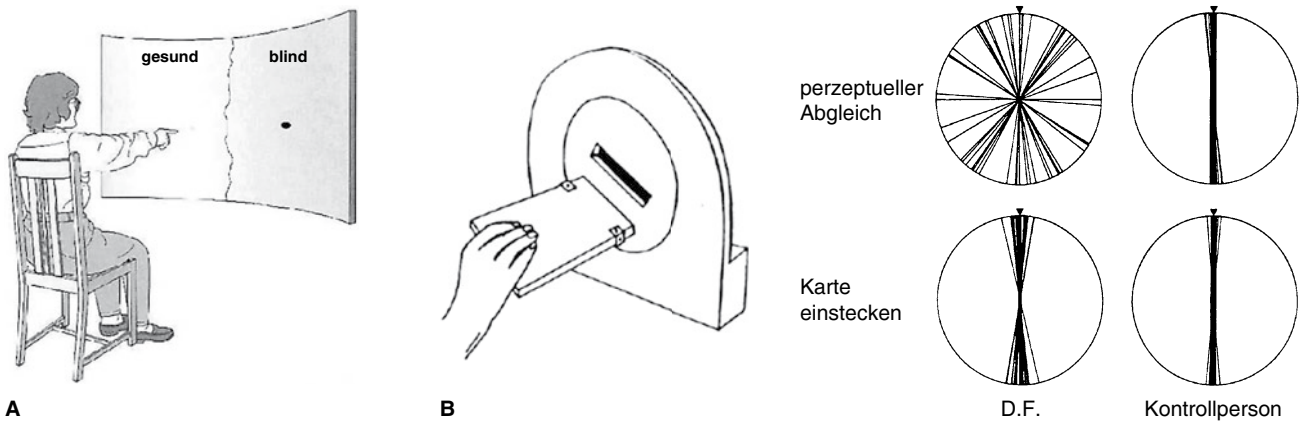


Abb. 22.6 (**A**) Blindsichtpatienten sind in der Lage, auf Objekte in ihrem „blinden" visuellen Halbfeld zu zeigen. (Nach Goldstein 1997) (**B**) Die Patientin D. F. ist im Unterschied zu Normalpersonen nicht in der Lage, verbal oder durch eine Handgeste anzuzeigen, welche Orientierung ein Briefschlitz hat (perzeptueller Abgleich). Sie kann dagegen die Karte ohne nennenswerte Probleme durch den Schlitz stecken. (Nach Goodale et al. 1991)

dale 1995). Es fällt ihr beispielsweise schwer, Objekte zu ergreifen und die Finger dabei so zu platzieren, dass das Objekt nicht aus der Hand gleitet.

Solche doppelten Dissoziationen, bei denen Hirnverletzung X die Funktion A, aber nicht Funktion B beeinträchtigt, Hirnverletzung Y dagegen Funktion B, aber nicht Funktion A beeinträchtigt, werden als starkes Indiz für die Spezialisierung bestimmter Hirnstrukturen angesehen (Struktur X ist für Funktion A, aber nicht für Funktion B notwendig, während Struktur Y für Funktion B, aber nicht für Funktion A notwendig ist). Die Beobachtungen an Patientinnen wie D. F. und R. V. haben daher zu der Überzeugung geführt, dass dieselben visuellen Reize auf zwei unterschiedliche Arten verarbeitet werden: zum einen zur Kontrolle von Bewegungen, wofür der dorsale Pfad intakt sein muss, und zum anderen zur Erzeugung phänomenalen Erlebens, wozu der ventrale Pfade benötigt wird.

Dass die bewusst erlebten visuellen Informationen auch bei Personen ohne Hirnverletzungen nicht immer diejenigen Informationen sind, die die Körperbewegungen kontrollieren, lässt sich auch daran erkennen, dass die menschliche Bewegungskontrolle relativ „immun" gegen visuelle Täuschungen ist (Aglioti et al. 1995). Praktisch jeder Betrachter von Abb. 22.7 hat den Eindruck, dass die linke Mittelscheibe größer sei als die rechte (*Ebbinghaus-Täuschung*). Sollen Personen aber die dargestellten Scheiben greifen, spreizen sie Daumen und Zeigefinger immer so, wie es die objektive Größe der Scheibe erfordert. Anders formuliert: Man versucht nicht, die linke Scheibe mit einer größeren Spreizung zu greifen als die rechte, was man aber tun müsste, wenn sich die Greifhandlung daran orientiert, was wir bewusst

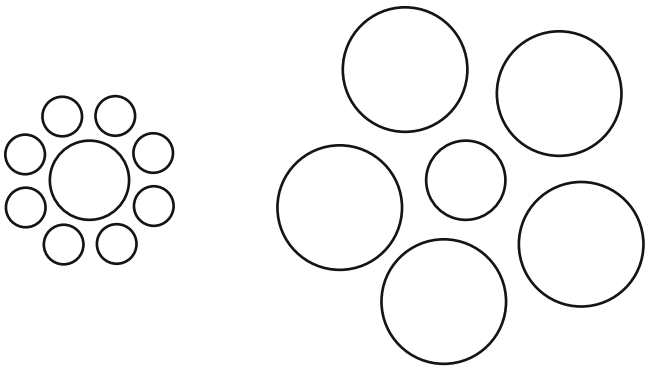


Abb. 22.7 Ebbinghaus-Täuschung. Die Mittelscheibe *links* erscheint subjektiv größer als die physikalisch gleich große Mittelscheibe *rechts*. Werden Personen gebeten, die Mittelscheiben zu greifen, passt sich die Spreizung von Zeigefinger und Daumen dagegen dem objektiven Durchmesser der Scheiben an. (Nach Aglioti et al. 1995)

wahrnehmen (kritische Sichtung der Evidenz in Bruno und Franz 2009).

Mittlerweile wissen wir, dass es eine ganze Reihe weiterer Unterschiede der Reizverarbeitung zur Bewegungskontrolle gegenüber der Reizverarbeitung zur phänomenalen Wahrnehmung gibt. Die Reizverarbeitung zur Bewegungskontrolle ist weniger durch die Variation irrelevanter Objektmerkmale (Ganel und Goodale 2003; Abb. 22.8) oder durch die Ähnlichkeit zwischen irrelevanten und relevanten Merkmalen beeinflussbar als die phänomenale Wahrnehmung (Janczyk und Kunde 2012). Allerdings ist auch deutlich geworden, dass im intakten Gehirn beide Verarbeitungswege miteinander interagieren und auf glei-

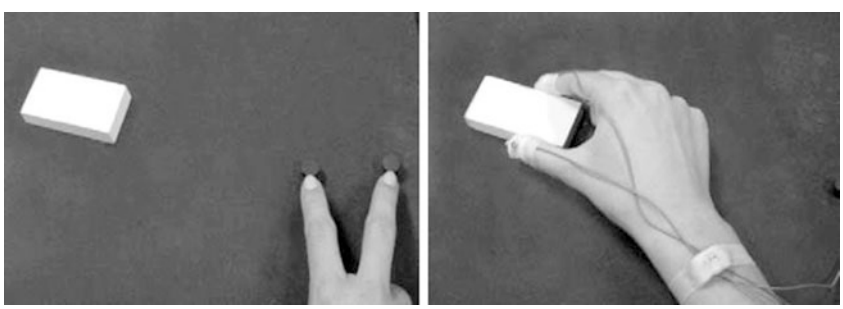


Abb. 22.8 Wenn Versuchspersonen beurteilen sollen, ob ein Holzklotz vor ihnen eher breit oder eher schmal ist (es gibt nur zwei unterschiedliche Breiten), fällt ihnen diese Beurteilung leichter, wenn die Klötze immer die gleiche Länge haben, als wenn die Klötze in der aufgabenirrelevanten Länge von Durchgang zu Durchgang variieren. Sollen die Versuchspersonen die Klötze entlang ihrer Breite greifen, können sie dies immer gleich schnell und akkurat tun, unabhängig davon, ob die Länge der Klötze konstant ist oder variiert. (Nach Ganel und Goodale 2003)

che Aufmerksamkeitsressourcen zurückgreifen (Janczyk und Kunde 2010).

22.3.3 Unbewusste Reaktionsbahnung

Dass sensorische Stimulation Handlungen auf einem direkten, nicht bewusst vermittelten Weg aktivieren, wissen wir noch von einem anderen Phänomen, der *unbewussten Reaktionsbahnung* (Überblick in Ansorge et al. 2014). Dabei sollen Versuchspersonen eine einfache Aufgabe bearbeiten, z. B. mit einem linken oder rechten Tastendruck angeben, ob eine Ziffer größer oder kleiner als 5 ist. Diesem Zielreiz (*target*) geht eine andere Ziffer, der Bahnungsreiz (*prime*) voran. Der Bahnungsreiz wird nur sehr kurz präsentiert und maskiert, sodass er für die Versuchspersonen nicht erkennbar ist, was sorgfältig geprüft wird (▶ Kap. 6). Dennoch fallen Reaktionen schneller aus, wenn Bahnungs- und Zielreiz derselben Reaktion angehören (also beide kleiner oder beide größer als 5 sind), als wenn sie unterschiedlichen Reaktionen angehören (der Bahnungsreiz also z. B. kleiner und der Zielreiz größer als 5 ist). Der Bahnungsreiz aktiviert offenbar, obwohl er nicht bewusst wahrnehmbar ist, die ihm vorher zugewiesene Reaktion (Dehaene et al. 1998). Die genauen Mechanismen der unbewussten Reaktionsbahnung sind nach wie vor umstritten, aber der Befund als solcher zeigt überzeugend, dass visuelle Stimulation Körperbewegungen aktivieren kann, selbst ohne dass der Beobachter etwas von dieser Stimulation erfährt (Neumann 1990).

Wir können zusammenfassen, dass das Phänomen der Reiz-Reaktions-Kompatibilität sowie die Beobachtungen zum Zwei-Pfade-Modell und zur unbewussten Reaktionsbahnung übereinstimmend nahelegen, dass Wahrnehmung und Handlung keine separierten Vorgänge sind, zwischen denen aufwendig oder gar bewusst vermittelt werden müsste. Visuelle Reize können Körperbewegungen direkt und ohne bewusstes Erleben zumindest bahnen. Das könnte fast wie eine Rehabilitierung der oben bereits kritisierten Annahme der reizbezogenen Determination des linearen Modells der Informationsverarbeitung erscheinen. Wenn Reize so unmittelbar an das Verhalten gekoppelt sind, könnte man sagen, sie „verursachen" das Verhalten?

Dem ist nicht so. Links oder rechts präsentierte Reize bahnen räumliche kompatible Reize nur dann, wenn die Personen das Ziel haben, etwas auf der linken oder rechten Seite zu tun (Ansorge und Wühr 2004), und es kommt dabei mehr auf den Ort des Zieles an, das erreicht werden soll, als auf die Lage der Hand, mit deren Hilfe das Ziel erreicht wird (Hommel 1993). Auch unbewusste Reize bahnen die ihnen zugeordneten Bewegungen nur dann, wenn die Personen das Ziel haben, die den Reizen zugeordneten Reaktionen auszuführen (Kunde et al. 2007). Und schließlich löst auch die Reizverarbeitung zum Zwecke der Bewegungskontrolle an sich keine Bewegungen aus, sondern kommt erst zum Tragen, wenn die Person die Absicht hat, bestimmte Objekte zu manipulieren. Ein Blindsichtpatient muss gebeten werden, auf Objekte zu zeigen, die er nicht sieht. Von allein würde er nicht auf die Idee kommen, dies zu tun. Es bedarf also immer reizvorgängiger Zielvorstellungen, damit Reize das Verhalten beeinflussen. Wir werden diesen Gedanken in ▶ Abschn. 22.5 noch einmal aufgreifen.

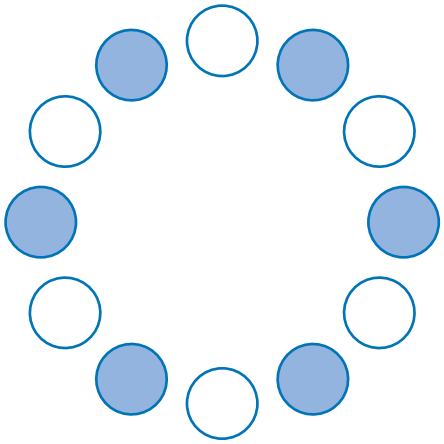


Abb. 22.9 Leuchten abwechselnd die hellen und dunkeln Punkte auf, entsteht der Eindruck einer Drehbewegung. Die Drehrichtung ist mehrdeutig. Mal scheinen sich die Punkte mit, mal gegen den Uhrzeigersinn zu drehen. (Nach Wohlschläger 2000)

22.4 Handeln verändert die Wahrnehmung

Wenn Wahrnehmung und Verhalten so eng aneinander gekoppelt sind, dann drängt sich fast die Frage auf, ob nicht nur die sensorische Verarbeitung das Verhalten beeinflusst, sondern auch umgekehrt die Art, wie wir uns bewegen, beeinflusst, wie und was wir wahrnehmen. Tatsächlich gibt es zahlreiche Belege dafür, dass bereits die Absicht, eine Handlung auszuführen, die Wahrnehmung verändert.

Wahrnehmung ambiger Reize

Das lässt sich am Beispiel ambiger Reize zeigen. Leuchten die hellen und dunkeln Punkte in Abb. 22.9 jeweils abwechselnd auf, entsteht der Eindruck einer Drehbewegung. Die Drehrichtung ist allerdings nicht eindeutig. Manchmal hat man den Eindruck, die Punkte drehen sich mit, und manchmal, sie drehen sich gegen den Uhrzeigersinn. Welche Drehrichtung man sieht, hängt davon ob, was der Betrachter gerade beabsichtigt zu tun. Plant man eine Drehbewegung der Hand mit dem Uhrzeigersinn, neigt man dazu, die Punkte als mit dem Uhrzeigersinn drehend zu sehen. Plant man dagegen eine Drehbewegung gegen den Uhrzeigersinn, scheinen sich auch die Punkte häufiger gegen den Uhrzeigersinn zu drehen (Wohlschläger 2000). Die Handlungsplanung erleichtert hier also das Entstehen räumlich korrespondierender Wahrnehmungen.

Doppelaufgaben

Die Planung einer Handlung kann auch die Wahrnehmung ähnlicher Ereignisse behindern. Bereitet man sich darauf vor, einen linken Tastendruck auszuführen, dann fällt es schwerer, nach links weisende Pfeile als nach rechts weisende Pfeile also solche zu identifizieren (Müsseler und Hommel 1997; Kunde und Wühr 2004). Das ist ein auf den ersten Blick überraschendes Ergebnis. Es wird aber unter der als Ideomotorik (▶ Abschn. 22.6.2)

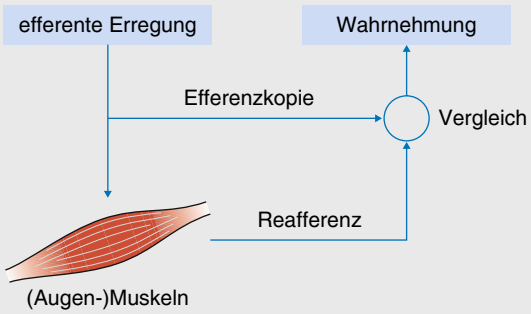
Zur Vertiefung 22.2

Reafferenzprinzip

Das Reafferenzprinzip ist von von Holst und Mittelstaedt (1950; vgl. auch interne Modelle in ▶ Kap. 20) als ein Mechanismus zur Lösung eines speziellen Problems bei der visuellen Wahrnehmung von Bewegungen postuliert worden. Wie kann man unterscheiden, ob sich ein Objekt vor dem ruhenden Auge bewegt oder ob sich das Auge über ein ruhendes Objekt hinwegbewegt? In beiden Fällen kann die Verschiebung des Bildes auf der Netzhaut identisch sein, z. B. wenn man eine einzelne Wolke am ansonsten völlig blauen Himmel betrachtet. Die vorgeschlagene Lösung des Problems ist folgende: Bei jeder Augenbewegung wird eine Kopie der efferenten Aktivierungen erstellt, die an die Augenmuskeln gehen (**Efferenzkopie**; ◘ Abb. 22.10). Auf dieser Grundlage wird antizipiert, welche Bildverschiebung sich als Folge der bevorstehenden Augenbewegung ergeben müsste, wenn die Umwelt statisch ist. Die dann real auf der Netzhaut eintretende Bildverschiebung wird mit der vorhergesagten Bildverschiebung verglichen. Wenn sich keine Differenz ergibt, nimmt der Beobachter keine Bewegung in der Umwelt wahr. Es tritt ja genau das ein, was als Folge der Planung unter der Annahme einer ruhenden Umwelt vorhergesagt worden war. Tritt eine Differenz auf, wird eine Bewegung in der Umwelt wahrgenommen.

Die Richtigkeit dieser Überlegung lässt sich leicht in einem Selbstversuch demonstrieren. Schließen Sie ein Auge und fixieren Sie einen Punkt in der Umwelt. Drücken Sie dann mit dem Finger leicht auf den Augenwinkel des geöffneten Auges. Sie werden den Eindruck haben, dass sich die Umwelt bewegt. Durch die Kompression und passive Bewegung des Augapfels entsteht eine Bildverlagerung auf der Netzhaut. Es tritt also Bildverschiebung auf, obwohl aufgrund der fehlenden Kommandos an die Augenmuskeln keine Verschiebung vorhergesagt wurde. Diese Differenz erzeugt die Wahrnehmung von Bewegung. Kurz gesagt, die aufgrund geplanter Augenbewegungen vorhersehbaren Bewegungen auf der Netzhaut werden aus der Wahrnehmung eliminiert.

Das Reafferenzprinzip als „Prinzip" zu bezeichnen, ist insofern berechtigt, als sich das Grundmuster, dass vorhersehbare Verhaltenskonsequenzen in der Wahrnehmung eliminiert oder gedämpft werden, immer wieder bestätigt. Das gilt z. B. für die Wahrnehmung taktiler Konsequenzen von selbstproduzierten Berührungen des eigenen Körpers. Diese nimmt man als weniger kitzelig wahr als Berührungen, die von einer anderen Person stammen und daher nicht so gut vorhergesehen werden können (Blakemore et al. 2000). Ähnliches gilt für die auditive Wahrnehmung. Grillen eliminieren aus der neuronalen Verarbeitung auditiver Signale das Zirpen, das sie selbst verursachen (Poulet und Hedwig 2002). Auch beim Menschen werden selbstproduzierte Töne als weniger laut wahrgenommen (Sato 2008) und in der neuronalen Verarbeitung gedämpft (Baess et al. 2011; Martikainen et al. 2005).



◘ **Abb. 22.10** Vereinfachte Darstellung des Reafferenzprinzips. Der Vergleich sensorischer Veränderungen, die durch Körperbewegungen eintreten (Reafferenz), mit denen, die aufgrund efferenter Aktivierungen (Efferenzkopie) vorhergesagt wurden, bestimmt den Wahrnehmungseindruck

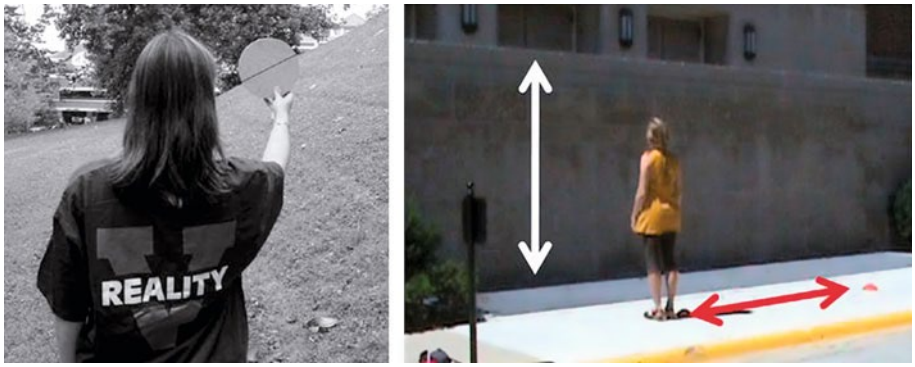
beschriebenen Überlegung plausibel, dass die Planung von Handlungen Repräsentationen sensorischer Handlungseffekte in Anspruch nimmt. Durch die Planung einer Handlung werden kurzzeitig Repräsentationen sensorischer Ereignisse besetzt, die dann für eine gewisse Zeit nicht mehr für die Wahrnehmung ähnlicher Ereignisse zur Verfügung stehen. Plant man gerade einen Tastendruck mit der linken Hand, wird, so die Überlegung, der Code „links" benötigt, und dieser kann dann nicht mehr für die gleichzeitige Verarbeitung eines nach „links" weisenden Pfeiles genutzt werden (*code-occupation hypothesis*; Hommel et al. 2001).

▪ Wahrnehmung vorhersagbarer Handlungseffekte

Gut gesichert sind auch Einflüsse der Handlungsplanung auf die Wahrnehmung ganz bestimmter Ereignisse, nämlich vorhersagbarer Handlungseffekte. Im Regelfall nehmen wir vorhersagbare Effekte unserer Handlungen gedämpft wahr (d. h. entdecken sie schwerer und empfinden sie als weniger intensiv), verglichen mit nicht vorhersagbaren Effekten (Cardoso-Leite et al. 2010). Ein bekanntes Beispiel hierfür ist das Phänomen, dass man sich selbst nicht kitzeln kann (Blakemore et al. 2000). Offenbar antizipieren wir während der Handlungsplanung die sensorischen Effekte unserer Handlungen. Die dann real eintretenden Effekte werden nur noch insofern wahrgenommen, als sie von diesen Antizipationen abweichen (Reafferenzprinzip; ▶ Zur Vertiefung 22.2).

Das ist ein insofern nützlicher Mechanismus, als er die Wahrnehmung des Organismus für solche Ereignisse schärft, die er offenbar selbst nicht kontrollieren kann. Solche Ereignisse sind von hoher Bedeutung, denn sie zeigen an, dass irgendetwas bei der Handlungsausführung schiefgelaufen ist oder ein anderes bewegtes Objekt vorhanden ist, auf das man keinen Einfluss hat. Die taktile Stimulation, die durch Bewegung der eigenen Finger auf der Haut entsteht, kann man relativ gut vorhersagen, und sie erscheint daher nicht sehr intensiv. Die taktile Stimulation hingegen, die durch Bewegung der Finger einer anderen Person entsteht, ist nicht so gut vorhersagbar und erscheint deshalb „kitzelig".

Es gibt also sowohl Hinweise darauf, dass die Wahrnehmung von handlungsähnlichen bzw. vorhersehbaren Ereignissen erleichtert als auch beeinträchtigt sein kann. Unter welchen Bedingungen eher Erleichterung und unter welchen Bedingungen eher Beeinträchtigung auftritt, wird gegenwärtig diskutiert. Wichtige



A B

Abb. 22.11 Versuchspersonen beim Schätzen der Steigung eines Hügels (**A**) bzw. der Höhe einer Mauer (**B**). Das Urteil wird durch Einstellung eines entsprechenden Vergleichswinkels oder einer Vergleichsdistanz erhoben. (Witt 2011).

Einflussfaktoren scheinen zu sein, ob solche Ereignisse lediglich entdeckt oder voneinander unterschieden werden müssen (Desantis et al. 2014) und ob kategoriale oder metrisch-räumliche Aspekte der Ereignisse zu verarbeiten sind (Thomaschke et al. 2012).

Handlungsspezifische Skalierung

Die gegenwärtig vielleicht stärksten Annahmen zum Einfluss der Handlungsplanung auf die Wahrnehmung machen Theorien der „verkörperten" Kognition (Embodiment; ▶ Kap. 21). Diese Theorien postulieren, dass wir die Welt entsprechend unserer aktuellen Handlungsmöglichkeiten wahrnehmen (Abb. 22.11). Hügel erscheinen einem steiler, um ein viel beachtetes Beispiel zu nennen, sobald man einen schweren Rucksack aufsetzt (Bhalla und Proffitt 1999). Personen, die im Übersteigen von Mauern geübt sind, schätzen Mauern als niedriger ein, als solche, die ungeübt sind (Taylor et al. 2011). Objekte im Greifraum erscheinen weiter entfernt, wenn man seine Arme gegen eine starke anstatt schwache Gegenkraft bewegen muss (Kirsch und Kunde 2013). Kurzum, wir „skalieren" die Welt in unserer Wahrnehmung also scheinbar entsprechend unseren aktuellen Handlungsmöglichkeiten bzw. entsprechend unseren Vermutungen über unsere Handlungsmöglichkeiten (Kirsch et al. 2014). Der Sinn einer solchen Skalierung könnte darin liegen, Überbeanspruchungen oder Gefahren zu vermeiden. Wenn man generell oder momentan keine hohe Sprungkraft hat, kann es sinnvoll sein, einen Bach als unüberwindlich breit zu sehen, anstatt zu versuchen, ihn zu überspringen und hineinzufallen (kritische Diskussion in Firestone 2013).

Zusammengenommen gibt es also zahlreiche Hinweise dafür, dass die durch das lineare Modell unterstellte unidirektionale Wirkungsrichtung von der Wahrnehmung zur Motorik, aber nicht umgekehrt, so nicht haltbar ist. Was wir als Handlung planen, beeinflusst umgekehrt, wie wir unsere Welt wahrnehmen.

22.5 Ziele bedingen Handlungen, nicht Reize

Wir können den im linearen Stadienmodell unterstellten Wirkungszusammenhang zwischen Reizen und Reaktionen noch grundsätzlicher als in Bezug auf die Wirkungsrichtung hinterfragen: Ist es denn überhaupt richtig anzunehmen, dass Reize Reaktionen auslösen? Die Antwort ist Ja, aber nur in wenigen Ausnahmen. Einfache Reflexreaktionen lassen sich durch bestimmte Reize auslösen. Ein Luftstoß auf das Auge beispielsweise führt zwangsläufig dazu, dass wir blinzeln, ob wir wollen oder nicht. In diesen Fällen sind die aus der Physiologie entlehnten Reiz-Reaktions-Modelle des menschlichen Verhaltens angemessen. Aber in praktisch allen anderen Fällen ist das menschliche Verhalten nicht reizgetrieben, schon gar nicht in einer Wahlreaktionsaufgabe. Die Darbietung eines bestimmten Buchstabens auf einem Bildschirm löst im Regelfall kein Blinzeln aus. Eine Versuchsperson kann zwar das Ziel haben, bei Darbietung eines bestimmten Buchstabens zu blinzeln; dann sieht es oberflächlich so aus, als würde der Buchstabe dieses Verhalten auslösen. Bei genauerer Betrachtung unterscheiden sich diese willkürlichen von reflexartig ausgeführten Lidschlüssen aber in einer Reihe von Merkmalen, etwa in ihrer Abhängigkeit davon, ob die Personen gerade mit einer anderen mentalen Aufgabe beschäftigt sind oder nicht (Janczyk et al. 2014).

Selbst wenn Reize und Reaktion auf einer gemeinsamen Dimension überlappen (wie wir in ▶ Abschn. 22.3.1 gesehen haben), lösen diese Reize nicht einfach kompatible Reaktionen aus. Bietet man Versuchspersonen zum Beispiel Farbreize wie in Abb. 22.5 dar, gibt ihnen aber erst *danach* bekannt, auf welchen Farbreiz sie welche Taste drücken sollen, findet man keine Bahnung räumlich korrespondierender Tastendrücke (Valle-Inclán und Redondo 1998). Unter diesen Bedingungen können die Versuchspersonen erst nach Darbietung der Reize das Ziel ausbilden, auf die Reize in bestimmter Weise zu antworten.

Auch wenn es in Stadienmodellen nicht großartig thematisiert wird, würden diese Ansätze nicht bestreiten, dass Ziele für die Bearbeitung einer Wahlreaktionsaufgabe eine gewisse Rolle spielen. Ohne dass die Versuchsperson das Ziel hat, dem Versuchsleiter zu helfen, indem sie ins Labor kommt und die Instruktion befolgt, gäbe es keine einzige Reaktion. Entscheidend ist aber, dass man buchstäblich jede einzelne Verhaltensäußerung, jeden einzelnen Tastendruck in einer Wahlreaktionsaufgabe als Handlung begreifen kann, die durch je bewegungsspezifische Ziele bedingt ist.

Mit anderen Worten, die sogenannten Reaktionen in Wahlreaktionsexperimenten sind zielgerichtete Handlungen, auch wenn das Ziel zugegebenermaßen meistens nur darin besteht, eine bestimmte Taste zu drücken (Prinz 1998). Diese Betrachtung legt ein ganz anderes Bedingungsgefüge menschlichen Verhaltens nahe. Reize sind (außer bei unbedingten Reflexen) nicht direkt verantwortlich für das Verhalten. Sie sind allenfalls eine freund-

liche Erinnerung an die Versuchsteilnehmer, ein bestimmtes Ziel zu verfolgen. Verantwortlich für das ausgeführte Verhalten ist das Ziel, das der Akteur damit erreichen will. Ein solches Ziel kann auch ohne einen offensichtlichen Stimulus in der Umwelt existieren. Wenn dem so ist, dann rückt die Frage, wie Menschen es schaffen, zielgerichtet zu agieren, viel stärker in den Mittelpunkt als die Frage, wie sie auf Reize reagieren.

22.6 Einheit von Wahrnehmung und Handlung

Wenn nun, wie wir gesehen haben, einiges dafür spricht, dass Wahrnehmung und Handlungsplanung nicht separiert, sondern im Gegenteil eng verzahnt operieren, was sind dann theoretische Alternativen zum linearen Modell der Informationsverarbeitung? In der Literatur sind hierzu zwei Extrempositionen formuliert worden.

22.6.1 Motorische Wahrnehmungstheorien

Die erste Position ist, dass alle mentalen Repräsentationen, einschließlich derjenigen, die für Wahrnehmungsvorgänge genutzt werden, ein *motorisches* Format besitzen. Das ist die Grundidee motorischer Wahrnehmungstheorien. Ein Beispiel ist die Sprachwahrnehmungstheorie von Liberman und Mattingly (1985). Die Annahme ist, dass wir Sprachsignale verstehen, indem wir sie intern imitieren, also nachsprechen. Erst die Überführung des Gehörten in ein motorisches Format erlaubt die Identifikation des Gesprochenen. Eine ähnliche Theorie im Bereich der visuellen Wahrnehmung ist die Scanpath-Theorie von Noton und Stark (1971). Die Theorie nimmt im Kern an, dass wir Objekte wiedererkennen, indem wir sie in vergleichbarer Weise mit den Augen „behandeln", d. h. mit den Augen abtasten, wie wir es beim ersten Betrachten desselben Objekts getan haben. Ein visuelles Objekt wird also durch die motorischen Kommandos gespeichert und wiedererkannt, die für das Abtasten des Objekts mit den Augen genutzt werden. Motorische Wahrnehmungstheorien haben in der Forschung lange Zeit keinen sehr starken Anklang gefunden. In Untersuchungen zur ästhetischen Wirkung visueller Reize ist die Grundidee aber in jüngerer Zeit wieder aufgenommen worden (Topolinski 2010).

22.6.2 Ideomotorik

Die zweite theoretische Alternative ist die Annahme, dass alle mentalen Repräsentationen, einschließlich derjenigen, die für die Handlungsplanung genutzt werden, ein *perzeptuelles* Format besitzen (▶ Kap. 21). Das ist die Grundannahme des sogenannten ideomotorischen Ansatzes (Überblick in Shin et al. 2010; Stock und Stock 2004). Dieser Ansatz hat in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erhalten, weil er versucht, das in ▶ Abschn. 22.5 angesprochene Problem zu lösen: Wie werden Menschen in die Lage versetzt, zielgerichtet zu agieren, anstatt auf Reize zu reagieren? Daher wollen wir diesen Ansatz etwas ausführlicher besprechen.

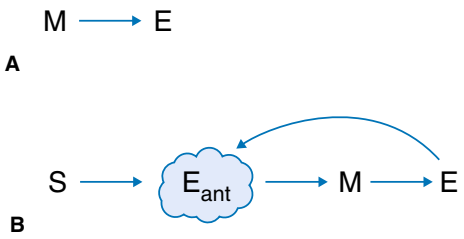


Abb. 22.12 Ideomotorische Handlungskontrolle. (**A**) Menschen erlernen Assoziationen zwischen motorischen Mustern (M) und sensorischen Effekten (E). (**B**) In der Handlungsplanung werden angestrebte Effekte (d. h. Ziele) antizipiert (E_{ant}); sie aktivieren die mit ihnen assoziierten motorischen Muster. Stimuli (S) können als Abrufhinweise für bestimmte Effekterinnerungen dienen. (In Anlehnung an Prinz 1998)

Es gibt unterschiedliche Formulierungen des Ansatzes (Harleß 1861; vgl. auch Pfister und Janczyk 2012; Greenwald 1970; Hoffmann 1993; Hommel et al. 2001; Prinz 1990). Die gemeinsame Grundidee ist aber verblüffend einfach (Abb. 22.12). Um bestimmte Zielzustände herstellen zu können, müssen wir zunächst durch Selbstbeobachtung erlernen, welche sensorischen Effekte unser Verhalten erzeugt. Andernfalls könnten wir uns höchstens zufällig bewegen und hoffen, dass das eintritt, was wir wollen. Sobald aber bestimmte motorische Muster konsistent bestimmte sensorische Effekte nach sich ziehen, werden diese Effekte an diejenigen motorischen Äußerungen gekoppelt, die sie verursachen. Diese Motorik-Effekt-Assoziationen sind, so die Annahme, in beide Richtungen aktivierbar. Das ist die Grundlage zielgerichteten Verhaltens. Es genügt dann nämlich, mentale Repräsentationen bestimmter Effekte zu aktivieren, sei es durch Wahrnehmung oder Vorstellung dieser Effekte, damit diejenigen motorischen Muster abgerufen werden, die an diese Effekte gekoppelt sind. Die Antizipation sensorischer Effekte reaktiviert also diejenigen Körperbewegungen, die diese Effekte erfahrungsgemäß erzeugen. Stimuli, wie sie in Wahlreaktionsaufgaben verwendet werden, sind aus dieser Perspektive Abrufhinweise für Effektantizipationen.

Diese Grundstruktur ist vermutlich nicht sehr strittig. Die ideomotorischen Ansätze gehen aber noch einen Schritt weiter. Sie nehmen nämlich an, dass Körperbewegungen einzig und allein in Form ihrer sensorischen Effekte gespeichert sind. Es gibt daher gar keinen anderen Weg, den Körper willentlich zu bewegen als durch die Antizipation der sensorischen Bewegungseffekte. Wir können also nicht direkt unsere Muskeln ansteuern, sondern nur indirekt durch Erinnerung der Effekte, die wir damit erzeugen. Man darf dabei nicht übersehen, dass wir wahrnehmbare Veränderungen nicht nur in der Umwelt, sondern auch an unserem Körper erzeugen. Wir sehen und fühlen zum Beispiel, wie sich unsere Hand bewegt. Diese körperbezogenen Effekte können ebenfalls genutzt werden, Körperbewegungen zu rekrutieren (Pfister et al. 2014a). Das ist allerdings eher die Ausnahme, weil wir uns selten bewegen, nur um unsere eigenen Körperbewegungen wahrzunehmen. Meistens geht es darum, Veränderungen außerhalb unseres Körpers zu bewirken: Wir drücken eine bestimmte Taste, um einen Buchstaben auf einem Bildschirm einzufügen, neigen eine Flasche, um einen Schluck Wasser in ein Glas zu schütten, oder reichen jemandem die Hand zum Gruß, damit er oder sie uns ebenfalls die Hand gibt. In solchen Fällen

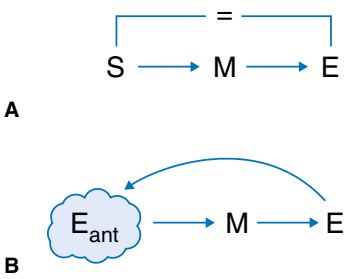


Abb. 22.13 Motorische Muster werden gebahnt durch die Wahrnehmung (Induktion; **A**) oder Vorstellung (Antizipation; **B**) von Handlungseffekten oder effektähnlichen Stimuli

bahnen Antizipationen der angestrebten Effekte außerhalb des Körpers motorische Muster, die diese Effekte erzeugen.

Der ideomotorische Ansatz ist für unser Thema, die Beziehung von Wahrnehmung und Handlung, von zentraler Bedeutung. Die Annahme ist, dass Handlungen in Form ihrer wahrnehmbaren Effekte mental repräsentiert sind und über die Antizipation der Effekte aufgerufen werden. Wahrnehmung und die Bereitstellung von Körperbewegungen beruhen auf denselben perzeptuellen Repräsentationen (Common-Coding-Prinzip; Prinz 1990; Hommel et al. 2001). Handlungen sind letztlich Wahrnehmungen, die noch werden sollen.

Bewegungsbahnung durch Induktion

Für die grundsätzliche Angemessenheit dieser Überlegung spricht eine Reihe von Beobachtungen. Zunächst einmal „induziert" die Wahrnehmung von potenziellen Handlungseffekten diejenigen motorischen Muster, die diese Effekte normalerweise erzeugen (Abb. 22.13). Der wohl unmittelbarste Effekt einer Bewegung ist die Wahrnehmung der Bewegung selbst. Insofern ist die Neigung des Menschen, die Körperbewegungen anderer Menschen zu imitieren, ein Induktionsphänomen (Heyes 2011). Motorische Muster werden aber auch durch die Wahrnehmung körperferner Effekte oder von Reizen, die ihnen stark ähneln, erleichtert. Das bereits dargestellte Phänomen der Reiz-Reaktions-Kompatibilität lässt sich in dieser Richtung re-interpretieren. Warum ist es leichter, auf einen links präsentierten Farbreiz mit einem linken anstatt rechten Tastendruck zu antworten? Das ist aus ideomotorischer Perspektive so, weil ein linker visueller Reiz stärker den sensorischen Effekten eines linken Tastendruckes wie z. B. dem taktilen Gefühl des linken Zeigfingers oder dem Klickgeräusch der linken Taste entspricht als den sensorischen Effekten eines rechten Tastendruckes. Sobald die Versuchspersonen mit einem linken Tastendruck ein auffälliges Ereignis auf ihrer rechten Seite erzeugen (z. B. dort eine Lampe einschalten), erleichtern plötzlich rechte Reize linke Tastendrücke (Hommel 1993). Es ist also die Übereinstimmung zwischen dem Reiz und den durch Körperbewegungen verursachten Effekten entscheidend dafür, welche Reize welche Körperbewegungen erleichtern. Haben Personen erfahren, dass ein Tastendruck einen bestimmten Ton erzeugt, neigen sie dazu, diesen Tastendruck auszuführen, wenn sie den Ton später hören (Elsner und Hommel 2001). Induktionsphänomene zeigen, dass Körperbewegungen an praktisch beliebige, hinreichend verlässlich eintretende Veränderungen gekoppelt werden können und die Darbietung von Effekten die an die Effekte gekoppelten Bewegungen aktiviert.

Bewegungsbahnung durch Antizipation

Die ideomotorische Hypothese macht eine noch weitergehende Annahme, nämlich dass Bewegungen durch die Antizipation solcher Effekte rekrutiert werden (müssen). Auch für diese Annahme gibt es Indizien, sogenannte Antizipationseffekte (Kunde 2006). Eigenschaften sensorischer Bewegungseffekte wirken sich nämlich selbst dann auf den Zeitpunkt und die Art der Bewegungsausführung aus, wenn es vor der Bewegung keinen effektähnlichen Stimulus gab und die Effekte erst durch die Bewegung erzeugt werden. Bewegungen werden beispielsweise schneller produziert, wenn sie verlässlich zu Effekten führen, die zur Bewegung (bzw. ihren körperbezogenen Effekten) kompatibel anstatt inkompatibel sind. Eine Taste kann man schneller drücken, wenn man damit eine Lampe auf derselben statt gegenüberliegenden Seite einschaltet (Pfister und Kunde 2013); es fällt leichter, ein Objekt kräftig zu drücken, wenn man damit einem lauten anstatt leisen Ton produziert (Kunde et al. 2004) und Bewegungen werden etwas verzögert begonnen, wenn man damit einen verzögerten anstatt unmittelbaren Ton erzeugt (Dignath et al. 2014). Zur Erklärung solcher Einflüsse muss man annehmen, dass die Effekte schon vor der Bewegungsausführung antizipiert werden, sonst könnten sie keine Bewegungen verändern, deren Resultat sie erst sein werden.

22.7 Vermittlungsversuche zwischen sensomotorischen und ideomotorischen Ansätze

Wir haben das lineare Modell der Informationsverarbeitung bislang sehr kritisch beleuchtet. Die drei Kritikpunkte waren, dass die strikte Separierung von Wahrnehmung und Handlung oft nicht sehr plausibel erscheint, dass das Modell die Rolle von Reizen über- und die von Zielen unterbewertet und keine Rückwirkung der Handlungsplanung auf die Wahrnehmung vorsieht. Aber ist das Modell damit vollkommen wertlos? Das anzunehmen, würde bedeuten, das Kind mit dem Bad auszuschütten. Sofern man sich der Beschränkungen sensomotorischer Ansätze im Klaren ist, können diese Ansätze noch immer als eine grobe Annäherung an neuartige Phänomene dienen. Es macht vermutlich mehr Sinn, darüber nachzudenken, ob und wie sich sensomotorische und ideomotorische Ansätze kombinieren lassen.

An einigen Punkten sind solche Integrationsversuche durchaus möglich. Wenn beispielsweise ideomotorische Ansätze annehmen, dass Handlungen durch die Antizipation ihrer sensorischen Effekte ausgewählt werden, dann liegt es nahe zu vermuten, dass dort, wo Stadienmodelle eine „Reaktionsauswahl" annehmen, die Antizipation sensorischer Effekte erfolgt. Das lässt sich beispielsweise mit der *Locus-of-Slack-Methode* (▶ Kap. 18) prüfen. Untersuchungen in dieser Richtung deuten tatsächlich auf eine zeitliche und vermutlich auch funktionelle Überlappung von Reaktionsauswahl und Antizipation von Handlungseffekten hin (Paelecke und Kunde 2007). Stadienmodelle nehmen weiterhin

Zur Vertiefung 22.3

Imitation aus Sicht des Imitators und des Modells

Menschen neigen dazu, die Handlungen anderer Personen zu imitieren (Brass et al. 2001; Heyes 2011). Aber warum ist das so? Zum Teil beruht dies auf angeborenen Beobachtungs-Produktions-Routinen. Neugeborene neigen nämlich schon kurze Zeit nach der Geburt dazu, auf das Herausstrecken der Zunge eines Modells mit dem Herausstrecken der eigenen Zunge zu antworten (Meltzoff und Moore 1977). Dieses Verhalten kann kaum auf Lernerfahrung beruhen, denn die Neugeborenen müssen eine Korrespondenz zwischen der Mimik des Modells und ihrer eigenen Mimik, die sie allenfalls fühlen, aber nicht sehen können, herstellen. Die Imitation anderer Bewegungsmuster dürfte aber das Ergebnis eines Lernprozesses sein. Durch Selbstbeobachtung erlernen wir schon am Anfang unseres Lebens, wie es aussieht, wenn wir unsere Arme oder Beine bewegen oder später die Beine beim Sitzen übereinanderschlagen. Dieselben Handlungen bei anderen Personen zu sehen, bedeutet, visuelle Effekte wahrzunehmen, die wir in ähnlicher Form durch eigene Körperbewegungen produzieren können. Dies induziert entsprechende Körperbewegungen beim Betrachter (◘ Abb. 22.13). Angenommen, wir würden mit unseren Körperbewegungen andere visuelle Effekte produzieren, als wir es gewöhnlich tun, z. B. wenn wir bei der Bewegung eines Armes die Bewegung eines Fußes sehen. Dann müsste nach einiger Erfahrung mit dieser neuen Aktions-Effekt-Beziehung die Wahrnehmung einer Fußbewegung nicht mehr Fuß-, sondern Armbewegungen bahnen. Beobachtungen in dieser Richtung sind berichtet worden (Wiggett et al. 2011).

Wenn Menschen stark zur Imitation neigen, hat dies aber auch Konsequenzen für die Person, die imitiert wird. Imitation durch Sozialpartner ist nämlich eine vorhersehbare Verhaltenskonsequenz. Wer sich in Anwesenheit einer anderen Person bewegt, kann mehr oder weniger verlässlich erwarten, imitiert zu werden. Es gibt Hinweise darauf, dass wir vor Produktion einer Bewegung die Imitation des Gegenübers bereits antizipieren. So können Körperbewegungen schneller bereitgestellt werden, wenn diese Bewegungen vorhersehbar von einem Gegenüber mit gleichen anstatt ungleichen Bewegungen beantwortet werden (Pfister et al. 2013). Imitation ist also ein Phänomen, das nicht nur im Imitator abläuft, sondern auch Wirkungen bei demjenigen hinterlässt, der imitiert wird.

an, dass die Reaktionsauswahl ein dahingehend limitierter Vorgang ist, dass er nur für eine Reaktion erfolgen kann. Das verursacht Doppelaufgabenkosten, wenn wir versuchen, mehr als eine Handlung gleichzeitig zu spezifizieren (▶ Kap. 5). Diese Kosten sind oft größer, je „unähnlicher" die Reaktionen sind (Spijkers et al. 1997). Wenn nun die Reaktionsauswahl nichts weiter ist als die Antizipation der sensorischen Reaktionseffekte, dann sollten solche Doppelaufgabenkosten entscheidend davon abhängigen, wie ähnlich oder unähnlich die sensorischen Effekte der gleichzeitig geplanten Bewegungen sind. Auch hierfür gibt es Hinweise (Janczyk et al. 2009; Kunde et al. 2002).

22.8 Anwendungsbeispiele

Wir haben gesehen, dass einiges dafür spricht, dass die Handlungsplanung sensorische Codierungen verwendet, also Codierungen der angestrebten sensorischen Effekte. Diese Annahme eröffnet neuartige Perspektiven auf die Bewegungsplanung in Anwendungskontexten.

▪ Werkzeuggebrauch

Ein Beispiel ist der Gebrauch von Werkzeugen (▶ Kap. 19). Ein einfacher Hebel mit Drehpunkt, wie er z. B. in der minimal-invasiven Chirurgie eingesetzt wird, ist dadurch gekennzeichnet, dass die Bewegung der Werkzeugspitze gegenläufig zur Bewegung der Hand verläuft. Bewegt sich die Hand nach rechts, bewegt sich die Hebelspitze nach links (◘ Abb. 22.14). Werkzeugbewegung und Handbewegung sind beides wahrnehmbare Effekte derselben Körperbewegung, die räumlich inkompatibel zueinander sind. Obwohl man es subjektiv kaum empfindet, verursacht diese Inkompatibilität Kosten in Form einer verzögerten und stärker fehleranfälligen Planung solcher Werkzeugbewegungen (Müsseler et al. 2008), für die entsprechende Vorsichtsmaßnahmen erforderlich sind, etwa dahingehend, weitere mentale Belastungen zu vermeiden (Kunde et al. 2012).

▪ Mensch-Maschine-Interaktion

Auch die Interaktion mit Maschinen erfolgt letztlich dadurch, dass Nutzer Bewegungen ausführen, um damit etwas an der Maschine einzugeben oder anderweitig zu bewirken. Eine sehr häufige Eingabeoperation ist die Verwendung von Eingabetasten oder der Computermaus, um damit aktuell nicht sichtbare Inhalte eines Dokuments auf den Bildschirm zu holen. Auch die Ergonomie derartiger Eingabeoperationen ist dadurch bestimmt, dass die Bewegungsrichtung der Hand oder des Fingers (z. B. nach oben) mit der Bewegungsrichtung der dann eintretenden Bewegung auf dem Display (z. B. Text wandert nach oben) übereinstimmt, was aber in manchen Programmen nicht der Fall ist (Chen und Proctor 2013).

▪ Sportpsychologie

Wenn Bewegungen durch ihre sensorischen Effekte repräsentiert sind, dann lässt sich vermuten, dass die Bewegungssteuerung verbessert werden kann, indem man an Körperbewegungen bestimmte gut unterscheidbare und vorstellbare sensorische Effekte koppelt. In diese Richtung geht die Grundidee der sogenannten Sonifikation. Dabei werden komplexe Bewegungsabläufe, wie die Koordination von Arm- und Beinbewegungen beim Brustschwimmen, in auditive Signale umgewandelt (Effenberg und Mechling 1998).

22.9 Ausblick

Über den Zusammenhang von Wahrnehmung und Handlung nachzudenken, wird auch zukünftig eine wichtige Aufgabe für die Allgemeine Psychologie bleiben, denn sie zwingt uns dazu, mehrere mentale Fähigkeiten des Menschen gleichzeitig in den Blick zu nehmen. Insofern ist diese Betrachtung vielleicht eine Art Prophylaxe gegen die nachvollziehbare Tendenz, allgemeinpsychologische Gegenstände immer stärker auf einzelne Untersuchungsparadigmen zu beschränken (▶ Kap. 1).

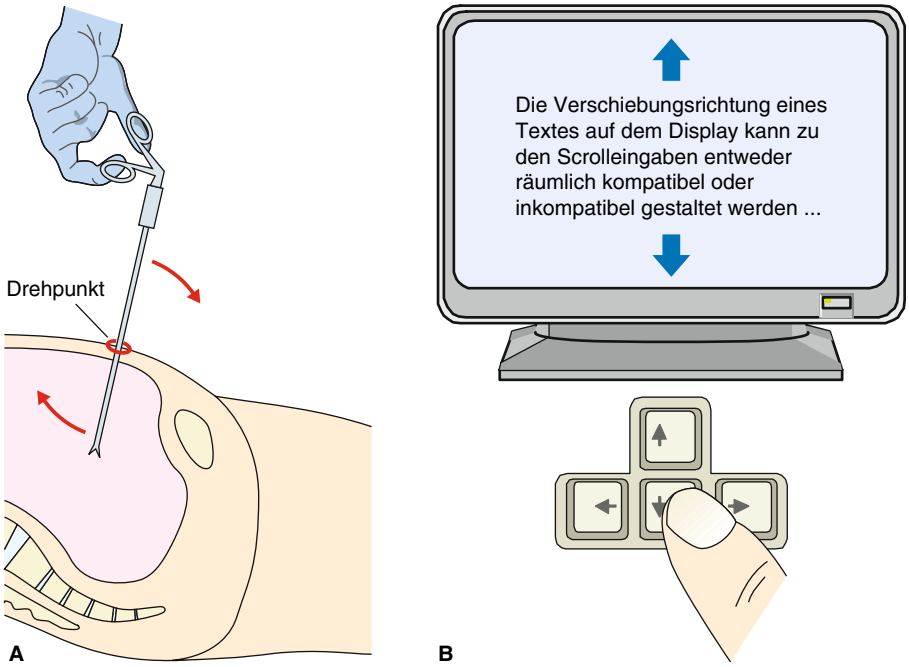


Abb. 22.14 (**A**) Der Drehpunkt bei einfachen Hebeln transformiert die körpernahen Bewegungen der Hand in räumlich entgegengesetzte Bewegungen des Werkzeugs. (**B**) Die Bildverschiebungen von Informationen auf einem Display können zu den manuellen Eingaben kompatibel oder inkompatibel sein

Viele der in diesem Kapitel berichteten Untersuchungen befassen sich mit der Wahrnehmung relativ einfach strukturierter Reize und der Ausführung relativ einfach strukturierter Handlungen. Es ist zu erwarten, dass sich die Fragen, die wir zum Zusammenhang von Handlung und Wahrnehmung stellen, auf andere Wahrnehmungs- und Handlungsereignisse erweitern werden.

Dies gilt insbesondere für den in ▶ Abschn. 22.6.2 besprochenen ideomotorischen Ansatz. Er nimmt an, dass sensorische Effekte an motorische Muster gekoppelt werden. Daher haben auch nur sensorische Effekte das Potenzial, diese Muster zu reaktivieren. Wir erzeugen aber mit unserem Verhalten nicht nur sensorische Veränderungen, sondern auch affektive und soziale Konsequenzen. Ein Akkord auf einem Klavier ist nicht nur durch sein Frequenzspektrum beschreibbar, sondern er klingt auch „schön". Wenn wir jemanden anlächeln, erzeugt dies konkrete Konsequenzen bei unserem Sozialpartner, etwa dahingehend, dass das Lächeln erwidert wird, aber auch abstrakte Konsequenzen, etwa einer angenehmen Gesprächsatmosphäre. Auf theoretischer Ebene ist weiter zu klären, wie abstrakte und konkrete Ziele bei der Handlungskontrolle ineinandergreifen. Überlegungen dazu sind schon von Baars (1993) formuliert worden. Baars geht davon aus, dass Ziele auf verschiedenen Ebenen einer Zielhierarchie mit aufsteigendem Abstraktionsgrad koexistieren. Konkretes Verhalten können aber nur anschauliche Ziele auf der untersten Ebene aktivieren. Solche anschaulichen Ziele können wir uns grundsätzlich ins Bewusstsein rufen.

Auf empirischer Ebene gilt es zu untersuchen, nach welchen Gesetzmäßigkeiten Beziehungen zwischen Verhalten und affektiven oder sozialen Konsequenzen erworben werden und inwieweit sie unser Verhalten nicht doch direkt kontrollieren (Eder et al. 2014; Pfister et al. 2013; Sato und Itakura 2013; Wolpert et al. 2003). In diesem Zusammenhang wird auch die Rolle bewusster Effektrepräsentation zu klären sein. Wir sind uns zwar manchmal bewusst, welche sensorischen Effekte wir durch unser Verhalten bewirken wollen, aber häufig sind wir es auch nicht und bewegen uns dennoch koordiniert. Nicht bewusst wahrnehmbare Handlungseffekte sind geeignet, die mit ihnen gekoppelten Handlungen (Kunde, 2004) und das Gefühl von Handlungskontrolle zu induzieren (Linser und Goschke 2007). Dies wirft die Frage danach auf, welche Funktion bewusste gegenüber unbewussten Zielrepräsentation bei der Handlungskontrolle haben.

Weitere Spezifizierungen werden sich auch aus der Modellierung sensomotorischer Lernvorgänge ergeben (Herbort und Butz 2012). Neuere empirische Arbeiten weisen schon jetzt darauf hin, dass assoziatives Lernen nicht der einzige Prozess zum Erwerb von Verhaltens-Effekt-Beziehungen ist (Pfister et al. 2014b). Diese und andere Entwicklungen zeigen, dass die alte Frage nach der Interaktion von Wahrnehmung und Handlung nicht an Aktualität verloren hat. Ganz im Gegenteil, sie rückt immer stärker in den Fokus verschiedener Forschungsprogramme, denen gemeinsam ist, dass sie beide Themen nicht separiert, sondern vielmehr als Einheit betrachten.

22.10 Weiterführende Informationen

Kernsätze

- Lineare Stadienmodelle nehmen an, dass Reize durch eine Sequenz von separierten Verarbeitungsmodulen in Reaktionen überführt werden.
- Stadienmodelle haben zu ausgefeilten Methoden der mentalen Chronometrie geführt, die darauf abzielen, die Anzahl und Dauer von Verarbeitungsprozessen in Reaktionsaufgaben zu bestimmen.
- Wenn Reize und Reaktion in Reaktionsaufgaben auf einer gemeinsamen Dimension variieren, kann im Regelfall schneller und genauer reagiert werden, wenn die geforderte Reaktion dieselbe Ausprägung auf der Dimension besitzt

wie der Reiz. Solche Reiz-Reaktions-Kompatibilitätsphänomene erfordern Erweiterungen des linearen Modells dahingehend, dass die Wahrnehmung von Reizen direkt merkmalsüberlappende Reaktionen aufrufen kann.

- Visuelle Informationen werden in zwei funktionell und neuroanatomisch getrennt operierenden Verarbeitungswegen verarbeitet: einem ventralen Pfad, aus dem subjektiv erlebte Wahrnehmungseindrücke hervorgehen, und einem dorsalen Pfad, der der unmittelbaren Kontrolle objektorientierter Handlungen dient.
- Sofern Betrachter die Absicht haben, auf Reize in spezifischer Weise zu reagieren, bahnen diese Reize die ihnen zugewiesenen motorischen Reaktionen, ohne dass man ihre Anwesenheit bemerkt. Unter geeigneten Bedingungen bedarf es also keiner bewussten Übersetzung von Reizen in Reaktionen.
- Die Beziehung von Wahrnehmung und Handlung ist keine Einbahnstraße. Handlungsplanung beeinflusst die Wahrnehmung mehrdeutiger Reize.
- Die Planung einer Handlung kann die Sensitivität des Betrachters für vorhersehbare sensorische Effekte oder handlungsähnliche Ereignisse dämpfen.
- Wie wir räumliche Aspekte der Umwelt, wie Steigungen oder Entfernungen, wahrnehmen, scheint von den aktuellen Handlungsmöglichkeiten des Betrachters abzuhängen.
- Motorische Wahrnehmungstheorien postulieren, dass Reizinformationen in einer Form umgewandelt und gespeichert werden, die die Kontrolle von Körperbewegungen erlaubt (motorische Codierung).
- Ideomotorische Ansätze postulieren, dass Handlungen in Form ihrer sensorischen Effekte gespeichert und reaktiviert werden. Die Wahrnehmung von Effekten oder ihre Vorstellung ruft die motorischen Muster auf, die diese Effekte erzeugen.

Schlüsselbegriffe

Antizipationseffekte (*anticipation effect*) Einflüsse auf das Verhalten, die auf der mentalen Vorwegnahme von Ereignissen vor deren realem Eintreten beruhen.

Blindsicht (*blindsight*) Neuropsychologisches Syndrom, bei dem Patienten nach Schädigungen des Okzipitallappens trotz Verlust der bewussten visuellen Wahrnehmung Handlungen an visuellen Reizen ausrichten können.

Common Codes (*common codes*) Die Annahme, dass die Prozesse der Wahrnehmung und Handlungsplanung auf denselben kognitiven Repräsentationen beruhen und sich so direkt wechselseitig beeinflussen.

Doppelaufgabe (*dual task*) Situation, in der Menschen mehr als eine Aufgabe gleichzeitig bewältigen sollen. Im Regelfall finden sich Leistungseinbußen in mindestens einer der Aufgaben verglichen mit der alleinigen Ausführung der Aufgaben.

Dorsaler Pfad (*dorsal path*) Verarbeitungsstrang innerhalb des visuellen Systems, der diejenigen visuellen Informationen zur Verfügung stellt, die für die Ausführung objektorientierter Handlungen notwendig sind.

Element-Level-Kompatibilität (*element level compatibility*) Übereinstimmung bestimmter Merkmale von Reizen und darauf erforderlichen Reaktionen auf einer gemeinsamen Dimension.

Efferenzkopie (*efference copy*) Kopie des efferenten Signals, die bei der Ausführung einer Körperbewegung erstellt wird.

Handlung (*action*) Zielgerichtetes Verhalten.

Objektagnosie (*object agnosia*) Neuropsychologisches Syndrom bei dem nach Hirnschädigung die Identifikation von Objekten gestört ist.

Set-Level-Kompatibilität (*set level compatibility*) Die Tatsache, dass Reize und Reaktionen in Wahlreaktionsaufgaben auf gemeinsamen Dimensionen variieren.

Spiegelneurone (*mirror neurons*) Neurone im prämotorischen Cortex von Primaten, die bei der Ausführung und Beobachtung von Handlungen aktiv werden.

Ventraler Pfad (*ventral path*) Verarbeitungsstrang innerhalb des visuellen Systems, der für die visuelle Identifikation von Objekten erforderlich ist.

Ziel (*goal*) Ein Zustand, dessen Erreichung anstrebt wird.

Weiterführende Literatur

Hoffmann J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung.* Göttingen: Hogrefe. (Hier wird die Theorie einer antizipativen Verhaltenskontrolle entwickelt, die von einer engen Verzahnung zwischen Handlung und Wahrnehmung ausgeht.)

Hommel, B. & Nattkemper, D. (2011). *Handlungspsychologie.* Springer Berlin Heidelberg. (Handliches, aber dennoch umfassendes Lehrbuch zum Thema Handlung.)

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 849-878. (Eine einflussreiche Theorie zur Koppelung von Handlung und Wahrnehmung durch gemeinsame Repräsentationen. Im ersten Teil außerdem ein schöner Überblick über die Ideengeschichte zum Thema Handlung und Wahrnehmung.)

Prinz, W., Beisert, M. & Herwig, A. (Eds.). (2013). *Action science: Foundations of an emerging discipline.* MIT Press. Cambridge London. (Aktuelle Beiträge zu vielen hier nur angerissenen Themen wie Imitation, Embodiment, Werkzeuggebrauch.)

Shin, Y. K., Proctor, R. W. & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin, 136*(6), 943-974. (Überblick über die vielfältigen empirischen Forschungsstränge zur Ideomotorik.)

■ **Danksagung**

Ich danke Gisa Aschersleben für das Lesen des Manuskripts.

Literatur

Aglioti, S., Desouza, J. F. X., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, *5*, 679–685.

Ansorge, U., & Wühr, P. (2004). A response-discrimination account of the Simon effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*, 365–377.

Ansorge, U., Kunde, W., & Kiefer, M. (2014). Unconscious vision and executive control: How unconscious processing and conscious action control interact. *Consciousness and Cognition*, *27*(27), 268–287.

Baars, B. J. (1993). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.

Baess, P., Horváth, J., Jacobsen, T., & Schröger, E. (2011). Selective suppression of self-initiated sounds in an auditory stream: an ERP study. *Psychophysiology*, *48*, 1276–1283.

Bhalla, M., & Proffitt, D. R. (1999). Visual-motor recalibration in geographical slant perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*(4), 1076–1096.

Blakemore, S. J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself. *Neuroreport*, *11*, 11–16.

Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta psychologica*, *106*(1), 3–22.

Bruno, N., & Franz, V. H. (2009). When is grasping affected by the Müller-Lyer illusion? A quantitative review. *Neuropsychologia*, *47*, 1421–1433.

Cardoso-Leite, P., Mamassian, P., Schutz-Bosbach, S., & Waszak, F. (2010). A New Look at Sensory Attenuation: Action-Effect Anticipation Affects Sensitivity, Not Response Bias. *Psychological Science*, *21*(12), 1740–1745.

Chen, J., & Proctor, R. W. (2013). Response-effect compatibility defines the natural scrolling direction. *Human Factors*, *55*, 1112–1129.

Daniel, D. (1991). *Consciousness explained*. Boston, MA: Little Brown.

Dehaene, S., Naccache, L., Le Clec, H. G., Koechlin, E., Mueller, M., Dehaene-Lambertz, G., & Le Bihan, D. (1998). Imaging unconscious semantic priming. *Nature*, *395*, 597–600.

Dennett, D. C. (1991). *Consciousness explained*. Boston: Little, Brown.

Desantis, A., Roussel, C., & Waszak, F. (2014). The temporal dynamics of the perceptual consequences of action-effect prediction. *Cognition*, *132*(3), 243–250.

Descartes, R. (1664). *Über den Menschen*.Lateinische Erstausgabe. Lugdunum Batavorum.

Dignath, D., Pfister, R., Eder, A. B., Kiesel, A., & Kunde, W. (2014). Representing the hyphen in action-effect associations: Automatic acquisition and bidirectional retrieval of action-effect intervals. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, *40*, 1701.

Donders, F. C. (1868). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, *30*, 412–431.

Eder, A. B., Rothermund, K., De Houwer, J., & Hommel, B. (2014). Directive and incentive functions of affective action consequences: An ideomotor approach. *Psychological Research*, *79*, 630.

Effenberg, A. O., & Mechling, H. (1998). Bewegung hörbar machen – Warum? Zur Perspektive einer systematischen Umsetzung von Bewegung in Klänge. *Psychologie und Sport*, *5*(1), 29–38.

Elsner, & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*(1), 229–240.

Firestone, C. (2013). How „paternalistic" is spatial perception? Why wearing a heavy backpack doesn't – and couldn't – make hills look steeper. *Perspectives on Psychological Science*, *8*(4), 455–473.

Fitts, P. M., & Seeger, C. M. (1953). S-R compatibility: Spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, *46*, 199–210.

Ganel, T., & Goodale, M. A. (2003). Visual control of action but not perception requires analytical processing of object shape. *Nature*, *426*, 664–667.

Goldstein, B. (1997). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum.

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neuroscience*, *15*, 20–25.

Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature*, *349*(6305), 154–156.

Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control – With special reference to ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, *77*, 73–99.

Harleß, E. (1861). Der Apparat des Willens. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, *38*(1861), 50–73.

Herbort, O., & Butz, M. V. (2012). Too good to be true? Ideomotor theory from a computational perspective. *Frontiers in Psychology*, *3*, 494.

Heyes, C. (2011). Automatic imitation. *Psychological Bulletin*, *137*(3), 463–483.

Hickok, G. (2009). Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(7), 1229–1243.

Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.

Holst, E. von, & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften*, *37*, 464–476.

Hommel, B. (1993). Inverting the Simon effect by intention: Determinants of direction and extent of effects of irrelevant spatial information. *Psychological Research*, *55*, 270–279.

Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): A framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*, 849–878.

Janczyk, M., & Kunde, W. (2010). Does dorsal processing require central capacity? More evidence from the PRP paradigm. *Experimental Brain Research*, *203*, 89–100.

Janczyk, M., & Kunde, W. (2012). Visual processing for action resists similarity of relevant and irrelevant object features. *Psychonomic Bulletin and Review*, *19*, 412–417.

Janczyk, M., Skirde, S., Weigelt, M., & Kunde, W. (2009). Visual and tactile action effects determine bimanual coordination performance. *Human Movement Science*, *28*, 437–449.

Janczyk, M., Pfister, R., Wallmeier, G., & Kunde, W. (2014). Exceptions to the PRP effect? A comparison of prepared and unconditioned reflexes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *40*(3), 776–786.

Kirsch, & Kunde, W. (2013). Visual near space is scaled to parameters of current action plans. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(5), 1313–1325.

Kirsch, W., Königstein, E., & Kunde, W. (2014). Action feedback affects the perception of action-related objects beyond actual action success. *Frontiers in Movement Science and Sport Psychology*, *5*, 17.

Kohler, E., Keysers, C., Umilta, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, *297*(5582), 846–848.

Kornblum, S., Hasbroucq, T., & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus – response compatibility – A model and taxonomy. *Psychological Review*, *97*, 253–270.

Külpe, O. (1893). *Grundriss der Psychologie, auf experimenteller Grundlage dargestellt*. Leipzig: W. Engelmann.

Kunde, W. (2004). Response priming by supraliminal and subliminal action effects. *Psychological Research*, *68*(2–3), 91–96.

Kunde, W. (2006). Antezedente Effektrepräsentationen in der Verhaltenssteuerung. *Psychologische Rundschau*, *57*(1), 34–42.

Kunde, W., & Stöcker, C. (2002). A Simon effect for stimulus – response duration. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55A*, 581–592.

Kunde, W., & Wühr, P. (2004). Actions blind to conceptually overlapping stimuli. *Psychological Research*, *68*(4), 199–207.

Kunde, W., Hoffmann, J., & Zellmann, P. (2002). The impact of anticipated action effects on action planning. *Acta Psychologica*, *109*(2), 137–155.

Kunde, W., Elsner, K., & Kiesel, A. (2007). No anticipation – no action: the role of anticipation in action and perception. *Cognitive Processing*, *8*, 71–78.

Kunde, W., Koch, I., & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation, and execution of actions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *57*(1), 87–106.

Kunde, W., Skirde, S., & Weigelt, M. (2011). Trust my face: Cognitive factors of head fakes in sports. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *17*, 110–127.

Kunde, W., Pfister, R., & Janczyk, M. (2012). The locus of tool-transformation costs. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *38*(3), 703–714.

Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, *21*(1), 1–36.

Linser, K., & Goschke, T. (2007). Unconscious modulation of the conscious experience of voluntary control. *Cognition*, *104*(3), 459–475.

Martikainen, M. H., Kaneko, K. I., & Hari, R. (2005). Suppressed responses to self-triggered sounds in the human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, *15*(3), 299–302.

Mattes, S., Leuthold, H., & Ulrich, R. (2002). Stimulus-response compatibility in intensity-force relations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *55A*, 1175–1191.

Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, *198*(4312), 75–78.

Miller, J. (2006). Simon congruency effects based on stimulus and response numerosity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(2), 387–396.

Milner, A. D., & Goodale, M. A. (1995). *The visual brain in action*. New York: Oxford University Press.

Müsseler, J., & Hommel, B. (1997). Blindness to response-compatible stimuli. *Journal of Experimental Psycholology. Human Perception and Performance*, *23*, 861–872.

Müsseler, J., Kunde, W., Gausepohl, D., & Heuer, H. (2008). Does a tool eliminate spatial compatibility effects? *European Journal of Cognitive Psychology*, *20*(2), 211–231.

Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton.

Neumann, O. (1990). Direct parameter specification and the concept of perception. *Psychological Research*, *52*, 207–215.

Noton, D., & Stark, L. (1971). Scanpaths in eye movements during pattern perception. *Science*, *171*(3968), 308–311.

Paelecke, M., & Kunde, W. (2007). Action-effect codes in and before the central bottleneck: evidence from the psychological refractory period paradigm. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *33*(3), 627–644.

Pellegrino di, Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, *91*(1), 176–180.

Pfister, R., & Janczyk, M. (2012). Harleß'apparatus of will: 150 years later. *Psychological Research*, *76*(5), 561–565.

Pfister, R., & Kunde, W. (2013). Dissecting the response in response-effect compatibility. *Experimental Brain Research*, *224*(4), 647–655.

Pfister, R., Dignath, D., Hommel, B., & Kunde, W. (2013). It Takes Two to Imitate Anticipation and Imitation in Social Interaction. *Psychological Science*, *24*(10), 2117–2121.

Pfister, R., Janczyk, M., Gressmann, M., Fournier, L. R., & Kunde, W. (2014a). Good vibrations? Vibrotactile self-stimulation reveals anticipation of body-related action effects in motor control. *Experimental Brain Research*, *232*(3), 847–854.

Pfister, R., Pfeuffer, C. U., & Kunde, W. (2014b). Perceiving by proxy: Effect-based action control with unperceivable effects. *Cognition*, *132*(3), 251–261.

Poulet, J. F., & Hedwig, B. (2002). A corollary discharge maintains auditory sensitivity during sound production. *Nature*, *418*, 872–876.

Prinz, W. (1990). A common-coding approach to perception and action. In O. Neumann, & W. Prinz (Hrsg.), *Relationships between perception and action: Current approaches* (S. 167–201). Berlin: Springer.

Prinz, W. (1998). Die Reaktion als Willenshandlung. *Psychologische Rundschau*, *49*, 10–20.

Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(9), 661–670.

Sanders, A. F. (1980). Stage analysis of reaction processes. *Tutorials in motor behavior*, 331–354.

Sato, A. (2008). Action observation modulates auditory perception of the consequence of others' actions. *Consciousness and Cognition*, *17*(4), 1219–1227.

Sato, A., & Itakura, S. (2013). Intersubjective action-effect binding: Eye contact modulates acquisition of bidirectional association between our and others' actions. *Cognition*, *127*(3), 383–390.

Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, *136*(6), 943–974.

Simon, J. R. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, *81*, 174–176.

Spijkers, W., Heuer, H., Kleinsorge, T., & Loo, H. van der (1997). Preparation of bimanual movements with same and different amplitudes: Specification interference as revealed by reaction time. *Acta Psychologica*, *96*(3), 207–227.

Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, *30*, 276–315.

Stock, A., & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, *68*(2–3), 176–188.

Taylor, J. E. T., Witt, J. K., & Sugovic, M. (2011). When walls are no longer barriers: Perception of wall height in parkour. *Perception-London*, *40*(6), 757–780.

Thomaschke, R., Hopkins, B., & Miall, R. C. (2012). The planning and control model (PCM) of motorvisual priming: reconciling motorvisual impairment and facilitation effects. *Psychological Review*, *119*(2), 388–407.

Topolinski, S. (2010). Moving the Eye of the Beholder Motor Components in Vision Determine Aesthetic Preference. *Psychological Science*, *21*, 1220–1224.

Valle-Inclán, F., & Redondo, M. (1998). On the automaticity of ipsilateral response activation in the Simon effect. *Psychophysiology*, *35*(4), 366–371.

Weiskrantz, L. (1986). *Blindsight: A Case Study and Implications*. NewYork: Oxford University Press.

Wiggett, A. J., Hudson, M., Tipper, S. P., & Downing, P. E. (2011). Learning associations between action and perception: effects of incompatible training on body part and spatial priming. *Brain and cognition*, *76*(1), 87–96.

Witt, J. K. (2011). Action's effect on perception. *Current Directions in Psychological Science*, *20*(3), 201–206.

Wohlschläger, A. (2000). Visual motion priming by invisible actions. *Vision Research*, *40*, 925–930.

Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *358*, 593–602.

Serviceteil

Stichwortverzeichnis – 840

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017
J. Müsseler, M. Rieger (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie,* DOI 10.1007/978-3-642-53898-8

Stichwortverzeichnis

2 1/2-dimensionale Skizze 41

A

abergläubisches Verhalten 333, 350
Abruf gelernter Information 428
Abschirmungs-Überwachungs-Dilemma 297
Absicht 256, 304
Absichtsaufschubparadigma 269
Absichtsgedächtnis 306
Absichtsüberlegenheitseffekt 269, 304
absolute Wahrnehmungsschwelle 20, 35, 46
abstrakte Regeln 579
abstrakte Sprache 805
ACC 275
Achievement 638
Adaptation 45, 84, 97, 710, 755, 768
– motorische 755, 768
– sensomotorische 710
– sensorische 45
– visuomotorische 84, 97
Adaptationsphase 84
adaptive Werkzeugkiste 646, 652
additive Faktorenmethode 824
Ad-hoc-Kategorien 385, 392
Adjunkte (Syntax) 472
Affekt 186, 216
Affektbilanz 224
afferent 751, 768
Affix 443, 459
AGM-Theorie 553
Agnosie 170, 180
– visuelle 170, 180
Agrafie 457
Agrammatismus 457
Aha-Moment 597, 614
Ähnlichkeit 322, 359, 392
– von Objekten 359, 392
ähnlichkeitsbasierte Kategorisierungstheorien 359, 370, 392
– Kritik 370
Ähnlichkeitseffekt 629
Ähnlichkeitstheorie (ÄT) 117
Aktivierung 447, 459
– von Wortrepräsentationen 447, 459
ALCOVE 383
Alertness 106
Alexie 457
Allais-Paradox 627
Ambiguität 54, 63, 70, 477, 489, 521
– auditive 54, 63, 70
– semantische 489, 521
– syntaktische 477, 521
Amnesie 406, 709
Amusia 67
Amygdala 201, 230, 245
analoge Abbildung 610, 614
analoger Abruf 610, 614
analoger Transfer 609, 611
– neuronale Korrelate 611
analoges Lernen 710
Analogie 609
Anapher 521
Anaphernresolution 500
Anarthie 457
Änderung von Überzeugungen 576
Anfangszustand 589
anfechtbares Schließen 552, 579
A-nicht-B-Aufgabe 675
Anomie 457
Anreiz 224, 245
Anschlussmotiv 225, 235, 245
anteriorer cingulärer Cortex 161, 202, 275, 294, 304
– Funktionen 294
Antezedenz 521
Antizipation 832
Antizipationseffekt 665, 676, 698, 832, 835
Antworttendenz 37
Aphasie 457, 460
apperzeptive Agnosie 170
Appraisal 210, 216
Apraxie 760, 768
Aprosodie 457
Arbeitsgedächtnis 157, 176, 304, 402, 423, 429
Ärger-Management 215
Argumente (Syntax) 472
Argumentieren 534, 576
– logisches 534
– und Überzeugen 576
aristotelischer Syllogismus 543
Arousal 156
Artefakte (Kategorien) 375, 392
Artikulationsort 440
Artikulatoren 439, 459
Assoziationsbildung 319, 321
– Prinzipien 321
Assoziationscortex 760
– Schädigung 760
assoziative Agnosie 171
assoziative Bevorzugung 332, 350
assoziatives Lernen 320, 321, 328, 337, 340
– Mechanismen 337
– Rescorla-Wagner-Modell 340
ÄT (Ähnlichkeitstheorie) 117
Ataxie 768
Athetose 761
Atmosphärentheorie 547
attentionale Reorientierung 124
Attenuationstheorie der Aufmerksamkeit 108, 143
Attrahierungseffekt 629
Attribut 623, 652
– der Optionen 623
Attributersetzung 634
Attributgewicht 652
Audiometrie 70
auditive Ambiguität 54, 63, 70
auditive Aufmerksamkeit 56, 70
auditive Informationsverarbeitung 51
auditive Maskierung 69
auditive Multistabilität 63, 70
auditiver Cortex 55
auditiver Verarbeitungspfad 54
auditives sensorisches Gedächtnis 57
auditive Szenenanalyse 56, 60, 70
auditive Überlagerung 56, 70
Aufgaben-Cue 690, 698
Aufgabenkombinationen 132
Aufgabenkoordination 684
Aufgabenset 694
Aufgabenvorbereitung 690
Aufgabenwechsel 688, 698
Aufmerksamkeit 56, 70, 86, 87, 93, 103, 104, 105, 107, 108, 130, 132, 140, 143, 144, 145, 157
– Attenuationstheorie 108, 143
– auditive 56, 70
– endogene 86
– Filtertheorie 107, 144
– geteilte 132, 144
– neurophysiologische Wirkmechanismen 130
– räumliche 86
– selektive 104, 105, 145, 157
– supervidierende 140
– über Sinne hinweg 86, 93
– und multisensorische Integration 87
– und Performanz 132
Aufmerksamkeitsblinzeln 59, 121, 144, 168, 179
Aufmerksamkeitsfokus 730
Aufmerksamkeitskaperung 120
Aufmerksamkeitsorientierung 110, 126, 127
Aufmerksamkeitssteuerung 142
aufmerksamkeitstheoretische Ansätze 135
Aufsuchenmotivation 230, 245
Auge 16
– Verarbeitungspfade 16
Augenfolgebewegung 109
Aussagenlogik 536, 579
automatische Aktivationsausbreitung 165
automatische Bahnung 137
automatische Bewegung 756
automatische Imitation 786, 810
automatische Prozesse 139
automatische Verarbeitung 137, 144
automatische Verarbeitungsprozesse 157
Automatisierung 695, 730, 741
– motorische 730, 741
Automatizität 140
Autoshaping 332, 351
Axiomsverletzung 627

B

Babinski-Antwort 756, 768
Backpropagation 382
Bahnung 137, 165, 168, 179, 828
– automatische 137
– semantische 165, 168
– subliminale (unterschwellige) 165
– unbewusste 828
Ballismus 761
Basalganglien 760, 761
– Schädigung 761
Basisaffekt 211, 216
Basisemotion 197
Basiskategorien 378, 392
Basisratenfehler 632
Bauchrednereffekt 78, 95
bayesianische Inferenz 797
bayesianisches Denken 561

Bayes-Theorem 632, 652
bedingte Reaktion 323
bedingter Reiz 323
Bedürfnisantizipation 256
Bedürfnis-Antizipations-Dilemma 296
Bejahung des Hinterglieds 538
Belohnungsaufschub 270, 305
Benennungsaufgabe 453, 460
Beobachtungslernen 326, 350, 789
Besitztumseffekt 629
Bestätigungsfehler 563, 573, 579
Best-PEST-Verfahren 20
Bestrafung 325, 327, 350
– stellvertretende 327
Bewegung 28, 29, 752, 756, 785
– automatische 756
– biologische 785
– induzierte 29
– neuronale Repräsentation 756
– reale 28
– zentrale Repräsentation 752
Bewegungskommandos 711
Bewegungsnacheffekt 28
Bewegungsparallaxe 26, 44
Bewegungsvorstellung 777, 810
Bewegungswahrnehmung 27
Bewusstlosigkeit 178
Bewusstsein 153, 155, 156, 157, 159, 164, 167, 169, 176, 178, 179, 322
– Bedeutung 155
– beim Lernen 322
– empirische Forschung 164, 167
– Entwicklung 159
– Erklärungsansätze 157
– Kriterien 156
– phänomenales 156, 159, 167, 176, 179
– Störungen 169, 178
Bewusstseinslagen 264, 305
bildgebende Verfahren 19, 44, 452
Bildgeschichtenübung 233, 245
Bild-Wort-Interferenzparadigma 453
binaurales Hören 54, 70
Bindungsproblem 34, 44, 115, 160, 669, 670
binokulare Rivalität 172, 175, 179
– Selbstversuch 175
biologische Bewegung 785
Bistabilität 64, 70
– auditive 64
Blickbewegungsstudien 605
Blindsicht 170, 179, 826, 835
Blitzlichterinnerung 195
Blockierung 336, 350
Bootstrapping-Methode 639
bottom-up 460
Bottom-up-Aktivierung 448, 460
Bottom-up-Parsing 475
Bottom-up-Verarbeitung 15, 45
Bouba-Kiki-Effekt 83
Bradykinese 761, 762, 768
Broca-Aphasie 457
Broca-Areal 457, 517
Brückeninferenz 496

C

Cannon-Bard-Theorie 205
cartesisches Theater 163, 177
CAS (conscious awareness system) 158
Caudatum 760
Cerebellum 763
Cerebrum 756
Certainty-Effekt 630
Chaining 348
Chamäleon-Effekt 789, 810
Change-Detection-Paradigma 426
Choking under Pressure 730
Chorea 761
Chunk 608, 614
Chunking 604
Circumplexmodell 194
Closed-Loop-Kontrolle 751
Cochleaimplantat 68
Cocktailparty-Phänomen 58, 104
Coercion 490, 521
Colliculus superior (CS) 17, 89
Commitment (Zielbindung) 241, 245
Common Codes 832, 835
computationaler Ansatz 40
conscious awareness system (CAS) 158
Constraints 479, 521
Control-Based Learning Theory (CoBaLT) 729
Coriolis-Kraft 768
Corpus geniculatum laterale (CGL) 17
Cortex 17, 55, 90, 161, 202, 260, 275, 276, 286, 287, 289, 294, 304, 306, 675, 688, 756, 757
– anteriorer cingulärer 161, 202, 275, 294, 304
– auditiver 55
– frontaler 275, 276, 688
– frontopolarer 286
– motorischer 757
– orbitofrontaler 275
– posteriorer parietaler 90, 756
– präfrontaler 161, 202, 260, 275, 287, 289, 306, 675
– prämotorischer 756
– primärer visueller 17
– primärmotorischer 756
corticaler Vergrößerungsfaktor 17, 45
corticale Verarbeitungspfade 16
CR 323
CS 323
Cue 341
Cue-Outcome-Lernen 326
Cue-Stimulus-Intervall (CSI) 690

D

Daueraufmerksamkeit 106
Deafferentierung 768
Deaf Hearing 67
deduktives Schließen 536, 579
Deese-Paradigma 419
Defaults 559
deklaratives Gedächtnis 406, 429, 709
Denken 196, 286, 533, 534, 556, 557, 561, 562, 566, 573, 574, 588
– Abnormitäten 557
– bayesianisches 561
– induktives 562
– mit mehr als zwei Wahrheitswerten 556
– und Argumentieren 534, 573
– und Entscheiden 196
– und Irrationalität 573
– und Performanz 574
– und Rationalität 566
– zukunftsorientiertes 286
Denkpsychologie 566
Denksysteme 573
Derivation 443, 460
deskriptive Sichtweise 621, 652
deskriptive Theorie 535
determinierende Tendenz 260, 305
Determinismus 254, 386, 393
– linguistischer 386, 393
Dialog 516
DICE-Modell 158
digitales Lernen 710
dimensionale Emotionsmodelle 193
Dimensionsgewichtungsansatz 113
Disambiguierung 77, 96
Disappointment-Theorie 631
diskrete Emotionsmodelle 192
Diskrimination 330
Diskriminationslernen 330, 350
Diskursmodelle 498
Dissoziationsparadigma 404, 429
Distanzschätzungen 43
distributionelle Semantik 488
domänenspezifisches Schema 567
Domänenspezifität von Kategorien 378, 392
Dopamin 230, 245
Doppelaufgabe 687, 698, 828, 835
Doppelaufgabenperformanz 132, 142
dorsaler Pfad 17, 55, 122, 144, 170, 179, 518, 672, 826, 835
Double-Step-Experimente 670
Drehmoment 754, 768
dreidimensionale Modellrepräsentation 41
Dreifarbentheorie 23
dreiwertige Logik 556
duale Repräsentation 160
Dualismus 162, 179
Dynamik 754, 768
dynamische Transformation 711, 715
Dysarthrie 765
Dysdiadochokinese 765
dysexekutives Syndrom 274, 305
Dyslexie 451, 460
Dysmetrie 765

E

Ebbinghaus-Täuschung 827
Echogedächtnis 427
Effekt phonologischer Ähnlichkeit 424
Effekt unbeachteter Sprache 424
efferent 754, 768
Efferenzkopie 829, 835
einfache Probleme 590
Ein-Kanal-Theorien 135
Einsicht 592, 614
Einsichtsprobleme 601
Einstellungseffekte 599, 614
EKP (ereigniskorreliertes Potenzial) 19, 65
Elaborationshypothese 735
elaborative Inferenz 502
elementale Modelle 342

elementare Informationsverarbeitungsprozesse 623, 652
Elementenpsychologie 38, 45
Element-Level-Kompatibilität 826, 835
eliminativer Materialismus 162, 179
Elman-Netz 484
Embedded-Processes-Modell 425
Embodiment 754, 773, 810
Emotion 185, 188, 189, 190, 192, 193, 195, 197, 201, 204, 216, 217
– Arbeitsdefinition 188
– biologische Grundlagen 201
– Funktionen 195
– Klassifikation 192
– Komponenten 189
– mimischer Ausdruck 190
– primäre 192, 197, 216
– Psychophysiologie 204
– sekundäre 193, 217
emotionale Ansteckung 789, 810
emotionale Aufmerksamkeitslenkung 195
emotionale Bewertungsprozesse 175
emotionale Handlungsbereitschaft 198
emotionale Konditionierung 209
emotionales Gehirn 201
emotionale Unterbrechungshypothese 197
Emotionsmodul 208, 216
Emotionspsychologie 186
– Geschichte 186
Emotionsregulation 212, 216, 283
Emotionstheorien 205
endogene Aufmerksamkeit 86
Engpassmodell 683, 698
Entscheidung 453, 460, 621, 623, 625, 648
– exemplarbasierte 648
– gute 625
– lexikale 453, 460
– riskante 623
– unter Unsicherheit 623
Entscheidungsanalyse 650
Entscheidungskonflikt 263, 284, 305
– intertemporaler 263, 284, 305
Entscheidungsmodelle 625
Entscheidungsregel 642
Entscheidungsstrategien 641, 642, 653
– kompensatorische 641, 653
– nichtkompensatorische 642, 653
episodischer Puffer 425
episodisches Gedächtnis 158, 256, 406, 429
epistemische Verwurzelung 553
EQW (Gleichgewichtungsregel) 642
ereignisbezogene Kategorien 381, 392
ereigniskorreliertes Potenzial (EKP) 19, 65
Erfolgsmotiv 240
ergebnisbezogenes Feedback 736, 741
Erklärungslücke 163, 179
Erlaubnisschema 567
Erregungstransfer 211, 216
Ersatzhandlung 227
Erwartung 228, 245
Erwartungsnutzen 625, 626
Erwartungswert 625, 652
Erwartungswerttheorien 228
Essenzialismus 374, 393
– psychologischer 374, 393
Ethologie 737
evaluative Konditionierung 325, 348
– Werbung 348
Evidenzakkumulierung 645
Evolution 159
evolutionäres motorisches Lernen 710
exekutive Funktionen 253, 305, 694, 698
Exemplarmodelle 644, 652
Exemplarsicht 363, 364, 392
– Probleme 364
exogene Aufmerksamkeit 86
Expected-Value-of-Control-Theorie 296
Experten 608
Expertise 588, 607, 614, 790, 804
– beim Problemlösen 588, 607, 614
– motorische 790, 804
explizites Gedächtnis 158, 408
explizites Lernen 322, 720, 731, 732
Exploiting 725
extensionale Semantik 488, 521
Extinktion 125, 171, 180
– visuelle 171, 180
extrinsisches Feedback 736

F

Facial-Feedback-Hypothese 206
Fahrerassistenzsysteme 93
failure-to-engage hypothesis 693
Farbagnosie 171
Farbkonstanz 32
Farbwahrnehmung 23
Fechner'sches Gesetz 35
Fechterreflex 756
Feedback 640, 665, 675, 699, 735, 736, 741, 742
– ergebnisbezogenes 736, 741
– extrinsisches 736
– intrinsisches 736
– kognitives 640
– verlaufsbezogenes 736, 742
Feedback-Delay-Intervall 737
Feedback-Error-Learning 720
Feedbackkontrolle 751, 768
Feedbackregelung 715
Feedforwardkontrolle 751, 768
Feedforwardsteuerung 715, 719, 721
– modellfreie Anpassung 721
Fehlwahrnehmung 42
Feldeffekt 755
Feldtheorie 226
Fertigkeitserwerb 710, 724, 729, 733
– Beeinflussung 733
– Control-Based Learning Theory 729
figurative Sprache 491
Figur-Grund-Problem 30, 45
Filtering-Mechanismus 119
Filtertheorie der Aufmerksamkeit 107, 144
Fitness 710, 737
Flash-lag-Effekt 29
Flexion 443, 460
Fluency-Heuristik 643
flüssige Aphasie 457
fMRI (funktionelle Kernspintomografie) 19
Fokus der Aufmerksamkeit 426
formale Gedächtnismodelle 419, 429
Formkonstanz 32
Formulator 454, 460
Framing 630
Framing-Effekt 630, 652
Freeing 725
Freezing 725
Frege-Prinzip 485
freies Morphem 443
Freiheitsgrade 725, 741
Fremdspracherwerb 518
Freud'scher Versprecher 510
Fröhlich-Effekt 29
frontaler Cortex 275, 276, 688
– funktionelle Anatomie 275, 276
Frontalhirnsyndrom 305
frontopolarer Cortex 286
frühe Selektion 108, 145
Führungsgröße 715, 741
funktionale Gebundenheit 598, 614
Funktionalismus 163, 179
funktionelle Kernspintomografie (fMRI) 19
Funktionsschleifen 760
Furchtappell 215
Furchtkonditionierung 324

G

Gainotti-Test 738
Garden-Path-Modell 477
GCM (generalisiertes Kontextmodell) 365, 392
gebrauchsabhängige Plastizität 719, 741
gebundenes Morphem 443
Gedächtnis 57, 157, 158, 176, 177, 256, 269, 270, 287, 306, 402, 403, 405, 406, 407, 408, 412, 423, 427, 429, 430, 709
– Arbeitsgedächtnis 157, 176, 423, 429
– auditives sensorisches 57
– deklaratives 406, 429, 709
– Echogedächtnis 427
– episodisches 158, 256, 406, 429
– explizites 158, 408
– für Gesichter 403
– für unerledigte Absichten 269, 270
– ikonisches 427
– implizites 177, 408
– Langzeitgedächtnis 405, 412, 430
– nondeklaratives 407, 429
– prospektives 287, 306
– prozedurales 709
– semantisches 407, 429
– sensorisches 57, 402, 427, 430
Gedächtniskonzeptionen 401
Gedächtnisleistungen 408, 429
– Messung 408, 429
Gedächtnisspur 727
Gedächtnistäuschungen 418, 429
Gedankenattribution 160
Gegenfarbentheorie 24
Gegenkonditionierung 324
Gehirn 159, 201
– emotionales 201
– Entwicklung 159
– Plastizität 159
gelernte Reaktion 331
Gemeinsamer-Effekt-Modell 376
Gemeinsame-Ursache-Modell 376
Generalisationsgradient 330, 350
generalisierter Verstärker 325
generalisiertes Kontextmodell (GCM) 365, 392
generalisiertes motorisches Programm (GMP) 753
Generalisierung 330

Generative Grammatik 471
Geons 34
Geschlechtsstereotype 390
Gesetz der Wirkung 324, 350
Gesichtergedächtnis 403
Gestaltgesetz der Ähnlichkeit 62
Gestaltgesetz der guten Fortsetzung 62
Gestaltgesetz des gemeinsamen Schicksals 63
Gestaltgesetze 31, 45
Gestaltpsychologie 38, 45, 596
Gesten 509
geteilte Aufmerksamkeit 132, 144
gewichtete additive Regel (WADD) 642
Gewichtungsfunktion 628
Gewohnheiten 255
Given-New-Prinzip 496
Gleichgewichtungsregel (EQW) 642
Gleichung 638
– lineare 638
globale Gedächtnismodelle 419, 429
Global-Workspace-Modell 161
GMP (generalisiertes motorisches Programm) 753
Grammatik 470, 521
Grammatiklernen 344
Graphem 451, 460
Graphem-zu-Phonem-Regeln 451
Greifhandlungen 170, 175
Grenzmethode 20
Größenkonstanz 32
Großhirns 756
Grounding 507
GST (Theorie der gesteuerten Suche) 116
Guidance-Hypothese 736
Gültigkeit 535, 536, 539, 540, 543, 579
– einer Schlussfolgerung 540
– konditionaler Schlüsse 536
– logische 535, 539, 579
– syllogistischer Schlüsse 543

H

Habit (Gewohnheit) 226, 245
Handlung 663, 666, 669, 698, 699, 750, 787, 789, 811, 821, 835
– bewusste 750
– exekutive Kontrolle 663
– Parameter 666, 699
– Programmierung 669
– Simulation 789
– unbewusste 750
– und Wahrnehmung 821
– Vorhersage 787, 811
Handlungsausführung 777
Handlungsauswahl 797
Handlungsbeobachtung 785
Handlungsbeobachtungsnetzwerk 787, 810
handlungsbezogene Sprache 800
Handlungscharakteristiken 780
Handlungseffekt 673, 698, 776
Handlungs-Effekt-Antizipation 256
Handlungselemente 677
Handlungserfahrung 790, 804
Handlungserleben 793
Handlungsinhibition 783
Handlungsinitiierung 669, 672, 698
Handlungskonsequenzen 795, 798
– Valenz 798
– Vorhersagbarkeit 795
Handlungskontrolle 253, 675, 676, 776
– Entwicklung 675, 676
Handlungskontrollstrategien 267, 305
Handlungsmerkmale 666
Handlungsorientierung 272, 305
Handlungsphasen 264, 305
Handlungsplan 698
Handlungsplanrekonstruktionshypothese 734
Handlungsplanung 258, 286, 663, 664, 679, 749, 829
– hierarchische 679
– motorische Kontrolle 749
– motorische Programme 664
– Schädigung des frontalen Cortex 286, 664
Handlungs-Satz-Kompatibilitätseffekt 801, 802, 803, 810
Handlungsschema 263, 305
Handlungssequenzen 674, 698
Handlungssimulation 786, 805
handlungssteuernde Selektion 104, 144
Handlungssteuerung 255, 262, 776
– automatische 262
– Entwicklungsstufen 255
– Modelle 776
– willentliche 255
Handlungsvorstellung 777, 810
Handungssequenzen 680
– Planung 680
Helligkeitskonstanz 32
Hermann'sches Gitter 23
Herstellungsmethode 20
Heuristics-and-Biases-Programm 634, 652
Heuristik 60, 593, 614, 634, 647, 652
– allgemeine 593
– beim Hören 60
– einfache 647
Heuristik (Logik) 573
hierarchische Handlungsplanung 679
Hill Climbing 593, 614
Hinweisreiz 341, 351
– konfiguraler 341, 351
Hippocampusformation 406
Hirnstimulation 766
Hobbits-und-Orks-Problem 595
Holzwegsätze 476, 521
Homunculus 254, 757
Homunculus-Problem 24, 45
Hörbahn 54, 70
Horopter 25, 45
Hörsinn 55, 66
– Störungen 66
Hörverlust 66, 68, 70
– sensorineuraler 66
– versteckter 68, 70
Huntington'sche Krankheit 762
Hypothese 129
– der integrierten Kompetition 129

I

Ich-Konzept 160
idealer Beobachter 79
Ideomotorik 831
ideomotorisches Prinzip 673, 698
ikonisches Gedächtnis 427
Imagery-Debatte 777, 810
Imitation 786, 810, 833
– automatische 786, 810
Imitationslernen 328
Implementierungsintention 266, 305
Implikation 535
implizite Polyphonie 62
implizites Gedächtnis 177, 408
implizites Lernen 319, 322, 343, 344, 350, 720, 731, 732
– Paradigmen 344
Impossibilismus 254
indexikalische Hypothese 801, 810
indirekter Sprechakt 494, 521
Induktion 388, 392, 832
– kategorienbasierte 388, 392
induktives Denken 562
induktives Schließen 562, 579
induzierte Bewegung 29
Inferenz 502, 521, 797
– bayesianische 797
– elaborative 502
Informationsmenge 648
– paradoxer Effekt 648
Informationssuche 623, 646
Informationsverarbeitung 13, 51, 75, 92
– auditive 51
– multisensorische 75, 92
– visuelle 13
Informationsverarbeitungsprozesse 623
– elementare 623
Inhaltseffekt 567, 569, 579
– neuronale Grundlagen 569
Inkrementalität 474, 489, 513, 521
– der semantischen Verarbeitung 489, 521
– der Sprachproduktion 513, 521
– der syntaktischen Verarbeitung 474, 521
Instinkt 226, 245
instruktionsbasiertes Lernen 277
instrumentelles Lernen 255, 323
Insula 203
Integration 60, 78, 81, 87, 96, 449, 668, 669, 679, 698
– der Wortbedeutung 449
– multisensorische 78, 87, 96
– optimale 81, 96
– simultane 60
– von Handlungselementen 679
– von Handlungsmerkmalen 668
– von verteilter Information 669, 698
intensionale Semantik 488, 521
Intention 256
intentionale Bindung 794, 810
intentionale Handlungssteuerung 255
Interactive Alignment 517, 521
Interferenz 383, 415, 416, 430
– katastrophische 383
– proaktive 416, 430
– retroaktive 416, 430
intermittierende Verstärkung 329, 350
internes Modell 776
intersensorische Aufmerksamkeitskopplung 91
intersensorische Beeinflussung 76, 78, 96
intersensorischer Abgleich 84
intertemporaler Entscheidungskonflikt 263, 284, 305
Intervallplan 329, 350
Intervallverstärkung 329

Intimitätsmotiv 225, 235, 245
intrinsisches Feedback 736
Invarianzprinzip 630
inverses Modell 720, 741, 754, 768, 776, 810
IOR-Effekt 111

J

James-Lange-Theorie 205
Junktor (Logik) 537, 579

K

Kampf-oder-Flucht-Reaktion 206
katastrophische Interferenz 383
Kategorien 358, 359, 362, 363, 374, 375, 378, 381, 384, 386, 390, 392, 393
– Artefakte 392
– Arten 374
– Domänenspezifität 378, 392
– ereignisbezogene 381, 392
– Erwerb 381
– Funktionen 358, 392
– in der Klinischen Psychologie 390
– kausale 375
– linear trennbare 362
– mentale Repräsentation 359
– natürliche Arten 374, 393
– nichthierarchische 381
– nichtlinear trennbare 363
– Nutzung 384
– Taxonomien 378, 393
– und Sprache 386
kategorienbasierte Induktion 388, 392
Kategorienlernen 369, 392
kategorienspezifische Defizite 379, 380, 392
kategorischer Syllogismus 544, 579
Kategorisierung 357
Kategorisierungstheorien 359, 392
– ähnlichkeitsbasierte 359, 392
Kausalattribution 794
kausale Kategorien 375
Kausallernen 326, 350
Kausalmodelle 376, 392
Kerzenproblem 599
Kinematik 754, 768
kinematische Transformation 711, 714
klassische Konditionierung 323, 328, 330, 350
– Erwerb und Löschung 328
– Generalisierung und Diskrimination 330
klassische Logik 535
klassische Sicht 359, 360, 392
– Probleme 360
Kleinhirn 763, 765
– Schädigung 765
Kniesehnenreflex 756
Koartikulation 665, 698
Kognition 774, 775, 811
– verankerte 775, 811
– verkörperte 774
kognitive Kontrolle 251, 253, 291, 293, 299, 300, 302, 305
– bei psychischen Störungen 300
– computationale Modelle 291
– Neuromodulation 299
– Training 302
kognitives Interview 415
kognitive Täuschungen 573
Kohärenz 495, 522, 621, 652
– von Sätzen 495, 522
Kohärenznetzwerke 644, 652
Kohäsion 496, 522
– von Sätzen 496, 522
Kohortenmodell 448
Komparatormodell 776, 810
Kompatibilismus 254
kompensatorische Entscheidungsstrategien 641, 653
Kompetenz 470, 522
– sprachliche 470, 522
komplexe Probleme 590
– Kritierien 590
komplexes Problemlösen 614
Komplexitätseffekt 665, 677, 698
Komponenten-Prozess-Modell 210
Kompositionalität 485, 490, 522
– Grenzen 490
Kompositum 443, 460
Kompromisseffekt 629
konditionales Schließen 536, 539, 540, 579
– empirische Ergebnisse 539
– Theorien 540
konditionierte Inhibition 335, 351
konditionierte Reaktion (CR) 323, 351
konditionierter Reiz (CS) 323, 351
Konditionierung 319, 322, 323, 325, 329, 338, 350, 351
– evaluative 325
– höherer Ordnung 338, 351
– klassische 323, 350
– operante 322, 323, 329, 351
Konditionierungsparadigmen 323
konfigurale Modelle 342
konfiguraler Hinweisreiz 341, 351
Konflikt 228, 245
Konfliktadaptationseffekt 294
Konfliktüberwachungstheorie 294
Konjunktionsfehler 634
Konklusion (Logik) 535, 566
konnektionistische Lernmodelle 381, 392
Konsequenz 653
Konstanzmethode 20
Kontaminationsproblem 409
Kontexteffekte 414, 430, 629
Kontextinterferenz 734, 742
Kontextsensitivität 370
Kontiguität 322, 333, 351
Kontingenz 334, 351
kontinuierliche Verstärkung 329
Kontinuitätsillusion 62
Kontrast 322
Kontrastgitter 23
Kontrastmodell der Ähnlichkeit 370
Kontrolldilemma 296, 305
Kontrollerleben 798
kontrollierte Verarbeitung 138, 144
kontrollierte Verarbeitungsprozesse 158
Kontrollstruktur 665, 682
konversationelle Implikaturen 493
Konversationsmaximen 469, 493
Konversionshypothese 547
Konzept 358, 360, 438, 454, 460
– lexikales 454, 460
konzeptuelle Kombination 386, 392
Koordinatensystem 77, 96
Koreferenz 497, 522
Körpertransformation 711, 712
– Erlernen 712
Korrespondenz 83, 621, 653
– semantische 83
– synästhetische 83
Korrespondenzproblem 25, 45, 77, 81, 96
Korte'sches Gesetz 28
Kosten-Nutzen-Analyse 646, 648
– Probleme 648
Kraftfeldadaptation 715, 742
Kraftrückmeldung 93
Kreuzklassifikationen 381, 393
Kurzzeitgedächtnis 117
– visuelles 117

L

Lageorientierung 272, 305
Landolt'sche Sehprobe 21
Langzeitgedächtnis 402, 405, 412, 430
Late-Closure-Prinzip 477
latente Inhibition 341
latente semantische Analyse (LSA) 519
latentes Lernen 340, 351
laterale Hemmung 448, 460
laterale Inhibition 23, 45
lateralisiertes Bereitschaftspotenzial (LRP) 457
Left-Corner-Parsing 475
Leib-Seele-Problem 162
Leistungsmotiv 225, 239, 245
Lemma 444
Lernen 255, 277, 319, 320, 321, 322, 323, 326, 328, 332, 335, 337, 340, 343, 344, 345, 346, 350, 351, 428, 707, 710, 717, 720, 730, 731, 732, 737
– Abruf gelernter Information 428
– analoges 710
– Assoziationsbildung 319
– assoziatives 320, 321, 328, 337
– biologische Einschränkungen 332
– Definition 320
– der Steuerung komplexer Systeme 345
– digitales 710
– durch Anpassung strategischer Prozesse 730
– durch Tuning der motorischen Transformationen 730
– evolutionäres motorisches 737
– explizites 322, 720, 731, 732
– implizites 319, 322, 343, 350, 720, 731, 732
– instruktionsbasiertes 277
– instrumentelles 255, 323
– Konditionierung 319
– latentes 340, 351
– mit mehreren Reizen 335
– motorisches 707, 710
– neuer Verhaltensweisen 323
– perzeptuelles 717
– Selbsttests 428
– soziales 326
– unbewusstes 346
– versteckter Kovariationen 344
Lernmodelle 381, 392
– konnektionistische 381, 392
Lernphasen 714
Lernpsychologie 322
– Untersuchungsparadigmen 322
Lernstrategien 428

Lerntheorie der Strategiewahl (SSL) 649
Lerntheorien 384
– wissensbasierte 384
Lesenlernen 518
lexikale Entscheidung 453, 460
lexikaler Zugriff 449
lexikale Selektion 449, 460
lexikales Konzept 454, 460
lexikalischer Rahmen 479
lexikalisierte Grammatiken 473
Lexikon 447, 460
– mentales 447, 460
Libertarianismus 254
Lichtkegelmetapher 109, 144
Lichtpunktdarstellung 785, 810
Lichtpunktläufer 785, 810
limbisches System 201, 230, 245
linguistischer Determinismus 386, 393
Linsenmodell 637, 653
Linsenmodellgleichung 638
Listenlängeneffekt 418
Locked-in-Syndrom 785
Locus-of-Slack-Methode 683, 832
Logik 534, 535, 552, 556, 573, 579
– dreiwertige 556
– klassische 535
– nichtklassische 552
– und Argumentieren 534
– und Rationalität 573
logikbasierte Theorie 574
logische Modelltheorie 540
logisches Denken 534, 563, 564, 565, 566, 570
– im intakten Gehirn 564
– nach Hirnschädigungen 565
– neuronale Korrelate 563
– und Rationalität 534
– und Visualisierung 570
– und Wissen 566
logisches Denken (s. auch Denken) 533
Logit-Analyse 20
Löschung 328, 351
Lösungsweg 589
Lotterieparadigma 622
LRP (lateralisiertes Bereitschaftspotenzial 457
LSA (latente semantische Analyse) 519
Lügendetektion 637

M

Macht 238, 243
– und Dominanz 238
– und Krise 243
Machtmotiv 225, 238, 245
Magnetencephalografie (MEG) 19
Maskierung 69, 164, 180
– auditive 69
– Techniken 164
– visuelle 164, 180
materiale Implikation 538
McGurk-Effekt 76, 96
MCPL (Multiple-Cue Probability Learning) 640
MEG (Magnetencephalografie) 19
Mehrdeutigkeit von Wörtern 444
Mehrfachaufgabenperformanz 132
Mehrfachhandlungen 682, 695
Mehrsprachigkeit 695
Mensch-Maschine-Interaktion 833
mentale Beweise 540
mentale Chronometrie 780
mentale Modelle 540, 579
mentales Kontrastieren 242, 245
mentales Lexikon 447, 460
mentales Training 806
Merkmalsanalyse 33, 45
Merkmalsbindung 668, 698
Merkmalsintegrationstheorie (MIT) 113
Messung von Gedächtnisleistungen 408, 429
Metakontrollparameter 298
Metakontrollprobleme 296
Metapher 491
Methode der Unterschiedsreduktion 593, 614
metrische Segmentierungsstrategie (MSS) 445
MINERVA 2 420
Minimal-Attachment-Prinzip 477
Minimalist-Heuristik 643
Mismatch Negativity (MMN) 66
Mismatch-Prinzip 555
Misserfolgsmotiv 240
Misskonzeption 358
MIT (Merkmalsintegrationstheorie) 113
Mittel-Ziel-Analyse 593, 614
MMG (Multi-Motiv-Gitter) 233, 245
MMN (Mismatch Negativity) 66
MMS (metrische Segmentierungsstrategie) 445
modale Emotionsmodelle 195
modales Gedächtnismodell 402, 430
modales Schließen 560
Modalitätsangemessenheit 79
Modallogiken 560
Modell 720, 741
– inverses 720, 741
modellbasiertes Verstärkungslernen 256
Modell der Informationsverarbeitung 403
modellfreies Verstärkungslernen 255
Modelllernen 327
Modifikationsmodell 386
– selektives 386
modulares Arbeitsgedächtnismodell 423
modulare Theorien 136, 144
Modularität 510, 522
– von Sprachproduktionsmodellen 510, 522
Modus ponens (MP) 538
Modus tollens (MT) 538
Monitoring 510, 522
– bei der Sprachproduktion 510, 522
Monitoring-Bewusstsein 157, 179
monotones Schließen 558
Monotonie (Logik) 536, 558, 579
Morbus Huntington 762
Morbus Parkinson 762
Morphem 439, 443, 460
Morphologie 443
morphologische Klassen 443
Motiv 224, 225, 231, 235, 238, 239, 243, 245
– Anschluss 225, 235, 245
– biogenes 225
– explizites 231
– implizites 231
– Intimität 225, 235, 245
– Leistung 225, 239, 245
– Macht 225, 238, 245
– soziogenes 225
– und Partnerschaft 243
Motivanregung 233, 245
Motivation 223, 225, 226, 230, 241, 245
– biologische Grundlagen 230
– durch Zielsetzung 241
– Theorien 226
Motivationskonflikte 263
Motivinkongruenz 232, 243, 245
Motivklassen 235
Motivmessung 233
Motorik 754
– interne Modelle 754
motorische Kontrolle 749, 750, 751
– Regelung und Steuerung 751
– Theorien und Modelle 750
motorischer Cortex 757
motorische Resonanz 786
motorischer Nacheffekt 755
motorisches Engramm 752, 768
motorische Signale 766
motorisches Lernen 707, 710, 723, 724, 727, 728, 738, 739
– Einfluss kognitiver Faktoren 723
– evolutionäres 710
– in der Mathematik 739
– in der Medizin 738
– Phasenmodelle 724
– Regelungstheorie 727
– Schematheorie 728
motorisches Programm 699, 752, 753, 769
– generalisiertes 753
motorisches Schema 666, 699
motorische Wahrnehmungstheorien 831
MouseLab 624
mp3-Codierung 69
multifunktionelles Netzwerk 287, 306
Multi-Motiv-Gitter (MMG) 233, 245
multinomiale Modelle 410, 430
Multiple-Cue Probability Learning (MCPL) 640
multiple lineare Regression 638
Multiplexing 108
multisensorische Informationsverarbeitung (s. auch multisensorische Verarbeitung) 75, 92
multisensorische Integration 78, 87, 96
multisensorische Kombination 77, 96
multisensorische Konvergenzzonen 90, 96
multisensorisches Neuron 89, 96
multisensorische Sprachwahrnehmung 76, 468
multisensorische Verarbeitung 77, 82, 89, 91, 96
– in unisensorischen Arealen 91
– neurophysiologische Grundlagen 89
– räumliche und zeitliche Nähe 82
Multistabilität 63, 70
– auditive 63, 70
Multitasking 286, 695
Multi-Voxel-Pattern-Analyse 261

N

Nachdenken 560
Nacheffekt 712, 742, 755
– motorischer 755
Nahrungskategorien 390
natürliche Arten (Kategorien) 374, 393
N-Back-Aufgabe 274, 306
negativer Nacheffekt 84
negative Verstärkung 325, 351
Neglect 93, 125, 171, 180, 738
– unilateraler 125, 738
– visuospatialer 171, 180
Neun-Punkte-Problem 599

neuronale Synchronisation 669
Neuronale Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (NTVA) 130
neuropsychologische Untersuchungen 605
Neurotransmitter 769
nichtflüssige Aphasie 457
nichtklassische Logik 552
nichtkompensatorische Entscheidungsstrategien 642, 653
nichtmonotones Schließen 557
Nichtmonotonie (Logik) 557, 579
nichtsprachliche Einheiten 438
Nominalphrase (NP) 470
nondeklaratives Gedächtnis 407, 429
normative Sichtweise 621, 653
normative Theorie 535
NTVA (Neuronale Theorie der visuellen Aufmerksamkeit) 130
Nucleus accumbens 230, 245
Nucleus ruber 769
Nutzenfunktion 625
– nach Bernoulli 625
Nystagmus 765, 769

O

Oberflächenähnlichkeit 610, 614
– beim analogen Transfer 610, 614
Oberflächenstruktur (Linguistik) 471
Objektagnosie 826, 835
Objektbewegung 785
Objektwahrnehmung 30, 776
OFC 275
OMT (Operanter Motivtest) 233, 245
Open-Loop-Kontrolle 751
operante Konditionierung 322, 323, 330, 351
– Generalisation und Diskrimination 330
Operanter Motivtest (OMT) 233, 245
operantes Verhalten 324
Operator 593, 614
– mentaler 593, 614
optimale Integration 81, 96
Option 623, 653
Optogenetik 769
optogenetische Stimulation 758
orbitofrontaler Cortex 275
orthogonale Hinweisreizaufgabe 86, 96
Overshadowing 336
Oxytocin 236, 245

P

Pandämonium-Modell 33
Paradigma 105, 113, 144, 779, 810
– der mentalen Chronometrie 779, 810
– der visuellen Suche 113, 144
– des dichotischen Hörens 105, 144
parallele Suche 113, 144
Parallelogramm-Quadrat-Problem 598, 613
– Lösung 613
Paralyse 760
Paraphasie 457
Parese 760
parietaler Pfad 17
Parkinson'sche Krankheit 762
Parsing 473
Parsing-Modelle 476
Patient H.M. 709
Performance-Resource-Funktion (PRF) 134, 144
Performanz 470, 522
– sprachliche 470, 522
Perseveration 278, 306
Persistenz 240, 245, 267, 306
Persistenz-Flexibilitäts-Dilemma 296
Perturbationstechnik 80, 96
perzeptive Selektion 104, 144
perzeptuelles Lernen 717
PET (Positronenemissionstomografie) 19
PFC 260
phänomenales Bewusstsein 156, 159, 167, 176, 179
Phasensynchronisation 160, 172, 180
Phi-Phänomen 28
Phonagnosie 67
Phonem 439, 460
phonologisches Modul 423
photopisches Sehen 16
Phrasenstrukturgrammatiken 470
Phrasenstrukturregeln 471
Picture Story Exercise (PSE) 233
Pigeonholing-Mechanismus 119
Pip-und-Pop-Effekt 88
Plastizität 719, 741
– gebrauchsabhängige 719, 741
Plegie 760
POC-Kurve 135, 144
Positive Psychologie 215
positive Verstärkung 325, 351
Positronenemissionstomografie (PET) 19
posteriorer parietaler Cortex 90, 756
Post-Feedback-Intervall 737
Potenzgesetz 609, 614
– des Lernens 609, 614
Prädikatenlogik 543, 579
Prädiktion 57, 58, 70
Präferenzumkehr 629
Präferenzumkehrung 284, 306
präferierte mentale Modelle 551, 559, 579
Präfix 443
präfrontaler Cortex 161, 202, 260, 275, 277, 287, 289, 306, 675
– funktionelle Organisation 287
– hierarchische Organisation 289
– Kontrollfunktionen 277
Pragmatik 469, 493, 522
pragmatisches Schema 567, 580
Prägnanzprinzip 31, 39
Prämisse (Logik) 535
Prämissenreihenfolge 549
prämotorischer Cortex 756
Präsuppositionen 493
präventive Selbstverpflichtung 268, 287, 306
Präzision 79, 96
– in der Wahrnehmung 79, 96
PRF (Performance-Resource-Funktion) 134, 144
primäre Rohskizze 41
primärer Verstärker 325
primärer visueller Cortex 17
primärmotorischer Cortex 756, 760
– Schädigung 760
Priming 179
Priming-Paradigma 453, 460
Prinzip der minimalen Veränderung 553
Prinzip des Konservatismus 553
Prinzip des modulierten Wettstreits 263, 305
Prinzip inverser Effektivität 90
Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten 556
Prismenadaptation 712, 738, 742
– Behandlung des unilateralen Neglects 738
Prismenbrille 84
proaktive Interferenz 416, 430
probabilistische Theorie 561
Probit-Analyse 20
Probleme 590
Problemlöseforschung 592, 605
– historische Grundlagen 592
– Methoden 605
Problemlösekompetenz 612
– in der Medizin 612
Problemlösen 587, 589, 591, 592, 596, 597, 599, 601, 604, 606, 607, 609, 612, 614
– durch analogen Transfer 609
– einfaches 592
– einsichtsvolles 601
– Expertise 607, 614
– Fixierung 599
– integrative Modelle 604
– komplexes 591, 614
– neuronale Korrelate 606
– Phasen 597
– Sackgasse 601, 614
– Softwareprogrammierung 612
– Strategie 589
– Umstrukturierung 596, 614
Problemlöseprozess 589
Problemlösetraining 611
Problemraum 593, 614
Problemraumtheorie 590, 593, 594, 596, 614
– Erweiterung 596
Problemtypen 589
Process-Tracing-Techniken 623
Proezssansatz (Gedächtnisforschung) 430
Programmierung 667, 674
– von Handlungsmerkmalen 667
– von Handlungssequenzen 674
Propositionen 485, 522
Prosodie 481
Prosopagnosie 171
Prospect-Theorie 628, 653
prospektives Gedächtnis 287, 306
Prototypensicht 361, 362, 393
– Probleme 362
prozedurales Gedächtnis 709
Prozessansatz (Gedächtnisforschung) 405
Prozessdissoziationsprozedur 409
Prozessfehler 541
Prozessmodell 641, 653
PRP (Psychologische Refraktärperiode) 107, 145, 683, 699
PSE (Picture Story Exercise) 233, 245
Psycholinguistik 440
psycholinguistische Forschung 440
Psychologische Refraktärperiode (PRP) 107, 145, 683, 699
psychologischer Essenzialismus 374, 393
psychologische Theorien (Logik) 540
Psychophysik 35, 45
psychophysische Methoden 20, 21, 45
Purkinje-Zelle 769
Putamen 760
Pyramidenbahn 764, 769

Q

Qualia 156, 163, 180
Quantorenlogik 543
Quantoren (Logik) 535, 580
Querdisparation 25, 45
Quotenplan 329, 350
Quotenverstärkung 329

R

Ramsey-Test 561
rationale Analyse 574
Rationalität 650
Raumakustik 69
räumliche Aufmerksamkeit 86
Raum- und Tiefenwahrnehmung 24, 45
Reafferenzprinzip 829
Reaktionsalternativen 667
Reaktionsauswahl 686
Reaktionsbahnung 165
Reaktions-Cue-Intervall (RCI) 690
Reaktionsinhibition 282
Reaktionsinitiierung 687
Reaktionskonflikte 696
Reaktions-Stimulus-Intervall (RSI) 690
Reaktionsverhinderung 338
reale Bewegung 28
Reanalyse 476
rechtliches Schließen 553
redundante Information 76, 79, 96
– Modelle zur Integration 79
Referenzpunkt 628
Reflection-Effekt 630
Reflexe 255, 259, 756
– bedingte 255
– vorbereitete 259
Reflexmotorik 751
Reflextheorie 340
Regelgröße 715, 742
Regeln 537, 557, 579
– abstrakte 579
– der Aussagenlogik 537
– konditionale 557
Regelungstheorie motorischen Lernens 727
Regret-Theorie 631
Rehearsal 57
Reichardt-Bewegungsdetektor 29
Reihenfolgefehler 676, 699
Reintonaudiometrie 67
reizgetriebene Verarbeitung 15
Reiz-Reaktions-Kompatibilität 699, 825
Reiz-Reaktions-Übersetzung 686, 699
Reizsubstitution 340
Reizverarbeitung 684
Rekalibrierung 84, 96
– intersensorische 84, 96
Rekognitionsheuristik 574, 642
rekurrentes Netz 484
rekurrente Verarbeitung 161, 174, 180
Rekursion 471
relationales Schließen 548, 549, 550, 555, 580
– empirische Ergebnisse 549
– Theorien 550
Relationen (Logik) 548, 580
Reliabilitätsproblem 408
repetitive Transkranielle Magnetstimulation (rTMS) 19
repräsentationales Momentum 30
repräsentationale Veränderungstheorie 601
Repräsentativitätsheuristik 634
Reprogrammierung 667
– von Handlungsmerkmalen 667
Rescorla-Wagner-Modell 340, 341
– Limitationen 341
respondentes Verhalten 324
Retina 16
retinales Abbild 41
retroaktive Interferenz 416, 430
rezeptives Feld 16, 45, 145
rhetorische Relationen 498
Rigor 761
Risikokommunikation 650
Risikowahlmodell 228
robuste schwache Fusion 80, 97
ROC-Kurven 37, 411
Rotation 713, 742
– visuomotorische 713, 742
rTMS (repetitive Transkranielle Magnetstimulation) 19
Rubikonmodell 264
Rückmeldung 675
Rückschaufehler 636
Rückwärtsblockierung 336

S

Sackgasse 601, 614
sakkadische Augenbewegungen 111
Satz 470, 473, 485, 489, 490, 491, 492, 493, 495, 496, 521, 522
– Coercion 490, 521
– Erfassen der Satzbedeutung 489
– figurative Lesart 491
– Kohärenz 495, 522
– Kohäsion 496
– oberflächliche Verarbeitung 492
– pragmatische Verarbeitung 493
– semantische Struktur 485
– semantische Verarbeitung 485
– Spuren und Köpfe 473
– syntaktische Verarbeitung 470
Satzproduktion 467
Satzüberlegenheitseffekt 425
Satzverstehen 467
Satz von Bayes 562
Scanpath-Theorie 831
Schablonenvergleich 33, 45
Schachexpertise 607
Schallwellen 53
Scheinbewegung 28, 45, 785
Scheinkontur 38
Schema 567, 580
– domänenspezifisches 567
– pragmatisches 567, 580
Schemaforschung 418
Schematheorie motorischen Lernens 728
Schizophrenie 807
Schlafforschung 406
Schleifenvermeidungsheuristik 593
Schließen 536, 543, 548, 551, 552, 553, 555, 557, 558, 560, 562, 579, 580
– anfechtbares 552, 579
– deduktives 536, 579
– induktives 562, 579
– konditionales 536, 579
– modales 560
– monotones 558
– nichtmonotones 557
– rechtliches 553
– relationales 548, 555, 580
– sicheres logisches 536
– syllogistisches 543, 580
– unsicheres logisches 551
Schlussfolgerungen 534, 535, 575
– bei psychischen Erkrankungen 575
– relationale 535
Schlussschemata 538, 544
Schuldunfähigkeit 178
– Beurteilung 178
SDT (Signalentdeckungstheorie) 36, 37, 45, 411
Segmentierung 445, 460
– eines Sprachsignals 445, 460
Segregation 60
Sehschärfe 19
Sehschärfe-Illusion 21
Selbstausformung 332, 351
Selbstbestimmung 242, 245
Selbst-Bewusstsein 157, 180
Selbst-Fremd-Unterscheidung 793
Selbstkategorisierungen 390
Selbstkontrolle 253, 256, 263, 271, 284, 306
– Mobilisierung 271
Selbstkontrollkompetenzen 302
Selbstwirksamkeit 242, 245
selection for action 104, 144
Selektion 104, 108, 118, 144, 145, 449, 460
– frühe 108, 145
– handlungssteuernde 104, 144
– in der Zeit 118, 145
– lexikale 449, 460
– perzeptive 104, 144
– späte 108, 145
selektive Aufmerksamkeit 104, 105, 118, 145, 157
– klassische Ansätze 105
– temporale Mechanismen 118
selektives Modifikationsmodell 386
selektive visuelle Aufmerksamkeit 109, 120, 122
– Limitationen 120
– neurokognitive Mechanismen 122
Semantik 469
semantische Korrespondenz 83
semantisches Gedächtnis 407, 429
Sense of Agency (SoA) 773, 793, 794, 810
– Untersuchungsmethoden 794
Sensitivität 19
sensomotorische Adaptation 710, 712, 715
– Mechanismen 715
– Paradigmen 712
sensomotorische Transformation 711, 742
– sensomotorische" 711
sensorineuraler Hörverlust 66
sensorische Dämpfung 794, 810
sensorische Register 402
sensorisches Gedächtnis 57, 402, 427, 430
sensorisches Vorkonditionieren 338, 351
Sequenzlernaufgaben 407
Sequenzlernen 345, 346, 731, 732
– neuronale Grundlagen 346
serielle Suche 113, 145
Set-Level-Kompatibilität 825, 835
Shadowing 106
Shams-Illusion 78, 97
Shaping 348
sicheres logisches Schließen 536

Signalentdeckungstheorie (SDT) 36, 37, 45, 411
Silbe 442, 460
Simon-Aufgabe 826
Simon-Effekt 298
Simulation 776, 810
Simulationsansatz 506, 509
Simultankontrast 23
Sinnestäuschungen 14
Skinner-Box 324
skotopisches Sehen 16
SMA (supplementär motorische Area) 756
Somatotopie 769
somatotopische Karte 757
soziales Lernen 326
späte Selektion 108, 145
Spatial-Cueing-Paradigma 110, 145
Spiegelneurone 787, 810, 822, 835
Spiegelsystem 787, 810
Split-Span-Paradigma 106
Spoonerismus 510, 522
sprachbasierte Theorien 540
Sprache 386, 491, 517, 800, 805
– abstrakte 805
– figurative 491
– handlungsbezogene 800
– neurobiologische Grundlagen 517
– und Kategorien 386
Sprachfähigkeit 257
Sprachkönnen 470, 522
Sprachlaute 440
sprachliche Einheiten 438
sprachliche Kommunikation 160
sprachliche Performanz 470, 522
Sprachproduktion 446, 452, 455, 457, 460, 508, 509, 510, 511, 513, 515, 521, 522
– Artikulation 452, 508, 521
– Botschaft 508, 521
– Formulierung 452, 508, 521
– Forschung 508
– Inkrementalität 513
– Koartikulation 446, 460
– Konzeptualisierung 452, 460, 508, 522
– Makro- und Mikroplanung 513
– Modelle 510
– neuronale Korrelate 457
– serielle vs. inkrementelle Verarbeitung 511
– Spoonerismus 510, 522
– syntaktische Struktur 515
– Versprecher 452, 509
Sprachsignal 445, 460
– Segmentierung 445, 460
Sprachstörung 457
Sprachverarbeitung 458
– diagnostische Verfahren 458
Sprachverlust 458
– Therapie 458
Sprachverstehen 439, 456, 470, 485, 489, 493, 521, 522
– Ambiguität 489, 521
– Inkrementalität 489, 521
– Kompositionalität 485, 522
– pragmatische Verarbeitung 493
– semantische verarbeitung 485
– syntaktische Verarbeitung 470
Sprachwahrnehmung 76, 468
– multisensorische 76, 468
Sprachwissen 470, 522
Sprechakt 494, 521
Sprechapparat 441
Sprechen 439, 456
– Gehirn 456
SSL (Lerntheorie der Strategiewahl) 649
Stäbchen 16
Stabilitäts-Flexibilitäts-Dilemma 258
Stadienmodell 826
Staircase-Methode 20
Stammhirn 760
Stellgröße 715, 742
Stevens'sche Potenzfunktion 37, 45
Stimmung 188, 217
Stoppregel 642
Story Grammars 495
Strategie 589
– beim Problemlösen 589
Strategieerfassung 639
Strategiefehler 541
Strategieindex 624
Streichholzproblem 602
Striatum 760
stroboskopische Bewegung 28
Stroop-Aufgabe 258
Stroop-Effekt 138, 145, 258, 696
Strukturbaum 487, 522
strukturelle Ähnlichkeit 610, 614
– beim analogen Transfer 610, 614
Strukturmodelle 622, 625
Subkategorisierungsinformation von Wörtern 443, 460
subliminale Wahrnehmung 164
Subtraktionsmethode 824, 825
Suchraum 593, 604
Suchregel 642
Suffix 443
superiorer temporaler Sulcus 90
supervidierende Aufmerksamkeit 140
supplementär motorische Area (SMA) 756
Suppositionstheorie 561
Suppressionseffekt 551
SUSTAIN 383
Syllogismus 543, 544, 579
– aristotelischer 543
– kategorischer 544, 579
syllogistisches Schließen 543, 545, 580
– empirische Ergebnisse 545
– Theorien 545
synästhetische Korrespondenz 83
Synergie 718, 742
– motorische 718, 742
syntaktische Marker 481
syntaktische Persistenz 516, 522
syntaktische Planung 512, 522
syntaktisches Wissen 482
Syntax 469, 476, 477
– autonome oder interaktive Verarbeitung 477
– Holzwegsätze 476
– serielle oder parallele Verarbeitung 477
Synthesetheorien 137
Systemansatz (Gedächtnisforschung) 405, 430
systematische Desensibilisierung 349

T

Take-the-Best-Heuristik 574
TAT (Thematischer Auffassungstest) 231, 246
Teilberichtsvorteil 427
Teleoperationen 92
temporaler Pfad 17
Termreihenfolgeeffekt 549
Testosteron 238, 246
Textlinguistik 469
Textproduktion 467
Textsorten 495
Textverstehen 467, 495, 496, 497, 498, 500, 502, 503, 521
– Anaphernresolution 500
– Diskursmodelle 498
– Erfassen der Textbedeutung 500
– Inferenz 502, 521
– koreferenzielle Bezüge 497
– Mikro- und Makrostruktur von Texten 496
– Modelle 503
– rhetorische Relationen 498
Thalamus 156, 161
Thematischer Auffassungstest (TAT) 231, 246
Theorie der Entscheidungsgrenzen 364, 366
– Probleme 366
Theorie der gesteuerten Suche (GST) 116
Theorie der perzeptuellen Symbole 800, 811
Theorie der pragmatischen Schemata 567
Theorie der probabilistischen Rationalität 574
Theorie der somatischen Marker 203
Theorie der visuellen Aufmerksamkeit (TVA) 119
Theorie des erwarteten Nutzens 626, 653
Theorie des verbalen Schließens 540
Theorie mentaler Beweise 540
Theorie mentaler Modelle 541
Theorie multipler Ressourcen 132
Theorien der begrenzten Rationalität 574
Theorien der dimensionsbasierten visuellen Aufmerksamkeit 113
Theorien der frühen Selektion 107, 145
Theorien der objektbezogenen visuellen Aufmerksamkeit 111
Theorien der ortsbasierten visuellen Aufmerksamkeit 109
Theorien der späten Selektion 108, 145
Theorien dimensionsbasierter visueller Aufmerksamkeit 145
Theorien multipler Systeme 367
Theorien objektbezogener visueller Aufmerksamkeit 145
Theorien ortsbasierter visueller Aufmerksamkeit 145
Theoriensicht 372, 374, 393
– Probleme 374
Theorien zentraler Kapazität 136, 145
Theorie präferierter mentaler Modelle 559
Tiefenkriterien 25, 45
Tiefenstruktur (Linguistik) 471
Tierdressur 348
Tinnitus 52, 68, 70
TMS (Transkranielle Magnetstimulation) 19
Token 446, 460
Tonotopie 53
top-down 461
Top-down-Modulation 280
Top-down-Parsing 475
Top-down-Verarbeitung 15, 46
TRACE-Modell 447
Tracking-Aufgabe 751, 769
Tracking-Aufgaben 716
transferangemessene Verarbeitung 412, 430
Transformation 711, 714, 715, 742

– dynamische 711, 715
– kinematische 711, 714
– sensomotorische 742
Transformationen 712
– visuomotorische 712
Transformation (Linguisitk) 471
Transivitätsaxiom 627
transkranielle Gleichstromstimulation 606
Transkranielle Magnetstimulation (TMS) 19
Tremor 761, 765
Trieb 226, 246
Triebtheorien 226
Turm-von-Hanoi-Problem 594, 605
TVA (Theorie der visuellen Aufmerksamkeit) 119

U

übergeordnetes Aufmerksamkeitssystem 306
übergeordnetes Aufmerksamkeitssystem (s. auch zentrale Exekutive) 263
Überzeugungsänderung 552, 556, 580
– Prinzipien 556
Übungsvariabilität 733, 742
Übungsverteilung 733, 742
Umkehrungshypothese 547
Umstrukturierung 596, 614
– beim Problemlösen 596, 614
Umweltmodell 638
Unabhängigkeitsaxiom 627
Unaufmerksamkeitsblindheit 120, 145
Unaufmerksamkeitstaubheit 59
unbedingte Reaktion 323
unbedingter Reiz 323
Unbestimmtheitseffekt 550
unbewusstes Lernen 346
unbewusste Wahrnehmung 164, 180
uncontrolled-manifold-Ansatz 718
unilateraler Neglect 125, 738
– Behandlung 738
Universales Gesetz der Generalisierung 365
unkonditionierte Reaktion (UR) 323, 351
unkonditionierter Reiz (US) 323, 351
Unrestricted-Race-Modell 480
unsicheres logisches Schließen 551
Unterdrückungseffekt 551
Unterschiedsschwelle 20, 35, 46
UR 323
Urteil 621, 632, 638, 639, 644
– Akkuratheit 621, 638
– examplarbasiertes 644
– klinisches 639
– statistisches 632
Urteilen und Entscheiden 619, 621, 623, 637, 641
– Abgrenzung 621
– Gemeinsamkeiten 621
– Grundbegriffe 623
– Methoden 623
– Prozessmodelle 641
– Rahmenkonzeption 637
Urteilermodell 638
Urteilsdimensionen 621
Urteilsprozess 639
Urteils- und Entscheidungsforschung 621
US 323

V

Valenz 227, 246
Validität 637
– ökologische 637
variabler Intervallplan 351
variabler Quotenplan 351
variables Sprachsignal 446
Vasopressin 240, 246
ventraler Pfad 17, 55, 122, 145, 170, 180, 518, 672, 826, 835
Ventriloquismuseffekt 78
Veränderungsblindheit 121, 145, 169, 180
Veränderungstaubheit 59
verankerte Kognition 775, 811
Verankerungsheuristik 635
Verarbeitungstiefe 412, 430
Verb 472, 522
– Subkategorisierungseigenschaften 472, 522
– thematische Rolle 472, 522
Verbalphrase (VP) 470
Verdeckungsparadigma 787, 811
Verfügbarkeitsheuristik 635
Vergessen 415, 430
Verhalten 256, 324, 329, 333, 823
– abergläubisches 333
– Erwerb und Löschung 329
– operantes 324
– respondentes 324
– sensomotorische Perspektive 823
– zielgerichtetes 256
Verhaltensbiologie 737
Verhaltenssteuerung 257
– zukunftsorientierte 257
Verhaltenstherapie 349
– systematische Desensibilisierung 349
verkörperte Kognition 774
verlaufsbezogenes Feedback 736, 742
Verlustaversion 629
Verpflichtungsschema 567
Versprecher 452, 509
Verständnisfehler 541
Verstärker 325, 351
– primärer 325
– sekundärer (generalisierter) 325, 351
Verstärkung 325, 327, 329, 350, 351
– intermittierende 329, 350
– kontinuierliche 329
– negative 325, 351
– positive 325, 351
– stellvertretende 327
Verstärkungsänderung 713, 742
– visuomotorische 713
Verstärkungsfaktor 714
Verstärkungslernen 255
versteckter Hörverlust 68, 70
verteilte Repräsentation 448, 461
Verteilungseffekt 428
Verzögerungstest 336
Vierfachmuster der Risikopräferenz 631
Vigilanz 106
visköse Kraft 754
visuelle Agnosie 170, 180
visuelle Aufmerksamkeit 109, 111, 113, 144, 145
– dimensionsbasierte 113, 145
– Lichtkegelmetapher 109, 144
– objektbasierte 111, 145
– ortsbasierte 109, 145
– selektive 109
– Theorien 113
visuelle Extinktion 171, 180
visuelle Informationsverarbeitung 13
visuelle Markierung 118
visuelle Maskierung 164, 180
visueller Beeinträchtigungseffekt 572, 580
visuelles System 122
– funktionale Architektur 122
visuelle Suche 113
– Theorien 113
visuell-räumliches Modul 423
visuell-räumliche Theorien 540
visuomotorische Adaptation 93
visuomotorische Rotation 713, 742
visuomotorische Transformationen 712
visuomotorische Verstärkungsänderung 713
visuospatialer Neglect 171, 180
Volition 251, 253, 306
Volitionsforschung 253, 302
– Implikationen 302
Vorhersagecodierung 788, 811
Vorhersagefehler 60
Vorinformation 666, 699
Vorwärtsblockierung 336
Vorwärtsmodell 719, 742, 754, 769, 776, 811
Vorwissen 588, 614

W

Wachheitszustand 156, 180
WADD (gewichtete additive Regel) 642
Wahrheitstabelle 537, 580
Wahrheitswert 536, 580
Wahrnehmung 35, 164, 180, 821
– Theorien 35
– unbewusste 180
– unbewusste (subliminale) 164
– und Handlung 821
Wahrnehmungsforschung 14
Wahrnehmungskonstanz 31, 46
wahrnehmungsökologischer Ansatz 39
Wahrnehmungsschwelle 46
Wahrnehmungstäuschungen 14
Wason-Aufgabe 539, 562
Was-Pfad 17
Wasserumschüttaufgaben 597, 600, 601
Weber'sche Konstante 35, 46
Wechselkosten 278, 306, 689, 693, 699
Wenn-dann-Aussage 535
Wenn-dann-Regel 537, 552, 553
– Ausnahmen 552
Werbung 348
Werkzeuggebrauch 833
Werkzeugtransformation 711, 713
– Erlernen 713
Wernicke-Aphasie 457
Wernicke-Areal 457, 517
Wertfunktion 628
Wiedererkennen 411, 417
– Interferenz 417
Wiedererkennungsschema 728, 742
Wiedergabeschema 728, 742
Wiederholungsblindheit 169, 180
Willensfreiheit 254
Willenshandlung 254, 306

willentliche Handlungssteuerung 255, 257, 259, 274
– kognitionspsychologische Ansätze 259
– Kognitive Neurowissenschaft 274
– Kontrollprobleme 257
Willkürbewegung 756
Willkürmotorik 750
Wisconsin-Kartensortiertest 278, 306
Wissen 482
– syntaktisches 482
Wissenserwerb 322, 357
Wissensrepräsentationen 401
Wo-Pfad 17
Wörter 438, 439, 442, 443, 444, 449, 460, 461
– als Kernelemente der Sprache 438
– Bedeutung 444
– Form 442
– interne Struktur 443
– Mehrdeutigkeit 444
– Selektion 449, 460
– strukturelle Merkmale 443
– Typen 461
Worterkennung 437, 445, 451, 452
– Gehirn 452
– visuelle 451
Worterkennungsprozess 449
Wortform 438, 456, 461
Wortgedächtnis 442
Wortklasse 443, 461
Wortlängeneffekt 424
Wortproduktion (s. auch Sprachproduktion) 437, 452
Wortstamm 443, 461
Wortstammergänzungsaufgabe 408

X

X-Bar-Schema 473

Z

Zapfen 16
Zeichensetzung 481
Zeigarnik-Effekt 269, 306
zeitliche Diskontierung 284
zentrale Exekutive 157, 253, 287, 306, 423, 425
zentrales Nervensystem (ZNS) 711
Zeugenaussagen 402
Ziel 224, 228, 246, 256, 306, 699, 830, 835
– ambivalentes 228
Zielbindung (Commitment) 241, 245
Zielerweiterung 604, 614
zielgerichtetes Verhalten 256
Zielrealisierung 264
Zielselektion 264
Zielzustand 589, 614
ZNS (zentrales Nervensystem) 711
Zugriffsbewusstsein 156, 180
zukunftsorientiertes Denken 286
zustandsabhängige Erinnerung 414
Zwei-Faktoren-Theorie 206
Zwei-Hochschwellen-Modell 403, 410
Zwei-Pfade-Modell 826
Zwei-Prozess-Modelle 650
Zwei-Seile-Problem 598
Zweiwertigkeit 536