ATZ/MTZ-Fachbuch




Stefan Pischinger
Ulrich Seiffert *Hrsg.*

# Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

*8. Auflage*

Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Antriebsstränge macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, anwendungsorientiert und aktuell zusammenstellt.
Die Reihe wendet sich an Ingenieure der Kraftfahrzeugentwicklung und Antriebstechnik sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Fahrzeug- und Antriebstechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Stefan Pischinger
Ulrich Seiffert
(Hrsg.)

# Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

**8., aktualisierte und erweiterte Auflage**

Springer Vieweg

*Herausgeber*
Stefan Pischinger
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Ulrich Seiffert
WiTech Engineering GmbH
Braunschweig, Deutschland

ATZ/MTZ-Fachbuch
ISBN 978-3-658-09527-7 ISBN 978-3-658-09528-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4

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

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2000, 2001, 2003, 2005, 2007, 2011, 2013, 2016
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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

tedrive
Steering




# TEDRIVE iHSA®
# AKTIVIERT LENKSYSTEME

tedrive Steering hat speziell für den Nutzfahrzeugsektor die preisgekrönte und patentierte iHSA® Technologie (intelligent Hydraulic Steering Assist) weiterentwickelt. Mit dem innovativen iHSA® System lässt sich eine Vielzahl von Fahrerassistenzfunktionen wie aktive Spurhaltung, Seitenwindkompensation, City Mode, Anhängerstabilisierung, Radunwuchtenausgleich und Rangierhilfe via Joystick zuschalten. In tedrive Zahnstangen- und tedrive Kugelumlauflenkungen modular integrierbar, bietet die iHSA® Technologie Nutzfahrzeug- und Busherstellern bei allen hydraulischen Lenksystemen eine hohe Design- und Funktionsflexibilität.

## iHSA® – DAS INTELLIGENTE PLUS AN SICHERHEIT FÜR ALLE FAHRZEUGKLASSEN

tedrive Steering I Henry-Ford II-Straße 15 I 42489 Wülfrath, Deutschland
Fon: +49 (0) 2058 905-0 I sales@td-steering.com

www.td-steering.com

# Vorwort

Die Neuauflage des Handbuches Kraftfahrzeugtechnik ist der Nachfolger des über viele Jahrzehnte herausgegebenen Taschenbuches der Professoren Heinrich Buschmann und Paul Koeßler. Dessen Erstausgabe erschien im Jahr 1940. Professor Koeßler gab im Jahre 1973 die achte und damit letzte Auflage heraus. Fahrzeugingenieure benutzen noch heute die in diesem Buch dargestellten Grundlagen für ihre Arbeit. Wir haben es deshalb als besondere Herausforderung empfunden, an der vollständigen Neufassung dieses für Lehre, Forschung und Praxis wichtigen Werkes aus Herausgeber und Autoren mitwirken zu können. Das vorliegende Buch beschreibt in umfassender Weise die faszinierende Welt des Automobils und seiner Entwicklung. Mehr als 100 namhafte Persönlichkeiten der Wissenschaft und der Automobil- und Zulieferindustrie sind als Mitautoren beteiligt. Damit ist dieses Handbuch auch ein Zeitdokument, welches den heutigen hohen Stand und die rasante Weiterentwicklung des Kraftfahrzeuges beschreibt. Für die Erstellung der 8. Auflage hat auch ein Herausgeberwechsel stattgefunden. Herr Professor Braess hat seine hervorragende Tätigkeit als Mitherausgeber an Herrn Professor Stefan Pischinger übergeben. Durch die weitere Herausgebertätigkeit von Professor Ulrich Seiffert wurde die Kontinuität dieses Standardwerks gewahrt.

Die Anforderungen an die Automobilindustrie haben sich in den letzten Jahren deutlich erhöht. Ohne eine Wertigkeit vorzunehmen, spiegeln sie sich in den folgenden Schlagworten wieder: Globalisierung, verändertes Mobilitätsverhalten, unterschiedliche Marktanforderungen, veränderte Antriebsenergien und Konzepte, Vernetzung der Infrastruktur mit anderen Verkehrsteilnehmern, Telematik, Infotainment, Sensorik, teil- bis vollautomatisches Fahren, erhöhte Sicherheits- und Umweltanforderungen insbesondere Senkung der Stickoxid- und Kohlendioxidemissionen.

Ausgehend von den Bedürfnissen nach Mobilität werden die Anforderungen und die daraus folgenden Zielkonflikte definiert, aus denen sich in Verbindung mit den physikalisch-technischen Grundlagen die Rahmenbedingungen für moderne Fahrzeuge ergeben. Das Design ist ein ganz wesentliches Element für Kundengewinnung, Kaufentscheid und Kundenakzeptanz und wird deshalb ausführlich behandelt. Das Kapitel Fahrzeugkonzepte und Package zeigt auf, dass es, je nach konkreten Schwerpunktvoraussetzungen, zu einer großen Vielzahl unterschiedlicher Gesamtkonzepte und Varianten kommt.

Einen großen Umfang nimmt die Erläuterung der Antriebskonzepte ein. Speziell der Elektroantrieb, die Hybridfahrzeuge, Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge werden dargestellt. Auch der 2-Taktmotor und die Gasturbine als Fahrzeugantrieb werden beurteilt.

Einen breiten Raum nimmt das Kapitel der „klassischen" Antriebe ein. Moderne Hubkolbenmotor-Technik für Otto- und Dieselmotoren prägen neben der Elektromobilität, den Hybridfahrzeugen und den Brennstoffzellenvarianten die absehbare Zukunft. Es wird deutlich, dass auch die Otto- und Dieselmotoren weiterhin ein hohes Weiterentwicklungspotenzial aufweisen. Abgasnachbehandlung, Aufladung und Optimierung der Nebenaggregate sind weitere wichtige Themen. Die Getriebevarianten werden immer zahlreicher, wie die Beispiele Doppelkupplungsgetriebe oder Allradantriebskonzepte zeigen. Langfristig von großer Bedeutung sind additive und alternative Kraftfahrstoffe bzw. Antriebsenergien, die im Vergleich behandelt werden. Besonders der neue Fahrzyklus und das Verhalten der Fahrzeuge im Praxisbetrieb bilden den neuen Beurteilungsstatus.

Der Fahrzeugaufbau wird ebenfalls immer anspruchsvoller und komplexer, wie schon die Anzahl der behandelten Themen zeigt. Diese reichen von den Grundlagen selbsttragender

Karosserien, Space-Frame-Techniken und Cabriolets über Ergonomie und Komfort bis hin zu Kommunikations- und Navigationssystemen. Auch im Fahrwerk steigt der Elektronik-Umfang weiter an – Stichworte sind „Drive by Wire“ und Fahrerassistenzsysteme bis hin zum teil- und vollautomatisierten Fahren. Damit ist schon angedeutet, dass fast alle Funktionen und Systeme im Fahrzeug elektronische Komponenten beinhalten werden. In dem umfassenden Kapitel Fahrzeugsicherheit werden die unfallvorbeugenden, die unfallmildernden Maßnahmen und die integrale Sicherheit dargelegt.

Die steigenden Anforderungen haben in den letzten Jahrzehnten zu deutlichen Erhöhungen der Fahrzeuggewichte geführt. Eine Umkehr dieser Gewichtszunahme findet zurzeit statt. Werkstofftechnik, Fertigungsverfahren und Bauweisen der Zukunft haben deshalb besonders der Forderung nach Leichtbau zu genügen, ohne dabei weitere Aspekte wie das Recycling zu vernachlässigen. Bei der damit zusammenhängenden steigenden Komplexität der Fahrzeuge, ihrer Entwicklung, der Vernetzung der Fahrzeughersteller und ihrer Systemlieferanten weltweiter Fertigungsstätten usw. ist es zwangsläufig, dass der Optimierung des Produktentstehungsprozesses eine immer größere Bedeutung zukommt. Verkürzung der Entwicklungszeiten, Begrenzung der Entwicklungskosten bei steigenden Qualitätssicherungsverfahren sowie „Virtual Reality“-Methoden; alle am Produktentstehungsprozess Beteiligten arbeiten wie ausführlich gezeigt wird, von Anfang an zusammen („Simultaneous Engineering“), wobei sich auch die Produktions- und Logistikprozesse stark verändern, Stichwort „4.0“.

Die achte Auflage erhält viele Aktualisierungen und Erweiterung in fast allen Bereichen. Dies zeigt sich besonders im Hauptkapitel Elektrik, Elektronik und Software. In diesem Zusammenhang sind besonders Telematik, Infotainment und Multimediaanwendungen zu nennen. Dabei wird das Automobil immer stärker in die globale Kommunikationswelt einbezogen. Die Zunahme der Fahrerassistenzsysteme und der Einsatz des eCalls (Notruf) vollzieht eine starke Vernetzung des Automobils mit seinem Umfeld. Der Weg vom teilautomatisierten zum vollautomatisierten Fahren scheint nicht mehr aufzuhalten zu sein, wobei die Zeitachse offen ist.

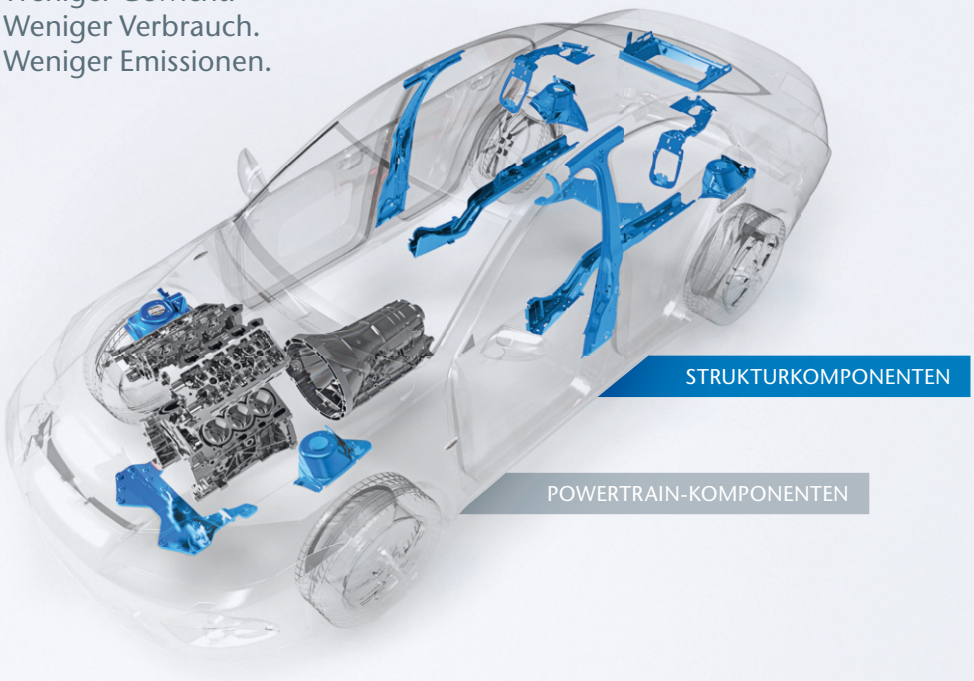
Zahlreiche Neuentwicklungen, aber auch die öffentliche Diskussion zur globalen $CO_2$-Situation, zum Feinstaub und Stickoxid haben einen starken Einfluss auf die Fahrzeugentwicklung. Die Aktualisierungen zeigen sich in praktisch allen Antriebskapiteln, vor allem bei den Hybridantriebs-Konzepten, den reinen Elektroantrieben und den Brennstoffzellenfahrzeugen sowie beim umfassenden Bordenergie-Management. Wegen der rasanten Weiterentwicklung war es notwendig, relevante Kapitel zu überarbeiten und zu aktualisieren.

Bei der Erstellung dieses Handbuches stand das große Fachwissen vieler Experten aus wissenschaftlichen Einrichtungen und der gesamten deutschsprachigen Industrie zur Verfügung. Allen Autoren sagen wir für ihre Beiträge herzlichen Dank, ebenso wie dem Springer Vieweg Verlag für die Anregung, dieses Handbuch herauszubringen, und den Mitarbeitern, vor allem Frau Elisabeth Lange und Herrn Ewald Schmitt sowie allen Lesern für die Hinweise, die zu den Verbesserungen in der achten Auflage geführt haben.

Aachen/Braunschweig im September 2016

Stefan Pischinger
Ulrich Seiffert

Weniger Gewicht.
Weniger Verbrauch.
Weniger Emissionen.




nemak

# Ihr innovativer Partner für Powertrain- und Strukturbauteile

Seit mehr als 30 Jahren hat sich Nemak auf die Entwicklung und die Produktion von Aluminiumkomponenten für die Automobilindustrie spezialisiert, mit dem Fokus auf komplexen Teilen wie Zylinderköpfe, Motorblöcke, Getriebegehäuse und Strukturkomponenten. Technical Leadership, höchste Qualitätsstandards und uneingeschränkte Kundenorientierung bilden die Eckpfeiler unseres internationalen Erfolgs.



www.nemak.com


D.A.S.
Dienstleistungen
für Akustik &
Schwingungstechnik
WIR
HÖREN
GENAUER
HIN
Als Experte für Vibroakustik wollen wir nur eines: Ihnen helfen, Ihr Produkt zu optimieren! Engineering, Messtechnik und modernste Prüfstände – alles aus einer Hand. Wir begleiten Ihren NVH-Entwicklungsprozess von der Komponente über den Motor bis hin zum Gesamtfahrzeug. Wir sind Ihr zuverlässiger, dynamischer und flexibler NVH-Dienstleister mit Sitz im Raum Stuttgart.
D.A.S. GmbH
Bertha-Benz-Str. 1 • 71120 Grafenau
T +49 7033 69338-0 • E info@das-nvh.de
Spüren Sie den Unterschied!
www.das-nvh.de

# Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Mobilität** | Dr. Irene Feige<br>Dipl.-Kfm. Frank Hansen |
| **2** | **Anforderungen, Zielkonflikte** | |
| 2.1 | Produktinnovation, bisherige Fortschritte | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |
| 2.2 | Anforderungen durch den Gesetzgeber | Prof. Andre Seeck<br>Dr. Jost Christian Gail<br>Bernd Lorenz |
| 2.2.5 | Normen | Egbert Fritzsche |
| 2.3 | Neue Technologien | Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess |
| **3** | **Fahrzeugphysik** | |
| 3.1 | Grundlagen | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |
| 3.2 | Aerodynamik | Dr.-Ing. Heinz Mankau<br>Dr.-Ing. Carsten Repmann |
| 3.3 | Wärmetechnik | Dr. Andreas Eilemann<br>Dr. Eberhard Pantow<br>Dr. Markus Wawzyniak<br>Dr. Achim Wiebelt |
| 3.4 | Akustik und Schwingungen | Dr.-Ing. Mihiar Ayoubi |
| **4** | **Formen und neue Konzepte** | |
| 4.1 | Design | Dipl.-Ing. Klaus Wolff<br>Dipl.-Des. Hans Dieter Futschik |
| 4.2 | Fahrzeugkonzept und Package | Dipl. Ing. Dipl. Wirtsch. Ing. August Achleitner<br>Dipl.-Ing. Christiaan Burgers<br>Dr.-Ing. Gernot Döllner |
| 4.3 | Neuartige Antriebe | |
| 4.3.1 | Elektroantriebe | Dr. Robert B. Inderka<br>Dr.-Ing. Sicong von Malottki<br>Dipl.-Ing. Manuel Urstöger |
| 4.3.2 | Brennstoffzellenantriebssysteme | Prof. Dr. Christian H. Mohrdieck<br>Herbert Schulze<br>Dr. Martin Wöhr |
| 4.3.3 | Hybridantrieb | Dipl.-Ing. (FH) Peter Antony<br>Dipl.-Ing. (FH) Norbert Ebner<br>M.Sc. Christoph Schildhauer |
| 4.3.4 | Stirlingmotor, Dampfmotor, Gasturbine und Schwungrad | Prof. Dipl.-Ing. Karl E. Noreikat<br>Markus Wagner, B. Eng. |
| 4.3.5 | Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor | Dr. Edgar Berger<br>Dipl.-Ing. Manfred Gruber<br>Dr.-Ing. Gerrit Kiesgen |

| | | |
|---|---|---|
| **5** | **Antriebe** | |
| 5.1 | Grundlagen der Motorentechnik | Dr.-Ing. Henning Baumgarten<br>M.Sc. Marius Böhmer<br>Dipl.-Ing. Michael Hinz<br>Dr.-Ing. Martin Nijs<br>Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger<br>Dipl.-Ing. Mike Souren<br>Dr.-Ing. Matthias Thewes |
| 5.2 | Dieselmotor | Dipl.-Ing. Richard Dorenkamp<br>Dr. Klaus-Peter Schindler |
| 5.2.7 | Abgasnachbehandlung | Dr. Thorsten Düsterdiek<br>Michael Zeiser<br>Dr. Torsten Schütte |
| 5.3 | Aufladung | Prof. Dr.-Ing. Roland Baar |
| 5.4 | Triebstrang | Dr. Jürgen Greiner<br>Dr.-Ing. Gerhard Gumpoltsberger<br>Dr. Christoph Sasse<br>Dipl.-Ing. Klaus Steinel |
| 5.5 | Allradantriebe, Brems- und Antriebsregelungen | |
| 5.5.1 | Allradantriebs-Konzepte | Dipl.-Ing. Heribert Lanzer<br>Ing. Hermann Pecnik |
| 5.5.2 | Antriebs- und Bremsregelung | Gerhard Kurz<br>Georg Eichner |
| 5.6 | Abgasanlagen | Dr. Dennis Bönnen<br>Dipl.-Ing. Emmanuel Jean<br>Dipl.-Ing. Klaus Spindler |
| 5.7 | Bordenergie-Management | Dipl.-Ing. Markus Beck<br>Dipl.-Ing. Roman Lahmeyer |
| 5.8 | Chancen und Risiken des Zweitaktmotors | Dipl.-Ing. MSc Bert Pingen |
| 5.9 | Konventionelle und alternative Kraftstoffe und Energieträger | Dr.-Ing. Jan Hentschel |
| 5.10 | Kraftstoffsystem | Hugo Kroiss<br>Markus Huber |
| 5.11 | Kraftstoffversorgungsanlagen für alternative Energieträger | Dr. Klaas Kunze |
| **6** | **Aufbau** | |
| 6.1 | Karosseriebauweisen | Dipl.-Ing. Lothar Teske<br>Dipl.-Ing. Helmut Goßmann |
| 6.1.2 | Aluminium Space Frame – ASF | Dipl.-Ing. Heinrich Timm |
| 6.1.3 | Leichtbaulösungen im Karosseriebau | Dr. Armin Plath |
| 6.1.4 | Cabriolet | Dipl.-Ing. (FH) Walter Pecho |
| 6.2 | Materialien der Karosserie | Prof. Dr. Rudolf Stauber<br>Dr.-Ing. René Konorsa |

| | | |
|---|---|---|
| 6.3 | Oberflächenschutz | Dr. Klaus Werner Thomer |
| 6.4 | Fahrzeuginnenraum | |
| 6.4.1 | Ergonomie | Prof. i.R. Dr. Heiner Bubb |
| 6.4.2 | Kommunikationssysteme und Navigation | Dr. Hans-Jörg Vögel |
| 6.4.3 | Innenraumbehaglichkeit/Thermischer Komfort | Dr. Markus Wawzyniak |
| 6.4.4 | Fahrzeuginnenausstattung | Georg Laukart<br>Dipl.-Ing. Thomas Vorberg |
| **7** | **Fahrwerk** | |
| 7.1 | Einführung | Dr.-Ing. Axel Pauly |
| 7.2 | Bremssysteme | Dipl.-Ing. James Remfrey<br>Dipl.-Ing. Steffen Gruber<br>Dr.-Ing. Jan Sendler |
| 7.3 | Reifen, Räder, Gleitschutzketten | Dipl.-Phys. Heiner Volk |
| 7.3.7 | Räder | Dipl.-Ing. (FH) Roman Müller |
| 7.3.8 | Gleitschutzketten | Dr.-Ing. Hansjörg Rieger |
| 7.4 | Fahrwerkauslegung | Dr.-Ing. Andreas Bootz<br>Dr.-Ing. Jens Holtschulze<br>Dipl.-Ing. Hubert Strobl<br>Dipl.-Ing. Ludwig Seethaler |
| 7.5 | Beurteilungskriterien | Dr.-Ing. Erich Sagan<br>Dipl.-Ing. Martin Schwarz<br>Dipl.-Ing. Thomas Unterstraßer (†) |
| **8** | **Elektrik/Elektronik/Software** | |
| 8.1 | Bedeutung Elektrik/Elektronik/Software für das Automobil | Dipl.-Ing. Simon Fürst<br>Dr.-Ing. Thomas Scharnhorst |
| 8.2 | Das Bordnetz | Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz |
| 8.3 | Kommunikationsbordnetze | Dr.-Ing. Olaf Krieger |
| 8.4 | Elektromagnetische Verträglichkeit | Dr. Wolfgang Pfaff |
| 8.5 | Funktionsdomänen | |
| 8.5.1 | Einleitung | |
| 8.5.2 | Beleuchtung | Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer |
| 8.5.3 | Instrumentierung für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion | Dr. Heinz-Bernhard Abel<br>Dr. Heinrich-Jochen Blume |
| 8.5.4 | Infotainment/Multimedia | Dipl.-Ing. Gerhard Heyen |
| 8.5.4.7 | Fahrzeugantennen | Dr.-Ing. Guido Schneider |
| 8.5.5 | Fahrerassistenzsysteme | Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll |
| 8.5.6 | Telematik | Dipl.-Ing. Günther Kasties |

| | | |
|---|---|---|
| 8.6 | Mensch-Technik-Kooperation | Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer<br>Dr. rer. soc. Meike Jipp |
| 8.7 | Software | Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy |
| 8.8 | Moderne Methoden der Regelungstechnik | Dr. Jörg Helbig<br>Dr. Lothar Ganzelmeier |
| **9** | **Fahrzeugsicherheit** | Prof. Dr.-Ing. Mark Gonter<br>Dipl.-Ing. André Leschke<br>Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |
| 9.1 | Allgemein | |
| 9.2 | Gebiete der Fahrzeugsicherheit | |
| 9.3 | Ergebnisse aus der Unfallforschung | |
| 9.4 | Unfallvermeidende Sicherheit | |
| 9.5 | Biomechanik und Schutzkriterien | |
| 9.6 | Quasistatische Anforderungen an die Karosserie und Komponenten | |
| 9.7 | Dynamische Fahrzeugkollision | |
| 9.8 | Insassenschutz | |
| 9.9 | Integrale Sicherheit | |
| 9.10 | Sicherheit von elektrischen Fahrzeugen | |
| 9.11 | Zusammenfassung | |
| **10** | **Werkstoffe und Fertigungsverfahren** | |
| 10.1 | Ein Blick zurück | Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Ludwig Hamm<br>Dipl.-Ing. Volker Peitz |
| 10.2 | Werkstoffe moderner Kraftfahrzeuge | |
| 10.3 | Wettbewerb und Zusammenspiel der Werkstoffe | |
| 10.4 | Wälzlager im Fahrzeugbau | Dr.-Ing. Robert Plank<br>Berthold Krautkrämer<br>Reinhart Malik<br>Dr. Peter Solfrank |
| **11** | **Produktentstehungsprozess** | |
| 11.1 | Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess | Dr.-Ing. Ulrich Widmann |
| 11.2 | Fahrzeugkonzeption in der frühen Entwicklungsphase | Jürgen Weissinger<br>Prof. Dr.-Ing. Thomas Breitling |
| 11.3 | Berechnung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung | Dr.-Ing. Ulrich Widmann<br>Dr.-Ing. Ulrich Hackenberg |
| 11.4 | Mess- und Versuchstechnik | Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess |
| 11.5 | Qualitätsmanagement | Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess |
| 11.6 | Betrieb und Instandhaltung von Kraftfahrzeugen | Dipl.-Ing. Norbert Grawunder<br>Prof. Dr.-Ing. Volker Liskowsky |

| | | |
|---|---|---|
| **12** | **Rennfahrzeuge** | Dipl.-Ing. Carsten Dieterich<br>Dipl.-Ing. Christoph Müller<br>Dipl.-Ing. (FH) Frank Nysten<br>BMW AG, Motorsport |
| 12.1 | Einsatzbedingungen | |
| 12.2 | Fahrzeug-Kategorien | |
| 12.3 | Bauweise | |
| 12.4 | Performance und Rundenzeit | |
| 12.5 | Entwicklung Aerodynamik und Fahrdynamik | |
| 12.6 | Zuverlässigkeit | |
| **13** | **Ausblick – Wo geht es hin?** | Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger<br>Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |

# Firmen- und Institutionenverzeichnis

- Adam Opel AG, Rüsselsheim
  - Dr. Thorsten Düsterdiek
  - Dipl.-Ing. Helmut Goßmann
  - Dr. Thorsten Schütte
  - Dipl.-Ing. Lothar Teske
  - Dr. Klaus Werner Thomer (vormals)
- Altair Engineering GmbH, Böblingen
  - Dipl.-Ing. Thomas Vorberg
- Audi AG, Ingolstadt
  - Dr.-Ing. Ulrich Hackenberg (vormals)
  - Dipl.-Ing. Heinrich Timm (vormals)
  - Dr.-Ing. Ulrich Widmann
- BBS Motorsport GmbH, Haslach
  - Dipl.-Ing. (FH) Roman Müller
- BMW Group, München
  - Dr.-Ing. Mihiar Ayoubi
  - Dr. Edgar Berger
  - Dr.-Ing. Andreas Bootz
  - Dr. Irene Feige
  - Dipl.-Ing. Simon Fürst
  - Dipl.-Ing. Manfred Gruber
  - Dipl.-Kfm. Frank Hansen
  - Dr.-Ing. Jens Holtschulze
  - Markus Huber
  - Dr.-Ing. Gerrit Kiesgen
  - Dr.-Ing. René Konorsa
  - Hugo Kroiss
  - Dr. Klaas Kunze
  - Gerhard Kurz
  - Dr.-Ing. Axel Pauly (vormals)
  - Dr.-Ing. Erich Sagan (vormals)
  - Dipl.-Ing. Martin Schwarz
  - Dipl.-Ing. Ludwig Seethaler
  - Dipl.-Ing. Hubert Strobl
  - Dipl.-Ing. Thomas Unterstraßer (†)
  - Dr. Hans-Jörg Vögel
- Bosch Engineering GmbH, Abstatt
  - Dipl.-Ing. Markus Beck
  - Dipl.-Ing. Roman Lahmeyer
- Continental AG, Hannover
  - Dipl.-Phys. Heiner Volk
- Continental Automotive GmbH, Babenhausen
  - Dr. Heinz-Bernhard Abel
  - Dr. Heinrich-Jochen Blume

- Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
  - Dipl.-Ing. James Remfrey
  - Dipl.-Ing. Steffen Gruber
  - Dr.-Ing. Jan Sendler
- Daimler AG, Kirchheim/Teck-Nabern
  - Prof. Dr. Christian H. Mohrdieck
- Daimler AG, Sindelfingen
  - Dipl.-Ing. (FH) Peter Antony
  - Prof. Dr.-Ing. Thomas Breitling
  - Dipl.-Ing. (FH) Norbert Ebner
  - Dipl.-Designer Hans Dieter Futschik
  - M.Sc. Christoph Schildhauer
  - Herbert Schulze
  - Jürgen Weissinger
  - Dr. Martin Wöhr
- Daimler AG, Stuttgart-Untertürkheim
  - Dr. Robert B. Inderka
  - Dr.-Ing. Sicong von Malottki
  - Dipl.-Ing. Manuel Urstöger
  - Markus Wagner, B. Eng.
- Faurecia Emissions Control Technologies, Augsburg
  - Dr. Dennis Bönnen
  - Dipl.-Ing. Emmanuel Jean
  - Dipl.-Ing. Klaus Spindler
- FEV GmbH, Aachen
  - Dr.-Ing. Henning Baumgarten
  - Dipl.-Ing. Carsten Dieterich
  - Dipl.-Ing. Michael Hinz
  - Dr.-Ing. Martin Nijs
  - Dipl.-Ing. (FH) Frank Nysten
  - Dipl.-Ing. Mike Souren
  - Dr.-Ing. Matthias Thewes
  - Dipl.-Ing. Klaus Wolff
- Ford-Werke GmbH, Köln
  - Dipl.-Ing. MSc Bert Pingen
- Hella KGaA, Lippstadt
  - Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
- Magna Exteriors & Interiors Management GmbH, München
  - Georg Laukart
- MAGNA STEYR Engineering AG & CO KG, A-Graz
  - Dipl.-Ing. Heribert Lanzer
  - Ing. Hermann Pecnik
- MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
  - Dr. Andreas Eilemann
  - Dr. Eberhard Pantow
  - Dr. Markus Wawzyniak
  - Dr. Achim Wiebelt

- OECON P&S GmbH, Braunschweig
  - Dipl.-Ing. Günther Kasties
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Stuttgart
  - Dr.-Ing. Gernot Döllner
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach
  - Dipl. Ing. Dipl. Wirtsch. Ing. August Achleitner
  - Dipl.-Ing. Christiaan Burgers
  - Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Ludwig Hamm (vormals)
  - Dipl.-Ing. Volker Peitz
- Robert Bosch GmbH, Stuttgart
  - Dr. Wolfgang Pfaff
- RUD Ketten Rieger & Dietz GmbH & Co. KG, Aalen
  - Dr.-Ing. Hansjörg Rieger
- Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
  - Berthold Krautkrämer
  - Reinhart Malik
  - Dr.-Ing. Robert Plank
  - Dr. Peter Solfrank
- Vehico GmbH, Braunschweig
  - Dr. Lothar Ganzelmeier
  - Dr. Jörg Helbig
- Visteon Innovation & Technology GmbH, Kerpen
  - Dipl.-Ing. Gerhard Heyen
- Volkswagen AG, Wolfsburg
  - Dipl.-Ing. Richard Dorenkamp (vormals)
  - Dr. Thorsten Düsterdiek
  - Prof. Dr.-Ing. Mark Gonter
  - Dipl.-Ing. Norbert Grawunder
  - Dr.-Ing. Jan Hentschel
  - Dr.-Ing. Olaf Krieger
  - Dipl.-Ing. André Leschke
  - Dr.-Ing. Heinz Mankau (vormals)
  - Dr. Armin Plath
  - Dr.-Ing. Carsten Repmann
  - Dr. Klaus-Peter Schindler
  - Dr.-Ing. Guido Schneider
  - Dr. Torsten Schütte
  - Michael Zeiser
- Webasto-Edscha Cabrio GmbH, Hengersberg
  - Dipl.-Ing. (FH) Walter Pecho

- WiTech Engineering GmbH, Braunschweig
  - Dr.-Ing. Thomas Scharnhorst
  - Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert
- ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen
  - Dr.-Ing. Gerhard Gumpoltsberger
  - Dipl.-Ing. Klaus Steinel
- ZF Getriebe GmbH Saarbrücken, Kressbronn
  - Dr. Jürgen Greiner
- ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt
  - Dr. Christoph Sasse

## Institutionenverzeichnis


- Bundesanstalt für Straßenwesen
  - Dr. Jost Christian Gail
  - Bernd Lorenz
  - Prof. Andre Seeck
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
  - Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
  - Dr. rer. soc. Meike Jipp
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
  - Prof. Dr.-Ing. Peter M. Knoll
- NorCon Scientific Consulting, Esslingen
  - Prof. Dipl.-Ing. Karl E. Noreikat
- RWTH Aachen University
  - M.Sc. Marius Böhmer
  - Dipl.-Ing. Christoph Müller
  - Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger
- Technische Universität Berlin
  - Prof. Dr.-Ing. Roland Baar
- Technische Universität München
  - Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy
  - Prof. i.R. Dr. Heiner Bubb
- Universität Kassel
  - Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz
- Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Berlin
  - Egbert Fritzsche
- Westsächsische Hochschule Zwickau
  - Prof. Dr.-Ing. Volker Liskowsky
- Zentralinstitut für Neue Materialien und Prozesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg
  - Prof. Dr. Rudolf Stauber




Die **HEAD acoustics GmbH** ist seit 30 Jahren der zuverlässige Partner der Automobil- und Telekommunikationsbranche und eines der weltweit führenden Unternehmen für ganzheitliche Akustiklösungen sowie Schall- und Schwingungsanalyse.

Innovation, Know-how und Erfahrung: Die Forschung sowie Entwicklung von Hard- und Software zur Messung, Analyse und Optimierung von Sprach- und Audioqualität findet international Anerkennung und setzt Standards.

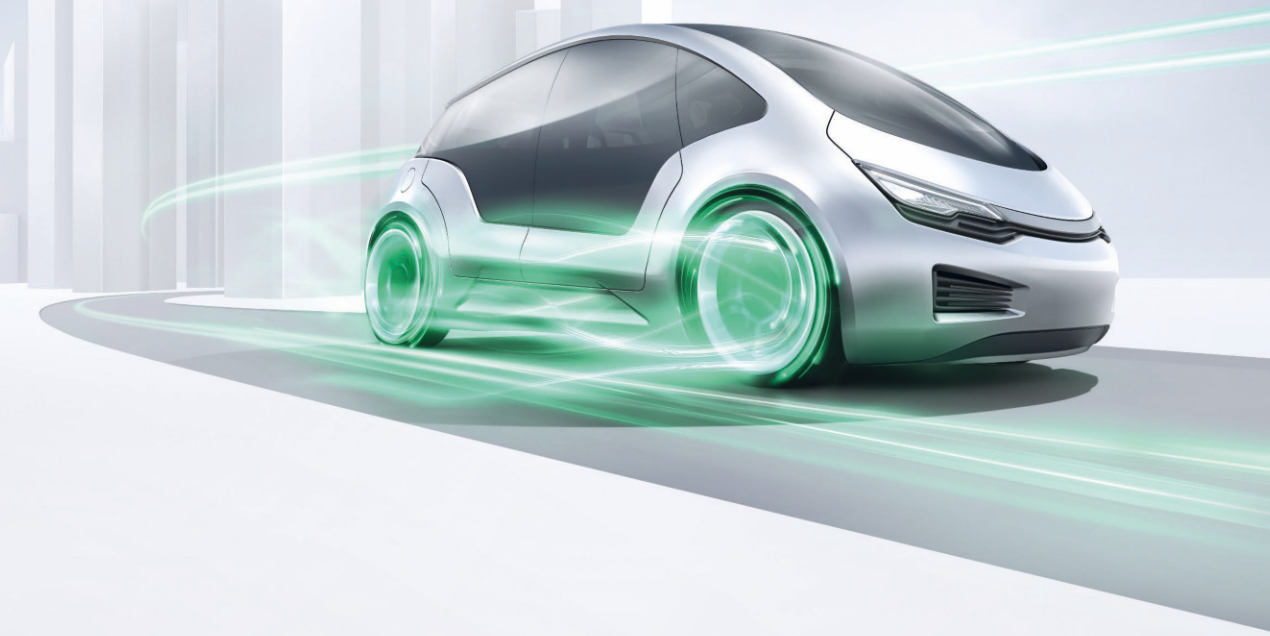
Das technisch aufeinander abgestimmte Produktportfolio der **HEAD acoustics GmbH** bietet kundenspezifische und zielorientierte Lösungsansätze und Dienstleistungen.

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.head-acoustics.de oder kontaktieren Sie uns direkt mit einer Mail an info@head-acoustics.de

BOSCH
Technik fürs Leben

# Erste Wahl für sauberes und sparsames Fahren

## Antriebssysteme und elektrifizierte Mobilität von Bosch



Mit kompletten Antriebssystemen für alle Fahrzeugklassen sorgt Bosch für Energieeffizienz in der Mobilität. Dazu gehören nicht nur die kontinuierliche Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren sondern auch Niedervolt- und Hochvolt-Hybridsysteme und Antriebssysteme für Elektrofahrzeuge. Die intelligente Vernetzung von Komponenten und Systemen macht den Antrieb effizient und damit sauber und sparsam. Dafür kombiniert Bosch Hardware, Software und Services zu umfassenden Antriebslösungen.
**www.bosch-mobility-solutions.de**

# Inhaltsverzeichnis


**1 Mobilität** ... 1
*Dr. Irene Feige und Dipl.-Kfm. Frank Hansen*

1.1 **Einleitung** ... 2
1.2 **Ursachen und Arten der Mobilität** ... 3
1.2.1 Definitionen ... 3
1.2.2 Aktivitäten bestimmen Mobilität ... 4
1.2.3 Transportsysteme für den Güterverkehr ... 5
1.2.4 Einige spezielle Ausprägungen von Mobilität ... 6
1.3 **Spannungsfelder und Auswirkungen der Mobilität** ... 6
1.4 **Mobilitätsrelevante Anforderungen an Automobile** ... 8
1.4.1 Grundsätzliche Anforderungen ... 8
1.4.2 Einige spezielle Anforderungen ... 8
**Literatur** ... 9

**2 Anforderungen, Zielkonflikte** ... 11
*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess, Egbert Fritzsche, Dr. Jost Christian Gail, Bernd Lorenz, Andre Seeck und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*

2.1 **Produktinnovation, bisherige Fortschritte** ... 12
2.1.1 Kundenwünsche ... 12
2.1.2 Gesetzgebung ... 14
2.1.3 Fahrzeugtechnik ... 16
2.2 **Anforderungen durch den Gesetzgeber** ... 22
2.2.1 Einleitung ... 22
2.2.2 Regelungsvorbereitende Forschung ... 22
2.2.2.1 Nationale Forschung ... 23
2.2.2.2 EU-Forschung ... 23
2.2.2.3 European Enhanced Vehicle-Safety Committee (EEVC) ... 26
2.2.2.4 Forschung auf UNECE-Ebene ... 26
2.2.3 Anforderungen der Gesetzgebung ... 27
2.2.3.1 Nationale Anforderungen ... 28
2.2.3.1.1 Fahrzeug-Zulassungsverordnung ... 28
2.2.3.1.2 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung ... 28
2.2.3.1.3 EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung ... 28
2.2.3.2 Europäische Anforderungen ... 29
2.2.3.2.1 EG-Typgenehmigung ... 29
2.2.3.2.2 Technische Überwachung ... 30

2.2.3.2.3 Anforderungen der UNECE ... 30
2.2.3.2.4 Anforderungen im Rahmen des Selbstzertifizierungsverfahrens ... 31
2.2.3.3 Inhalte der verbindlichen Vorschriften für Kraftfahrzeuge ... 31
2.2.3.3.1 Beispiele für Anforderungen an die aktive Sicherheit ... 36
2.2.3.3.2 Beispiele für Anforderungen an die passive Sicherheit ... 37
2.2.3.3.3 Beispiele für Anforderungen an den Umweltschutz ... 38
2.2.4 Anforderungen des Verbraucherschutzes ... 40
2.2.4.1 Euro NCAP ... 41
2.2.4.2 Global NCAP und Verbraucherschutzprogramme in anderen Regionen der Welt ... 44
2.2.5 Normen ... 45
2.2.5.1 Einleitung ... 45
2.2.5.2 Nationale und internationale Struktur ... 45
2.2.5.3 Grundregeln der Normungsarbeit und Anwendung von Normen ... 45
2.2.5.4 Erarbeitung einer Norm ... 46
2.2.5.5 Facharbeit in Normenausschüssen ... 46
2.2.5.6 Normung in der Automobiltechnik ... 47
2.2.5.7 Aufgaben des NA Automobil ... 48
2.2.5.8 Normungsfelder ... 48
2.2.5.9 Nutzen der Normung ... 49
2.3 **Neue Technologien** ... 50
**Literatur** ... 53

**3 Fahrzeugphysik** ... 57
*Dr.-Ing. Mihiar Ayoubi, Dr. Andreas Eilemann, Dr.-Ing. Heinz Mankau, Dr. Eberhard Pantow, Dr.-Ing. Carsten Repmann, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, Dr. Markus Wawzyniak und Dr. Achim Wiebelt*

3.1 **Grundlagen** ... 58
3.1.1 Definitionen ... 58
3.1.2 Fahrwiderstand und Antrieb ... 59
3.1.2.1 Gesamtwiderstand ... 59
3.1.2.2 Rollwiderstand ... 60
3.1.2.3 Luftwiderstand ... 60
3.1.2.4 Antriebswiderstand ... 61
3.1.2.5 Steigungswiderstand ... 61
3.1.2.6 Beschleunigungswiderstand ... 61
3.1.2.7 Zugkraftausnutzung ... 61
3.1.2.8 Zugkraftdiagramm ... 61
3.1.3 Kraftstoffverbrauch beeinflussende Maßnahmen ... 62

3.1.4 Dynamische Kräfte ... 62
3.1.4.1 Fahrdynamik und Fahrverhalten ... 62
3.1.5 Weitere Definitionen ... 63
3.2 **Aerodynamik** ... 63
3.2.1 Grundlagen ... 63
3.2.2 Wirkungsbereiche ... 66
3.2.2.1 Luftwiderstand/Fahrleistung ... 66
3.2.2.2 Fahrsicherheit ... 68
3.2.2.3 Benetzung und Verschmutzung ... 69
3.2.2.4 Einzelkräfte ... 70
3.2.2.5 Kühlung/Bauteiltemperaturen ... 71
3.2.2.6 Innenraumklima ... 72
3.2.2.7 Windgeräusche ... 72
3.2.3 Einordnung in die Gesamtentwicklung ... 74
3.3 **Wärmetechnik** ... 75
3.3.1 Kühlung von Verbrennungsmotoren ... 75
3.3.1.1 Auslegung von Kühlern ... 76
3.3.1.2 Kühlerbauarten ... 77
3.3.1.3 Lüfter und Lüfterantriebe ... 79
3.3.1.4 Kühlmodule ... 79
3.3.1.5 Gesamtsystem Motorkühlung ... 80
3.3.2 Beheizen und Kühlen des Fahrgastraumes ... 81
3.3.2.1 Die Funktion Heizen und ihre Komponenten ... 81
3.3.2.2 Die Funktion der Kälteanlage und ihre Komponenten ... 83
3.3.2.3 Verdichter und Regelung der Kälteleistung ... 85
3.3.2.4 Auslegung der Klimaanlage ... 86
3.3.2.5 Kraftstoffmehrverbrauch durch die Klimaanlage ... 87
3.3.3 Komponenten und Systeme zur Heizung und Kühlung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen ... 88
3.3.3.1 Einführung ... 88
3.3.3.2 Microhybride ... 88
3.3.3.3 Milde Hybride und Batteriekühlung ... 89
3.3.3.4 Vollhybride und Plug-in-Hybride ... 91
3.3.3.5 Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ... 92
3.4 **Akustik und Schwingungen** ... 93
3.4.1 Einleitung ... 93
3.4.2 Fahrgeräusche ... 98

3.4.3 Antriebsgeräusch ... 99
3.4.3.1 Luftschall ... 100
3.4.3.2 Aktive Luftschallbeeinflussung ... 103
3.4.3.3 Körperschall ... 104
3.4.3.4 Auslegung Akustik und Schwingungskomfort am Beispiel eines 3-Zylinder-Motors ... 107
3.4.4 Rollgeräusch ... 107
3.4.5 Windgeräusch ... 110
3.4.6 Mechatronische Geräusche ... 112
3.4.6.1 Stellmotoren ... 113
3.4.6.2 Fahrzeugklimatisierung ... 114
3.4.6.3 Lüfter und Gebläse ... 115
3.4.6.4 Lenkungssystem ... 115
3.4.6.5 Fahrwerksregelung ... 116
3.4.6.6 Biegeschlaffe Leitungen ... 116
3.4.7 Klappern, Knarzen, Quietschen ... 117
3.4.8 Außengeräusch ... 117
3.4.8.1 Standgeräusch ... 117
3.4.8.2 Fahrgeräusche ... 118
3.4.8.3 Vorbeifahrt nach ISO 362 ... 119
3.4.8.4 Reifen/Fahrbahngeräusch ... 120
3.4.9 Schwingungskomfort ... 122
3.4.9.1 Motorerregte Schwingungen ... 123
3.4.9.2 Fahrbahnerregte Schwingungen ... 124
3.4.9.3 Raderregte Schwingungen ... 125
3.4.10 Akustik und Schwingungen beim Elektrischen Fahren ... 125
3.4.11 Prozess Akustikentwicklung ... 126
**Literatur** ... 127

**4 Formen und neue Konzepte** ... 131
*Dipl.-Ing. Dipl. Wirtsch. Ing. August Achleitner, Dipl.-Ing. (FH) Peter Antony, Dr. Edgar Berger, Dipl.-Ing. Christiaan Burgers, Dr.-Ing. Gernot Döllner, Norbert Ebner, Dipl.-Ing. (FH), Hans Dieter Futschik, Dipl.-Des., Manfred Gruber, Dipl.-Ing. (TU), Dr.-Ing. Gerrit Kiesgen, Dr. Robert B. Inderka, Dr.-Ing. Sicong von Malottki, Prof. Dr. Christian H. Mohrdieck, Prof. Dipl.-Ing. Karl E. Noreikat, Manuel Urstöger, Dipl.-Ing., Christoph Schildhauer, M. Sc., Herbert Schulze, Markus Wagner, Klaus Wolff und Dr. Martin Wöhr*
4.1 **Design** ... 132
4.1.1 Der Design Prozess ... 132
4.1.1.1 Kreative Konzeptphase ... 132
4.1.1.2 3D Entwicklung ... 134
4.1.1.3 Physische Design Modelle ... 135
4.1.1.4 Color und Trim ... 136

4.1.1.5 Design Freeze ... 137
4.1.2 Design und Markenimage ... 137
4.1.2.1 Neue Automobilfirma ... 137
4.1.2.2 Etablierte Automobilfirma ... 138
4.1.3 Designstudien und Advanced Design ... 139
4.2 **Fahrzeugkonzept und Package** ... 140
4.2.1 Einführung und Definition ... 140
4.2.1.1 Definition Fahrzeugkonzept ... 140
4.2.1.2 Definition Package ... 141
4.2.2 Gestaltung von Fahrzeugkonzepten ... 141
4.2.2.1 Außenabmessungen und Fahrzeugklassen ... 142
4.2.2.2 Aufbauausprägungen und Konzeptsegmente ... 143
4.2.2.3 Fahrzeuggrundformen ... 143
4.2.2.4 Sitzigkeit, Gepäckraum und Innenraumvariabilität ... 146
4.2.2.5 Wesentliche Innenraumabmessungen ... 146
4.2.2.6 Aggregate- und Antriebsstrangkonzepte ... 150
4.2.2.6.1 Bauart des Motors ... 151
4.2.2.6.2 Aggregateanordnung ... 151
4.2.2.6.3 Antriebskonzept und Triebstrang ... 151
4.2.2.6.4 Antriebsstrangkonzepte ... 154
4.2.2.7 Elektrifizierung des Antriebsstrangs ... 157
4.2.2.7.1 Hybridkonzepte ... 157
4.2.2.7.2 Elektrofahrzeuge ... 158
4.2.2.8 Fahrzeuggewicht ... 158
4.2.3 Einflussfaktoren und Gestaltungsfelder des Package ... 159
4.2.3.1 Gesetze und Vorschriften ... 159
4.2.3.2 Innenraummaßkonzeption ... 159
4.2.3.3 Konzeptbeeinflussende Maßketten ... 161
4.2.3.3.1 Die Fahrzeuglänge definierende Maßketten ... 162
4.2.3.3.2 Die Fahrzeughöhe definierende Maßketten ... 163
4.2.3.3.3 Die Fahrzeugbreite definierende Maßketten ... 163
4.2.3.4 Ausgewählte Aspekte des Packages ... 164
4.2.3.4.1 Karosseriestruktur ... 164
4.2.3.4.2 Motorraum ... 164
4.2.3.4.3 Unterboden ... 164
4.2.3.4.4 Tank, Leitungen und Reserverad ... 165
4.2.3.5 Anforderungen aus Produktion und Kundendienst ... 165
4.2.3.5.1 Produktion und Modularisierung ... 165
4.2.3.5.2 Kundendienst ... 165

4.2.3.6 Einfluss von Plattform und Baukästen ... 165
4.2.4 Beispiele ausgewählter Fahrzeugkonzepte in unterschiedlichen Klassen ... 166
4.2.4.1 Beispiele nach Fahrzeuggrößenklasse ... 166
4.2.4.1.1 Kompaktklasse ... 166
4.2.4.1.2 Minicar ... 166
4.2.4.1.3 Mittelklasse ... 167
4.2.4.1.4 Obere Mittelklasse ... 167
4.2.4.1.5 Oberklasse ... 167
4.2.4.1.6 Luxusklasse ... 168
4.2.4.2 Beispiele nach Fahrzeugausprägung ... 168
4.2.4.2.1 Roadster ... 168
4.2.4.2.2 Coupé und Sportcoupé ... 168
4.2.4.2.3 Sport Utility Vehicles (SUV) ... 168
4.2.4.2.4 Van ... 169
4.2.5 Konzeption und Packageprozess in der industriellen Praxis ... 169
4.2.6 Entwicklung der Fahrzeugkonzepte ... 170
4.3 **Neuartige Antriebe** ... 173
4.3.1 Elektroantriebe im Kfz ... 173
4.3.1.1 Elektrischer Antriebsstrang eATS ... 179
4.3.1.2 Elektrische Maschinen ... 183
4.3.1.3 Leistungselektronik ... 189
4.3.1.4 Regelung des E-Motor-Systems ... 191
4.3.1.5 Getriebe ... 192
4.3.2 Brennstoffzellenantriebssysteme ... 195
4.3.2.1 Antriebsarchitektur mit PEM-Brennstoffzellen ... 196
4.3.2.1.1 Brennstoffzellen-Stack ... 196
4.3.2.1.2 Stack-Peripherie ... 201
4.3.2.1.3 Mobile Wasserstoffspeicher ... 202
4.3.2.1.4 Hybridisierter Brennstoffzellenantrieb ... 203
4.3.2.2 Sicherheit ... 204
4.3.2.3 Rechtsvorschriften und Standards ... 204
4.3.2.4 Brennstoffzellen-Fahrzeuge ... 205
4.3.2.4.1 Brennstoffzellen – Pkw und Transporter ... 205
4.3.2.4.2 Brennstoffzellen-Busse ... 206
4.3.2.4.3 Demonstrationen und Flottenversuche ... 207
4.3.2.5 Kraftstoffversorgung und Infrastruktur ... 207
4.3.2.6 Ausblick ... 210
4.3.3 Hybridantrieb ... 211
4.3.3.1 Szenario ... 211
4.3.3.2 Elektrifizierungsklassen ... 211

4.3.3.3 Konzepte und Betriebsstrategien ... 213
4.3.3.4 Betriebsstrategien ... 221
4.3.3.5 Plug-In Hybride ... 224
4.3.3.6 Hybrid Sportwagen ... 228
4.3.3.7 Antriebskomponenten aus Hybridsicht ... 230
4.3.3.8 Fahrzeugintegration ... 232
4.3.4 Stirlingmotor, Dampfmotor, Gasturbine und Schwungrad ... 234
4.3.4.1 Stirlingmotor ... 234
4.3.4.1.1 Kennwerte von Stirlingmotoren ... 236
4.3.4.2 Dampfmotor ... 236
4.3.4.3 Gasturbine ... 237
4.3.4.4 Schwungrad ... 239
4.3.5 Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor ... 242
4.3.5.1 Konstruktive Merkmale ... 243
4.3.5.2 $H_2$-Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung ... 243
4.3.5.3 $H_2$-Brennverfahren mit innerer Gemischbildung ... 244
4.3.5.4 Wirkungsgradpotenziale ... 245
4.3.5.5 $H_2$-Ottomotor als Fahrzeugantrieb ... 246
**Literatur** ... 246

**5 Antriebe** ... 253
*Prof. Dr.-Ing. Roland Baar, Dr.-Ing. Henning Baumgarten, Dipl.-Ing. Markus Beck, Marius Böhmer, M.Sc., Dr. Dennis Bönnen, Dipl.-Ing. Richard Dorenkamp, Dr. Thorsten Düsterdiek, Georg Eichner, Dr. Jürgen Greiner, Dr.-Ing. Gerhard Gumpoltsberger, Dr.-Ing. Jan Hentschel, Michael Hinz, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Emmanuel Jean, Hugo Kroiss, Gerhard Kurz, Roman Lahmeyer, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Heribert Lanzer, Dr.-Ing. Martin Nijs, Ing. Hermann Pecnik, Dipl.-Ing. MSc Bert Pingen, Prof. Dr. Dr. E.h. Franz Pischinger, Dr. Christoph Sasse, Dr. Klaus-Peter Schindler, Dr. Torsten Schütte, Mike Souren, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Klaus Spindler, Dipl.-Ing. Klaus Steinel, Dr.-Ing. Matthias Thewes und Michael Zeiser*

5.1 **Grundlagen der Motorentechnik** ... 254
5.1.1 Prozess des Verbrennungsmotors ... 254
5.1.1.1 Viertakt-Verfahren ... 254
5.1.1.2 Zweitakt-Verfahren ... 257
5.1.2 Definitionen und Kenngrößen ... 258
5.1.2.1 Leistungskenngrößen ... 258
5.1.2.2 Spezifische Motorkenngrößen ... 258
5.1.2.3 Wirkungsgrade ... 259
5.1.3 Bauarten ... 261
5.1.3.1 Hubkolbenmotoren ... 261
5.1.3.1.1 Bauformen ... 261
5.1.3.1.2 Kinematik des Kurbeltriebs ... 263

5.1.3.1.3 Kräfte und Momente im Triebwerk ... 264
5.1.3.2 Rotationskolbenmotoren ... 269
5.1.3.3 Range Extender Aggregate ... 269
5.1.3.4 Konstruktive Anforderungen an Verbrennungsmotoren für hybride Antriebsstränge ... 270
5.1.4 Konstruktion und Motormechanik ... 271
5.1.4.1 Kurbelgehäuse ... 272
5.1.4.2 Kurbelwelle ... 274
5.1.4.3 Pleuel ... 275
5.1.4.4 Kolben ... 276
5.1.4.5 Zylinderkopf und Dichtung ... 276
5.1.4.6 Ventiltrieb und Steuertrieb ... 278
5.1.4.6.1 Hauptbauteile des Ventiltriebs ... 278
5.1.4.6.2 Bauformen des Ventiltriebs ... 279
5.1.4.6.3 Variable Ventilsteuerung ... 283
5.1.4.7 Motorkühlung ... 286
5.1.4.8 Motorschmierung ... 289
5.1.4.9 Saugrohr ... 292
5.1.4.10 Nebenaggregate und Package ... 293
5.1.5 Ottomotoren ... 295
5.1.5.1 Ladungswechsel ... 297
5.1.5.1.1 Ansaugsystem ... 297
5.1.5.1.2 Abgassystem ... 299
5.1.5.1.3 Ventilsteuerzeiten und variable Ventilsteuerung ... 300
5.1.5.2 Gemischbildung ... 305
5.1.5.2.1 Homogene Gemischbildung ... 307
5.1.5.2.2 Benzin-Direkteinspritzung ... 308
5.1.5.2.3 Abgasrückführung ... 316
5.1.5.2.4 Ladungsbewegung ... 317
5.1.5.3 Zündung ... 318
5.1.5.4 Downsizing und Aufladung ... 323
5.1.5.4.1 Betriebspunktverlagerung ... 323
5.1.5.4.2 Variable Verdichtung ... 327
5.1.5.5 Verbrennung ... 327
5.1.5.6 Wassereinspritzung ... 330
5.1.5.7 Abgasreinigung ... 330
5.1.5.7.1 Drei-Wege-Katalysator ... 331
5.1.5.7.2 De$NO_x$-Katalysator ... 337

5.1.5.8 Motormanagement ... 339
5.1.5.8.1 Motorsteuerung ... 340
5.1.5.8.2 Betriebsstrategie und Motormanagement bei Benzin-Direkteinspritzung ... 342
5.2 **Dieselmotor** ... 344
5.2.1 Definitionen ... 344
5.2.1.1 Verbrennungsmotor ... 344
5.2.1.2 Dieselmotor ... 344
5.2.2 Historie des Dieselmotors ... 345
5.2.3 Motortechnische Grundlagen ... 345
5.2.3.1 Einleitung ... 345
5.2.3.2 Vergleich motorischer Verbrennungsverfahren ... 345
5.2.3.3 Die Thermodynamik des Dieselmotors ... 348
5.2.4 Die dieselmotorische Verbrennung ... 351
5.2.4.1 Allgemeines ... 351
5.2.4.2 Einspritzung und Gemischbildung ... 351
5.2.4.3 Selbstzündung und Zündverzug ... 352
5.2.4.4 Verbrennung und Brennverlauf ... 353
5.2.4.5 Abgasemissionen ... 354
5.2.5 Die dieselmotorischen Verbrennungsverfahren ... 358
5.2.5.1 Ausführungsformen ... 358
5.2.5.2 Vorkammerverfahren ... 359
5.2.5.3 Wirbelkammerverfahren ... 359
5.2.5.4 Direkte Einspritzung ... 359
5.2.5.5 Qualitative Bewertung von Verbrennungsverfahren ... 361
5.2.5.6 Simulation der dieselmotorischen Verbrennung ... 362
5.2.6 Konstruktive und funktionale Merkmale des Dieselmotors ... 363
5.2.6.1 Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse ... 363
5.2.6.2 Einspritzsysteme ... 365
5.2.6.3 Aufladung ... 371
5.2.6.4 Abgasrückführung ... 374
5.2.6.5 Luftmanagement ... 375
5.2.6.6 Brennverfahren ... 375
5.2.6.7 Downsizing und Downspeeding ... 375
5.2.7 Abgasnachbehandlung ... 376
5.2.7.1 Oxidationskatalysator (DOC) ... 376
5.2.7.2 Dieselpartikelfilter (DPF) ... 377
5.2.7.3 Entstickung ... 379
5.2.7.4 Real Driving Emissions ... 386
5.2.8 Dieselkraftstoffe ... 387

5.2.9 Regelung ... 391
5.2.10 Die Zukunft des Dieselmotors ... 391
5.3 **Aufladung** ... 401
5.3.1 Hintergrund ... 401
5.3.2 Aufladeprinzip ... 402
5.3.2.1 Schwingrohraufladung ... 403
5.3.2.2 Kompressoraufladung ... 403
5.3.2.3 Abgasturboaufladung ... 404
5.3.2.4 Sonstige Systeme ... 405
5.3.3 Konstruktiver Aufbau ... 406
5.3.4 Kopplung von Motor und Verdichter ... 407
5.3.5 Regelung ... 408
5.3.5.1 Kompressor ... 408
5.3.5.2 Turbolader mit Bypassregelung (Wastegate) ... 409
5.3.5.3 Turbolader mit Regelung über einen verstellbaren Düsenring ... 409
5.3.5.4 Zweistufig geregelte Aufladung aus zwei Abgasturboladern ... 410
5.3.5.5 Zweistufig geregelte Aufladung aus Abgasturbolader und Kompressor ... 410
5.3.6 Motorkomponenten im unmittelbaren Zusammenhang zur Aufladung ... 411
5.3.6.1 Ladeluftkühlung ... 411
5.3.6.2 Abgasrückführung ... 411
5.3.6.3 Schubumluft ... 411
5.3.7 Sonstige Regelungssysteme ... 412
5.3.7.1 Turbolader mit Regelung über eine verschiebbare Hülse am Turbineneintritt ... 412
5.3.7.2 Elektrisch unterstützte Aufladung ... 412
5.3.7.3 Registeraufladung ... 412
5.3.7.4 Turbo-Compound-Verfahren ... 413
5.3.8 Downsizing und Aufladung: Potentiale, Grenzen, Auswirkungen ... 413
5.3.9 Methoden in der Entwicklung ... 414
5.3.10 Ausblick ... 416
5.4 **Triebstrang** ... 417
5.4.1 Überblick ... 417
5.4.1.1 Einleitung ... 417
5.4.1.2 Aufgaben des Getriebes ... 417
5.4.1.3 Aufbau und Elemente des Triebstrangs ... 419
5.4.1.4 Achsantrieb ... 420
5.4.1.5 Differenzialgetriebe ... 420
5.4.1.6 Allrad-Verteilergetriebe ... 421
5.4.1.7 Gelenkwellen ... 421

5.4.1.8 Schwingungssystem ... 421
5.4.1.8.1 Torsionsschwingungen ... 422
5.4.1.8.2 Biegeschwingungen ... 422
5.4.2 Anfahrelemente ... 422
5.4.2.1 Kupplungen ... 422
5.4.2.1.1 Drehmomentübertragung ... 422
5.4.2.1.2 Trennen ... 424
5.4.2.1.3 Drehschwingungsdämpfung ... 424
5.4.2.1.4 Kupplungsbetätigung ... 424
5.4.2.2 Hydrodynamische Drehmomentwandler ... 426
5.4.2.2.1 Einleitung ... 426
5.4.2.2.2 Aufbau ... 426
5.4.2.2.3 Funktionsweise ... 426
5.4.2.2.4 Ausblick ... 429
5.4.3 Das Handschaltgetriebe-System ... 429
5.4.3.1 Funktion und Aufbau ... 429
5.4.3.2 Verzahnung ... 430
5.4.3.3 Synchronisierung ... 431
5.4.3.4 Weitere Getriebekomponenten ... 431
5.4.3.5 Getriebeschaltung ... 432
5.4.3.6 Ausführungsbeispiele ... 432
5.4.3.7 Automatisierte Schaltgetriebe ... 433
5.4.4 Stufenautomatgetriebe ... 433
5.4.4.1 Funktionsweise ... 433
5.4.4.2 Aufbau ... 435
5.4.4.3 Baugruppen ... 436
5.4.4.4 Betätigung ... 440
5.4.4.5 Betriebsverhalten ... 441
5.4.4.6 Ausführungsbeispiele ... 443
5.4.5 Stufenlose Getriebe ... 445
5.4.5.1 Funktionsweise ... 445
5.4.5.2 Aufbau ... 446
5.4.5.3 Baugruppen ... 446
5.4.5.4 Betätigung ... 448
5.4.5.5 Betriebsverhalten ... 448
5.4.5.6 Ausführungsbeispiele ... 449
5.4.6 Doppelkupplungsgetriebe ... 450
5.4.6.1 Funktionen und Bauteile ... 450
5.4.6.2 Radsatzsynthese ... 453

5.4.7 Hybridantriebe ... 454
5.4.7.1 Hybridsysteme ... 454
5.4.7.2 Mikrohybrid ... 454
5.4.7.3 Mildhybrid und Vollhybrid ... 454
5.4.7.4 Verbrauchseinsparung ... 454
5.4.8 Elektronische Getriebesteuerung ... 457
5.4.8.1 Gesamtsystem ... 457
5.4.8.2 Steuergerät ... 458
5.4.8.3 Bauteile ... 459
5.4.8.4 Funktionen ... 461
5.4.9 Ausblick ... 463
**5.5 Allradantriebe, Brems- und Antriebsregelungen ... 465**
5.5.1 Allradantriebs-Konzepte ... 465
5.5.1.1 Verwendung von Allradantrieben ... 465
5.5.1.2 Kennlinien von Allradantrieben ... 465
5.5.1.3 Systematik der Antriebe ... 467
5.5.1.4 Systemkomponenten ... 468
5.5.1.4.1 Zentraldifferenziale ... 468
5.5.1.4.2 Kupplungen mit selbsttätiger Momentenanpassung ... 471
5.5.1.4.3 Kupplungen mit externer Regelung ... 472
5.5.1.4.4 Abschaltbarer Allrad-Teilleistungspfad ... 476
5.5.1.4.5 Variable Drehmomentverteilung zur aktiven Beeinflussung des Gierverhaltens eines Fahrzeuges ... 477
5.5.1.5 Getriebeabtriebe ... 481
5.5.1.6 Systemauswahl ... 483
5.5.1.7 Einfluss auf Crashverhalten ... 484
5.5.1.8 Geräusch- und Schwingungstechnik Noise-Vibration-Harshness (NVH) ... 484
5.5.1.9 Dimensionierung ... 485
5.5.1.10 Allradantrieb und Regelsysteme ... 485
5.5.2 Antriebs- und Bremsregelung ... 486
5.5.2.1 Unfallvorbeugende Sicherheit ... 486
5.5.2.2 Traktionssysteme ... 487
5.5.2.3 Stabilitätssysteme ... 487
5.5.2.3.1 Passive Systeme ASC, ASR ... 487
5.5.2.3.2 Aktive Systeme, DSC, ESP ... 489
5.5.2.3.3 Elektronisches Bremsen Management EBM ... 491
5.5.2.3.4 EBMx für Allradfahrzeuge ... 492
5.5.2.3.5 Weiterentwicklung ... 493
5.5.2.4 DSC, ESP mit Fremdkraft-Bremsanlage ... 493

5.5.2.5 Bremssysteme für Fahrzeuge mit Hybridantrieb ... 493
5.5.2.6 Sensorik ... 494
5.5.2.6.1 Raddrehzahlfühler ... 494
5.5.2.6.2 Fahrdynamiksensorik ... 494
5.6 **Abgasanlagen** ... 495
5.6.1 Aufgaben und Komponenten der Abgasanlage ... 495
5.6.2 Katalysatoren ... 497
5.6.3 Partikelfilter ... 498
5.6.4 Canning und Monolith-Lagerung ... 499
5.6.5 Schalldämpfer ... 500
5.6.6 Akustische Abstimmung ... 502
5.6.7 Körperschall ... 503
5.7 **Bordenergie-Management** ... 503
5.7.1 Ausgangssituation ... 503
5.7.2 Der Klauenpolgenerator im Energiebordnetz ... 504
5.7.2.1 Leistungs- und Wirkungsgradverhalten ... 505
5.7.2.2 Überspannungsschutz ... 506
5.7.2.3 Generator mit Schnittstellenregler ... 506
5.7.3 Elektrische Speicher im Energiebordnetz ... 507
5.7.3.1 Blei-Säure Batterien ... 508
5.7.3.1.1 Entladen von Blei-Säure-Batterien ... 508
5.7.3.1.2 Laden von Blei-Säure-Batterien ... 509
5.7.3.2 Traktionsspeicher ... 509
5.7.3.2.1 Aufbau und Auslegung von Traktionsbatterien ... 509
5.7.4 Energiebordnetze für konventionelle Fahrzeuge ... 510
5.7.4.1 Energiebordnetze für Start/Stopp Fahrzeuge ... 510
5.7.4.2 Zwei-Batterien-Bordnetze ... 511
5.7.4.3 Elektrisches Energiemanagement EEM in konventionellen Fahrzeugen ... 511
5.7.4.3.1 Ruhestrommanagement ... 513
5.7.4.3.2 Fahrbetrieb/Dynamisches Energiemanagement ... 513
5.7.4.3.3 Diagnose und Anzeige ... 513
5.7.4.3.4 Zusatzfunktionen ... 514
5.7.4.3.5 Batteriezustandserkennung/Batteriemanagement ... 514
5.7.4.3.6 Batteriesensor EBS ... 514
5.7.5 Energiebordnetze für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang ... 515
5.7.5.1 Elektrifizierte Antriebsstränge ... 517
5.7.5.2 Elektromotoren ... 517
5.7.5.3 Energiespeicher ... 517
5.7.5.4 Sicherheitsanforderungen in Hochvolt-Bordnetzen ... 517

5.8 **Chancen und Risiken des Zweitaktmotors** ... 517
5.8.1 Das Zweitaktverfahren ... 518
5.8.2 Das verwendete Konzept ... 518
5.8.3 Die Entwicklungsschwerpunkte ... 519
5.8.3.1 Abgasverhalten ... 519
5.8.3.2 Geräuschverhalten ... 520
5.8.3.3 Kraftstoffverbrauch ... 520
5.8.3.4 Mechanische Standfestigkeit ... 521
5.8.3.5 Package/Gewicht ... 522
5.8.3.6 Kosten ... 522
5.8.4 Zusammenfassung und Bewertung ... 524
5.9 **Konventionelle und alternative Kraftstoffe und Energieträger** ... 524
5.9.1 Fossile Energiequellen ... 528
5.9.2 Regenerative Energiequellen ... 530
5.9.2.1 Biokraftstoffe auf Basis von Biomasse ... 531
5.9.2.2 Biokraftstoffe auf Basis von Licht und Kohlendioxid ... 533
5.9.2.3 Mobilität auf Basis von Elektrizität ... 534
5.9.2.4 Evaluation der Potenziale regenerativer Energiequellen für die Mobilität ... 537
5.9.3 Zusammenfassung ... 539
5.10 **Kraftstoffsystem** ... 540
5.10.1 Aufgaben und Komponenten ... 540
5.10.2 Gesetzliche und kundenspezifische Vorschriften ... 541
5.10.2.1 Gesetzliche Vorschriften ... 541
5.10.2.2 Kundenspezifische Anforderungen ... 546
5.10.3 Kraftstoffbehälter ... 546
5.10.3.1 Anordnung im Fahrzeug ... 547
5.10.3.2 Behälterwerkstoff ... 547
5.10.3.2.1 Metall Kraftstoffbehälter ... 547
5.10.3.2.2 Kunststoff Kraftstoffbehälter (KKB) ... 547
5.10.4 Befüllsystem ... 549
5.10.5 Ausgleichsvolumen und Be-/Entlüftungssystem ... 549
5.10.5.1 Externes Ausgleichsvolumen ... 550
5.10.5.2 Internes Ausgleichsvolumen ... 550
5.10.5.3 Aktivkohlefilter (AKF) ... 550
5.10.6 Füllstandserfassung ... 550
5.10.6.1 Hebelgeber ... 551
5.10.6.2 Tauchrohrgeber ... 551
5.10.6.3 Füllstandssensor ohne bewegliche Teile ... 551

5.10.7 Kraftstoffförderung ... 552
5.10.7.1 Elektrokraftstoffpumpe (EKP) ... 552
5.10.7.2 Schwalltopf ... 554
5.10.7.3 Saugstrahlpumpe (SSP) ... 554
5.10.7.4 Aufbereitung des Kraftstoffs ... 554
5.10.8 Elektrische/elektronische Systemeinbindung ... 555
5.10.9 Besondere Anforderungen an die KVA bei hybridisierten Fahrzeugen ... 555
5.10.10 Ausblick ... 556
**5.11 Kraftstoffversorgungsanlagen für alternative Energieträger** ... 557
5.11.1 Anforderungen ... 557
5.11.2 Gesetzliche Vorschriften ... 557
5.11.3 Anordnung im Fahrzeug ... 558
5.11.4 Kraftstoffbehälter und Kraftstoffsysteme für Druckgas ... 559
5.11.4.1 Kraftstoffbehälter ... 559
5.11.4.2 Kraftstoffsysteme ... 559
5.11.5 Kraftstoffbehälter und Kraftstoffsysteme für tiefkalt flüssige Gase ... 561
5.11.5.1 Kraftstoffbehälter ... 561
5.11.5.2 Kraftstoffsysteme ... 562
5.11.6 Speichersysteme für tiefkalte superkritische Gase ... 562
5.11.7 Entwicklungstendenzen ... 563
**Literatur** ... 564

**6 Aufbau** ... 575
*Univ.-Prof.i.R. Dr.rer.nat. habil. Heiner Bubb, Dipl.-Ing. Helmut Goßmann, Dr.-Ing. René Konorsa, Walter Pecho, Dipl.-Ing. (FH), Dr. Armin Plath, Jochen Reichhold, Prof. Dr. Rudolf Stauber, Dipl.-Ing. Lothar Teske, Dr. Klaus Werner Thomer, Dipl.-Ing. Heinrich Timm, Dr. Hans-Jörg Vögel und Dr. Markus Wawzyniak*
**6.1 Karosseriebauweisen** ... 576
6.1.1 Selbsttragende Karosserie ... 576
6.1.1.1 Entwicklungsanforderungen ... 576
6.1.1.2 Außenhaut ... 576
6.1.1.2.1 Design ... 576
6.1.1.2.2 Aerodynamik und Aeroakustik ... 576
6.1.1.3 Package ... 578
6.1.1.4 Karosseriestruktur ... 580
6.1.1.4.1 Unterbau ... 580
6.1.1.4.2 Aufbau ... 582
6.1.1.4.3 Zusammenbau Seitenwand ... 582
6.1.1.4.4 Dach ... 583
6.1.1.4.5 Anbauteile ... 583

6.1.1.4.6 Verbindungstechnik ... 585
6.1.1.4.7 Materialauswahl und Leichtbau ... 585
6.1.1.4.8 Sicken und Verprägungen ... 587
6.1.1.5 Karosserieeigenschaften ... 587
6.1.1.5.1 Zusammenbautoleranzen ... 587
6.1.1.5.2 Karosseriesteifigkeiten ... 587
6.1.1.5.3 Aufprallverhalten ... 588
6.1.1.6 Ausblick ... 589
6.1.2 Aluminium Space Frame – ASF ... 589
6.1.2.1 Einleitung ... 589
6.1.2.2 AUDI-Aluminium Space Frame – ASF ... 590
6.1.2.3 Das Karosseriekonzept des Audi-ASF ... 592
6.1.2.4 Der Aufbau der ASF Karosserie A8 (D3) ... 593
6.1.2.4.1 Fortschritte in der ASF Architektur nach zwanzig Jahren Produktionserfahrung ... 594
6.1.2.5 Werkstoffe und Fertigungstechnologien ... 595
6.1.2.5.1 Blechteile und Verfahren ... 595
6.1.2.5.2 Strangpressprofile und Verfahren ... 596
6.1.2.5.3 Gussteile und Verfahren ... 597
6.1.2.6 Fügeverfahren ... 598
6.1.2.6.1 MIG-Schweißen mit Impulslichtbogen ... 598
6.1.2.6.2 Stanznieten mit Halbhohlniet ... 598
6.1.2.6.3 Vollstanznieten ... 599
6.1.2.6.4 Automatisiertes Direktverschrauben (FDS – Flow Drill Screws) ... 599
6.1.2.6.5 Laserstrahl-Schweißen ... 600
6.1.2.6.6 Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen ... 600
6.1.2.6.7 Rollfalzen + Kleben ... 600
6.1.2.7 Reparaturkonzept ... 600
6.1.2.8 Energiebilanz ... 602
6.1.3 Leichtbaulösungen im Karosseriebau ... 602
6.1.3.1 Die Zukunft der Stahlkarosserie „FutureSteelVehicle“ ... 602
6.1.4 Cabriolet ... 610
6.1.4.1 Einführung ... 610
6.1.4.2 Rohbau ... 610
6.1.4.2.1 Karosseriesteifigkeit ... 611
6.1.4.2.2 Karosserietilger ... 612
6.1.4.2.3 Betriebsfeste Auslegung von Cabriolet-Karosserien ... 612
6.1.4.3 Sicherheitsrelevante Auslegung von Cabriolets ... 612
6.1.4.4 Aeroakustik ... 613
6.1.4.5 Türen ... 614

6.1.4.6 Dachsystem ... 614
6.1.4.6.1 Faltbares Festdach (Retractable Hardtop) ... 617
6.1.4.6.2 Stoffverdeck (Softtop) ... 617
6.1.4.6.3 Komponenten des Verdecksystems ... 617
6.2 **Materialien der Karosserie** ... 620
6.2.1 Historischer Rückblick ... 620
6.2.2 Konzepte und Bauweisen ... 620
6.2.3 Anforderungen und Auslegungskriterien an die Werkstoffe der Karosserie ... 623
6.2.4 Typische Karosseriewerkstoffe ... 626
6.2.4.1 Stahlwerkstoffe ... 626
6.2.4.2 Aluminiumlegierungen ... 629
6.2.4.3 Magnesiumlegierungen ... 630
6.2.4.4 Kunststoffe ... 630
6.2.4.4.1 Thermoplaste ... 632
6.2.4.4.2 Duroplaste ... 632
6.2.5 Sortenreine Beispiele ... 634
6.2.5.1 Stahl Seitenrahmen ... 634
6.2.5.2 Aluminium Seitentür ... 635
6.2.5.3 Magnesium Instrumententafelträger ... 635
6.2.5.4 Hardtop als Sandwichkonstruktion ... 635
6.2.6 Mischbauweisen ... 635
6.2.6.1 Mischbau in der Karosserie ... 635
6.2.6.2 Mischbau im Innenraum (Cockpit) und Frontendmodule ... 637
6.2.7 Materialspezifische Aspekte der Fertigungstechnik ... 638
6.2.7.1 Tailored products ... 638
6.2.7.2 Superplastisches Umformen (SPF) ... 642
6.2.7.3 Innenhochdruckumformen (IHU) ... 642
6.2.7.4 Folientechnik als Alternative zur Nasslackierung ... 643
6.2.7.5 Fügeverfahren ... 644
6.3 **Oberflächenschutz** ... 645
6.3.1 Nutzen des Oberflächenschutzes ... 645
6.3.1.1 Korrosionsschutz ... 646
6.3.1.2 Oberflächenschutz ... 647
6.3.2 Entwicklung und Produktion des Oberflächenschutzes ... 647
6.3.2.1 Blechvorbeschichtung ... 647
6.3.2.2 Maßnahmen in der Karosseriekonstruktion ... 648
6.3.2.3 Maßnahmen in der Produktion ... 649
6.3.2.3.1 Kleben und Dichten ... 649

6.3.2.3.2 Vorbehandlung ... 651
6.3.2.3.3 Elektrotauchlackierung ... 653
6.3.2.3.4 Grund- und Decklackierung ... 654
6.3.2.4 Hohlraumkonservierung und Unterbodenschutz ... 655
6.3.2.4.1 Hohlraumkonservierung ... 656
6.3.2.4.2 Unterbodenschutz ... 656
6.3.2.5 Transportschutz ... 656
6.3.3 Ausblick ... 657
6.4 **Fahrzeuginnenraum** ... 659
6.4.1 Ergonomie ... 659
6.4.1.1 Bedeutung der Ergonomie in der Automobilgestaltung ... 659
6.4.1.2 Das Regelkreisparadigma der Ergonomie ... 660
6.4.1.2.1 Der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug ... 660
6.4.1.2.2 Das Belastungs-Beanspruchungskonzept der Ergonomie ... 663
6.4.1.2.3 Ergonomie und Komfort ... 664
6.4.1.3 Systemergonomische Gestaltung ... 666
6.4.1.3.1 Systemergonomische Regeln ... 667
6.4.1.3.2 Anzeigen ... 669
6.4.1.3.3 Bedienelemente ... 675
6.4.1.4 Anthropometrische Gestaltung ... 683
6.4.1.4.1 Kategorisierung anthropometrischer Maße und Menschmodelle ... 683
6.4.1.4.2 Pkw-Maßkonzeption nach SAE ... 686
6.4.1.4.3 Arbeitsfelder anthropometrischer Fahrzeuggestaltung ... 687
6.4.1.5 Zusammenfassung ... 693
6.4.2 Kommunikationssysteme und Navigation ... 693
6.4.2.1 Rundfunk und Entertainment ... 693
6.4.2.2 Telefonie ... 696
6.4.2.3 Mobile Datenkommunikation ... 697
6.4.2.4 Navigation ... 700
6.4.3 Innenraumbehaglichkeit/Thermischer Komfort ... 701
6.4.3.1 Komfortbedürfnisse der Fahrzeuginsassen ... 701
6.4.3.2 Funktionen und Aufbau von Klimageräten ... 703
6.4.3.2.1 Funktionen des Klimagerätes – Luft fördern ... 703
6.4.3.2.2 Funktionen des Klimagerätes – Luft reinigen ... 705
6.4.3.2.3 Funktionen des Klimagerätes – Luft temperieren und entfeuchten ... 706
6.4.3.2.4 Funktionen des Klimagerätes – Luft verteilen ... 709
6.4.3.2.5 Bauformen von Klimageräten ... 710
6.4.3.2.6 Mehrzonigkeit und Zusatzgeräte ... 711
6.4.3.3 Steuerung und Regelung von Klimaanlagen ... 711
6.4.3.3.1 Regelung und Automatisierungsgrade ... 711

6.4.3.3.2 Bedienung ... 713
6.4.3.3.3 Aktuatorik, Sensorik ... 713
6.4.4 Fahrzeuginnenausstattung ... 714
6.4.4.1 Zur Geschichte des Innenraums ... 714
6.4.4.2 Anforderungen an Innenraum und Komponenten ... 714
6.4.4.2.1 Optik ... 714
6.4.4.2.2 Olfaktorik ... 715
6.4.4.2.3 Ergonomie ... 715
6.4.4.2.4 Haptik ... 715
6.4.4.2.5 Akustik ... 716
6.4.4.2.6 Sicherheit ... 716
6.4.4.2.7 Thermischer Komfort ... 716
6.4.4.3 Baugruppen des Innenraums ... 719
6.4.4.3.1 Cockpit/Tunnelkonsole ... 719
6.4.4.3.2 Sitze ... 720
6.4.4.3.3 Tür-, Seitenverkleidungen ... 722
6.4.4.3.4 Dachhimmel, Säulenverkleidung ... 722
6.4.4.3.5 Gepäckraum/Laderaum ... 723
6.4.4.3.6 Bodenverkleidung, Akustik ... 724
6.4.4.4 Entwicklungsablauf Innenraum ... 724
6.4.4.4.1 Lastenheft ... 724
6.4.4.4.2 Berechnung/Digital Mockup ... 724
6.4.4.4.3 Teilekonstruktion ... 725
6.4.4.4.4 Datenkontrollmodelle ... 726
6.4.4.4.5 Prototypen/Testing ... 726
6.4.4.4.6 Serienproduktion/Montage ... 726
6.4.4.4.7 Variantenmanagement ... 727
6.4.4.5 Ausblick ... 727
**Literatur** ... 727

**7 Fahrwerk** ... 735
*Dr.-Ing. Andreas Bootz, Dipl.-Ing. Steffen Gruber, Dr. Jens Holtschulze, Hugo Kroiss, Dr. Klaas Kunze, Dipl.-Ing. (FH) Roman Müller, Dr.-Ing. Axel Pauly, Dipl.-Ing. James Remfrey, Dr.-Ing. Hansjörg Rieger, Dr.-Ing. Erich Sagan, Dipl.-Ing. Martin Schwarz, Dipl.-Ing. Ludwig Seethaler, Dr.-Ing. Jan Sendler, Dipl.-Ing. Hubert Strobl, Dipl.-Ing. Thomas Unterstraßer und Dipl.-Phys. Heiner Volk*
7.1 **Einführung** ... 736
7.1.1 Definition des Begriffs Fahrwerk ... 736
7.1.2 Aufgaben des Fahrwerks ... 736
7.1.3 Fahrdynamik und Fahrwerkskräfte ... 738

7.1.3.1 Querdynamik: Fahrwerkskräfte in Querrichtung ... 738
7.1.3.1.1 Lenken der Räder ... 739
7.1.3.1.2 Querverschiebung des Radaufstandspunktes ... 740
7.1.3.1.3 Stabilisieren des Fahrzeugs auf einer vorgegebenen Bahn ... 741
7.1.3.2 Längsdynamik: Fahrwerkskräfte in Fahrzeuglängsrichtung ... 741
7.1.3.3 Vertikaldynamik: Fahrwerkskräfte in Fahrzeughochrichtung ... 743
7.1.4 Basis-Zielkonflikte ... 744
7.1.5 Ausblick ... 746
7.2 **Bremssysteme** ... 746
7.2.1 Einführung ... 746
7.2.2 Auslegung von Bremssystemen ... 749
7.2.2.1 Physikalische Grundlagen ... 750
7.2.2.2 Bremskraftverteilung ... 752
7.2.2.3 Bremspedalcharakteristik ... 753
7.2.2.4 Thermische Dimensionierung ... 755
7.2.2.5 Auslegungsaspekte bei regenerativen Bremssystemen ... 756
7.2.3 Bremssystemkomponenten ... 756
7.2.3.1 Bremspedal ... 756
7.2.3.2 Bremskraftverstärker ... 758
7.2.3.3 Vakuumpumpe ... 759
7.2.3.4 (Tandem)-Hauptzylinder ... 759
7.2.3.5 Ausgleichbehälter ... 759
7.2.3.6 Bremsflüssigkeit ... 760
7.2.3.7 Bremsleitungen und -schläuche ... 761
7.2.3.8 Bremskraftverteiler ... 761
7.2.3.9 Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU) ... 761
7.2.3.10 Scheibenbremsen ... 764
7.2.3.11 Bremsscheiben ... 768
7.2.3.12 Bremsbeläge ... 770
7.2.3.13 Trommelbremsen ... 770
7.2.4 Sensoren ... 772
7.2.4.1 Betätigungswegsensor ... 773
7.2.4.2 Raddrehzahlsensor ... 773
7.2.4.3 Beschleunigungssensor ... 774
7.2.4.4 Gierratensensor ... 775
7.2.4.5 Lenkradwinkelsensor ... 775
7.2.4.6 Drucksensor ... 775
7.2.4.7 Abstandssensoren ... 776
7.2.5 Assistenzfunktionen des Bremssystems ... 776

7.2.5.1 Antiblockiersystem (ABS) ... 776
7.2.5.2 Elektronische Bremskraftverteilung (EBV) ... 782
7.2.5.3 Erweitertes Stabilitäts-Bremssystem (ABSplus) ... 783
7.2.5.4 Antriebsschlupfregelung (ASR) ... 783
7.2.5.5 Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP/DSC/VSC/…) ... 784
7.2.5.6 Bremsassistent (MBA, EBA, HBA) ... 785
7.2.5.7 Erweiterte Bremskraftverstärkungsfunktionen ... 787
7.2.5.8 Active Rollover Protection (ARP) ... 787
7.2.5.9 Abstandsregelsysteme ... 787
7.2.5.10 Elektrische Feststellbremse (Parkbremse) EPB ... 788
7.2.6 Neue und zukünftige Systemarchitekturen ... 790
7.2.6.1 Entkoppelte Bremssysteme ... 790
7.2.6.2 Regeneratives Bremssystem ... 796
7.2.6.3 Vernetztes Chassis ... 797
7.2.6.4 Ausblick ... 799
7.3 **Reifen, Räder, Gleitschutzketten** ... 800
7.3.1 Einführung ... 800
7.3.2 Reifenaufbau ... 800
7.3.3 Anforderungen an Reifen ... 801
7.3.3.1 Gebrauchseigenschaften ... 802
7.3.3.2 Gesetzliche Anforderungen ... 806
7.3.3.3 Reifen und Räder, Normung ... 806
7.3.3.4 Reifenkennzeichnung, EU-Label ... 806
7.3.4 Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn ... 808
7.3.4.1 Tragverhalten ... 808
7.3.4.2 Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften ... 808
7.3.4.3 Antreiben und Bremsen; Umfangskräfte ... 810
7.3.4.4 Schräglauf; Kräfte und Momente ... 812
7.3.4.5 Reifen unter Quer- und Längsschlupf ... 813
7.3.4.6 Reifengleichförmigkeit ... 814
7.3.5 Reifen als integraler Baustein des Gesamtsystems Fahrzeug ... 815
7.3.5.1 Reifenmechanik, Materialeigenschaften ... 815
7.3.5.2 Reifenmodelle ... 817
7.3.5.3 Gesamtmodelle ... 817
7.3.5.4 Beschreibung des Fahrverhaltens ... 818
7.3.5.5 Synergien zwischen Reifen und anderen Systemkomponenten ... 818
7.3.5.6 Reifensysteme mit Notlaufeigenschaften ... 818
7.3.6 Zukünftige Reifentechnologien ... 819
7.3.6.1 Reifenbezogene Zusatzprodukte ... 819

7.3.6.2 Reifendruckkontrolle ... 819
7.3.6.3 Auf Reifen abgestimmte Komponenten im Fahrwerk ... 820
7.3.6.4 Materialentwicklung ... 820
7.3.6.5 Reifen mit erweiterten Funktionen ... 820
7.3.7 Räder ... 821
7.3.7.1 Einführung/Historie ... 821
7.3.7.2 Normung/Terminologie ... 821
7.3.7.3 Wesentliche Herstellverfahren ... 822
7.3.7.4 Serieneinsatz (Marktanteile heute und in Zukunft) ... 822
7.3.7.5 Entwicklungs-Methodik ... 822
7.3.7.5.1 CAD Konstruktion ... 822
7.3.7.5.2 Finite Elemente Analyse ... 822
7.3.7.5.3 Prüfstandserprobung ... 823
7.3.7.5.4 Fahrerprobung im Rahmen der Fahrzeugentwicklung (Dauerläufer) ... 826
7.3.7.5.5 Entwicklungstendenzen zur Methodik ... 826
7.3.7.6 Fertigungsverfahren – Weiterentwicklung ... 826
7.3.7.6.1 Stahlrad ... 826
7.3.7.6.2 Leichtmetallrad ... 826
7.3.7.6.3 Kunststoff-Rad (Composite-Rad) ... 828
7.3.7.7 Gewichtsrelationen ... 828
7.3.7.8 Größenrelationen ... 828
7.3.7.9 Rad/Reifen – Besondere Aspekte ... 828
7.3.7.10 Energiebetrachtung bei Herstellung/Recycling ... 829
7.3.7.11 Umweltschonung ... 830
7.3.8 Gleitschutzketten ... 830
7.3.8.1 Einleitung ... 830
7.3.8.2 Wirkungsprinzip von Gleitschutzketten ... 830
7.3.8.3 Aufbau von Gleitschutzketten ... 830
7.3.8.3.1 Laufnetzformen ... 830
7.3.8.3.2 Greifelemente ... 830
7.3.8.3.3 Dimensionierung ... 831
7.3.8.4 Kraftübertragung Kette–Fahrbahn ... 831
7.3.8.5 Montagesysteme ... 832
7.4 **Fahrwerkauslegung** ... 834
7.4.1 Kinematik der Radaufhängung ... 834
7.4.1.1 Radhubkinematik ... 834
7.4.1.2 Lenkkinematik ... 838
7.4.2 Elastokinematik ... 839

7.4.2.1 Wirkung von Bauteilelastizitäten ... 839
7.4.2.2 Elastomerlager ... 840
7.4.2.3 Wirkung äußerer Kräfte ... 847
7.4.3 Radaufhängungen ... 851
7.4.3.1 Starrachsen ... 852
7.4.3.2 Einzelradaufhängungen ... 853
7.4.3.3 Verbundachsen ... 856
7.4.4 Federung, Dämpfung, Stabilisatoren ... 857
7.4.4.1 Tragfeder ... 858
7.4.4.2 Stabilisierung ... 863
7.4.4.3 Schwingungsdämpfung ... 864
7.4.4.4 Vertikaldynamiksysteme ... 868
7.4.4.5 Ausblick ... 873
7.4.5 Lenkung ... 874
7.4.5.1 Lenkungskinematik ... 877
7.4.5.2 Lenkgetriebe und -gestänge ... 886
7.4.5.3 Lenkunterstützung ... 889
7.4.6 Aktive Lenksysteme ... 895
7.4.6.1 Einleitung ... 895
7.4.6.2 Aktive Vorderradlenkungen ... 896
7.4.6.2.1 Aktive Servolenkungen ... 896
7.4.6.2.2 Lenkungen mit aktiv veränderlicher Übersetzung ... 897
7.4.6.2.3 Überlagerungslenkungen ... 897
7.4.6.2.4 Integration von Überlagerungslenkung und geregelter Servolenkung ... 900
7.4.6.2.5 „Steer by wire"-Lenksysteme ... 900
7.4.6.3 Aktive Hinterradlenkungen ... 901
7.4.6.3.1 Hinterradlenkungen ohne fahrdynamische Regelung ... 902
7.4.6.3.2 Hinterradlenkungen mit fahrdynamischer Regelung ... 905
7.4.6.4 Aktive geregelte Vorder- und Hinterachslenksysteme ... 906
7.5 **Beurteilungskriterien** ... 908
7.5.1 Subjektive Fahreigenschaftsbeurteilung ... 908
7.5.2 Objektive Fahreigenschaftsbeurteilung ... 909
7.5.2.1 Geradeausfahrt ... 911
7.5.2.2 Kurvenverhalten ... 912
7.5.2.3 Übergangsverhalten ... 914
7.5.2.4 Weitere Testverfahren ... 915
7.5.2.5 Ausblick ... 916
**Literatur** ... 917

**8 Elektrik/Elektronik/Software** ... 925
*Dr. Heinz-Bernhard Abel, Dr. Heinrich-Jochen Blume, Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz, Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy, Dipl.-Ing. Simon Fürst, Dr. Lothar Ganzelmeier, Dr. Jörg Helbig, Dipl.-Ing. Gerhard Heyen, Dr. rer. soc. Meike Jipp, Dipl.-Ing. Günther Kasties, Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll, Dr.-Ing. Olaf Krieger, Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer, Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Dr. Wolfgang Pfaff, Dr.-Ing. Thomas Scharnhorst und Dr.-Ing. Guido Schneider*

8.1 **Bedeutung Elektrik/Elektronik/Software für das Automobil** ... 926
8.1.1 Einleitung ... 926
8.1.2 Entwicklungsprozess und Technologie ... 930
8.1.3 Neue Anforderungen an Entwicklungsprozess und Technologie ... 931
8.1.3.1 Eigenschaften des Entwicklungsprozesses ... 931
8.1.3.2 Systemintegration ... 935
8.1.4 AUTOSAR ... 937
8.1.4.1 Zunehmender Umfang des Standards und Pflege der existierenden Versionen ... 937
8.1.4.2 Die drei Bereiche der Standardisierung von AUTOSAR Software-Plattformen ... 938
8.1.4.2.1 Softwarearchitektur ... 938
8.1.4.2.2 Entwurfsmethodik ... 939
8.1.4.2.3 Anwendungsschnittstellen ... 940
8.1.4.3 Eine neue Klasse von Steuergeräten entsteht ... 940
8.1.4.4 Der nächste Technologiesprung von AUTOSAR: Die AUTOSAR Adaptive Platform ... 940
8.1.4.5 Die Integration verschiedener Plattformen ... 942
8.1.4.6 Fazit zu AUTOSAR ... 942
8.2 **Das Bordnetz** ... 943
8.2.1 Einführung ... 943
8.2.2 Bestandteile des Bordnetzes ... 943
8.2.2.1 Übersicht ... 943
8.2.2.2 Randbedingungen ... 943
8.2.2.3 Leitungen ... 947
8.2.2.4 Knotenpunkte ... 948
8.2.2.5 Sicherungen ... 949
8.2.2.6 Steckverbindungen, Gehäuse ... 950
8.2.2.7 Steckverbindungen, Kontakte ... 952
8.2.3 Auslegungskriterien ... 953
8.2.3.1 Qualitätsorientierte Bordnetzauslegung ... 953
8.2.3.2 Leitungsverlegung ... 954
8.2.3.3 Leitungsstrangfertigung ... 956
8.2.3.4 Variantenbildung ... 958
8.2.3.5 Logistik und Fahrzeugmontage ... 959

8.2.4 Architektur des Bordnetzes ... 959
8.2.4.1 Topologie, Koppel- und Trennstellen ... 959
8.2.4.2 Systemarchitektur ... 961
8.2.4.3 Energieversorgung und Absicherung ... 962
8.2.4.4 Signalverteilung ... 964
8.2.4.5 Optimierung über Varianten ... 964
8.2.4.6 Bordnetzstabilisierung ... 966
8.2.4.7 Bordnetzspannungen ... 967
8.2.4.8 Hochvoltbordnetze ... 968
8.2.5 Der Bordnetz-Entwicklungsprozess ... 970
8.2.5.1 Abläufe ... 970
8.2.5.1.1 Konzeptphase ... 970
8.2.5.1.2 Serienentwicklung ... 972
8.2.5.1.3 Erprobung ... 973
8.2.5.2 CAE und CAD-Werkzeuge ... 974
8.2.5.3 Lieferantenstruktur ... 977
8.2.6 Entwicklungstrends ... 977
**8.3 Kommunikationsbordnetze** ... 977
**8.4 Elektromagnetische Verträglichkeit – EMV** ... 988
8.4.1 Eigenentstörung ... 988
8.4.2 Störfestigkeit gegen externe elektromagnetische Felder ... 990
8.4.3 Fernentstörung ... 990
8.4.4 Normen und Richtlinien ... 990
8.4.5 Sicherstellung der EMV ... 992
**8.5 Funktionsdomänen** ... 992
8.5.1 Einleitung ... 992
8.5.2 Beleuchtung ... 992
8.5.2.1 Zulassung ... 993
8.5.2.2 Lichttechnische Begriffe ... 993
8.5.2.3 Scheinwerfer ... 993
8.5.2.3.1 Historische Entwicklung ... 993
8.5.2.3.2 Scheinwerferarten ... 994
8.5.2.3.3 Reflektoren ... 994
8.5.2.3.4 Abschlussscheiben ... 996
8.5.2.3.5 Lichtquellen ... 997
8.5.2.3.6 Bi-Xenon-Scheinwerfer ... 1000
8.5.2.3.7 Intelligente Scheinwerfer ... 1001
8.5.2.3.8 LED-Scheinwerfer ... 1002

8.5.2.3.9 Scheinwerfer-Einstellung und Leuchtweitenregulierung ... 1004
8.5.2.3.10 Lichtbewertung ... 1004
8.5.2.4 Tagfahrlicht und Positionslicht ... 1005
8.5.2.5 Zusatzscheinwerfer ... 1006
8.5.2.6 Signalleuchten ... 1006
8.5.2.6.1 Lichtquellen für Signalleuchten ... 1007
8.5.2.6.2 Bauformen von Signalleuchten ... 1008
8.5.2.6.3 Neuentwicklungen adaptiver Signalfunktionen ... 1008
8.5.2.7 Innenbeleuchtung und Einstiegsleuchten ... 1008
8.5.2.8 Beleuchtungsstyling ... 1009
8.5.3 Instrumentierung für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ... 1009
8.5.3.1 Einleitung ... 1009
8.5.3.2 Informationsdarstellung ... 1010
8.5.3.2.1 Kombinations-Instrument ... 1010
8.5.3.2.2 Beleuchtung ... 1011
8.5.3.2.3 Weitere Display-Arten im Cockpit ... 1012
8.5.3.3 Head-up-Display (HUD) ... 1012
8.5.3.4 Eingabeelemente ... 1013
8.5.3.5 Connectivity ... 1014
8.5.3.6 Holistischer HMI Ansatz und Automatisiertes Fahren ... 1015
8.5.3.7 Ausblick ... 1015
8.5.4 Infotainment/Multimedia ... 1016
8.5.4.1 Einleitung ... 1016
8.5.4.2 Broadcast ... 1017
8.5.4.2.1 Audio Broadcast ... 1017
8.5.4.2.2 Video Broadcasting ... 1018
8.5.4.3 Medien ... 1019
8.5.4.3.1 Lokale Medienquellen ... 1019
8.5.4.3.2 Connectivity ... 1019
8.5.4.4 HMI ... 1023
8.5.4.4.1 Herausforderungen ... 1023
8.5.4.4.2 HMI Struktur ... 1024
8.5.4.4.3 Ausgabegeräte ... 1025
8.5.4.4.4 Eingabegeräte ... 1026
8.5.4.5 Architektur ... 1028
8.5.4.5.1 Hardwarearchitektur im Fahrzeug ... 1028
8.5.4.5.2 Infotainment – Interne Hardwarearchitektur ... 1032
8.5.4.5.3 Infotainment-Softwarearchitekturen ... 1032

8.5.4.6 Ausblick ... 1036
8.5.4.7 Fahrzeugantennen ... 1037
8.5.5 Fahrerassistenzsysteme ... 1042
8.5.5.1 Unfallursachen und Fahrerassistenzsysteme zu ihrer Vermeidung ... 1042
8.5.5.2 Fahrerassistenz ... 1043
8.5.5.3 Fahrzeugkommunikationssysteme ... 1043
8.5.5.4 Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeugstabilisierung ... 1044
8.5.5.5 Prädiktive Fahrerassistenzsysteme ... 1044
8.5.5.5.1 Sensoren für Fahrerassistenzsysteme ... 1045
8.5.5.5.2 Ultranahbereichssensoren in Ultraschalltechnik ... 1045
8.5.5.5.3 Fernbereichsradar 77 GHz ... 1045
8.5.5.5.4 Fernbereichslidar ... 1046
8.5.5.5.5 Nahbereichssensoren ... 1046
8.5.5.5.6 Video-Sensor ... 1046
8.5.5.6 Fahrerassistenzsysteme für Komfort und Sicherheit ... 1047
8.5.5.6.1 Einparkhilfe-Systeme ... 1047
8.5.5.6.2 Adaptive Cruise Control (ACC) ... 1048
8.5.5.6.3 Prädiktive Sicherheitssysteme (Predictive Safety Systems, PSS) ... 1049
8.5.5.6.4 Bildgebende Video Systeme ... 1051
8.5.5.6.5 Videosysteme mit Bildverarbeitung ... 1053
8.5.5.7 Adaptive Systeme ... 1056
8.5.5.8 Zusammenfassung und Ausblick ... 1057
8.5.6 Telematik ... 1059
8.5.6.1 Grundlagen und Technologien der Verkehrstelematik ... 1059
8.5.6.2 Endgeräte ... 1061
8.5.6.3 Dienstleistungen der Zukunft ... 1062
8.6 **Mensch-Technik-Kooperation** ... 1064
8.6.1 Wann ist die Mensch-Technik-Kooperation gut? Definition von Zielkriterien ... 1065
8.6.1.1 Performanz ... 1065
8.6.1.2 Belastung und Beanspruchung ... 1066
8.6.1.3 Situationsbewusstsein ... 1066
8.6.1.4 Usability ... 1067
8.6.1.5 Vertrauen ... 1068
8.6.2 Der Mensch im System ... 1068
8.6.3 Automations- und Assistenzsysteme für den Fahrer ... 1069
8.6.3.1 Automationssysteme ... 1069
8.6.3.2 Fahrerassistenzsysteme ... 1071
8.6.4 Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation ... 1071

8.6.5 Evaluation ... 1073
8.6.5.1 Modellierung ... 1073
8.6.5.2 Studien ... 1073
8.6.6 Zusammenfassung ... 1075
8.7 **Software** ... 1075
8.7.1 Vorbemerkungen zum Thema Software ... 1076
8.7.2 Softwareentwicklungsprozess ... 1076
8.7.2.1 Einbettung in den Systementwicklungsprozess ... 1077
8.7.2.2 Anforderungsanalyse und –spezifikation ... 1078
8.7.2.3 Design und Architektur ... 1078
8.7.2.4 Implementierung und Modultest ... 1079
8.7.2.5 Integration ... 1079
8.7.2.6 Validierung und Verifikation ... 1079
8.7.2.7 Produktion und Wartung ... 1080
8.7.3 Erfolgsfaktoren ... 1080
8.7.3.1 Modellbildung ... 1080
8.7.3.2 MMI ... 1081
8.7.3.3 Qualitätssicherung ... 1081
8.7.4 Entkopplung von Infrastruktur und Plattformen ... 1082
8.7.5 Produktlinien ... 1082
8.7.6 Anwendungsfelder ... 1083
8.7.6.1 Fahrerassistenzsysteme ... 1083
8.7.6.2 Automatisches Fahren ... 1084
8.7.6.3 Infotainment ... 1084
8.7.6.4 Vernetzung nach Außen ... 1084
8.7.6.5 Karosserie- und Komfortfunktionen ... 1084
8.7.6.6 Sicherheitsfunktionen ... 1084
8.7.7 Technische Herausforderungen zur Software im Fahrzeug ... 1085
8.7.7.1 Zuverlässigkeit ... 1085
8.7.7.2 Diagnose und Wartung ... 1085
8.7.7.3 Softwarewartung und -logistik ... 1086
8.7.7.4 Vernetzung im Fahrzeug ... 1086
8.7.7.5 Multiplexing, Zeitbeherrschung und Determinismus ... 1087
8.7.7.6 Funktionale Sicherheit ... 1087
8.7.7.7 IT-Security ... 1087
8.7.8 Potenzial durch innovative Software ... 1087
8.7.9 Organisatorische Herausforderungen ... 1088
8.7.9.1 Prozesse ... 1088
8.7.9.2 Impakt und langfristige Perspektiven ... 1089

8.8 **Moderne Methoden der Regelungstechnik** ... 1089
8.8.1 Anforderungen an Regelsysteme im Kraftfahrzeug ... 1089
8.8.2 Moderne Reglerentwurfsverfahren ... 1090
8.8.2.1 Adaptive Regelung ... 1090
8.8.2.2 Fuzzy-Regelung ... 1091
8.8.2.3 $\Gamma$-Synthese ... 1091
8.8.2.4 Neuronale Regelung ... 1092
8.8.2.5 Norm-optimale Regelung ... 1092
8.8.2.6 Prädiktive Regelung ... 1093
8.8.2.7 Quantitative Feedback Theory (QFT) ... 1093
8.8.3 Evaluierung moderner Regelungsverfahren ... 1094
8.8.4 Anwendungsbeispiel Fahrdynamikregelung ... 1095
8.8.5 Ausblick ... 1096
**Literatur** ... 1097

**9 Fahrzeugsicherheit** ... 1105
*Prof. Dr.-Ing. Mark Gonter, Dipl.-Ing. Andre Leschke und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*
9.1 **Allgemein** ... 1106
9.2 **Gebiete der Fahrzeugsicherheit** ... 1106
9.3 **Ergebnisse aus der Unfallforschung** ... 1108
9.3.1 Einleitung ... 1108
9.3.2 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik ... 1108
9.3.3 Verkehrsunfalldaten der Versicherungen ... 1109
9.3.4 „In-Depth" Unfallerhebungen ... 1109
9.4 **Unfallvermeidende Sicherheit** ... 1113
9.4.1 Assistenzsysteme der Fahrzeugebene ... 1113
9.4.2 Assistenzsysteme mit Umfeldsensorik ... 1114
9.4.2.1 Systeme der Längsführung ... 1114
9.4.2.2 Systeme der Querführung ... 1115
9.4.2.3 Systeme der Quer- und Längsführung ... 1116
9.4.2.4 Nachtassistenz ... 1116
9.5 **Biomechanik und Schutzkriterien** ... 1117
9.5.1 Biomechanik ... 1117
9.5.1.1 Grundlagen ... 1117
9.5.1.2 Belastungsgrenzen ... 1118
9.5.2 Schutzkriterien ... 1119
9.5.3 Simulationseinrichtungen ... 1121
9.5.3.1 Kopf ... 1121
9.5.3.2 Bein, Hüfte ... 1121

9.5.3.3 Rumpf ... 1121
9.5.3.4 Gesamtkörper ... 1122
9.6 **Quasistatische Anforderungen an die Karosserie und Komponenten** ... 1123
9.6.1 Sitz- und Sicherheitsgurtverankerungspunkttests ... 1123
9.6.2 Dachfestigkeit ... 1123
9.6.3 Seitenstruktur ... 1123
9.7 **Dynamische Fahrzeugkollision** ... 1124
9.7.1 Frontale Kollision ... 1124
9.7.2 Seitliche Kollisionen ... 1127
9.7.3 Heckkollision ... 1127
9.7.4 Fahrzeugüberschlag ... 1127
9.8 **Insassenschutz** ... 1129
9.8.1 Fahrzeuginnenraum ... 1129
9.8.2 Rückhaltesysteme ... 1129
9.8.2.1 Sicherheitsgurte ... 1130
9.8.2.2 Kinderrückhaltesysteme ... 1131
9.8.2.3 Airbag-Systeme ... 1132
9.8.2.4 Sitze, Sitzlehne und Kopfstütze ... 1133
9.8.3 Zusammenwirken von Rückhaltesystemen und Fahrzeug ... 1133
9.8.3.1 Insasse ... 1133
9.8.3.2 Angelegter Dreipunktgurt ... 1134
9.8.3.3 Airbag-Systeme ... 1134
9.8.4 Adaptiver Insassenschutz ... 1135
9.8.4.1 Anforderungen durch das Unfallgeschehen ... 1135
9.8.4.2 Airbag-Steuerungskonzepte ... 1136
9.8.4.3 Insassen- und unfallschwerespezifische Adaptivität ... 1136
9.8.5 Seitenkollisionen ... 1137
9.8.5.1 Theoretische Betrachtung ... 1138
9.8.5.2 In den USA und Europa definierte Seitenaufpralltests ... 1139
9.8.6 Kompatibilität ... 1139
9.8.6.1 Allgemeine Aussage ... 1139
9.8.6.2 PKW/PKW-Kollision ... 1140
9.8.6.3 Pkw/Lkw-Kollision ... 1141
9.8.6.4 Fußgängerkollision ... 1141
9.8.6.5 Zusammenfassung ... 1141

9.9 **Integrale Sicherheit** ... 1142
9.9.1 Fahrer, Fahrzeug und Umfeld ... 1143
9.9.2 PreCrash ... 1144
9.9.2.1 Automatischer Bremseingriff ... 1145
9.9.2.2 Präventiv wirkender Insassenschutz ... 1145
9.9.2.3 Irreversible Rückhaltesysteme ... 1146
9.9.3 Integraler Fußgängerschutz ... 1148
9.9.4 Multikollisionsbremse ... 1149
9.9.5 Von der Lenkunterstützung bis zum Eingriff beim automatischen Fahren ... 1149
9.9.6 Consumer- und Gesetzestests für aktive Sicherheitssysteme ... 1150
9.9.7 Entwicklungsprozess integraler Funktionen ... 1152
9.9.7.1 Simulation vorausschauender Sicherheitssysteme ... 1152
9.9.7.2 Funktionale Sicherheit ... 1153
9.9.7.3 Rechnerunterstützung bei der Entwicklung von Sicherheitskomponenten ... 1154
9.9.8 Retten und Bergen ... 1154
9.9.9 Car2X Safety – Ausblick ... 1155
9.9.9.1 Kooperatives Fahren ... 1157
9.10 **Sicherheit von elektrischen Fahrzeugen** ... 1157
9.11 **Zusammenfassung** ... 1158
**Literatur** ... 1158

**10 Werkstoffe und Fertigungsverfahren** ... 1163
*Dr. Ludwig Hamm, Berthold Krautkrämer, Reinhart Malik, Dipl.-Ing. Volker Peitz, Dr.-Ing. Robert Plank und Dr. Peter Solfrank*
10.1 **Ein Blick zurück** ... 1164
10.2 **Werkstoffe moderner Kraftfahrzeuge** ... 1167
10.2.1 Materialanteile im Automobilbau ... 1167
10.2.2 Fortschritte in den Leistungsmerkmalen ... 1169
10.2.2.1 Festigkeit und Verarbeitung ... 1169
10.2.2.1.1 Stahlwerkstoffe ... 1169
10.2.2.1.2 Leichtmetalle ... 1175
10.2.2.1.3 Edelmetalle ... 1187
10.2.2.1.4 Kunststoffe ... 1188
10.2.2.2 Tribologie ... 1197
10.2.2.3 Korrosionsschutz ... 1200
10.2.3 Fortschritte in der Fügetechnik ... 1202
10.2.3.1 Schweißen und Löten ... 1202
10.2.3.2 Mechanische Fügeverfahren ... 1203
10.2.3.3 Kleben ... 1206

10.2.4 Fortschritte in der Um- und Urformung ... 1208
10.2.4.1 Metalle ... 1208
10.2.4.1.1 Innenhochdruckumformen ... 1208
10.2.4.1.2 Hydromechanisches Umformen ... 1209
10.2.4.1.3 Zwei-Platinen-Innenhochdruckumformen ... 1210
10.2.4.1.4 Kaltfließpressen ... 1211
10.2.4.1.5 Gießtechnik ... 1212
10.2.4.1.6 Schmieden ... 1214
10.2.4.1.7 Schmiedestahl ... 1215
10.2.4.2 Polymere ... 1215
10.2.5 Fortschritte in der Umweltverträglichkeit ... 1218
10.2.6 Thermoelektrizität und mögliche Anwendungen im Pkw ... 1223
10.2.7 Nanotechnologie (im Automobil) ... 1225
10.3 **Wettbewerb und Zusammenspiel der Werkstoffe** ... 1233
10.4 **Wälzlager im Fahrzeugbau** ... 1234
10.4.1 Einleitung ... 1234
10.4.2 Gebräuchliche Wälzlager-Bauarten ... 1235
10.4.2.1 Einreihige Rillenkugellager ... 1235
10.4.2.2 Nadellager, Nadelkränze ... 1235
10.4.2.3 Kegelrollenlager ... 1235
10.4.3 Auslegung von Wälzlagern ... 1237
10.4.3.1 Wellen- und Lagerberechnung nach Formelsammlung ... 1237
10.4.3.2 Wellen- und Lagerberechnung mittels spezieller Software ... 1238
10.4.4 Exemplarische Ausführungen aus der jüngeren Wälzlager-Entwicklung ... 1238
10.4.4.1 Wälzgelagerter Turbolader ... 1239
10.4.4.2 Radlager ... 1239
10.4.4.3 Beispiele für richtungweisende Technologien mit Wälzlagerung ... 1243
10.4.4.3.1 Doppelkupplungs-Systeme ... 1243
10.4.4.3.2 Ausgleichswellen mit direkter Wälzlagerung ... 1243
10.4.4.3.3 Kugelgewinde-Antrieb ... 1244
10.4.4.3.4 CVT-Getriebe ... 1244
10.4.4.3.5 Leichtbau-Differenzial ... 1245
10.4.4.3.6 Hybridantriebe ... 1245
10.4.4.3.7 Wälzlagerung des Kurbeltriebs im Verbrennungsmotor ... 1246
10.4.5 Schmierung und Schmierstoffe für Wälzlager ... 1247
**Literatur** ... 1249

**11 Produktentstehungsprozess** ... 1257
*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess, Prof. Dr.-Ing. Thomas Breitling, Jürgen Weissinger, Dipl.-Ing. Norbert Grawunder, Dr.-Ing. Ulrich Hackenberg, Prof. Dr.-Ing. Volker Liskowsky und Dr.-Ing. Ulrich Widmann*

11.1 **Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess** 1258
11.1.1 Einleitung ... 1258
11.1.2 Produktentstehungsprozess ... 1259
11.1.2.1 Organisationsformen ... 1259
11.1.2.2 Projektorganisation eines OEM ... 1261
11.1.2.3 PEP-Ablauf und Meilenstein-Definition ... 1262
11.1.3 Produktplanung ... 1263
11.1.4 Innovationsmanagement ... 1265
11.1.5 Produktinhalte, Lastenhefte, Gesetze ... 1266
11.1.6 Konzeptentwicklung ... 1267
11.1.7 Produkt Daten Management (PDM) ... 1268
11.1.8 Product Lifecycle Management (PLM) ... 1269
11.1.9 Serienentwicklung ... 1270
11.1.9.1 Strak ... 1270
11.1.9.2 Datenkontrollprozess ... 1271
11.1.9.3 Planungsfreigabe ... 1271
11.1.9.4 Virtuelle Entwicklung ... 1272
11.1.9.5 Fahrzeugerprobung ... 1273
11.1.9.6 Änderungsmanagement und Launch-Freigabe ... 1275
11.1.9.7 Meisterbock ... 1275
11.1.9.8 Breitenabsicherung ... 1275
11.1.10 Serienbetreuung ... 1275
11.1.11 Ausblick ... 1276
11.2 **Fahrzeugkonzeption in der frühen Entwicklungsphase** ... 1276
11.2.1 Einführung ... 1276
11.2.1.1 Definition ... 1276
11.2.1.2 Zielsetzung der frühen Entwicklungsphase ... 1277
11.2.1.3 Fahrzeugkonzeptinhalte der frühen Phase ... 1277
11.2.2 Vorgehensweise ... 1278
11.2.2.1 Prozess ... 1278
11.2.2.2 Digitaler Prototyp ... 1278
11.2.2.3 Tools ... 1280
11.2.3 Beispiele ... 1281
11.2.3.1 Fahrdynamik ... 1281
11.2.3.2 Passive Sicherheit – Betriebsfestigkeit ... 1282

11.2.3.3 Aerodynamik ... 1282
11.2.3.4 Fahrleistung und Verbrauch ... 1282
11.2.4 Ausblick ... 1282
11.3 **Berechnung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung** ... 1283
11.3.1 Einleitung ... 1283
11.3.2 CAE-Prozess und notwendige Infrastruktur in der Produktentstehung ... 1283
11.3.2.1 CAE-Einsatz in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen ... 1284
11.3.2.2 Digitale Prototypen ... 1286
11.3.2.3 Computer Ressourcen für CAE ... 1288
11.3.3 Anwendungsgebiete und Methoden ... 1289
11.3.3.1 Finite Elemente Berechnungen ... 1289
11.3.3.1.1 Statik und Dynamik ... 1292
11.3.3.1.2 Sicherheit ... 1297
11.3.3.2 Mehrkörpersystem-Simulationen ... 1301
11.3.3.3 Strömungssimulation ... 1303
11.3.3.4 Elektrik-/Elektronik-Simulation ... 1311
11.3.3.5 Simulation in der Produktion ... 1318
11.3.3.6 Gekoppelte virtuelle-reale Systeme ... 1322
11.3.3.7 Querschnittsthemen ... 1325
11.4 **Mess- und Versuchstechnik** ... 1329
11.4.1 Kurzer Rückblick ... 1329
11.4.2 Grundsätzliches zur Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau ... 1329
11.4.3 Einige ausgewählte Beispiele ... 1335
11.4.4 Zur Effizienz der Mess- und Versuchstechnik ... 1338
11.5 **Qualitätsmanagement** ... 1340
11.6 **Betrieb und Instandhaltung von Kraftfahrzeugen** ... 1343
11.6.1 Einführung ... 1343
11.6.1.1 Definitionen ... 1344
11.6.1.2 Entwicklungstendenzen ... 1345
11.6.2 Instandhaltbarkeit und Zuverlässigkeit ... 1345
11.6.2.1 Zuverlässigkeitskenngrößen ... 1346
11.6.2.2 Weibullverteilung ... 1346
11.6.2.3 Anwendung von Zuverlässigkeitskenngrößen ... 1348
11.6.3 Lebenslaufkosten ... 1349
11.6.3.1 Anschaffungskosten ... 1349
11.6.3.2 Gesetzgeber abhängige Kosten ... 1350
11.6.3.3 Versicherungskosten ... 1350
11.6.3.4 Betriebskosten ... 1350
11.6.3.5 Werkstattkosten ... 1350

11.6.4 Organisation des Service-Prozesses in den Werkstätten ... 1351
11.6.5 Instandhaltungsgerechte Konstruktion ... 1352
11.6.5.1 Ziele und Anforderungen zur Instandhaltbarkeit ... 1352
11.6.5.2 Werkstattkostenfaktor Zeit (Instandhaltungszeit, Planzeiten) ... 1353
11.6.5.3 Kostenfaktor Werkstattausrüstung, Spezialwerkzeuge ... 1354
11.6.5.4 Ersatzteile, Zerlegungstiefe, Transport-, Lagerfähigkeit und Lieferzeitraum ... 1355
11.6.5.5 Nachweis der Instandhaltbarkeit ... 1356
11.6.5.6 Datensysteme ... 1356
11.6.5.7 Virtuelle Beurteilung der Servicefreundlichkeit ... 1357
11.6.5.8 Berichtswesen ... 1358
11.6.6 Strategie und Konzept ... 1358
11.6.6.1 Instandhaltungsstrategien ... 1358
11.6.6.2 Instandhaltungskonzept ... 1358
11.6.6.3 Anforderungen zur Instandhaltbarkeit ... 1359
11.6.6.4 Kunden- und Lieferantenbeziehungen ... 1359
11.6.6.5 Rolle des Managements ... 1359
11.6.6.6 Einfluss der EU ... 1360
11.6.6.7 Einfluss alternativer Antriebskonzeptionen ... 1360
**Literatur** ... 1361

**12 Rennfahrzeuge** ... 1371
*Dipl.-Ing. Carsten Dieterich, Dipl.-Ing. Christoph Müller und Dipl.-Ing. (FH) Frank Nysten*
12.1 **Einsatzbedingungen** ... 1372
12.1.1 Sportbehörde ... 1372
12.1.2 Technik-Reglement ... 1372
12.1.3 Sport-Reglement ... 1372
12.2 **Fahrzeug-Kategorien** ... 1373
12.3 **Bauweise** ... 1375
12.3.1 Monocoque ... 1375
12.3.1.1 Struktur ... 1375
12.3.1.2 Entwicklung ... 1376
12.3.1.3 Fertigung ... 1376
12.3.2 Bodywork ... 1377
12.3.3 Antrieb ... 1377
12.3.3.1 Motor ... 1377
12.3.3.2 Energierückgewinnungssysteme ... 1378
12.3.4 Getriebe ... 1379
12.3.5 Fahrwerk ... 1381
12.3.5.1 Achskonzept ... 1381
12.3.5.2 Federungssystem ... 1382

12.3.5.3 Dämpfungssystem ... 1382
12.3.5.4 Abstimmung ... 1382
12.4 **Performance und Rundenzeit** ... 1383
12.4.1 Fahrzeugparameter ... 1383
12.4.2 Sensitivität der direkt messbaren Fahrzeugparameter ... 1383
12.4.3 Entwicklungspotenzial ... 1383
12.5 **Entwicklung Aerodynamik und Fahrdynamik** ... 1385
12.5.1 Aerodynamische Effizienz und Aerobalance ... 1385
12.5.2 Einflussgrößen auf die Aerodynamik ... 1386
12.5.2.1 Radeinschlag beim Lenken ... 1386
12.5.2.2 Gierwinkel und Schräganströmung ... 1386
12.5.2.3 Mechanische Fahrwerksabstimmung ... 1387
12.5.2.4 Durchströmung des Fahrzeugs ... 1387
12.5.3 Aerodynamik und Reifeneinfluss ... 1388
12.5.4 Aerodynamik und Fahrdynamik ... 1389
12.6 **Zuverlässigkeit** ... 1390
**Literatur** ... 1390

**13 Ausblick – Wo geht es hin?** ... 1391
*Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*
**Literatur** ... 1394

**Serviceteil** ... 1395
**Sachverzeichnis** ... 1396

# Autorenverzeichnis


**Abel, Heinz-Bernhard, Dr.**
Continental Automotive GmbH, Babenhausen
www.continental-corporation.com

**Achleitner, August, Dipl.-Ing.**
**Dipl. Wirtsch. Ing.**
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach
www.porsche.de

**Antony, Peter, Dipl.-Ing. (FH)**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Ayoubi, Mihiar, Dr.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.de

**Baar, Roland, Prof. Dr.-Ing.**
Technische Universität Berlin
www.vkm.tu-berlin.de

**Baumgarten, Henning, Dr.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Beck, Markus, Dipl.-Ing.**
Bosch Engineering GmbH, Abstatt
www.bosch-engineering.de

**Berger, Edgar, Dr.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Blume, Heinrich-Jochen, Dr.**
Continental Automotive GmbH, Babenhausen
www.continental-corporation.com

**Böhmer, Marius, M.Sc.**
RWTH Aachen University, Aachen
www.rwth-aachen.de

**Bönnen, Dennis, Dr.**
Faurecia Emissions Control Technologies, Augsburg
www.faurecia.com

**Bootz, Andreas, Dr.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Braess, Hans-Hermann, Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h.**
Honorarprofessor an der TU München, TU Dresden und HTW Dresden

**Brabetz, Ludwig, Prof. Dr. rer. nat.**
Universität Kassel
www.uni-kassel.de

**Breitling, Thomas, Prof. Dr.-Ing.**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Broy, Manfred, Prof. Dr. Dr. h.c.**
Technische Universität München, Garching
www.tu-muenchen.de

**Bubb, Heiner, Prof. i.R. Dr.**
Technische Universität München
www.tu-muenchen.de

**Burgers, Christiaan, Dipl.-Ing.**
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach
www.porsche.de

**Dieterich, Carsten, Dipl.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Döllner, Gernot, Dr.-Ing.**
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Stuttgart
www.porsche.de

**Dorenkamp, Richard, Dipl.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Düsterdiek, Thorsten, Dr.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Ebner, Norbert, Dipl.-Ing. (FH)**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Eichner, Georg**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Eilemann, Andreas, Dr.**
MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
www.behrgroup.com

**Feige, Irene, Dr.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Fritzsche, Egbert**
Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Berlin
www.vda.de

**Fürst, Simon, Dipl.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Futschik, Hans Dieter, Dipl.-Designer**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Gail, Jost Christian, Dr.**
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
www.bast.de

**Ganzelmeier, Lothar, Dr.**
VEHICO GmbH, Braunschweig
www.vehico.de

**Gonter, Mark, Prof. Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Goßmann, Helmut, Dipl.-Ing.**
Adam Opel AG, Rüsselsheim
www.opel.de

**Grawunder, Norbert, Dipl.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Greiner, Jürgen, Dr.**
ZF Getriebe GmbH Saarbrücken, Kressbronn
www.zf.com

**Gruber, Manfred, Dipl.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Gruber, Steffen, Dipl.-Ing.**
Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
www.conti-online.com

**Gumpoltsberger, Gerhard, Dr.-Ing.**
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen
www.zf.com

**Hackenberg, Ulrich, Dr.-Ing.**
Audi AG, Ingolstadt (vormals)
www.audi.de

**Hamm, Ludwig, Dr. rer. pol. Dipl.-Ing.**
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach (vormals)
www.porsche.de

**Hansen, Frank, Dipl.-Kfm.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Helbig, Jörg, Dr.**
VEHICO GmbH, Braunschweig
www.vehico.de

**Hentschel, Jan, Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen-konzern.de

**Heyen, Gerhard, Dipl.-Ing.**
Visteon Innovation & Technology GmbH, Kerpen
www.visteon.com

**Hinz, Michael, Dipl.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Holtschulze, Jens, Dr.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Huber, Markus**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Inderka, Robert B., Dr.**
Daimler AG, Stuttgart
www.daimler.com

**Jean, Emmanuel, Dipl.-Ing.**
Faurecia Emissions Control Technologies, Augsburg
www.faurecia.com

**Jipp, Meike, Dr. rer. soc.**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Braunschweig
www.dlr.de/ts

**Kasties, Günther, Dipl.-Ing.**
OECON P&S GmbH, Braunschweig
www.oecon-line.de

**Kiesgen, Gerrit, Dr.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Knoll, Peter M., Prof. Dr.-Ing.**
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
www.kit.edu

**Konorsa, René, Dr.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Krautkrämer, Berthold**
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
www.schaeffler.com

**Krieger, Olaf, Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Kroiss, Hugo**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Kunze, Klaas, Dr.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Kurz, Gerhard**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Lachmayer, Roland, Prof. Dr.-Ing.**
Leibniz Universität Hannover
www.uni-hannover.de

**Lahmayer, Roman, Dipl.-Ing.**
Bosch Engineering GmbH, Abstatt
www.bosch-engineering.de

**Lanzer, Heribert, Dipl.-Ing.**
MAGNA STEYR Engineering AG & CO KG, A-Graz
www.magnasteyr.com

**Laukart, Georg**
Magna Exteriors & Interiors Management GmbH, München
www.magna.com

**Lemmer, Karsten, Prof. Dr.-Ing.**
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Braunschweig
www.dlr.de/ts

**Leschke, André, Dipl.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Liskowsky, Volker, Prof. Dr.**
Westsächsische Hochschule, Zwickau
www.fh-zwickau.de

**Lorenz, Bernd**
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
www.bast.de

**Malik, Reinhart**
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
www.schaeffler.com

**von Malottki, Sicong, Dr.-Ing.**
Daimler AG, Stuttgart
www.daimler.com

**Mankau, Heinz, Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg (vormals)
www.volkswagen.de

**Mohrdieck, Christian H., Prof. Dr.**
Daimler AG, Kirchheim/Teck-Nabern
www.daimler.com

**Müller, Christoph, Dipl.-Ing.**
RWTH Aachen University, Aachen
www.rwth-aachen.de

**Müller, Roman, Dipl.-Ing. (FH)**
BBS Motorsport GmbH, Haslach
www.bbs.com

**Nijs, Martin, Dr.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Noreikat, Karl E., Prof. Dipl.-Ing.**
NorCon Scientific Consulting, Esslingen

**Nysten, Frank, Dipl.-Ing. (FH)**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Pantow, Eberhard, Dr.**
MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
www.behrgroup.com

**Pauly, Axel, Dr.-Ing.**
Product&TechnologyConsult, Karlsfeld

**Pecho, Walter, Dipl.-Ing. (FH)**
Webasto-Edscha Cabrio GmbH, Hengersberg
www.webasto.com

**Pecnik, Hermann, Ing.**
MAGNA STEYR Engineering AG & CO KG, A-Graz
www.magnasteyr.com

**Peitz, Volker, Dipl.-Ing.**
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach
www.porsche.de

**Pfaff, Wolfgang, Dr.**
Robert Bosch GmbH, Stuttgart
www.bosch.com

**Pingen, Bert, Dipl.-Ing. MSc**
Ford-Werke GmbH, Köln
www.ford.com

**Plank, Robert, Dr.-Ing.**
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
www.schaeffler.com

**Plath, Armin, Dr.**
Volkwagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Pischinger, Stefan, Prof. Dr.-Ing.**
RWTH Aachen University, Aachen
www.rwth-aachen.de

**Plank, Robert, Dr.-Ing.**
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
www.schaeffler.com

**Remfrey, James, Dipl.-Ing.**
Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
www.conti-online.com

**Repmann, Carsten, Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Rieger, Hansjörg, Dr.-Ing.**
RUD Ketten Rieger & Dietz GmbH & Co. KG, Aalen
www.rud.de

**Sagan, Erich, Dr.-Ing.**
BMW Group, München (vormals)
www.bmwgroup.com

**Sasse, Christoph, Dr.**
ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt
www.zf.com

**Scharnhorst, Thomas, Dr.-Ing.**
WiTech Engineering GmbH, Braunschweig
www.witech-engineering.de

**Schildhauer, Christoph, M.Sc.**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Schindler, Klaus-Peter, Dr.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Schneider, Guido, Dr.-Ing.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Schulze, Herbert**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Schütte, Torsten, Dr.**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

**Schwarz, Martin, Dipl.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.de

**Seeck, Andre, Prof.**
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
www.bast.de

**Seethaler, Ludwig, Dipl.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Seiffert, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.**
WiTech Engineering GmbH, Braunschweig
www.witech-engineering.de

**Sendler, Jan, Dr.-Ing.**
Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
www.conti-online.com

**Solfrank, Peter, Dr.**
Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
www.schaeffler.com

**Souren, Mike, Dipl.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Spindler, Klaus, Dipl.-Ing.**
Faurecia Emissions Control Technologies, Augsburg
www.faurecia.com

**Stauber, Rudolf, Prof. Dr.**
Zentralinstitut für Neue Materialien und Prozesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg
www.zmp.uni-erlangen.de

**Steinel, Klaus, Dipl.-Ing.**
ZF Friedrichshafen AG, Schweinfurt
www.zf.com

**Strobl, Hubert, Dipl.-Ing.**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Teske, Lothar, Dipl.-Ing.**
Adam Opel AG, Rüsselsheim
www.opel.de

**Thewes, Matthias, Dr.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Thomer, Klaus Werner, Dr.**
Adam Opel AG, Rüsselsheim (vormals)
www.opel.de

**Timm, Heinrich, Dipl.-Ing.**
Audi AG, Ingolstadt (vormals)
www.audi.de

**Unterstraßer, Thomas, Dipl.-Ing. (†)**
BMW Group, München
www.bmwgroup.com

**Urstöger, Manuel, Dipl.-Ing.**
Daimler AG, Stuttgart
www.daimler.com

**Vögel, Hans-Jörg, Dr.**
BMW Group München
www.bmwgroup.de

**Volk, Heiner, Dipl.-Phys.**
Continental AG, Hannover
www.conti-online.com

**Vorberg, Thomas, Dipl.-Ing.**
Altair Engineering GmbH, Böblingen
www.altairproductdesign.de

**Wagner, Markus, B. Eng.**
Daimler AG, Stuttgart
www.daimler.com

**Wawzyniak, Markus, Dr.**
MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
www.behrgroup.com

**Weissinger, Jürgen**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Widmann, Ulrich, Dr.-Ing.**
Audi AG, Ingolstadt
www.audi.de

**Wiebelt, Achim, Dr.**
MAHLE Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart
www.behrgroup.com

**Wolff, Klaus, Dipl.-Ing.**
FEV GmbH, Aachen
www.fev.com

**Wöhr, Martin, Dr.**
Daimler AG, Sindelfingen
www.daimler.com

**Zeiser, Michael**
Volkswagen AG, Wolfsburg
www.volkswagen.de

# Mobilität

*Dr. Irene Feige und Dipl.-Kfm. Frank Hansen*

1.1 Einleitung – 2

1.2 Ursachen und Arten der Mobilität – 3

1.3 Spannungsfelder und Auswirkungen der Mobilität – 6

1.4 Mobilitätsrelevante Anforderungen an Automobile – 8

Literatur – 9

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_1

## 1.1 Einleitung

Wie Bewegung eine Voraussetzung des Lebens ist, wird ihr Gegenteil, Bewegungslosigkeit, Starre, mit Leblosigkeit oder gar mit Tod gleichgesetzt. Die Materie selbst ist unaufhörlich in Bewegung. So sagt Galileo Galilei: „Nichts ist älter in der Natur als Bewegung". Und Pascal sagt in seinen Pensees: „Zu unserer Natur gehört die Bewegung; vollkommene Ruhe ist der Tod". Nicht umsonst zählt Gefängnis seit jeher zu den besonders harten Strafen für Mensch und Tier. Es bedeutet nämlich nicht nur kein Aus-dem-Haus-gehen, Fahren, Fliegen, sondern auch starken Verlust an Informationsaufnahme und damit Mangel an Erkenntnis-Gewinn und Erkenntnis-Weitergabe.

In der Urzeit emanzipierte die Fähigkeit zur Fortbewegung die Tiere von den Launen der Natur, befreite sie von den Fesseln eines festen Standortes. Fortbewegung war und ist für das Überleben einer Gattung immer eine wesentliche Grundvoraussetzung und somit ein Erfolgsprinzip der Evolution.

Der Mensch hat seit alters her den Wunsch sich schneller, weiter und mit größeren Lasten bewegen zu können, als er mit eigener Muskelkraft dazu im Stande wäre – und das möglichst ohne körperliche Anstrengung. Daher hat er zu jeder Zeit die Möglichkeiten der Technik geradezu begierig aufgegriffen: Im Altertum das Schiff, durch Wind und Menschenkraft bewegt, mit der Erfindung des Rades den Wagen, der über Jahrhunderte von Tieren gezogen wurde, bis dann vor mehr als 170 Jahren die Eisenbahn eine erste Revolution in Sachen Mobilität herbeiführte.

Mit der Entwicklung des Automobils, die vor 125 Jahren begann, wurde dann das Verkehrsmittel geschaffen, das aufgrund seiner individuellen und flexiblen Einsetzbarkeit bis heute am meisten genutzt wird. Nur das Automobil kann praktisch zu jeder beliebigen Zeit an fast jeden gewünschten Ort fahren. Das Auto ermöglicht heute in fast allen Regionen dieser Erde individuelle Mobilität und den Transport von Gütern.

Immer wieder zeigt sich, dass zivilisatorischer, wirtschaftlicher und kultureller Fortschritt weltweit untrennbar mit Mobilität verbunden ist.

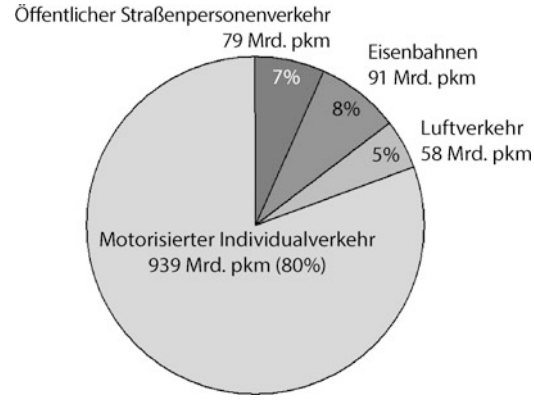



**Abb. 1.1** Personenverkehrsleistung in Deutschland 2008 (Quelle: DIW 2009)

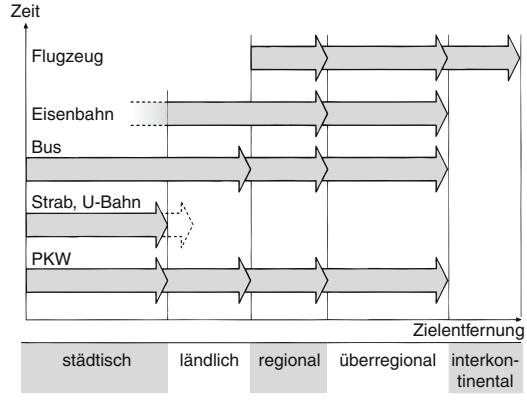



**Abb. 1.2** Einsatzbreite verschiedener Verkehrsmittel

Derzeit werden in Deutschland 80 % der Personenverkehrsleistung mit dem Pkw abgewickelt (Abb. 1.1 nach [1]).

Trotz ständiger Verbesserungen beim öffentlichen Verkehr kann man davon ausgehen, dass der Pkw aufgrund seiner Einsatzbreite sowie seiner vielfältigen individuellen Nutzungsmöglichkeiten, sogar in Ballungsräumen, auf lange Sicht von großer Bedeutung sein wird (Abb. 1.2).

Die Zahl der Automobile überschritt 2010 erstmals die Grenze von 1 Milliarde Fahrzeuge und beträgt weltweit heute schätzungsweise 1,2 Milliarden [2]. Dabei ist zu beachten, dass die Massen-Motorisierung einiger großer und vieler kleiner Länder erst im Anfang begriffen ist bzw. noch

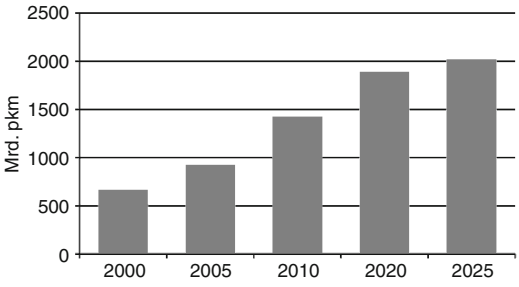



**Abb. 1.3** Entwicklung und Prognose der Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr in China (Quelle: ProgTrans 2010)

gar nicht begonnen hat. Der motorisierte Individualverkehr ist in Ländern wie China und Indien in den vergangenen Jahren stark gewachsen und wird aller Voraussicht nach auch in den kommenden Jahren große Wachstumsraten aufweisen (siehe Abb. 1.3 nach [5]). Deshalb haben nicht nur die Vorteile, sondern auch die Nachteile des Straßenverkehrs, insbesondere Ressourcen-Verbrauch, Unfallgefahren und Umweltwirkungen in Technik und Gesellschaft einen hohen Stellenwert. Dies führt immer wieder zu Diskussionen über reglementierende Eingriffe der öffentlichen Hand, mit dem Ziel, die ungehinderte Nutzung des Automobils einzuschränken.

Man könnte durchaus sagen, dass der große Erfolg des Automobils zum Teil als die Ursache des Problems angesehen werden kann. Trotz der Nachteile muss man aber konstatieren, dass es in allen Politikbereichen und auf allen politischen Ebenen eine hohe Anzahl an Entscheidungen gibt, bei denen eine steigende Verkehrsnachfrage überhaupt erst Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der jeweiligen Entscheidung oder die Folge davon ist [3].

Eine unabdingbare Voraussetzung für jeden, der sich mit dem Verkehr im Allgemeinen und dem Automobil im Speziellen beschäftigt, ist außerdem die Berücksichtigung der Erkenntnisse verschiedenster Fachdisziplinen. So müssen die unterschiedlichsten Technologiebereiche, aber auch Fachgebiete wie Soziologie, Psychologie und Ökologie, direkt oder indirekt bei den Entwicklungen neuer Fahrzeuge berücksichtigt werden.

## 1.2 Ursachen und Arten der Mobilität

### 1.2.1 Definitionen

Mobilität bedeutet allgemein Raumüberwindung, Erreichen von Zielen; teilweise wird unter Mobilität bereits das Bedürfnis bzw. die Fähigkeit zur Ortsveränderung verstanden. Für den Soziologen ist Mobilität zusätzlich die Bewegung von Menschen zwischen sozialen Schichten, für den Psychologen geistige Beweglichkeit. Mobilitätsbedürfnisse sind zuweilen spontan oder emotional; Mobilität kann aber auch Selbstzweck sein.

Die Summe aller Bewegungen von Menschen und Gütern wird als Verkehr bezeichnet. Zur Quantifizierung physischer Mobilität dienen in verkehrswirtschaftlichem Zusammenhang vor allem zwei Indikatoren:

- **Verkehrsaufkommen** (Transportaufkommen): Im Personenverkehr werden damit die beförderten Personen (Beförderungsfälle) bzw. im Güterverkehr die transportierten Tonnen pro Zeiteinheit in einem definierten Gebiet oder am Querschnitt eines Verkehrsweges gemessen.
- **Verkehrsleistung** (Transportleistung): Sie ergibt sich durch Multiplikation des Verkehrsaufkommens mit den jeweils zurückgelegten Entfernungen (Personenkilometer (pkm) bzw. Tonnenkilometer (tkm)).

Zur weiteren Spezifizierung der physischen Mobilität von Personen dienen außerdem die drei folgenden Indikatoren:

- **Anzahl der Wege pro Person und Zeiteinheit** (z. B. legte 2008 eine Person in Deutschland im Durchschnitt durchschnittlich 3,4 Wege pro Tag zurück).
- **Zurückgelegte Streckenlänge pro Person und Zeiteinheit** (z. B. legte 2008 eine Person in Deutschland durchschnittlich 41,7 Kilometer pro Tag zurück).
- **Für alle Wege benötigte Zeit pro Person und Zeiteinheit** (z. B. benötigte eine Person in Deutschland durchschnittlich 1 h 24 min für die Bewältigung der zurückgelegten Wege pro Tag, alles aus [4]).

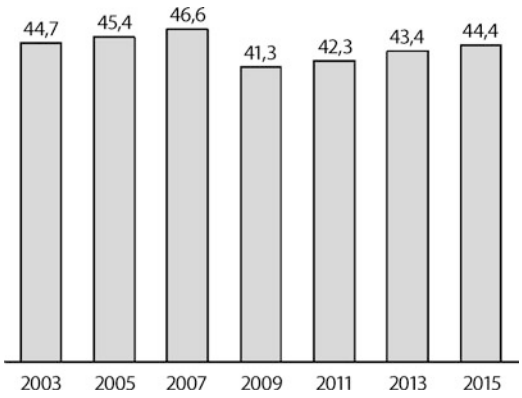



**Abb. 1.4** Pkw-Bestand in Deutschland: Entwicklung und Prognose (in Millionen) (Quelle: ProgTrans 2010)

Die Bedeutung der individuellen Mobilität lässt sich z. B. an der Entwicklung des Pkw-Bestandes ablesen, der zwar noch nicht wieder den Stand vor der Finanzkrise erreichen konnte, jedoch weiter einen steigenden Trend aufweist (Abb. 1.4 nach [5]).

Personen- und Güterverkehr finden unimodal (mit nur einem Verkehrsmittel) oder multimodal (unter Nutzung verschiedener Verkehrsmittel) von Quelle A zu Ziel B, gegebenenfalls mit Zwischenzielen, statt. Beispiele für den Personenverkehr wären:

- Fahrt mit dem Auto zum Büro, nachmittags Autofahrt zum Supermarkt, dann zum Kino, anschließend wieder Autofahrt nach Hause; also eine unimodale Wegekette.
- Fahrt mit dem Auto zum Bahnhof, von dort Fahrt mit dem Zug in eine andere Stadt, dann mit einem Call-a-Bike zu einem Geschäftstermin usw.; also eine multimodale Wegekette.

Schon aus diesen wenigen Beispielen wird deutlich, wie unterschiedlich Mobilitätsformen sein können, und welch differierende Anforderungen an die verschiedenen Verkehrsmittel und ihr Zusammenwirken im Verkehrssystem (Intermodalität) daraus resultieren.

In der Vergangenheit wurden immer wieder Erwartungen geäußert, dass durch die neuen Medien (z. B. Social Media, Video-Konferenzen) der Zuwachs an physischer Mobilität zumindest in seinem Wachstum gebremst werden könnte.

Es sind jedoch nur in einigen wenigen Fällen Substitutionseffekte von physischer durch virtuelle Mobilität zu beobachten, wie beispielsweise beim Online-Banking. Tatsächlich findet eine Kompensation dieser Effekte durch physische Mobilität statt, die durch virtuelle Mobilität induziert wird, wenn man z. B. den Facebook-Kontakt auch real treffen möchte [6].

### 1.2.2 Aktivitäten bestimmen Mobilität

Die Mobilitätsnachfrage wird von zahlreichen Einflussfaktoren beeinflusst. Dies sind unter anderem Faktoren aus den Umfeldern Gesellschaft, Ökonomie, Politik, Umwelt oder Technologie [7]. Die enge Kopplung zwischen Wirtschafts- und Verkehrsleistung der vergangenen Jahrzehnte scheint sich jedoch abzuschwächen, zumindest im Personenverkehr. Der Güterverkehr ist in den letzten Jahren hingegen sogar deutlich überproportional zum Bruttoinlandsprodukt gewachsen. Dieser Trend wird sich aller Voraussicht nach in den kommenden Jahren fortsetzen (siehe Abb. 1.5 nach [7]).

Die wichtigsten Anlässe für Mobilität von Personen sind in Deutschland Freizeit, Beruf und Einkauf [8] (siehe Abb. 1.6 nach [20]).

Von besonderer Bedeutung ist der Freizeitverkehr (z. B. [9–11]), der den höchsten Anteil an der Verkehrsleistung aufweist.

Zudem stellt der Freizeitverkehr wegen seiner besonderen Anforderungen, wie z. B. spezielle Zielorte, Zahl der Passagiere, spezielles Gepäck wie Sportgeräte besonders hohe Anforderungen an die dazu geeigneten bzw. bevorzugten Verkehrsmittel.

Wie schon einleitend angedeutet, resultiert der insgesamt hohe Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) aus den besonderen Vorteilen des Automobils.

In Städten und Ballungsräumen, die über leistungsfähige U-und S-Bahnen verfügen, ist der ÖPNV-Anteil deutlich höher.

Neben der schon angesprochenen, vorzugsweise zweckorientierten Mobilität spricht man auch von sog. „Erlebnismobilität“. Hier steht die emotionale Komponente des Unterwegssein im Vordergrund. Oftmals mit Freizeit und Urlaub gekoppelt, führt Erlebnismobilität häufig zu speziellen Fahrzeugkonzepten und Ausstattungsmerkmalen.

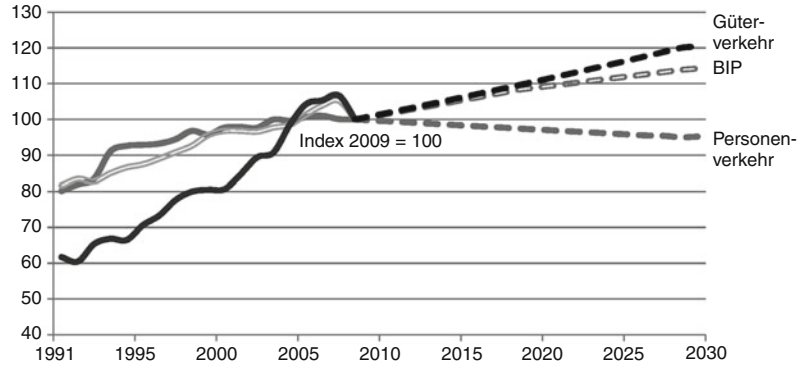



**Abb. 1.5** Entwicklung Wirtschaftsleistung und Verkehrsleistung Personen/Güterverkehr in Deutschland im Vergleich – mittleres ifmo-Szenario „Gereifter Fortschritt" (Quelle: ifmo 2010)

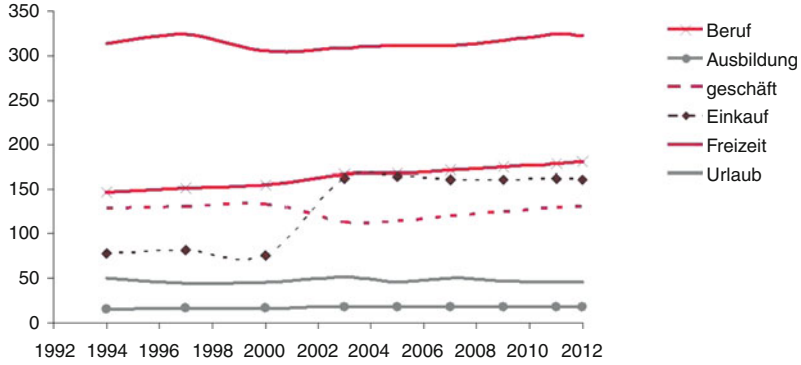



**Abb. 1.6** Entwicklung der Verkehrsleistung in motorisierten Individualverkehr in Deutschland nach Verkehrszwecken (Quelle: DIW 2009)

Besondere Anforderungen an Fahrzeugkonzept und Ausstattung stellt aber auch der Wirtschaftsverkehr mit dem Pkw, z. B. hinsichtlich Transportvolumen und -gewicht, Wirtschaftlichkeit oder Variabilität.

Für den Pkw-Verkehr ist darüber hinaus der sog. ruhende Verkehr von hoher Bedeutung, da für den Pkw nach jeder Fahrt ein Stellplatz verfügbar sein muss. Die Regulierung von Kapazitäten des ruhenden Verkehrs durch Parkraumbewirtschaftung ist für viele Städte ein etabliertes Mittel zur Verkehrssteuerung geworden und wird aller Voraussicht nach weiterhin an Bedeutung gewinnen [7].

### 1.2.3 Transportsysteme für den Güterverkehr

Globalisierung, fortschreitende europäische Integration sowie zunehmende Arbeitsteiligkeit der Wirtschaft haben große Auswirkungen auf den Güterverkehr. Transportqualität, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit sind wichtige Kriterien für die Auswahl des zu bevorzugenden Verkehrsmittels.

Auch beim Güterverkehr ist die Straße der Verkehrsträger mit dem größten Anteil beim Modalsplit (2014 in Deutschland: ca. 70 %, siehe Abb. 1.8 nach [1]). Die Gründe sind vor allem die hohe Dich-

| Vorteile des privaten Personenwagens | Vorteile öffentlicher Verkehrsmittel |
|---|---|
| ■ Weitgehend örtlich und zeitlich unabhängige Verfügbarkeit<br>■ Minimaler Anmarschweg, kein Warten und Umsteigen erforderlich<br>■ Meist günstige Reisezeiten<br>■ Private Umgebung, Komfort, Schutz vor schlechtem Wetter<br>■ Leichte Mitnahmemöglichkeit für Gepäck; Sportgerät usw., Aufbewahrungsmöglichkeiten im parkenden Fahrzeug<br>■ Geringe Zusatzkosten bei Mitnahme von Passagieren<br>■ Freude an der aktiven Steuerung und Bewegung möglich<br>■ Freude am Besitz möglich | ■ Benutzung auch für solche Personen, die nicht Auto fahren können (z.B. Kinder, Senioren) oder wollen<br>■ Direkte finanzielle Belastung nur bei Inanspruchnahme (kein Kauf oder Leasing)<br>■ Keine Beanspruchung durch aktives Fahren. Lesen und Schreiben während der Fahrt möglich<br>■ Keine Parkplatzsuche erforderlich<br>■ Schienenfahrzeuge: Bei sehr schlechtem Wetter höherer Grad an Pünktlichkeit |

**Abb. 1.7** Vorteile verschiedener Verkehrsmittel im Vergleich

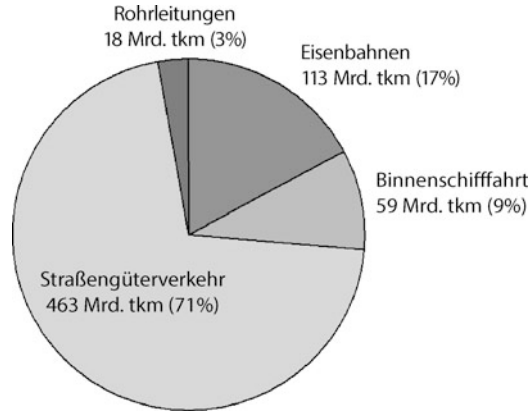



**Abb. 1.8** Güterverkehrsleistung in Deutschland 2008 (Quelle: DIW 2009)

te des Straßennetzes, die hohe Flexibilität des Lkw, die Möglichkeit des Transportes vom Absender zum Empfänger ohne Umladevorgang (z. B. [13] sowie Abb. 1.7). Da Güter- und Personenverkehr meist dieselbe Infrastruktur nutzen, muss man bei Diskussionen über den Straßenverkehr immer beide Entwicklungen im Auge behalten.

### 1.2.4 Einige spezielle Ausprägungen von Mobilität

Werden Personenwagen normalerweise für möglichst vielfältige Anwendungen ausgelegt („Einhüllende aller Anforderungen", siehe ▶ Kap. 2), gibt es spezielle Mobilitätsformen, die aufgrund spezifischer Zielsetzungen zu eingeschränkten bzw. speziellen Fahrzeugkonzepten führen können. Hierzu gehören:

- Nutzung vor allem in Ballungszentren (ausgesprochene Stadtautos, wenig Stauraum, geringe Außenmaße, geringe Höchstgeschwindigkeit),
- Mitnahme von größeren Lasten in Anhängern (Boote, Pferde) oder das Ziehen von Wohnwagen,
- Fahrten auf unbefestigten Wegen und im Gelände,
- Fahrten in gepanzerten Sicherheitsfahrzeugen,
- Mobilität von Senioren (möglicherweise mit spezieller Fahrzeugausstattung zur Kompensation körperlicher Einschränkungen).

## 1.3 Spannungsfelder und Auswirkungen der Mobilität

Mobilität und Wohlstandsentwicklung sind eng aneinander gekoppelt. Durch die Struktur unserer Wertschöpfung führt ein Anstieg der Wirtschaftsleitung vor allem im Güterverkehr zu einem weiteren Wachstum. In Schwellenländern wie China und Indien ist aber bei weiteren Wohlstandszuwächsen auch weiteres Wachstum im Personenverkehr zu erwarten. Mobilität ist aber auch Voraussetzung für das Wohlbefinden des Einzelnen und für seine Teilnahme am sozialen Leben (z. B. Fahrten zur Ausbildung oder zur Arbeitsstelle, Besuch von Freunden oder anderen Ländern).

Die hohe Bedeutung von Mobilität und die damit verbundene hohe Nachfrage nach Mobilität brachten aber schon immer auch Probleme mit sich. So erließ schon Caesar aus Gründen der Geräuschreduzierung eine Verordnung, welche Streitwagen zeitweise von den Straßen Roms verbannte. Und vor der Erfindung des Automobils drohten Großstädte im Verkehr der Pferdefuhrwerke zu ersticken. In

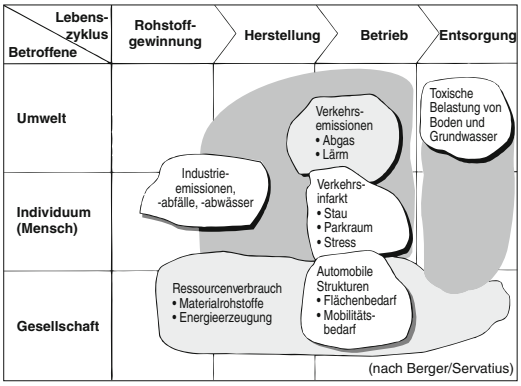



**Abb. 1.9** Negative Auswirkungen des Autos

Berlin gab es im Jahr 1875, also vor Erscheinen der ersten Automobile, mehr Tote im Straßenverkehr als derzeit.

Heutzutage, bei einer Weltbevölkerung von über 7 Milliarden Menschen, sind die Konsequenzen des Verkehrs von Personen und Gütern zu einer globalen Herausforderung für Ballungsräume, Magistralen und den Globus insgesamt geworden.

Allgemein bekannt sind die direkten Auswirkungen des Verkehrs, wie

- Ressourcenbedarf,
- Emissionen,
- Unfälle,

die den verschiedenen Lebenszyklusabschnitten der Verkehrsmittel zugeordnet werden können (Abb. 1.9 aus [14]).

In einer Untersuchung im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung wurde in einer Abschätzung für den gesamten Straßen- und Schienenverkehr in der Schweiz ermittelt, dass der Gesamtnutzen größer als die Gesamtkosten sind [15]. Allerdings sind Ergebnisse solcher Untersuchungen stark davon abhängig, unter welchen Annahmen die Berechnungen durchgeführt und welche Kriterien einbezogen wurden.

Einige Wirkungen haben vorwiegend oder ausschließlich lokale oder regionale Bedeutung wie z. B. Geräuschemissionen, Flächenbedarf für Infrastruktur. Andere Belastungen wie Ressourcenverbrauch oder $CO_2$-Emissionen betreffen den gesamten Globus.

Nicht alle Problembereiche haben allerdings den gleichen Kritikalitätsgrad. Als Beispiel für das Thema Ressourcenreichweite sei der Rohstoff-Sektor genannt. So kommen Eisenwerkstoffe weltweit in großem Umfang vor, während spezielle Materialien wie Edelmetalle für Katalysatoren oder seltene Erden für Magnete in Elektromotoren nur in beschränktem Umfang verfügbar sind.

Eine wichtige Herausforderung an Wissenschaft und Praxis ist die ständige Arbeit an den Herausforderungen der Zukunft. So gibt es Belastungen, die bis heute bereits drastisch verringert werden konnten, wie z. B. Schadstoff-Emissionen der Verbrennungsmotoren oder umweltbelastende Effekte von Fertigungsprozessen. Die weitere Reduktion des Ressourcenverbrauchs, vor allem bei fossilen Energieträgern stellt eine zentrale Herausforderung für die Zukunft dar.

Die Knappheit von Finanzmitteln für Infrastrukturinvestitionen stellt für die Politik eine andere wesentliche Herausforderung für eine zukunftsorientierte Gestaltung von Mobilität dar. Eine auf langfristige strategische Zielsetzungen ausgerichtete Verkehrspolitik wird damit für einen effektiven und effizienten Mitteleinsatz noch wichtiger [16].

Eine weitere Herausforderung liegt darin, Kooperationen zur Umsetzung vielfältiger Lösungen einzugehen. Eine unternehmens- und verkehrsträgerübergreifende Zusammenarbeit gemeinsam mit Institutionen der öffentlichen Hand ist sowohl zur Optimierung der Schnittstellen zwischen den Verkehrsträgern als auch für eine effizientere Gestaltung des gesamten Verkehrssystems zukünftig eine Notwendigkeit [7].

In einem Bereich allerdings gibt es zweifellos eine Grenze, die bei Null liegt: die Anzahl der im Verkehr Getöteten. Denn jeder Verkehrstote ist einer zuviel!

Bis zu 94 % der kleinen und großen Verkehrsunfälle auf amerikanischen Straßen involvieren menschliches Versagen. Die Weiterentwicklung der Sicherheits- und Assistenzsysteme bis hin zum autonomen Fahren soll dieser Problematik begegnen. So war das Google Self-Driving Car Project auf einer Erprobungsstrecke von 1,8 Millionen Meilen in lediglich zwölf minderschwere Verkehrsunfälle verwickelt [21]. Ein autonomes Fahrzeug überwacht

und erkennt seine Umgebung mit Hilfe von Radar, Lidar, Kamera oder GPS Systemen. Mit tatkräftiger Unterstützung nicht nur von traditionellen Automobilherstellern sondern auch von Unternehmen wie beispielsweise der NASA sollen wir schon in 2025 dem vollständigen autonomen Fahrzeug sehr nahe kommen.

Bereits hier sei angedeutet, dass das Problem der Verkehrssicherheit jedoch nicht allein mit sichereren Automobilen zu lösen ist. Erforderlich ist neben der technischen Weiterentwicklung im Hinblick auf die aktive und passive Sicherheit ein den gesamten Verkehrsbereich umfassendes Verkehrsmanagement.

## 1.4 Mobilitätsrelevante Anforderungen an Automobile

### 1.4.1 Grundsätzliche Anforderungen

Der automobil- und verkehrstechnische Fortschritt hat seit der Einführung der ersten Fahrzeuge Ende der 80er Jahre des neunzehnten Jahrhunderts eine unübersehbare Fülle an grundlegenden Verbesserungen auf allen Teilgebieten gebracht. Doch bleiben weder der Anstieg der Ansprüche noch der weitere technische Fortschritt stehen. Die aus der Massenmotorisierung resultierenden Anforderungen wurden schon in ▶ Abschn. 1.3 angesprochen; nicht zuletzt entwickeln sich aber auch die Wünsche und Anforderungen jedes Autofahrers an seine künftigen Fahrzeuge weiter (◘ Abb. 1.10 aus [18]).

Eine andere Sichtweise geht von den Anforderungen der Verkehrsabläufe aus und zielt auf Maßnahmenbereiche zu deren Verbesserung, insbesondere auf interne und externe Assistenzsysteme (z. B. [17]), und bezieht die zugehörigen Verantwortungsträger und Akteure ein.

### 1.4.2 Einige spezielle Anforderungen

Trotz zunehmender Bedeutung des ÖPNV wird auch der MIV in Ballungszentren weiterhin unverzichtbar sein. Damit werden auch die (an sich alten) Bemühungen um ausgesprochen stadtverträgliche Fahrzeugkonzepte fortgesetzt. Zugehörige Anforderungen betreffen vor allem besonders geringe Abgas- und Lärm-Emissionen sowie geringen Platzbedarf beim Parken, was sowohl zu speziellen Package-Konzepten als auch zu eigenständigen Antriebsaggregaten (z. B. Hybrid- oder Elektroantrieb) führen kann (▶ Abschn. 4.3).

- Pannen- und Unfallfreiheit
- Zielfindung in fremden Gebieten, Hilfe bei Parkplatzsuche
- Vermeidung unerwarteter Zeitverluste (Staus, ...)
- Vermeidung bzw. Beherrschung von kritischen Situationen
- Bewältigung unvermeidbarer Unfallsituationen
- Minimierung von Unannehmlichkeiten in Sondersituationen (ungünstige Witterung, ...)
- Einparkhilfen
- „Freude am Fahren“

◘ **Abb. 1.10** Erwartungen des Fahrers an sein Fahrzeug

Während für Fahrzeuge von körperlich Behinderten speziell angepasste Umrüstmaßnahmen angeboten werden, gibt es zur Frage ausgesprochener „Senioren-Autos“, die vor allem den ergonomischen Eigenschaften dieser Nutzerpopulation Rechnung tragen, von der Zielgruppe selbst häufig eher Ablehnung als Zustimmung.

Obwohl im Taxieinsatz ebenfalls bestimmte Eigenschaften bevorzugt werden (bequemer Einstieg, geringer Wendekreis, etc.) haben sich (bis auf das Londoner Taxi) spezielle Fahrzeugkonzepte kaum durchsetzen können. Im Gegensatz dazu haben Offroad-Fahrzeuge für Extremeinsätze sowie Abwandlungen (z. B. Sport Utitily Vehicles – SUV), die auch auf befestigten Straßen akzeptable Fahreigenschaften aufweisen, aus verschiedenen Gründen weltweite Erfolge erzielt.

Neue Angebote im motorisierten Individualverkehr, wie z. B. Car Sharing [19] haben in den vergangenen Jahren durchaus an Bedeutung gewonnen. Auch wenn sie bezogen auf den gesamten Mobilitätsmarkt nach wie vor eine eher untergeordnete Rolle spielen, weisen die derzeit hohen Wachstumsraten auf eine weiter steigende Bedeutung dieser Konzepte hin, vor allem für die individuelle Mobilität in Ballungsräumen [19].

Carsharing wird heute in Deutschland von etwa 150 Unternehmen und Vereinen angeboten.

Grundsätzlich ist zwischen stationsbasiertem Carsharing mit festen Mietstationen und flexiblen Angeboten, bei denen die Fahrzeuge grundsätzlich frei und spontan abgestellt und übernommen werden können, zu unterscheiden. Eine Sonderform stellt das private Carsharing dar, bei dem zur Verfügung gestellte Fahrzeuge aus Privatbesitz angemietet werden können.

## Literatur

1. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Verkehr im Überblick 2014. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2015)
2. statista Statistik-Portal: Anzahl registrierter Kraftfahrzeuge weltweit in den Jahren 2005 bis 2013. Statista GmbH, Hamburg (2015)
3. Bruckmann, D., et al.: Untersuchung ausgewählter Entscheidungen auf Verkehr und Umwelt. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.) Berlin (2000)
4. Deutsches Mobilitätspanel (MOP): Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen; Bericht 2013/2014: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Institut für Verkehrswesen, Karlsruhe. Institut für Technologie, Karlsruhe (2014)
5. Kraftfahrt-Bundesamt: Bestand an Personenkraftwagen am 01. Januar 2003 – 1. Januar 2015. Flensburg (2015)
6. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Auswirkungen der virtuellen Mobilität? Springer, Berlin (2003)
7. Institut für Mobilitätsforschung: Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2030. BMW AG, München (2010)
8. Zängler, T.: Mikroanalyse des Mobilitätsverhaltens in Alltag und Freizeit. Springer, Berlin (2000)
9. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Freizeitverkehr. Springer, Berlin (2000)
10. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Erlebniswelten und Tourismus. Springer, Berlin (2004)
11. Institut für Mobilitätsforschung (Hrsg.): Öffentlicher Personennahverkehr – Herausforderungen und Chancen. Springer, Berlin (2006)
12. Seiffert, U.: Mobilität – Gesellschaftliche Anforderungen und technologische Optionen der Zukunft; RWE-Zukunftstagung „Gesellschaft und Technik im 21. Jahrhundert", Essen, 22. August 1998
13. Schulz, J.: Bewertung des Güterverkehrs auf Straße und Schiene. FAT-Schrift, Bd. 125 (1996)
14. Berger, R., Servatius, H.-G.: Die Zukunft der Autos hat erst begonnen – Ökologisches Umsteuern als Chance. Piper-Verlag, München (1994)
15. INFRAS/IWW: Externe Kosten des Verkehrs. Zürich/Karlsruhe, Oktober 2004
16. Institut für Mobilitätsforschung: Verkehrsinfrastruktur-Benchmarking Europa – Verkehrsinfrastrukturausstattung und verkehrspolitische Rahmenbedingungen in ausgewählten europäischen Staaten. Berlin (2007)
17. Jürgensohn, T., Timpe, K.-T.: Kraftfahrzeugführung. Springer, Berlin (2001)
18. Braess, H.-H., Reichart, G.: PROMETHEUS – Vision des intelligenten Automobils auf der intelligenten Straße? ATZ 200–205 (1995). und S. 330–343
19. Frost & Sullivan: Sustainable and Innovative Personal Transport Solutions – Strategic Analysis of Carsharing Market in Europe. London (2010)
20. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr in Zahlen 2014/2015. DVV Media Group GmbH, Hamburg (2014)
21. Google Self-Driving Car Project Monthly Report May 2015. Mountain View, USA (2015)

# Anforderungen, Zielkonflikte

*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess, Egbert Fritzsche, Dr. Jost Christian Gail, Bernd Lorenz, Andre Seeck und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*

2.1 **Produktinnovation, bisherige Fortschritte – 12**

2.2 **Anforderungen durch den Gesetzgeber – 22**

2.3 **Neue Technologien – 50**

**Literatur – 53**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_2

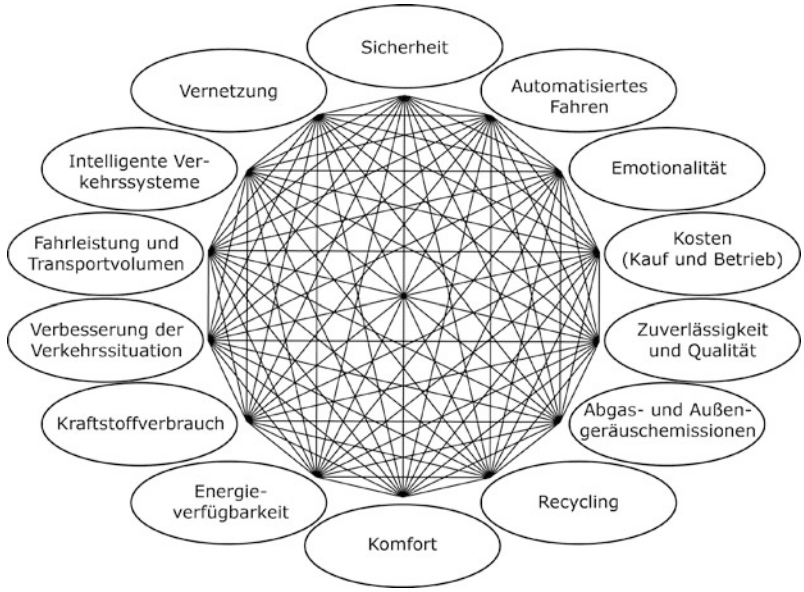
## 2.1 Produktinnovation, bisherige Fortschritte

Das Automobil ist seit mehr als einhundert Jahren ein Transportmittel für Menschen, Tiere und Güter. Obwohl es für den größten Anteil der Fahrzeuge in seinen Grundzügen gleich geblieben ist – vier Räder, Otto- oder Dieselmotor als Antrieb, Getriebe als Drehmomentwandler – hat es doch erhebliche Veränderungen erfahren. Diese findet man – auf den Kunden bezogen – in den zahlreichen Fahrerassistenzsystemen und bei den Antrieben in der wachsenden Anzahl an Varianten, wie CNG – Compressed Natural Gas, LPG – Liquified Petrol Gas, den diversen Hybridsystemen – vom Mild bis zum Plug IN Hybrid – sowie beim reinen Elektroantrieb und der Brennstoffzelle. Die Veränderungen werden geprägt durch den Mobilitätsbedarf, den internationalen Wettbewerb, den technischen Fortschritt, das weltweite Produktangebot, die Aktivitäten der Gesetzgeber, die eingesetzte Energie, Erdöl, Gas, Biokraftstoffe und Elektrizität sowie durch die vielfältigen Kundenanforderungen.

### 2.1.1 Kundenwünsche

Besonders die letzte Forderung bedeutet, dass die Wünsche der Kunden und der Märkte vorrangig in den Produktentstehungsprozess eingehen und durch den Fahrzeughersteller berücksichtigt werden müssen. Die Anforderungen an das Automobil selbst sind voller Widersprüche, die aber immer wieder gesamtheitlich gelöst werden konnten. Neu sind die Anforderungen durch die wachsende Verkehrsdichte in den Megacities und die Tendenz Fahrzeuge nicht mehr zu besitzen sondern für den jeweiligen Zweck zu leasen. Das Thema Vernetzung gewinnt besonders für jüngere Fahrer immer mehr an Bedeutung [1]. ◘ Abb. 2.1 zeigt sehr deutlich die Zielkonflikte:

Die Anforderungen an das System Gesamtverkehr steigen ebenfalls [2], da der Kunde die zurzeit wachsenden Verkehrsprobleme auch der Automobilindustrie zuordnet bzw. einen wesentlichen Beitrag zur Lösung derselben von ihr erwartet. Bei Befragungen der Kunden direkt zum Automobil ergeben sich die in ◘ Abb. 2.2 gezeigten Antworten.




◘ **Abb. 2.1** Forderungen an das Automobil

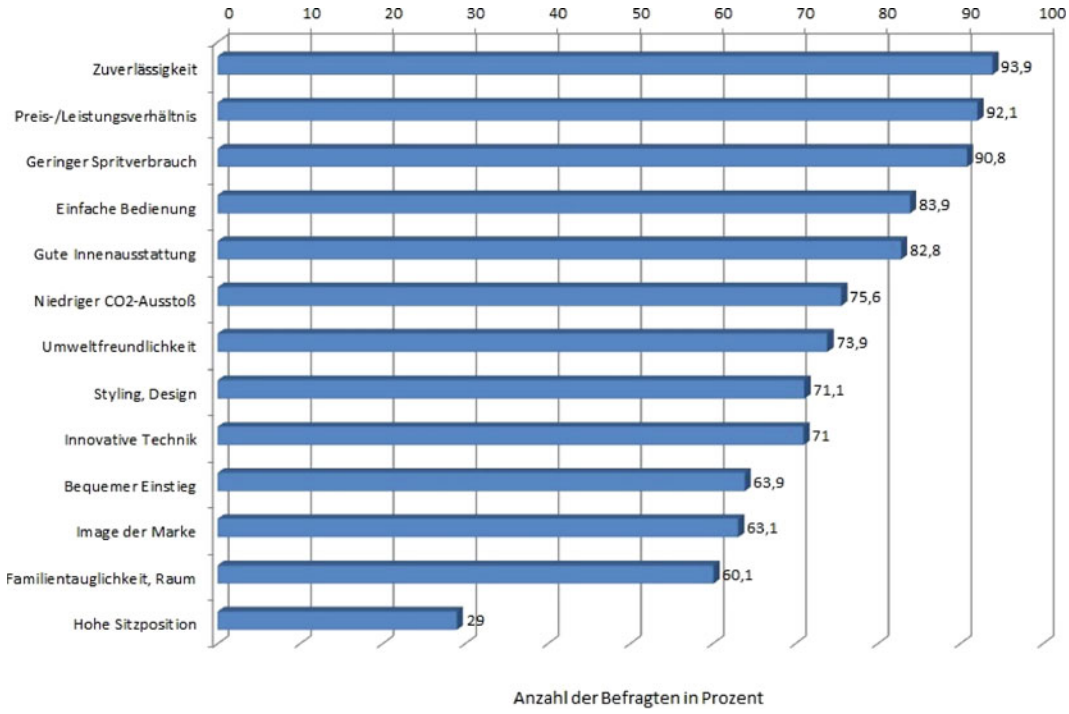



**Abb. 2.2** Wichtigste Kriterien beim Autokauf in Deutschland im Jahr 2014, Quelle Statista 2015 [3]



**Abb. 2.3** Größenvergleich Smart und Maybach 62

Sicherheit und Zuverlässigkeit, kein Liegenbleiben haben neben niedrigem Kraftstoffverbrauch eine hohe Priorität.

Um die Wünsche der Kunden zu erfüllen, aber auch wegen der geforderten $CO_2$/km-Begrenzung ab dem Jahr 2020 auf im Mittel pro Fahrzeughersteller unter 95 g $CO_2$/km ist außerdem in den letzten Jahren die Angebotsvielfalt durch die Hersteller stark gestiegen. Sie reicht innerhalb eines Konzerns inzwischen von sehr kompakten Fahrzeugen wie dem „smart“ [4] mit einer Fahrzeuglänge von 2,7 m, einer Fahrzeugbreite von 1,66 m und einer Höhe von 1,55 m bis hin zum Maybach [5] in der langen Version mit einer Länge von 6,165 m, einer Breite von 1,98 m und einer Höhe von 1,57 m. Die Abb. 2.3 zeigt in einer Gegenüberstellung die Größen-




**Abb. 2.4** Audi R8 e-tron (Quelle: Audi AG)

**Tabelle 2.1** Anteile der Fahrzeugsegmente an den Neuzulassungen in Deutschland 2012, Quelle KBA

| Fahrzeugsegment | Prozent |
|---|---|
| Kompaktklasse | 23,8 |
| Kleinwagen | 16,9 |
| Geländewagen | 15 |
| Mittelklasse | 13,8 |
| Kleinstwagen | 6,9 |
| Minivans | 6,5 |
| Obere Mittelklasse | 4,7 |
| Großraum-Vans | 5,1 |
| Sonstige | 7,3 |

verhältnisse. Aber auch andere Segmente decken den Kundenbedarf ab, z. B. die große Anzahl Cabrios, Sportwagen, Multivan und Offroadfahrzeuge, Abb. 2.4 zeigt den Audi R8 e-tron. In der Tab. 2.1 sind die Segmente für Deutschland für 2014 dargestellt. Der Kunde ist dann bereit, ein neues Fahrzeug zu kaufen, wenn es seinen finanziellen Möglichkeiten und Neigungen entspricht. Dabei reagiert er häufig auf spontane Ereignisse.

## 2.1.2 Gesetzgebung

Während sich das Automobil als Transportmittel bis zum zweiten Weltkrieg zunächst ohne große Beachtung der Umweltfrage, der Fahrzeugsicherheit und der Wiederverwertung entwickelte und nach dem Krieg eine Vielzahl von kleineren Fahrzeugen das Transportbedürfnis erfüllte, begann Mitte der Sechzigerjahre in den USA durch die Sicherheitsgesetze und die Emissionsvorschriften eine deutliche Veränderung. Einen großen Einfluss hatte dabei der Verbraucheranwalt Ralph Nader mit seiner Sicherheitskampagne. Diese und die Vorschriften für den Kauf von Behördenfahrzeugen führte zu den *Federal Motor Vehicle Safety Standards*. Ein umfassendes Vorschriftenwerk, welches alle Fahrzeugteile umfasst und bis zum heutigen Zeitpunkt ständig erweitert wird. Gesetzliche Regelungen für den Betrieb von Fahrzeugen gab es auch schon Anfang 1900 in Deutschland mit einem Gesetz über die Haftpflicht beim Betrieb von Fahrzeugen. Die internationalen weltweiten Sicherheitskonferenzen, wie die *ESV-Conferences* [6] und die Biomechaniktagungen [7], taten ein Übriges, um dieses wichtige Thema voranzubringen. Hier treffen sich Unfallforscher, Biomechaniker, Ingenieure und die Vertreter der Gesetzgebung, um über die neuesten Ergebnisse der Fahrzeugsicherheit intensiv zu diskutieren. Besonders zu Beginn der Siebzigerjahre, gab es auch einen innovativen Wettbewerb für die besten Lösungen bei Experimentierfahrzeugen oder Teilsystemen. Die Fahrzeugsicherheit kann nicht nur vom Fahrzeughersteller, sondern ganz wesentlich vom Kunden und durch den Gesetzgeber positiv beeinflusst werden. Z. B. haben Straßenausbau, Signalgebung, Führerscheinausbildung, Begrenzung des Alkohol- und Drogenkonsums und klare Verkehrszeichen ebenfalls einen sehr positiven Beitrag geleistet. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet „Car to Infrastructure“ werden weitere Fortschritte bringen. Als Ergebnis der Bemühungen ist festzustellen, dass in allen Ländern West-Europa's die Anzahl der tödlichen Unfälle und Unfälle mit Verletzungen als Funktion der gefahrenen Kilometer deutlich zurückgegangen ist. Die Abb. 9.3, [8, 9] zeigt beispielhaft für Deutschland den Rückgang der im Straßenverkehr Getöteten als Funktion der Jahre pro gefahrenen Millionen Fahrzeugkilometer. Daraus ist zu erkennen, wie notwendig die Aktivitäten waren und sind. Leider sind weltweit sehr viel mehr Unfälle mit tödlichen Verletzungen, größer als 1 Million pro Jahr, zu verzeichnen. Die länderspezifischen Unterschiede

sollten die „schlechteren“ Länder reizen, es den „besseren“ nachzutun. Dies gilt auch für andere Verkehrsträger wie Eisenbahn, Öffentlicher Personennahverkehr und professionelle Airlines, die jedoch eine deutlich höhere Sicherheit pro Personenkilometer aufweisen.

Nicht immer gingen die Veränderungswünsche vom Automobilkunden aus, häufig hat die Allgemeinheit diese Veränderungen über die Politik herbeigeführt. Ein typisches Beispiel ist Kalifornien. Ausgelöst von dem Smog und der schlechten Luftqualität in Los Angeles und in anderen großen Städten, wurden die Abgasgesetze erlassen. Mitte der 60-er Jahre begrenzte man in den USA zunächst das Kohlenmonoxid CO, die Stickoxide $NO_x$, die Kohlenwasserstoffe HC und die Partikel. Anfang der 70-er Jahre wurden in Europa die Abgasemissionen für die Komponenten: Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel und zu einem späteren Zeitpunkt die Stickoxide gesetzlich geregelt. Zusätzlich muss der Fahrzeughersteller den Beweis antreten, dass die nicht limitierten Abgasbestandteile keine Gesundheitsgefährdung darstellen. Der eigentliche technologische Durchbruch wurde mit dem Dreiwegekatalysator und der $\lambda = 1$-Regelung bei den Ottomotoren im Zusammenhang mit bleifreiem Kraftstoff erreicht, ▶ Abschn. 5.1. Dies gilt auch für Europa, wo inzwischen ein sehr hoher Durchdringungsgrad von derartigen Konzepten erreicht wurde. Auch die Emissionen aus den Kraftstoffsystemen wurden um ein Vielfaches reduziert, ▶ Abschn. 5.10. Die Verdampfungsverluste beim Stillstand und beim Betrieb des Fahrzeuges werden über entsprechende Dichtheit des Kraftstoffbehälters und der Leitungen und der Hinführung der Emissionen zu einem Aktivkohlebehälter, der vom Motor gereinigt wird, begrenzt. Beim Tanken werden die aus dem Kraftstoffbehältereinfüllstutzen entweichenden Gase über geeignete Vorrichtungen an den Zapfpistolen abgesaugt. Bei den Dieselmotoren wurden zunächst die Fortschritte durch motorinterne Maßnahmen erzielt, bis Ende der 80-er Jahre die Oxidationskatalysatoren einen weiteren Freiheitsgrad in der Reduzierung der Abgaskomponenten ergeben haben. Die Hochdruckeinspritzung hat weitere Erfolge gebracht. Partikelfilter, $NO_x$-Speicherkatalysatoren und die SCR-Technologie sind in Serie. Besonders die Stickoxide und die Partikel konnten deutlich verringert werden, ▶ Abschn. 5.2.

Nach wie vor wird intensiv an weiteren Verbesserungen für beide Motorkonzepte gearbeitet. Sie lassen sich in folgende Gruppen einteilen: Minimierung der Kaltstartemissionen, weitere Reduzierung der limitierten Abgaskomponenten und der Stickoxide bei Otto- und Dieseldirekteinspritzern. Die gesetzlichen Forderungen in Kalifornien mit den ULEV (ULTRA LOW EMISSION VEHICLE), SULEV (SUPER ULTRA LOW EMISSION VEHICLE) und ZERO Emission (Null Emissionen) und die europäischen Ziele mit Euro 5 + Euro 6 sorgen dafür, dass das Automobil bis auf die Kohlendioxidemission völlig aus der Diskussion bezüglich der Umweltbelastung verschwindet. Als Beispiel demonstriert das ◘ Abb. 2.5 die Absenkungsschritte der Emissionswerte in Europa seit. 1992 bis zum Einsatz von Euro 6. Die Abgaswerte wurden im Schnitt um mehr als 98 % in Richtung Null gesenkt. Die Euro 5-Regelung hat besonders die Stickoxide und die Partikel begrenzt. Im NEFZ für Dieselfahrzeuge die $NO_x$ auf 0,18 g/km und Partikel auf 0,005 g/km. Mit EURO 6 wurden die Werte weiter gesenkt und auch die Partikelzahl limitiert.

Auch das Außengeräusch wurde reduziert. In dem europäischen Zulassungsverfahren wird eine beschleunigte Vorbeifahrt im 2. und 3. Gang simuliert. Heute können mehr als 5 mal so viele Fahrzeuge diesen Test vollziehen und bleiben insgesamt noch unter dem Grenzwert von 1975 mit 82 dB(A). Bei der momentanen Festlegung des Typprüfungswertes mit 74 dB(A) werden bereits ca. 50 % des Geräusches durch den Kontakt Fahrbahn/Reifen erzeugt, bei einer weiteren Absenkung z. B. auf 72 dB(A) steigt dieser Wert auf 75 %. Die wesentlichen Aktivitäten müssen sich daher auf die Reduzierung des Geräusches Reifen/Fahrbahn konzentrieren. Hier ist der Einsatz der neuen Geräuschgesetzgebung zum Juli 2016 (ECE R 51.03) zu berücksichtigen, ▶ Abschn. 3.4. Durch eine besondere Fahrbahnoberfläche, dem „Flüsterasphalt“, ist viel zu erreichen. Allerdings haben diese Fahrbahnoberflächen im Vergleich zur Standardbauweise eine reduzierte Lebensdauer. Das Außengeräusch erhält eine zunehmende Bedeutung seitens der Öffentlichkeit. Bei kritischen Stimmen zum Automobil wird es häufig gleichbedeutend mit

**Pkw mit Benzinmotor (mg/km), PN [1/km]**

| Norm | EURO 1 | EURO 2 | EURO 3 | EURO 4 | EURO 5 | EURO 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Typprüfung | ab 1. Juli 1992 | ab 1. Jan. 1996 | ab 1. Jan. 2000 | ab 1. Jan. 2005 | ab 1. Sep. 2009 | ab 1. Sep. 2014 |
| CO | 3160 | 2200 | 2300 | 1000 | 1000 | 1000 |
| $(HC + NO_x)$ | 1130 | 500 | | | | |
| $NO_x$ | | | 150 | 80 | 60 | 60 |
| HC | | | 200 | 100 | 100 | 100 |
| davon NMHC | | | | | | 68 |
| PM | | | | | 4,5* | 4,5* |
| PN | | | | | | $6 \cdot 10^{12}$ |

* mit Direkteinspritzung

**Pkw mit Dieselmotor (mg/km), PN [1/km]**

| Norm | EURO 1 | EURO 2 | EURO 3 | EURO 4 | EURO 5 | EURO 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Typprüfung | ab 1. Juli 1992 | ab 1. Jan. 1996 | ab 1. Jan. 2000 | ab 1. Jan. 2005 | ab 1. Sep. 2009 | ab 1. Sep. 2014 |
| CO | 3160 | 1000 | 640 | 500 | 500 | 500 |
| $(HC + NO_x)$ | 1130 | 700/900* | 560 | 300 | 230 | 170 |
| $NO_x$ | | | 500 | 250 | 180 | 80 |
| PM | 180 | 80/100* | 50 | 25 | 5 | 4,5 |
| PN | | | | | | $6 \cdot 10^{11}$ |

* mit Direkteinspritzung

**Abb. 2.5** Verringerung der Abgaswerte in Europa

Parkplatz- und Emissionsproblemen in der Stadt genannt.

## 2.1.3 Fahrzeugtechnik

Bei der Beurteilung der Fahrzeugtechnik kann man feststellen, dass sich alle wesentlichen Eigenschaften kontinuierlich verbessert haben. Dies gilt für die Langlebigkeit, z. B. verzinkte Karosserie und andere verbesserte Korrosionseigenschaften (korrosionssicher bis zu 12 Jahren), die höhere Anmutungs- und Lebensdauerqualität, die größere Verwindungssteifigkeit und die damit verbundene Klapperfreiheit, eine verbesserte Ergonomie, Sitzgestaltung sowie Lage und Betätigung von Bedienelementen und die wesentliche Verbesserung des Schwingungsverhaltens und Geräuschniveaus im Fahrzeuginnenraum. Die diesbezügliche Leistungsfähigkeit beurteilt der Kunde sowohl im Stand als auch beim Fahren besonders hoch. Viele Detailoptimierungen: Entkopplung, Tilger, Dämpfung bis hin zur geregelten Luftfeder haben für den Kunden wesentliche Verbesserungen erzielt. Dieser Trend wird sich fortsetzen.

Einen wesentlichen Anteil an den Verbesserungen hat die Karosserie. Durch die Kompaktbauweise wurde die Raumausnutzung deutlich verbessert. Dies gilt auch für die Verwindungssteifigkeit. Interessant ist die Karosseriegestaltung im Zusammenhang mit den Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Bereits heute zeichnet sich eine Umkehr der Gewichtsspirale ab, wobei alle Bereiche des Fahrzeugs betroffen sind.

Für den Fahrzeugbetrieb haben inzwischen zahlreiche Assistenzsysteme in der Serie eingesetzt. Sie beinhalten beispielhaft die im Abb. 2.6 dargestellten Gebiete. Eine sehr gute Übersicht findet man auch im Handbuch für Fahrerassistenzsysteme [10]. In der näheren Zukunft werden hochautomatisierte Fahrzeuge das Straßenbild beherrschen und den Weg zu einer noch autonomeren Fahrweise ebnen.

Ein ganz wichtiger Grund für den Kaufentscheid ist für die Kunden der Kraftstoffverbrauch. Dieser konnte für die von deutschen Herstellern in der Bundesrepublik angebotenen Fahrzeuge seit 1992 deutlich gesenkt werden. Die momentan größte Herausforderung an die Automobilindustrie ist die $CO_2$-Begrenzung pro gefahrenen Kilometer auf




**Abb. 2.6** Beispiele für eine Fahrerunterstützung [10]

zunächst $\leq 130$ g/km (beginnend im Jahr 2012), dann $\leq 95$ g/km im Jahr 2020 und in Diskussion für 2050 $< 20$ g/km, d. h. weniger als 0,9 l pro 100 km.

Durch viel Feinarbeit bezüglich der aerodynamischen Formgebung wurde der Luftwiderstandsbeiwert $c_w$, aber auch der Luftwiderstand selbst deutlich reduziert. Der $c_w$-Wert konnte seit 1960 um 40 % auf im Schnitt auf einen Wert von 0,3 [–] gesenkt werden, Abb. 2.7. Der Luftwiderstand (die Multiplikation von $c_w \times$ Querschnittsfläche) liegt heute bei vielen Fahrzeugen unter 0,6 m$^2$. Trotz der größeren Querschnittsfläche durch den momentanen Designtrend – kürzer, breiter und höher – gab es eine ständige Reduzierung des Luftwiderstandes und damit des Fahrwiderstandes. Der Luftwiderstand trägt auch bei den momentanen EG-Messzyklen für ein Mittelklassefahrzeug je nach Ausgangslage mit ca. 40 % zum Verbrauch bei. Allerdings schwankt dieser Wert. Pro 10 % $c_w \times A$ Änderung liegt die Einsparung bei einem großen/schweren Fahrzeug bei 2,2 % und bei einem kleinen Fahrzeug, 4 % [11].

Auch bei der Reduzierung des Rollwiderstandes konnte durch neue Reifengenerationen u. a. mit Silikatechnik der Rollwiderstandsbeiwert von 0,02 im Jahr 1960 auf heute $f_r = 0{,}008$ gesenkt werden. Zusätzlich werden auch alle weiteren den Rollwiderstand beeinflussenden Bauteile, wie Lager, Gelenke, Antriebswellen, der Optimierung unterzogen.

Den größten Anteil an der Verbrauchsreduzierung und zur Steigerung des Komforts haben die Antriebsaggregate erzielt. Beim Ottomotor: Multipointeinspritzung, kontaktfreie Zündung, Mehrventiler, variable Ventilverstellung, Direkteinspritzung, bedarfsgesteuerte Kraftstoffpumpe, Zylinderabschaltung, Leichtbauweise, Kühlkreislaufoptimierung, Aufladung zur Drehmoment- oder Leistungssteigerung, Downsizing mit minimalen Verbräuchen von unter 225 g/kWh. Beim Dieselmo-

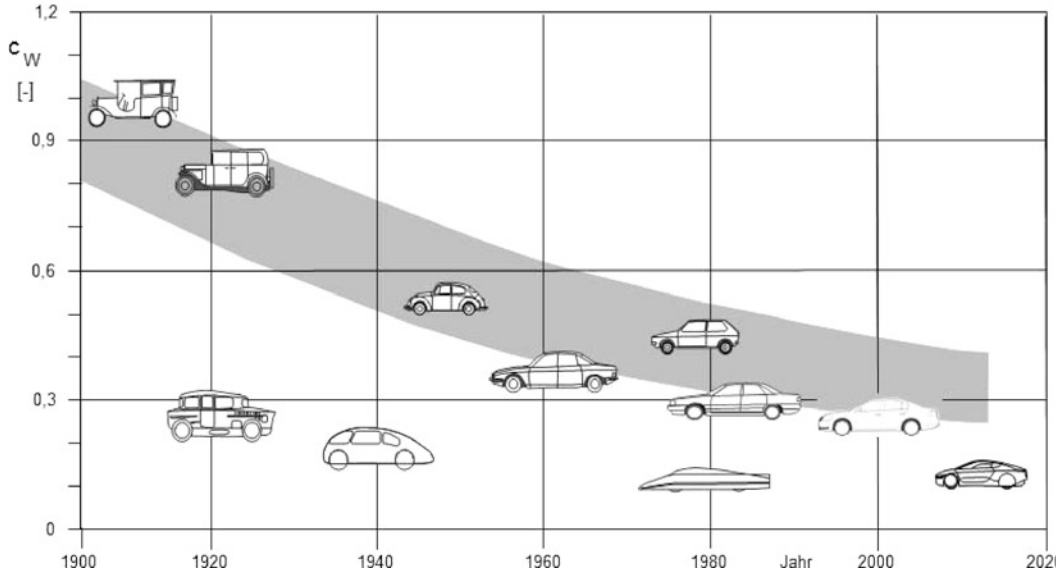



**Abb. 2.7** Luftwiderstandsbeiwert als Funktion der Jahre (Quelle: Volkswagen AG)

tor Direkteinspritzung mit variabler Aufladung zur Drehmoment- und Leistungssteigerung, Common-Rail und Pumpe/Düse mit Einspritzdrücken von bis zu 2500 bar und mit Voreinspritzung zur Geräusch- und Emissionsminderung. Die piezoelektrische Einspritzung erlaubt zahlreiche Optimierungen bezüglich des Einspritzvorgangs. Die besten Motoren derartiger Ausführung liegen beim spezifischen Verbrauch unter 200 g/kWh.

Die Getriebe wurden ebenfalls bezüglich der Drehmomentenübertragung pro Getriebegewicht und -baugröße wesentlich verbessert. Bei den Schaltgetrieben führte dies zu 5- und 6-Gang-Getrieben, bei den Automatikgetrieben haben elektronische Regelung und Steuerung mit dem Einsatz von 5- bis 9-Gang-Getrieben erhebliche Verbrauchseinsparungen erbracht. Die eingeführten mechanischen automatisierten Schaltgetriebe bis 7-Gänge (10 Gänge werden entwickelt), bei denen die Gangwahl sowohl vom Fahrer als auch automatisch vorgenommen werden können, einschließlich des Stopp/Start-Systems, stellen einen wesentlichen Beitrag zur Verbrauchsreduzierung dar. Der Kunde erwartet aus Komfort und Beschleunigungsgründen keine Zugkraftunterbrechnung, so dass erst mit den geregelten Doppelkupplungsgetrieben der Marktdurchbruch gelang [12]. Die kontinuierlich variablen Getriebe haben speziell in Europa im Vergleich zu Japan noch nicht den prognostizierten Markterfolg erzielt. Abzuwarten ist der Einsatz im Zusammenhang mit Hybridantrieben (▶ Abschn. 4.3.3).

Beim Ottokraftstoff kann man überschlägig rechnen, dass 1 l verbrannter Kraftstoff ca. 2400 g $CO_2$ emittiert, beim Diesel sind dies ca. 2640 g $CO_2$ Die Aufgaben der Zukunft sind besonders intensiv bezüglich der weiteren Kraftstoffverbrauchsreduzierung. Diese Regelung wird durch Aktivitäten wie Steuererleichterungen oder direkte Förderung beim Kauf von Fahrzeugen in einigen Ländern unterstützt. Inzwischen werden für 2020 95 g $CO_2$/km und für 2050 20 g $CO_2$/km gefordert [14], ◘ Abb. 2.8.

Die Notwendigkeit die $CO_2$-Emissionen zu reduzieren erfordert eine Vielzahl von Aktivitäten: verstärkter Einsatz von alternativen Kraftstoffen, wie biofuel, CNG, synfuel und Ausschöpfung des Potentials von Diesel- und Ottofahrzeugen, inklusive der Hybridisierung, vom Midi bis zum Plug IN, der reinen Elektrotraktion und der Brennstoffzellenfahrzeuge. Ganz wichtig ist bei der Betrachtung der Alternativen zum Otto- und Dieselmotor die LCA (Life Cycle Analysis, d. h. die Betrachtung der gesamten Energiekette [15]). Die ◘ Abb. 2.9

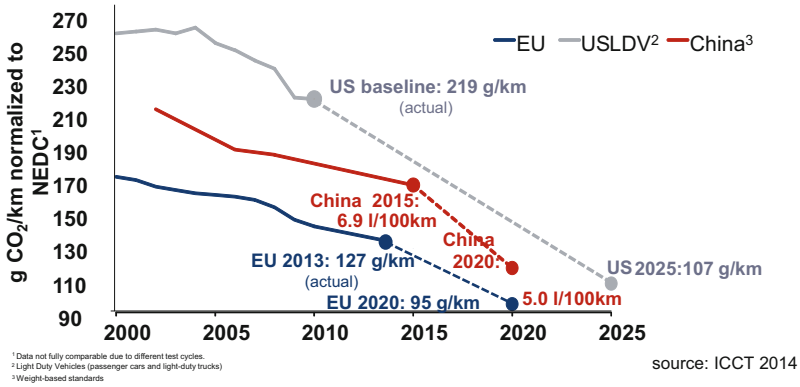



**Abb. 2.8** Zukünftige $CO_2$-Emission in g/km [15]

zeigt den Volkswagen Golf GTE Hybrid Plug IN, welcher 50 Kilometer elektrisch fährt aber mit dem Verbrennungsmotor fast 1000 km ohne zu tanken fahren kann. Der Normverbrauch liegt bei 1,5 l/100 km. Das entspricht einem $CO_2$-Ausstoß von 36 g/km. Ein anderes Beispiel ist der Toyota Mirai, welcher als Brennstoffzellenfahrzeug ab 2015 zunächst in Japan und dann in Europa und USA angeboten wird. Die Brennstoffzelle gibt eine Leistung von 100 KW ab und wird mit Wasserstoff betrieben [16].Um die ehrgeizigen Ziele der $CO_2$-Reduzierung zu erreichen, wird man intensiv an allen Varianten weiterarbeiten müssen.

Ein anderer wesentlicher Aspekt ist die indirekte Wahrnehmung des Kunden von Verbesserungsmaßnahmen. Dazu gehört zweifelsohne die Akzeptanz des „bleifreien Benzins", des schwefelarmen Kraftstoffes, Bio-Fuel, die Funktionsfähigkeit der Abgaskonzepte, die Korrosionsbeständigkeit und die Kommunikationssysteme. Dies gilt ebenso für die Langzeitqualität der eingesetzten Elektrik/Elektronik, Aktuatorik und Sensorik, die einen wesentlichen Anteil an den erzielten Fortschritten haben. Die Durchdringung aller Fahrzeugbauteile ist beträchtlich. Alle neuen Innovationen werden zu mehr als 80 % durch elektronische Komponenten beeinflusst, wie aus der folgenden Aufstellung, Abb. 2.10, ersichtlich ist. Diese lässt sich beliebig erweitern, wenn noch vermehrt Fahrerassistenzsysteme und Hybrid- und E-antriebe in der Serie einsetzen.

Am Beispiel der Steuer- und Regelsysteme sind im Abb. 2.11 bedeutende Meilensteine als Funktion der Jahre dargestellt [17]. Man kann die kontinuierliche Weiterentwicklung erkennen. Die Elektronik wird auch zunehmend für die Überwachung der Funktionsfähigkeit von Fahrzeugkomponenten, wie Airbag-System, Motorölstand und Qualität, Reifendruck, Serviceintervalle und die Onboard-Diagnose (Überwachung der das Abgas beeinflussenden Komponenten) eingesetzt. Aber auch der vermehrte Einsatz von Systemen zum automatisierten Fahren, wie automatische Notbremsung, Fußgängererkennung und Notbremsung, Staupilotierung, im Notfall Bremsen und Lenken usw. wird die Fahrerwelt verändern.

**Blue Motion Technologie**




**Abb. 2.9** Volkswagen GTE PLUG IN [13]

| | |
|---|---|
| Anlasser | Radio/CD/Tape/Amplifier |
| Kraftstoffpumpe | Infrarotschlossbetätigung |
| Zündung | Navigation |
| Aktuator für Leerlaufbypassventil | Diebstahlwarnanlage |
| Drosselklappenbetätigung | geheizter Katalysator |
| ABS-Hydraulikpumpe | elektrische Motorkühlung |
| Scheibenwischer vorne/hinten | elektrische Wasserpumpe |
| Scheinwerfer-Waschanlage | elektromagnetischer Ventiltrieb |
| elektrische Fensterheber vorne/hinten | Komponenten für Hybridantrieb |
| elektrisches Schiebedach | aktive Motorlager |
| elektrische Türverriegelung, auch Heckklappe | aktives Fahrwerk |
| Kopfstützen und Sitzeinstellung | Reifendruckwächter |
| elektrische Spiegel | Bremsassistent |
| elektrische Antenne | elektrische Bremse |
| Leuchten und Scheinwerfer | elektrischer A/C-Kompressor |
| Heckscheibenheizung | elektrischer Gangwechsel bei 5- und 6-Gang-getrieben |
| Sitzheizung | geheizte Windschutzscheibe |
| Windschutzscheibendüsenheizung | verbesserte Nachtsicht |
| geheizte $\lambda$-Sonde | Fahrbahnwechselsichtgerät |
| ECU, Motor-Getriebe | Kurvenlicht |
| ABS, Anfahrhilfe, ESP | Einparkassistent |
| Geschwindigkeitsregelanlage | Automatische Abstandshaltung mit Bremseneingriff |
| elektrisch/mechanische bzw. hydraulische Lenkung | Automatsiche Notbremsung |
| Fahrbahneinhaltung | intelligente Airbag-Sensoren |
| Instrumente | Telefon/Fax |
| Airbag- und Gurtstrafferauslösung | Stimmeingabe |
| Notruf | Head up-Display |
| Klimaanlage | Gestensteuerung |
| | Sensorik |
| | Vernetzung |
| | Internetverfügbarkeit |

**Abb. 2.10** Elektrische/elektronische Systeme im Fahrzeug

Durch die Informations- und Kommunikationssysteme findet zurzeit eine bessere Integration des Automobils in andere Systeme statt, sei es durch Verbesserung der Logistik und der Kommunikation, der dynamischen Zielführung (So hat als Beispiel der BMWX5e-Drive ein vorausschauendes Energiemanagementsystem im Serienangebot [18]) oder durch die Verknüpfung mit anderen Verkehrssystemen. Dabei ergeben sich auch mit den Kunden im Automobil völlig neue Kommunikationsmöglichkeiten, z. B. allgemeine Serviceleistungen, Wartung und Information über Veranstaltungen etc.

Der Kunde erwartet:

1. Reiseinformationen
   Reiseplanung, Verkehrsmittelwahl, -übergreifende Fahrtroutenplanung, Service und Dienstleistung, Buchungen und Reservierungen, Routenplanung für Fußgänger, Touristikinformationen, Straßencharakteristik, Parkraumangebot, Verknüpfung von Verkehrsmitteln, Straßenkarten, Persönliche Kommunikation, Persönlicher Briefkasten, Notfallmeldung, Notruf,
2. Managementsysteme im öffentlichen Nahverkehr
   Statische und dynamische Fahrtinformation, individuelle ÖV-Reiseplanung, Fahrscheinverkauf bzw. Fahrscheinersatz,
3. Parkraummanagement
   Parkraumbelegung, dynamische Parkrauminformation, Parkleitempfehlung, Stellplatzreservierung, automatisches Einparken,
4. Verkehrsinformation
   Navigation, Routenführung individuell und kollektiv, dynamische Information über Unfälle, allgemeine Verkehrszustände (Stau, Straßenarbeiten, Wettervorhersage, Umweltbedingungen, Sonderveranstaltungen, örtliche Einschränkungen – Zufahrt, Durchfahrt),
5. Management der Verkehrsnachfrage
   car-pooling, Verknüpfung im Güterverkehr, City-Logistik, Mauteinfluss.

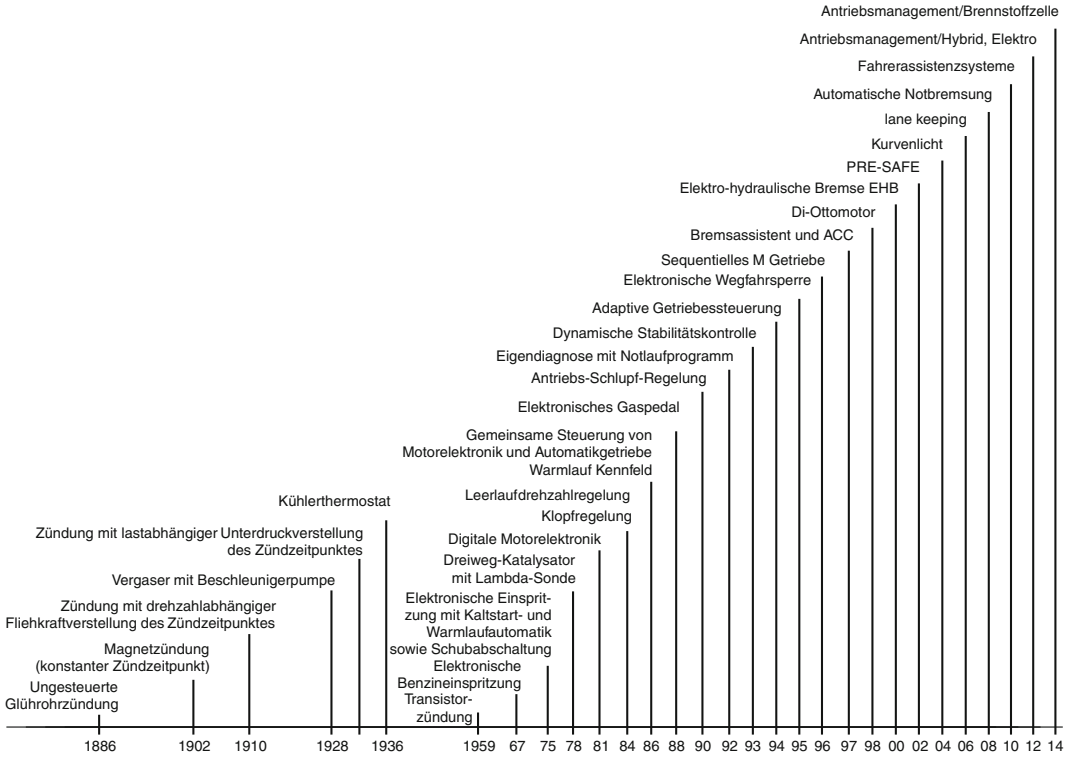



**Abb. 2.11** Bedeutende Meilensteine im Automobilbau am Beispiel Steuer- und Regelsysteme [17]

Parallel mit der Automobiltechnik hat sich auch das Angebot der Hersteller zum Kunden geändert. Dies zeigt sich z. B. in einem viel größeren Angebot von Fahrzeugmodellen, erweiterten Serviceleistungen, neuartigen Leasingangeboten, Carsharingangeboten bis hin zu anderen Verkaufsorganisationen. Jeder Konzern versucht über zahlreiche Modelle sein Angebot so attraktiv wie möglich zu machen, sei es innerhalb einer Marke selbst oder über verschiedene Marken in einem Konzern. Dies gilt auch für die Kommunikation mit den Kunden über Kundenkliniken, interne und externe Befragungen, *customer satisfaction index*, Werkstatttests, Langzeittests durch Verbraucherorganisationen wie ADAC und TÜV, Crashtests und direkte Informationen über die Fachzeitschriften. Im Vergleich zu früher ist der Kunde heute hervorragend über das Produkt und die Marke informiert bzw. kann Informationen über das Internet abfragen.

Die erwähnte Recyclingfähigkeit hat sich in einer inzwischen vorhandenen Rücknahmekette etabliert. Im Sinne der Schonung von Ressourcen ist es außerdem notwendig, das wiederverwertbare Material einer erneuten Verwendung zuzuführen. Die Recyclingrichtlinie wurde inzwischen in Brüssel für die EU rechtsgültig definiert [19, 20].

Das Automobil mit einem jährlichen Umsatz von mehr als 1000 Milliarden EUR und der zusätzliche Umsatz der Vertriebs- und Werkstattaktivitäten stellt einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Die kontinuierlich steigenden Herausforderungen müssen von der Automobilindustrie und ihren Zulieferanten bewältigt werden: Globalisierung, internationaler Wettbewerb, Produktivitätssteigerung, kontinuierliche Verbesserungsprozesse, Modularisierung, Veränderung in der Zusammenarbeit mit den Zulieferanten und wissenschaftlichen Einrichtungen, Entwicklungspartnern und die Neuorientierung des Produktentstehungsprozesses. Diese Veränderungen beinhalten das frühzeitige Einbeziehen aller am Produktentstehungsprozess beteiligter Bereiche. Zur Reduzierung der Fahr-

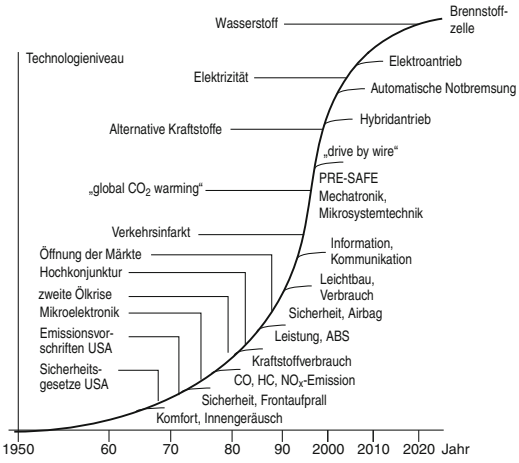



**Abb. 2.12** Innovationswellen im Automobilbau

zeug- inkl. der Entwicklungskosten dienen auch die Gleichteile, firmenspezifisch und firmenübergreifend und die Modulstrategie in der Entwicklung und Produktion, die eine große Variantenzahl von Modellen bei einer günstigen Kostenstruktur ermöglicht.

Die Automobilindustrie muss auch in Zukunft mit innovativen Lösungen aufwarten. Traditionell ist die Bereitschaft zu großen Veränderungen nur dann vorhanden, wenn sie vom Kunden akzeptiert werden. Die Abb. 2.12 zeigt zwei Arten von Innovationsänderungen. Die linke Seite zeigt externe, nur sehr schwer zu beeinflussende Faktoren wie Ölkrisen, Aktivitäten der Gesetzgeber auf, auf der rechten Seite die mehr von Technologien getriebene Veränderung wie die Mikroelektronik, Fuzzy Logic, neuronale Regler. Neuartige Otto- und Dieselmotoren, alternative Antriebe, Brennstoffzelle und Hybride, Unfallvorbeugung über Sensorik und gestützte Leitsysteme inklusive des „elektronischen Beifahrers“, Optimierung von Elektrik/Elektronik im Fahrzeug und der Leichtbau stehen im Vordergrund. Ganz besonders wird die Elektromobilität sowohl die Energieversorgung als auch das Käuferverhalten und die Automobilbaustellerstrukturen verändern.

Die technologischen Herausforderungen sind immens, aber beherrschbar, wenn alle an dem Prozess Beteiligten, Wissenschaft, Politik und Industrie sich von nachvollziehbaren Kriterien leiten lassen und an einem Strang ziehen.

## 2.2 Anforderungen durch den Gesetzgeber

### 2.2.1 Einleitung

Um Sicherheit und Umweltverträglichkeit von Straßen- bzw. Kraftfahrzeugen zu gewährleisten, werden an die Gestaltung der Fahrzeuge technische Anforderungen gestellt. Es gibt Anforderungen durch den Gesetzgeber, die erfüllt werden müssen, um ein Fahrzeug in den Verkehr bringen zu dürfen. Darüber hinaus bestehen herstellerinterne Anforderungen an das Produkt, die über das vom Gesetzgeber geforderte Maß hinausgehen, um den Kundenwünschen und der Firmenphilosophie zu genügen. Und als dritter Punkt stellen auch Verbraucherschutzorganisationen Kriterien auf, anhand derer sie die Eigenschaften der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge bewerten und die Fahrzeuge eingruppieren, was dann der Kundeninformation dient. Auch diese Anforderungen gehen über die des Gesetzgebers hinaus.

Das Setzen der gesetzlichen Mindestanforderungen ist für die Fahrzeugtechnik mittlerweile jedoch nicht mehr einzelnen Staaten überlassen. Vielmehr sind die für die Genehmigung von Fahrzeugtypen einzuhaltenden Bedingungen international harmonisiert: Für die EU sind dies EU-Richtlinien oder EU-Verordnungen, die von der Europäischen Kommission in Brüssel vorgeschlagen werden. Für über die EU hinausgehende Staaten bzw. Regionen sind dies unter anderem Regelungen der UN, erstellt von der UN-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) in Genf.

### 2.2.2 Regelungsvorbereitende Forschung

Heute entsteht keine neue fahrzeugtechnische Vorschrift, ohne dass vorher untersucht wurde, welcher Nutzen für die Verkehrssicherheit zu erwarten ist – hier ist jeweils eine tiefgehende Analyse des Unfallgeschehens unverzichtbar – und ob der zu erwartende Aufwand der Einführung einer Vorschrift oder Vorschriftenänderung in einem tragbaren Ver-

hältnis zum Nutzen steht. Weiterhin müssen sich die Vorschriften an der technischen Machbarkeit orientieren, aber auch dem technischen Fortschritt Rechnung tragen. Zuletzt müssen die gestellten Anforderungen auch in reproduzierbar durchführbaren Tests mit geeigneten Testwerkzeugen abprüfbar sein. Um diese Fragen im Vorfeld der Entwicklung von fahrzeugtechnischen Regelungen wissenschaftlich fundiert zu klären, sind vielfältige Forschungsarbeiten nötig. Diese können national, auf EU-Ebene oder auf sonstiger internationaler Ebene angesiedelt sein.

#### 2.2.2.1 Nationale Forschung

In Deutschland finden nationale reglungsvorbereitende Forschungsaktivitäten unter der Federführung verschiedener Ressorts statt. Das Verkehrsministerium finanziert zum Beispiel die Forschungsarbeiten der Bundesanstalt für Straßenwesen, die als nachgeordnete Behörde des Ministeriums sowohl Eigenforschung durchführt als auch Forschungsprojekte aus einem sogenannten Sicherheitsforschungsprogramm nach außen vergibt, um auf Basis der gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse das Ministerium im Hinblick auf die nationale oder internationale Diskussion neuer Vorschriften zu beraten und zu unterstützen. Neben dem Verkehrsministerium werden Forschungsarbeiten, die die Sicherheit des Straßenverkehrs und die Vorschriften für Kraftfahrzeuge im weiteren Sinne betreffen, auch vom Forschungs-, Umwelt-, und Wirtschaftsministerium gefördert. Teilweise werden die entsprechenden Programme auch gemeinsam von den Ressorts gestaltet wie z. B. das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) oder der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität [25].

Beispiel für die Forschung im nationalen Bereich ist das Projekt AKTIV (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr). Dieses Verbundprojekt (2006 bis 2010) hat neue Fahrerassistenzsysteme entwickelt und an Lösungen für ein effizientes Verkehrsmanagement und die Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. die Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation gearbeitet. In Bezug auf Fahrerassistenzsysteme wurden neben der Applikationsentwicklung auch Aspekte der Fahreraufmerksamkeit einbezogen, um Assistenzsysteme zu gestalten, die den Aufmerksamkeitsgrad des Fahrers berücksichtigen. Im Projekt UR:BAN (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement, 2012–2015) steht die Entwicklung von Fahrerassistenz- und Verkehrsmanagementsystemen für die Stadt im Fokus. Neben strategischer Verkehrssteuerung in der Stadt stehen hier Fahrerassistenzfunktionen im Mittelpunkt des Projektes. Dabei werden Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion besonders berücksichtigt, um Fahrer in den für sie schwierigen Situationen angemessen zu unterstützen.

#### 2.2.2.2 EU-Forschung

Verschiedene Generaldirektionen der Europäischen Kommission vergeben Forschungsprojekte, die letztlich der Entwicklung von Anforderungen an Fahrzeugsicherheitssysteme und -eigenschaften dienen. Dies kann zum einen sehr regelungsnah erfolgen. Zum Beispiel vergeben die Generaldirektionen „Unternehmen und Industrie“ und „Mobilität und Verkehr“, die unmittelbar mit der Erstellung von Verordnungen und Richtlinien für die Sicherheit und Umweltverträglichkeit von Fahrzeugen befasst sind, eine Vielzahl von Aufträgen für Studien, die ganz gezielt Einzelaspekte klären sollen, die für die Erstellung bzw. Fertigstellung von Vorschriften noch benötigt werden. Häufig geht es darum, den Regelungsbedarf und dessen Umfang festzustellen und zu begründen sowie mit Hilfe von Kosten-Nutzen-Analysen auch volkswirtschaftlich zu rechtfertigen. Solche Studien betrafen in den vergangenen Jahren zum Beispiel die Vorschriften für die Sicherheit von Wasserstofffahrzeugen, die Überarbeitung der Emissionsvorschriften für Motorräder oder Fragen zur Einführung von Unfalldatenschreibern, aber auch viele weitere Themen mehr. Demgegenüber werden von der Kommission auch Forschungsprojekte gefördert, die zeitlich weit vor einer möglichen gesetzgeberischen Umsetzung liegen. Diese Projekte sind grundlegender gestaltet und befassen sich zum Beispiel mit der Erforschung und Entwicklung von fahrzeugtechnischen Systemen, um mit deren Markteinführung neue Sicherheitsgewinne erschließen zu können. In den Projekten geht es aber auch um die Ent-



**Abb. 2.13** Entwicklung von Testtarget und Testszenarien in ASSESS (Foto: BASt)

wicklung von Testverfahren und Testwerkzeugen, um neue Sicherheitssysteme überhaupt bewerten und gegebenenfalls später gesetzliche Anforderungen setzen zu können. Diese eher grundlegenden Projekte wurden und werden in der Regel aus den jeweils mehrere Jahre laufenden Forschungsrahmenprogrammen der EU gefördert. Das im Jahr 2014 gestartete und bis 2020 laufende Programm trägt den Namen „Horizon 2020“ [26].

Ein Beispiel für die Förderung der Sicherheitsforschung durch die europäische Kommission sind die beiden im siebten Forschungsrahmenprogramm geförderten Projekte ASSESS „Assessment of integrated vehicle safety systems for improved vehicle safety“ (2009 bis 2013) und ASPECSS „Assessment methodologies for forward looking integrated pedestrian and further extension to cyclists safety systems“ (2011 bis 2014) [27, 28].

Ziel beider Projekte war es, harmonisierte und standardisierte Bewertungsprozeduren inklusive der benötigten Werkzeuge für integrale Fahrzeugsicherheitssysteme zu entwickeln. Im Fokus von ASSESS waren integrale Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Pkw-Pkw-Kollisionen mit besonderer Berücksichtigung von Heckaufprallen, während sich ASPECSS gezielt mit Notbremssystemen für den Fußgängerschutz befasste. Mit den Projekten soll auch die Akzeptanz für die zukünftige Einführung von Test- und Bewertungsverfahren für diese Systeme bei Gesetzgebern und Verbraucherschutzorganisationen hergestellt werden, indem erste Systeme ausführlich getestet und bewertet werden. Darüber hinaus wurde ein Überblick über derzeitige gesetzliche Hindernisse für die Einführung dieser Systeme erstellt und eine sozioökonomische Bewertung der integralen Sicherheitssysteme durchgeführt.

In ASSESS wurde sowohl ein Testtarget für zerstörungsfreie Tests zum Fahrzeugheckaufprall aufgebaut als auch die dazugehörigen Testszenarien und Testprotokolle entwickelt (siehe Abb. 2.13). Diese sind in die seit 2014 bei Euro NCAP eingeführten Test- und Bewertungsprozeduren von AEB-Systemen (automatische Notbremssysteme) eingeflossen und haben diese maßgeblich beeinflusst.

Das gilt noch mehr für das Forschungsprojekt ASPECSS, das erstmals alle Beteiligten des Themas „aktiver Fußgängerschutz“ an einen Tisch gebracht hat. Im Ergebnis sind die gemeinsam entwickel-



**Abb. 2.14** Testszenario „Verdecktes Kind" aus ASPECSS (Foto: BASt)

ten Tests zum Fußgängerschutz nahezu eins zu eins in das Euro NCAP-Bewertungsverfahren eingeflossen (siehe Abb. 2.14). Unter anderem wurden auch die Testtools wiederum maßgeblich unter Einbeziehung der ASPECSS-Partner entwickelt.

Weitere wichtige EU-Projekte im Hinblick auf die Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit und insbesondere der Fahrzeuge aber auch (virtueller) Testverfahren und Testwerkzeuge (wie z. B. Dummies) sind die EU-Projekte COVER, CASPER, EPOCh, THORAX, THOMO und IMVITER, die alle im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU durchgeführt wurden und werden.

So war es Ziel des EU-Projekts Projekts COVER „Coordination of Vehicle and Road Safety Initiatives", die Forschungsaktivitäten der vier EU-Projekte THORAX (Entwicklung eines neuen Brustkorbs für einen Frontalaufprall-Dummy) und CASPER (Kindersicherheit), EPOCh (Entwicklung eines zehnjährigen Kinderdummys Q10) und THOMO (Entwicklung eines Finite-Element-Modells des menschlichen Brustkorbes) zu koordinieren. Die Abstimmung von Aktivitäten und die Nutzung gemeinsamer Ressourcen zwischen den vier Projekten, die insbesondere in den Bereichen Unfalldatenerhebung und Dissemination erfolgte, ermöglichte Synergie-Effekte. Weiterhin konnte durch das gemeinsame abgestimmte Auftreten der vier Projekte gegenüber den Interessengruppen (z. B. Industrie, gesetzgebende Organe, Verbraucherschutzorganisationen) eine schnellere Umsetzung der biomechanischen Erkenntnisse in eine effektive Entwicklung von neuen Systemen im Bereich der Fahrzeugsicherheit erreicht werden.

Das EU-Projekt CASPER „Child Advanced Safety Project for European Roads" diente der Entwicklung von Methoden, um den Schutz von Kindern in Fahrzeugen besser beurteilen und so die Sicherheit von Kindern im Fahrzeug verbessern zu können. Es wurde Wert auf ein möglichst umfassendes Verständnis der Umstände des Transportes von Kindern in Fahrzeugen und die sich hieraus ergebenden Anforderungen an den Schutz der Kinder gelegt.

Im EU-Projekt THORAX „Thoracic Injury Assessment for Improved Vehicle Safety" wurden Verletzungsmechanismen im Fahrzeugfrontalaufprall mit dem Schwerpunkt auf Brustkorbverletzungen untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um einen neuen Dummy-Brustkorb zu entwickeln. Dieser bildet den menschlichen Brustkorb besser ab als der des aktuellen Frontalaufpralldummys Hybrid III und kann für eine realistischere Bewertung des Verletzungsrisikos im Fahrzeugfrontalaufprall eingesetzt werden. Es wurden umfangreiche Analysen mit In-Depth-Unfalldaten durchgeführt, um Verletzungen in Unfällen, die der Euro NCAP Frontalanprall-Testkonfiguration entsprechen, mit den Dummy-basierten Bewertungsergebnissen im Euro NCAP Test zu vergleichen. Im Ergebnis zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen realen Verletzungen und der Brustkorbbewertung des Hybrid III Dummys, insbesondere für ältere Fahrzeuginsassen. Dies zeigte den Bedarf für einen neuen Frontal-Dummy mit verbessertem Brustkorb.

Ziel des EU-Projekts Projekts IMVITER „Implementation of Virtual Testing in Safety Regulations" war es, zu untersuchen, ob in einigen gesetzlichen Regelungen aus dem Bereich der Fahrzeugsicherheit Versuche zur Typgenehmigung durch virtuelle Tests ganz oder teilweise ersetzt werden können. Eine einheitliche Vorgehensweise zum Ablauf einer virtuellen Typprüfung mit nachprüfbaren Kriterien wurde im Rahmen des Projekts aufgestellt und anhand von ausgewählten Regelungen beispielhaft erprobt.

#### 2.2.2.3 European Enhanced Vehicle-Safety Committee (EEVC)

Das European Experimental Vehicles Committee (EEVC) wurde im Oktober 1970 als eine Antwort auf die von dem US Verkehrsministerium ausgehende Initiative für ein internationales Programm zu experimentellen Sicherheitsfahrzeugen (Experimental Safety Vehicles – ESV) gegründet. Das Ziel von EEVC war es, einen kontinuierlichen Informationsaustausch und eine Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Regierungen sicherzustellen, um unter bestmöglicher Nutzung der verfügbaren Ressourcen der Einladung der US an der Entwicklung von experimentellen Sicherheitsfahrzeugen folgen zu können.

Das ESV-Programm konzentriert sich nicht mehr auf die Entwicklung spezieller Experimentalfahrzeuge, sondern hat den Fokus auf das größere Feld der Verbesserung der Sicherheit von Fahrzeugen im Straßenverkehr erweitert und infolge dessen auch seinen Namen zu „Enhanced Safety Vehicle" geändert.

1997 hat EEVC ebenfalls seine Bezeichnung in „European Enhanced Vehicle-Safety Committee" geändert. Die Regierungen von Frankreich, Deutschland, Italien, Niederlande, Spanien, Vereinigtes Königreich und Polen sind derzeit Mitglieder von EEVC.

In den diversen Arbeitsgruppen von EEVC befinden sich neben Vertretern der jeweiligen Regierungen auch Industrie-Experten der jeweiligen Länder.

Die Arbeitsgruppen von EEVC führten die präregulative Forschung für wichtige UNECE Regelungen wie z. B. die UNECE-R 94 zum Frontaufprall und die UNECE-R 95 zum Seitenaufprall durch und halfen dabei, diese Regelungen vorzubereiten. Ebenfalls wurden die Grundlagen für die Testverfahren zum Fußgängerschutz durch EEVC-Arbeitsgruppen erarbeitet. Die dort entwickelten Komponententests fanden Eingang in die europäische Rahmenrichtline zum Fußgängerschutz, die nun in die UNECE-R 127 und im internationalen Bereich in die Globale Technische Regelung Nr. 9 (GTR 9) zum Fußgängerschutz mündete.

Die Berichte von EEVC sind auf der Webseite www.eevc.org verfügbar.

EEVC stellt die Verbindung zwischen Regierungen, Forschung und Entwicklung, Industrie, Verwaltung und Gesetzgebung in Europa in Fragestellungen im Hinblick auf sicherere Fahrzeuge dar.

Derzeit (2015) sind die Arbeitsgruppen zu Unfalldaten (WG 21) und Biomechanik (WG 12) aktiv. Aufgrund der Erneuerung der Statuten im Jahr 2014 hat sich EEVC nun auch für andere interessierte Regierungen bzw. Institutionen aus dem UNECE-Raum geöffnet und Task Forces zum THOR Dummy (TEFIRE) und für die Entwicklung verbesserter Methoden zur Beurteilung von Brust- und Abdomenbelastungen für die Kinderdummies der Q-Serie gegründet.

#### 2.2.2.4 Forschung auf UNECE-Ebene

Auch in den Arbeitsgruppen der UNECE (► Abschn. 2.2.3.2.3) werden Forschungsarbeiten geleistet, um neue Regelungsinhalte wissenschaftlich zu stützen. Häufig werden für neu zu entwickelnde Vorschriften gezielt „informelle Arbeitsgruppen" (informal working groups) eingerichtet, in denen Anforderungen und Spezifikationen erarbeitet werden. Diese Arbeit kommt meist nicht ohne experimentelle oder simulative Untersuchungen aus, in denen die Machbarkeit von Testverfahren inklusive der Reproduzierbarkeit geprüft wird, in denen nötige Toleranzen ermittelt und Bestehenskriterien festgelegt oder in denen Testwerkzeuge fertig entwickelt werden. Die Experimente werden hier vor allem von Forschungslabors der Vertragsparteien durchgeführt.

So wurden zum Beispiel die Spezifikationen für automatische Notbremssysteme und Spurverlassenswarnsysteme, die in schwere Nutzfahrzeuge einzubauen sind, im Rahmen einer informellen Arbeitsgruppe und auf Basis von Fahrversuchen entwickelt. Auch zum Einsatz von Kamera-Monitor-Systemen als Ersatz für Außenspiegel zur Sicherstellung der indirekten Sicht werden aktuell Forschungsarbeiten für eine informelle Arbeitsgruppe geleistet. Teilweise fließen auch die Ergebnisse von EU-Forschungsprojekten direkt in die Arbeiten der UNECE ein:

Im Rahmen der Erarbeitung der neuen UNECE Regelung Nr. 129 zu verbesserten Kinderrückhaltesystemen (sog. „i-size" KRS) wurden die Ergebnisse aus den EU-Projekten CASPER und EPOCh benö-

tigt. Im Projekt CASPER wurden so beispielsweise Verletzungskriterien erarbeitet und in EPOCh der für das Testen von KRS benötigte Kinderdummy Q10 entwickelt. Beides wurde in die UNECE-R 129 eingearbeitet.

In den informellen Arbeitsgruppen können auch Technische Evaluationsgruppen (TEG) eingesetzt werden, die sich mit speziellen schwierigen technischen Fragen befassen. So befasst sich die BioRID TEG im Rahmen der informellen Arbeitsgruppe zur Erarbeitung der Phase 2 der GTR 7 zu Kopfstützen mit Fragen der Verbesserung der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit des Dummys für den Heckaufprall BioRID und der Entwicklung von verbesserten Zertifizierverfahren für diesen Dummy.

Eine TEG wurde auch für die Weiterentwicklung und Implementierung des biofidelen und flexiblen Beinprüfkörpers FlexPLI für die Phase 2 der GTR 9 zum Fußgängerschutz eingesetzt.

In dem europäischen Forschungsprojekt FIMCAR (Frontal Impact and Compatibility Assessment Research) wurden gemeinsam mit 18 Projektpartnern aus sieben Ländern unterschiedliche Aufprallkonfigurationen untersucht und zwar mit dem Ziel, die Testprozeduren für den Frontalaufprall, einschließlich einer Kompatibilitätsbewertung für die Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision, fertigzustellen. Basierend auf der Forschungsarbeit von vorhergehenden Projekten und einer aktuellen Unfalldatenanalyse wurden Kompatibilitätskriterien erarbeitet und priorisiert. Diese Kriterien dienten zur Bewertung der unterschiedlichen Testprozeduren. Das Ergebnis des Projektes führte zum Vorschlag einer Kombination bestehend aus dem Test mit voller Überdeckung und deformierbarer Barriere (FWDB, Full Width Deformable Barrier) einschließlich einer Kompatibilitätsmetrik sowie dem in der UNECE-R 94 beschriebenen Test mit 40 % Überdeckung und deformierbarer Barriere (ODB; Offset Deformable Barrier). Mit dieser Kombination können die meisten identifizierten Kompatibilitätsprobleme adressiert werden. Dieser Vorschlag wurde in die informelle Arbeitsgruppe zur Weiterentwicklung des Frontalaufprall-Testverfahrens eingebracht.

### 2.2.3 Anforderungen der Gesetzgebung

Zur Erfüllung von politisch gesetzten Sicherheits- und Umweltschutzzielen werden vom Gesetzgeber in fahrzeugtechnischen Vorschriften bestimmte Anforderungen an Straßenfahrzeuge festgeschrieben. Die Vorschriften werden auf internationaler, europäischer oder nationaler Ebene erlassen. Hierbei haben die international harmonisierten Festlegungen insbesondere den Zweck, Handelshemmnisse abzubauen, gleichzeitig dienen sie jedoch auch der Festschreibung eines Mindestniveaus an Sicherheit und Umweltverträglichkeit. Das Regelwerk sieht vor, dass ein Fahrzeughersteller bei Erfüllung der Vorschriften eine Genehmigung für sein Produkt erhalten kann, und es stellt sicher, dass die Genehmigungen von allen das Regelwerk anwendenden Parteien akzeptiert werden. Im Gegensatz zu Normen, die der freiwilligen Vereinheitlichung von z. B. Bauteilen dienen, sind die fahrzeugtechnischen Vorschriften verbindlich. Auf bestimmte internationale oder europäische Normen kann jedoch in den Vorschriften – unter exakter Nennung der Norm und ihres Datums – durchaus Bezug genommen werden. Die Genehmigung und Zulassung von Kraftfahrzeugen in Deutschland basiert auf Verordnungen und Richtlinien der Europäischen Union, die zwingend einzuhalten sind. In den europäischen Vorschriften werden in zunehmenden Maße die Inhalte und technischen Anforderungen aus UN-Regelungen oder UN-Globalen Technischen Regelungen (GTR) genutzt bzw. auf diese verwiesen. Diese Regelungen werden auf internationaler Ebene vom „Weltforum für die Harmonisierung von Fahrzeugregelungen“ (WP. 29) bei der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) mit Sitz in Genf entwickelt. Auf Grund der Einbindung Deutschlands in die EU und wiederum des Rückgriffs der EU auf Regelungen der UN finden – bis auf wenige Ausnahmefälle – für die Genehmigung und das Inverkehrbringen von Kraftfahrzeugen europäische bzw. internationale Verordnungen, Richtlinien und Regelungen Anwendung.

#### 2.2.3.1 Nationale Anforderungen

In § 1 des Straßenverkehrsgesetzes (StVG) [29] wird festgelegt, dass Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger, die auf öffentlichen Straßen in Betrieb gesetzt werden sollen, von der zuständigen Behörde (Zulassungsbehörde) zum Verkehr zugelassen sein müssen. Die Zulassung erfolgt auf Antrag des Verfügungsberechtigten des Fahrzeugs bei Vorliegen einer Betriebserlaubnis, Einzelgenehmigung oder EG-Typgenehmigung durch Zuteilung eines amtlichen Kennzeichens. Als Kraftfahrzeuge im Sinne des StVG gelten Landfahrzeuge, die durch Maschinenkraft bewegt werden, ohne an Bahngleise gebunden zu sein.

In den Ausführungsvorschriften (§ 6 StVG) wird das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, je nach thematischer Zuständigkeit auch in Verbindung mit anderen Ministerien ermächtigt, mit Zustimmung des Bundesrates Rechtsverordnungen zu erlassen, in denen unter anderem die Voraussetzungen für die Zulassung von Kraftfahrzeugen und deren Anhänger, vor allem über Bau, Beschaffenheit, Abnahme, Ausrüstung und Betrieb, Begutachtung und Prüfung, Betriebserlaubnis und Genehmigung sowie Kennzeichnung der Fahrzeuge und Fahrzeugteile zu regeln sind. Dabei geht es zum einen darum, die Verkehrssicherheit zu gewährleisten und die Insassen und andere Verkehrsteilnehmer bei einem Verkehrsunfall vor Verletzungen zu schützen oder deren Ausmaß oder Folgen zu mildern. Zum anderen geht es um den Schutz vor den von Fahrzeugen ausgehenden schädlichen Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Relevant für die Zulassung und Genehmigung von Kraftfahrzeugen unter dem Straßenverkehrsgesetz (StVG) sind die folgenden drei Verordnungen:

##### 2.2.3.1.1 Fahrzeug-Zulassungsverordnung

Die Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr (Fahrzeug-Zulassungsverordnung – FZV) [30] ist anzuwenden auf Kraftfahrzeuge mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 6 km/h und die Zulassung ihrer Anhänger. Sie regelt insbesondere, dass eine Zulassung für Fahrzeuge nur dann erteilt wird, wenn das Fahrzeug einem genehmigten Typ entspricht oder eine Einzelgenehmigung erteilt ist und eine dem Pflichtversicherungsgesetz entsprechende Kraftfahrzeug-Haftpflichtversicherung besteht. Die Zulassung erfolgt durch Zuteilung eines Kennzeichens – Abstempelung der Kennzeichenschilder – und Ausfertigung einer Zulassungsbescheinigung. Die Verordnung macht Vorgaben zum Verfahren der Zulassung und der Zuteilung, Ausgestaltung und Anbringung eines Kennzeichens sowie zu den auszustellenden Dokumenten (Zulassungsbescheinigungen Teil I und II). Darüber hinaus regelt sie die Überwachung des Versicherungsschutzes der Fahrzeuge sowie die Speicherung der Fahrzeugdaten im zentralen und örtlichen Fahrzeugregister.

##### 2.2.3.1.2 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung

Die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [31] widmet sich der Betriebserlaubnis für Fahrzeugtypen, Fahrzeuge und Fahrzeugteile, der Bauartgenehmigung für Fahrzeugteile sowie den Bau- und Betriebsvorschriften. Geregelt sind insbesondere nationale Einzel- und Kleinserien-genehmigungen, Genehmigungen für Sonderfahrzeuge, Ausnahmen, Änderungen an schon zugelassenen Fahrzeugen und die regelmäßige „Technische Überwachung“. Auch Vorschriften für Fahrräder sind in der StVZO gefasst. Für Kraftfahrzeuge nimmt die StVZO für den Großteil der zu regelnden Aspekte auf europäische oder internationale Vorschriften Bezug (s. hierzu auch ► Abschn. 2.2.3.1.3).

##### 2.2.3.1.3 EG-Fahrzeuggenehmigungs-verordnung

Die Verordnung über die EG-Genehmigung für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge (EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung – EG-FGV) [32] dient der Umsetzung folgender drei europäischer Rechtsakte, in diesem Falle Rahmenrichtlinien, in nationales Recht:

1. Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeug-

anhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge,
2. Richtlinie 2002/24/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. März 2002 über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge,
3. Richtlinie 2003/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 über die Typgenehmigung für land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen, ihre Anhänger und die von ihnen gezogenen auswechselbaren Maschinen sowie für Systeme, Bauteile und selbständige technische Einheiten dieser Fahrzeuge.

Die EG-FGV regelt somit EG-Typgenehmigungen, EG-Kleinserien und EG-Einzelgenehmigungen. Es ist anzumerken, dass im Jahr 2013 sowohl für die landwirtschaftlichen Zugmaschinen als auch für die zwei, drei- und leichten vierrädrigen Kraftfahrzeuge die oben genannten Rahmenrichtlinien durch neue EU-Verordnungen ersetzt wurden (siehe hierzu ► Abschn. 2.2.3.2.1).

### 2.2.3.2 Europäische Anforderungen

#### 2.2.3.2.1 EG-Typgenehmigung

Alle europäischen und damit auch für Deutschland verbindlichen Vorschriften für die EG-Typgenehmigung sind mit folgenden Rahmenrichtlinien bzw. Rahmenverordnungen festgelegt:

- Richtlinie 2007/46/EG für die Genehmigung von Pkw, Lkw und Bussen [33]
- Verordnung VO (EU) Nr. 168/2013 (tritt am 1. Januar 2016 in Kraft) bzw. vorher 2002/24/EG für die Genehmigung von zwei, drei- und leichten vierrädrigen Kraftfahrzeugen [34]
- VO (EU) Nr. 167/2013 (tritt am 1. Januar 2016 in Kraft) bzw. vorher 2003/37/EG für die Genehmigung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen [35]

Als Unterbau zu diesen Rahmenrichtlinien bzw. -verordnungen gibt es viele weitere Einzelrichtlinien und -verordnungen, in denen technische Anforderungen für die Sicherheit und Umweltverträglichkeit von Kraftfahrzeugen spezifiziert werden. In diesen Vorschriften wird bereits auf Anforderungen aus UN-Regelungen oder UN-Globale Technische Regelungen (GTR) zurückgegriffen. Es ist das Ziel der EU, dieses Vorgehen in Zukunft weiter auszubauen.

Zur Erlangung einer EG-Typgenehmigung stellt der Fahrzeughersteller einen Antrag bei einer europäischen Genehmigungsbehörde, z. B. dem Kraftfahrtbundesamt, die dann die Genehmigung erteilt, wenn durch Prüfungen eines ‚Technischen Dienstes' nachgewiesen ist, dass alle Anforderungen erfüllt sind. Neben Fahrzeugen können auch Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten eine Typgenehmigung erhalten.

Die Fahrzeuge und Anhänger werden in verschiedene Klassen eingeteilt, für die wiederum jeweils ein bestimmter Teil der Vorschriften Anwendung findet bzw. für die spezifische Anforderungen festgelegt sind. Fahrzeuge zur Personenbeförderung (Pkw und Busse) werden in die Klassen $M_1$ bis $M_3$ eingeteilt, Lkw in die Klassen $N_1$ bis $N_3$, Anhänger in $O_1$ bis $O_4$, Krafträder, dreirädrige und leicht vierrädrige Kfz in die Klassen $L_1$ bis $L_7$ und land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen in die Klassen $T_1$ bis $T_4$ [36].

Neue Vorschriften zur Genehmigung von Kraftfahrzeugen werden in der EU grundsätzlich von der Europäischen Kommission vorgeschlagen. Nur sie hat dieses sogenannte Vorschlagsrecht. Für kraftfahrzeugtechnische Vorschriften existieren derzeit zwei Verfahren zur Verabschiedung. Rechtsakte mit besonderer politischer Bedeutung (z. B. die Einführung neuer Emissionsgrenzwerte) sowie grundsätzlich neue Vorschriften werden über das Mitentscheidungsverfahren erlassen, bei dem nach der Vorlage des Vorschlags der Kommission der Europäische Rat und das Europäische Parlament mitentscheiden. Demgegenüber werden gemäß dem Vertrag von Lissabon technische und administrative Detailvorschriften sowie deren Änderungen oder Anpassungen an den technischen Fortschritt im Komitologieverfahren durch sogenannte „delegierte Rechtsakte", d. h. die Befugnis für den Erlass von Bestimmungen wurde an die Kommission delegiert, in Form von „Durchführungsbestimmungen" eingeführt. Die Mitgliedstaaten werden hier in den Ausschüssen beteiligt und es ist lediglich ein Kontrollverfahren von Rat und Parlament vorgesehen.

Mit Vorschlägen der Kommission für neue Vorschriften verbunden ist jeweils eine Folgenabschätzung, in der häufig Kosten-Nutzen-Rechnungen für die Einführung von Maßnahmen enthalten sind. Es ist üblich, dass im Vorfeld der Vorschriftenentwicklung von der Kommission öffentliche Anhörungen durchgeführt werden sowie auch Expertengruppen beteiligt bzw. eingerichtet werden. Letztere können sogar im Rahmen der Arbeitsgruppen der UNECE installiert werden, wenn die Kommission möchte, dass Anforderungen auf UN-Ebene definiert werden, die dann genau so für Europa verbindlich werden sollen.

#### 2.2.3.2.2 Technische Überwachung

Die Vorschriften zur regelmäßigen technischen Überwachung (PTI = Periodical Technical Inspection) basieren auf der Richtlinie 2014/45/EU, die die Vorgängerrichtline 2009/40/EU ersetzt hat [37]. Die Mindestanforderungen, die in der Richtlinie für die technische Überwachung genannt werden, sind von den EU Mitgliedstaaten umzusetzen, sie können aber national um zusätzliche oder tiefer gehende Untersuchungen erweitert werden. Mit Hilfe von Durchführungsrechtsakten wird die Kommission die Richtlinie um die von den Fahrzeugherstellern zu liefernden Daten zum Zwecke der PTI erweitern und im Anschluss die Datenprotokolle und Dateninfrastruktur hierzu unter Beteiligung der Mitgliedsstaaten festlegen. Langfristig wird die gegenseitige Anerkennung der PTI-Prüfungen von Seiten der Kommission angestrebt, wie sie bilateral schon teilweise umgesetzt ist.

Die für Deutschland verbindlichen Anforderungen an die regelmäßige technische Überwachung der Fahrzeuge sind in § 29 StVZO und Anlage VIII bzw. VIIIa geregelt. Zukünftig ist zur Vereinfachung der Vorschriften und nach dem Vorbild der EU die Entstehung einer eigenen „Überwachungsverordnung“ denkbar, die dann zeitgleich mit einer Neufassung der StVZO umgesetzt werden müsste.

#### 2.2.3.2.3 Anforderungen der UNECE

Unter der UN-Wirtschaftskommission für Europa in Genf werden im „Weltforum zur Harmonisierung von Regelungen für Kraftfahrzeuge“ (WP.29) technische Anforderungen für Fahrzeuge, hier speziell Radfahrzeuge genannt, erarbeitet. Diese Anforderungen sind in drei völkerrechtlichen Verträgen, sogenannten Übereinkommen oder Abkommen gefasst:

**Übereinkommen von 1958 über die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen für Radfahrzeuge (UN-Regelungen)** Mit dem Abkommen von 1958 werden technischen Vorschriften für die aktive und passive Sicherheit, das Emissionsverhalten und den Kraftstoffverbrauch, die im einzelnen für die Genehmigung von Radfahrzeugen zu erfüllen sind, international harmonisiert. Insbesondere geht es um die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen für Fahrzeuge und Fahrzeugteile, die nach den Vorschriften des Abkommens erteilt wurden. Bisher sind über 130 UN-Regelungen zu den verschiedensten Funktionalitäten von Fahrzeugen in Kraft. Beispiele solcher UN-Regelungen werden in ► Abschn. 2.2.3.3. aufgeführt. Ca. 50 Vertragsparteien sind dem 58er-Abkommen beigetreten. Dies sind zum einen verschiedene Staaten, zum anderen aber auch die EU als Ganzes. Die USA sind nicht Vertragspartei, da das dort angewandte Verfahren der Selbstzertifizierung (► Abschn. 2.2.3.2.4) unvereinbar ist mit den auf ECE-Genehmigungen fußenden Typgenehmigungen.

**Übereinkommen von 1998 über die Festlegung globaler technischer Regelungen (UN-GTR) für Radfahrzeuge** Um Anforderungen an Kraftfahrzeuge weltweit zu harmonisieren, wurde 1998 ein weiteres Abkommen in Kraft gesetzt, auf dessen Basis sogenannte Global Technical Regulations (GTR) erstellt werden. Ziel des Abkommens ist es, weltweit gemeinsam einheitliche Mindestanforderungen für Sicherheit, Umweltschutz, Energieeffizienz und Diebstahlschutz zu definieren. Das Abkommen besteht parallel zu dem von 1958, schließt aber nun z. B. die USA als eine der bisher 35 Vertragsparteien ein. Jede Vertragspartei entscheidet, ob sie eine GTR anwendet, in ihr nationales Recht übernimmt oder lediglich Produkte akzeptiert, die den GTR genügen. Damit können GTR sowohl im Typgenehmigungsverfahren als auch im Verfahren der Selbstzertifizierung Verwendung finden. Bisher sind 16 GTR verabschiedet worden.

**Übereinkommen von 1997 über einheitliche Bedingungen für periodische Technische Untersuchungen von Radfahrzeugen** Im Übereinkommen von 1997 werden einheitliche Regeln für periodische technische Untersuchungen von Radfahrzeugen, die auf dem Gebiet der jeweiligen Vertragsparteien zugelassen sind oder in Betrieb genommen werden, festgelegt. Technische Untersuchungen, die den Mindestanforderungen des Abkommens genügen, müssen von den Vertragsparteien gegenseitig anerkannt werden. Europa und Deutschland sind nicht unter den bisher 12 Vertragsparteien des Übereinkommens.

Für die Erarbeitung der technischen Anforderungen wurden sechs Arbeitsgruppen eingerichtet, die jeweils für bestimmte Fachthemen zuständig sind: Arbeitsgruppe für Geräusche (GRB), Licht und Lichtsignale (GRE), Schadstoffe und Energie (GRPE), Bremsen und Fahrwerk (GRRF), passive Sicherheit (GRSP) und für allgemeine Sicherheitsvorschriften (GRSG). Neben den Vertragsparteien nehmen an den Sitzungen der Arbeitsgruppen – ohne Stimmrecht – auch Industrieverbände sowie andere Nichtregierungsorganisationen (NGO) teil. Unter den sechs genannten Arbeitsgruppen gibt es eine Vielzahl befristete „informelle Arbeitsgruppen", die zu bestimmten Themen neue Regelungen oder Änderungen zu bestehenden Regelungen erarbeiten. Die Arbeit der WP.29, der sechs Arbeitsgruppen und der informellen Arbeitsgruppen ist stets nachvollziehbar, da alle Arbeitsdokumente auf der Internetseite der UNECE [38] frei verfügbar sind. Dort finden sich auch die Texte der einzelnen Reglungen unter den drei verschiedenen Übereinkommen.

#### 2.2.3.2.4 Anforderungen im Rahmen des Selbstzertifizierungsverfahrens

In den Vereinigten Staaten von Amerika, die für Kraftfahrzeuge nicht das System der UN-Regelungen für Typgenehmigungen nutzen und auch keine Genehmigungen nach dem Übereinkommen von 1958 anerkennen, findet ein völlig anderes System der Fahrzeug- und Teilezulassung Anwendung: Die nationale Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (The National Highway Traffic Safety Administration) der USA besitzt das gesetzgeberische Mandat, Vorschriften in Form von „Federal Motor Vehicle Safety Standards" (FMVSS) zu erlassen. In diesen Standards werden die Anforderungen an die Fahrzeuge in Bezug auf Unfallprävention, Crashsicherheit, Post-Crash-Sicherheit sowie weitere Aspekte (z. B. für den Kraftstoffverbrauch) festgelegt. Fahrzeughersteller müssen sicherstellen, dass ihre Produkte diesen Standards genügen. Sie müssen weiterhin bestätigen, dass dies der Fall ist, daher der Begriff Selbstzertifizierung für das Verfahren. Neue oder geänderte Standards werden jeweils von der NHTSA in einem Register veröffentlicht. Da das System der FMVSS sich inhaltlich nicht mit dem der EU oder der ECE deckt, ist es im Moment nicht möglich, ein Fahrzeug so zu bauen, dass es beiden Regelwerken gleichzeitig genügen würde.

### 2.2.3.3 Inhalte der verbindlichen Vorschriften für Kraftfahrzeuge

Die Inhalte der Vorschriften, die für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen in der EU anzuwenden sind, verteilen sich auf viele Einzelrichtlinien und -verordnungen. Die in ▶ Abschn. 2.2.3.2.1 genannten Rahmenrechtsakte beschreiben, in welchen Einzelrechtsakten welche Anforderungen gefasst sind. Für Pkw, Lkw, Busse und deren Anhänger gibt ◘ Tab. 2.2 eine Übersicht über die Rechtsakte, auf die in der Rahmenrichtline 2007/46/EG verwiesen wird. Angegeben sind auch die Gegenstände, für die es einer Genehmigung bedarf, d. h. es wird aufgezählt, für welche Aspekte der Gesetzgeber Anforderungen vorschreibt. Neben den EU-Vorschriften sind in ◘ Tab. 2.2 auch diejenigen UN-Regelungen angegeben, die von der EU als gleichwertige Alternative anerkannt werden. In der Rahmenrichtline wird weiterhin spezifiziert, auf welche Fahrzeugklassen die Einzelrichtlinien und -verordnungen anzuwenden sind. So sind zum Beispiel Emissionsvorschriften oder Anforderungen an Scheinwerfer für Anhänger obsolet.

Im Folgenden wird beispielhaft auf Inhalte der Anforderungen für die aktive und passive Sicherheit von Fahrzeugen sowie auf solche für die Umwelteigenschaften von Kraftfahrzeugen eingegangen.

**Tabelle 2.2** Aufstellung der für die EG-Typgenehmigung für Fahrzeuge (Pkw, Lkw, Busse und Anhänger) nach Richtlinie 2007/46/EG anzuwendenden Vorschriften inklusiver der Nennung derjenigen UN-Regelungen, die von der EU als gleichwertige Alternative anerkannt werden

| Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt | Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Zulässiger Geräuschpegel | RL 70/157/EWG | 30 | Parkleuchten | RL 77/540/EWG |
| 2 | Emissionen leichter Pkw und Nutzfahrzeuge (Euro 5 und 6)/Zugang zu Informationen | VO (EG) Nr. 715/2007 | 30A | Parkleuchten für Kraftfahrzeuge | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 77 |
| 3 | Kraftstoffbehälter/Unterfahrschutz hinten | RL 70/221/EWG | 31 | Rückhaltesysteme und Rückhalteeinrichtungen | RL 77/541/EWG |
| 3A | Verhütung von Brandgefahren (Behälter für flüssigen Kraftstoff) | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 34 | 31A | Sicherheitsgurte, Rückhaltesysteme, Kinder-Rückhaltesysteme und ISOFIX-Kinder-Rückhaltesysteme | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 16 |
| 3B | Einrichtungen für den hinteren Unterfahrschutz und ihr Anbau; hinterer Unterfahrschutz | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 58 | 32 | Sichtfeld | RL 77/649/EWG |
| 4 | Anbringung hinteres Kennzeichen | RL 70/222/EWG | 32A | Sichtfeld des Fahrzeugführers nach vorn | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 125 |
| 4A | Anbringungsstelle und Anbringung, hinteres Kennzeichen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1003/2010 | 33 | Kennzeichnung der Betätigungseinrichtungen, Warn- und Kontrollleuchten | RL 78/316/EWG |
| 5 | Lenkanlagen | RL 70/311/EWG | 33A | Anordnung und Kenn-zeichnung der Betätigungs-einrichtungen, Kontroll-leuchten und Anzeiger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 121 |
| 5A | Lenkanlagen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 79 | 34 | Entfrostung/Trocknung | RL 78/317/EWG |
| 6 | Türverriegelungen und -scharniere | RL 70/387/EWG | 34A | Entfrostungs- und Trocknungsanlagen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 672/2010 |
| 6A | Einstieg ins Fahrzeug und Manövriereigenschaften | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 130/2012 | 35 | Scheibenwischer/-wascher | RL 78/318/EWG |
| 6B | Türverschlüsse und Türaufhängungen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 11 | 35A | Windschutzscheibenwischanlagen und Windschutzscheibenwaschanlagen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1008/2010 |
| 7 | Schallzeichen | RL 70/388/EWG | 36 | Heizung | RL 2001/56/EG |
| 7A | Vorrichtungen für Schallzeichen/Schallzeichen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 28 | 36A | Heizungssysteme | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 122 |

**Tabelle 2.2** (Fortsetzung)

| Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt | Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt |
|---|---|---|---|---|---|
| 8 | Einrichtungen für indirekte Sicht | RL 2003/97/EG | 37 | Radabdeckung | RL 78/549/EWG |
| 8A | Einrichtungen für indirekte Sicht und ihre Anbringung | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 46 | 37A | Radabdeckung | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1009/2010 |
| 9 | Bremsanlage | RL 71/320/EWG | 38 | Kopfstützen | RL 78/932/EWG |
| 9A | Bremsen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 13 | 38A | In Fahrzeugsitze einbezogene und nicht einbezogene Kopfstützen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 25 |
| 9B | Bremsen (Pkw) | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 13-H | 41A | Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (Euro 6)/Zugang zu Informationen | VO (EG) Nr. 595/2009 |
| 10 | Funkentstörung (elektromagnetische Verträglichkeit) | RL 72/245/EWG | 42 | Seitliche Schutzvorrichtungen | RL 89/297/EWG |
| 10A | Elektromagnetische Verträglichkeit | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 10 | 42A | Seitenschutz von Lastkraftwagen, Anhängern und Sattelanhängern | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 73 |
| 12 | Innenausstattung | RL 74/60/EWG | 43 | Spritzschutzsysteme | RL 91/226/EWG |
| 12A | Innenausstattung | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 21 | 43A | Spritzschutzsysteme | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 109/2011 |
| 13 | Diebstahlsicherung | RL 74/61/EWG | 44 | Massen und Abmessungen (Pkw) | RL 92/21/EWG |
| 13A | Schutz von Kraftfahrzeugen gegen unbefugte Benutzung | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 18 | 44A | Massen und Abmessungen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1230/2012 |
| 13B | Schutz von Kraftfahrzeugen gegen unbefugte Benutzung | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 116 | 45 | Sicherheitsscheiben | RL 92/22/EWG |
| 14 | Lenkanlage bei Unfallstößen | RL 74/297/EWG | 45A | Sicherheitsglas | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 43 |
| 14A | Schutz des Fahrzeugführers vor der Lenkanlage bei Unfallstößen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 12 | 46 | Reifen | RL 92/23/EWG |
| 15 | Sitzfestigkeit | RL 74/408/EWG | 46A | Montage von Reifen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 458/2011 |
| 15A | Sitze, ihre Verankerungen und Kopfstützen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 17 | 46B | Luftreifen für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger (Kl. C1) | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 30 |
| 15B | Sitze für Kraftomnibusse | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 80 | 46C | Luftreifen für Nutzfahrzeuge und ihre Anhänger (Kl. C2 und C3) | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 54 |

**Tabelle 2.2** (Fortsetzung)

| Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt | Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt |
|---|---|---|---|---|---|
| 16 | Vorstehende Außenkanten | RL 74/483/EWG | 46D | Reifen: Rollgeräuschemissionen, Haftung auf nassen Oberflächen und Rollwiderstand (Kl. C1, C2 und C3) | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 117 |
| 16A | Vorstehende Außenkanten | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 26 | 46E | Komplettnotrad, Notlaufreifen/Notlaufsystem und Reifendrucküberwachungssystem | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 64 |
| 17 | Geschwindigkeitsmesser und Rückwärtsgang | RL 75/443/EWG | 47 | Geschwindigkeitsbegrenzungseinrichtungen | RL 92/24/EWG |
| 17A | Einstiegs ins Fahrzeug und Manövriereigenschaften | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 130/2012 | 47A | Geschwindigkeitsbegrenzungseinrichtungen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 89 |
| 17B | Geschwindigkeitsmesseinrichtung einschl. ihres Einbaus | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 39 | 48 | Massen und Abmessungen (außer Pkw der Nr. 44) | RL 97/27/EWG |
| 18 | (Vorgeschriebene) Schilder | RL 76/114/EWG | 48A | Massen und Abmessungen | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1230/2012 |
| 18A | Gesetzlich vorgeschriebenes Fabrikschild und Fahrzeug-Identifizierungsnummer | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 19/2011 | 49 | Führerhaus-Außenkanten | RL 92/114/EWG |
| 19 | Gurtverankerungen | RL 76/115/EWG | 49A | Außen vorstehende Teile vor der Führerhausrückwand von Nutzfahrzeugen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 61 |
| 19A | Sicherheitsgurtverankerungen, ISOFIX- Verankerungssysteme und Verankerungen für den oberen ISOFIX-Haltegurt | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 14 | 50 | Verbindungseinrichtungen | RL 94/20/EG |
| 20 | Anbau der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen | RL 76/756/EWG | 50A | Mechanische Verbindungseinrichtungen für Fahrzeugkombinationen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 55 |
| 20A | Anbau der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 48 | 50B | Kurzkupplungseinrichtung; Anbau eines genehmigten Typs einer Kurzkupplungseinrichtung | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 102 |
| 21 | Rückstrahler | RL 76/757/EWG | 51 | Brennverhalten | RL 95/28/EG |
| 21A | Retroreflektierende Einrichtungen für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 3 | 51A | Brennverhalten von Werkstoffen der Innenausstattung bestimmter Kraftfahrzeugklassen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 118 |

**Tabelle 2.2** (Fortsetzung)

| Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt | Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt |
|---|---|---|---|---|---|
| 22 | Umriss-, Begrenzungs-, Schluss-, Tagfahr-, Brems- und Seitenmarkierungsleuchten | RL 76/758/EWG | 52 | Kraftomnibusse | RL 2001/85/EG |
| 22A | Begrenzungsleuchten, Schluss-leuchten, Bremsleuchten und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 7 | 52A | Fahrzeuge der Klassen M2 und M3 | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 107 |
| 22B | Tagfahrlicht für Kraftfahrzeuge | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 87 | 52B | Festigkeit des Aufbaus von Kraftomnibussen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 66 |
| 22C | Seitenmarkierungsleuchten für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 91 | 53 | Frontalaufprall | RL 96/79/EG |
| 23 | Fahrtrichtungsanzeiger | RL 76/759/EWG | 53A | Schutz der Insassen bei einem Frontalaufprall | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 94 |
| 23A | Fahrtrichtungsanzeiger für Kfz und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 6 | 54 | Seitenaufprall | RL 96/27/EG |
| 24 | Hintere Kennzeichenbeleuchtung | RL 76/760/EWG | 54A | Schutz der Insassen bei einem Seitenaufprall | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 95 |
| 24A | Beleuchtungseinrichtungen für das hintere Kennzeichenschild von Kfz und ihren Anhängern | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 4 | 56 | Kraftfahrzeuge zur Beförderung gefährlicher Güter | RL 98/91/EG |
| 25 | Scheinwerfer (einschließlich Glühlampen) | RL 76/761/EWG | 56A | Fahrzeuge für die Beförderung gefährlicher Güter | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 105 |
| 25A | Sealed-Beam-Halogenscheinwerfereinheit (HSB) für Kfz für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 31 | 57 | Vorderer Unterfahrschutz | RL 2000/40/EG |
| 25B | Glühlampen zur Verwendung in genehmigten Scheinwerfern und Leuchten von Kraftfahr-zeugen und ihren Anhängern | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 37 | 57A | Einrichtungen für den vorderen Unterfahrschutz und ihr Anbau; vorderer Unterfahrschutz | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 93 |
| 25C | Kfz-Scheinwerfer mit Gasentladungslichtquellen | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 98 | 58 | Fußgängerschutz | VO (EG) Nr. 78/2009 |
| 25D | Gasentladungslichtquellen für genehmigte Gasentladungsleuchteinheiten in Kfz | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 99 | 59 | Recyclingfähigkeit | RL 2005/64/EG |

**Tabelle 2.2** (Fortsetzung)

| Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt | Nr. | Genehmigungsgegenstand | Rechtsakt |
|---|---|---|---|---|---|
| 25E | Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 112 | 61 | Klimaanlagen | RL 2006/40/EG |
| 25F | Adaptive Front-Beleuchtungs-systeme für Kfz | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 123 | 62 | Wasserstoffsystem | VO (EG) Nr. 79/2009 |
| 26 | Nebelscheinwerfer | RL 76/762/EWG | 63 | Allgemeine Sicherheit | VO (EG) Nr. 661/2009 |
| 26A | Nebelscheinwerfer für Kraftfahrzeuge | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 19 | 64 | Gangwechselanzeiger | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 65/2012 |
| 27 | Abschleppeinrichtung | RL 77/389/EWG | 65 | Notbrems-Assistenzsystem | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 347/2012 |
| 27A | Abschleppeinrichtung | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 1005/2010 | 66 | Spurhaltewarnsystem | VO (EG) Nr. 661/2009 VO (EU) Nr. 351/2012 |
| 28 | Nebelschlussleuchten | RL 77/538/EWG | 67 | Spezielle Ausrüstung für Kraftfahrzeuge, in deren Antriebssystem verflüssigte Gase verwendet werden, und deren Einbau | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 67 |
| 28A | Nebelschlussleuchten für Kfz und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 38 | 68 | Fahrzeug-Alarmsysteme | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 97 |
| 29 | Rückfahrscheinwerfer | RL 77/539/EWG | 69 | Elektrische Sicherheit | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 100 |
| 29A | Rückfahrscheinwerfer für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 23 | 70 | Spezielle Bauteile von Kraftfahrzeugen, in deren Antriebssystem komprimiertes Erdgas (CNG) verwendet wird, und deren Einbau | VO (EG) Nr. 661/2009 UNECE-R Nr. 110 |

Stand 01.01.2014.

#### 2.2.3.3.1 Beispiele für Anforderungen an die aktive Sicherheit

Die aktive Sicherheit von Fahrzeugen, die die Vorkehrungen zur Vermeidung von Unfällen beinhaltet, lässt sich unterteilen in Aspekte der Sicht und Sichtbarkeit, der Fahrdynamik (insbesondere Längs- und Querdynamik), sowie der funktionalen Sicherheit (Absicherung gegenüber Störungen, Defekten, Fehlern oder Versagen von Bauteilen oder -gruppen).

In besonderer Tiefe und mit hohem Detaillierungsgrad sind die Anforderungen an die Fahrzeugbeleuchtung geregelt. Dies ist zurückzuführen auf die große und unmittelbare Bedeutung der Sicht für den Fahrer und des optischen Signalbildes von Fahrzeugen auf die Verkehrssicherheit, wobei so-

wohl der Nutzen einer guten Ausleuchtung und eines eindeutigen sowie klar erkennbaren Signalbildes sicherzustellen ist als auch auf der anderen Seiten unerwünschte Wirkungen wie Blendung oder Reizüberflutung zu vermeiden sind.

Im Bereich der Fahrdynamik gibt es grundlegende Anforderungen an die Basisbaugruppen und -funktionen Bremse, Lenkung und Reifen. Darüber hinaus sind in den vergangenen Jahren weitere interessante Systeme der aktiven Sicherheit in die Vorschriften aufgenommen worden: Die Ausstattung mit Fahrdynamikregelsystemen (ESC = Electronic Stability Control) wurde mit der Verordnung VO (EG) Nr. 661/2009 [39] zur Typgenehmigung und allgemeinen Sicherheit von Kraftfahrzeugen für Pkw und Nutzfahrzeuge verpflichtend, nachdem sich deren großer Nutzen für die Verkehrssicherheit in den Unfallzahlen in Form von vermiedenen Fahrunfällen gezeigt hatte [40, 41]. Für Motorräder der Kategorie $L_3$ wurde mit der Verordnung VO (EU) Nr. 168/2013 die Ausrüstung mit ABS (Anti-Blockier-System) ab dem Jahr 2016 vorgeschrieben. Auch hier hatten Studien gezeigt, dass die Vermeidung von Radblockaden beim Bremsen mit Einspurfahrzeugen wesentlich zur Sturzvermeidung beiträgt und für den verpflichtenden Einbau von ABS ein volkswirtschaftlicher Nutzen zu erwarten ist, der die Kosten um das etwa vierfache übersteigt [42, 43]. Für schwere Lkw und Busse wurden mit der Verordnung VO (EG) Nr. 661/2009 [39] zur Typgenehmigung und allgemeinen Sicherheit von Kraftfahrzeugen von Seiten der EU erstmals Spurverlassenswarnsysteme und automatische Notbremssysteme vorgeschrieben. Mit dem obligatorischen Einbau der Systeme, der ab 1. November 2013 stufenweise für neue Typen und ab 1. November 2015 für neue Fahrzeuge erfolgt, wird eine Reduktion der Abkommens- und Auffahrunfälle von Nutzfahrzeugen aus den Klassen $M_2$, $M_3$, $N_2$ und $N_3$, die auf Grund der hohen Masse der Fahrzeuge folgenschwer sind, erwartet.

Beispiele für Anforderungen zur funktionalen Sicherheit sind die Vorschriften zur elektromagnetischen Verträglichkeit, dem Schutz von Personen gegenüber elektrischem Schlag, was vor allem mit zunehmender Elektrifizierung der Antriebsstränge an Bedeutung gewann, sowie Anforderungen an die Sicherheit von komplexen elektronischen Systemen,

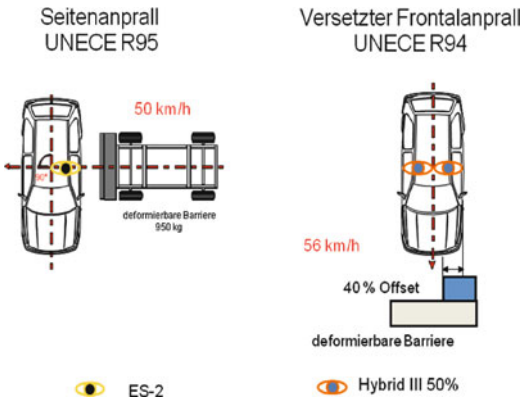



**Abb. 2.15** UNECE Testverfahren für Frontal- und Seitenanprall

wie sie sich z. B. in Anhängen der UN-Regelungen zu Bremse und Lenkung befinden, um für Regelsysteme, die (wie z. B. Abstandsregeltempomaten) auf Bremse und Lenkung aufsetzen, eine fehlertolerante Auslegung zu garantieren. Es ist zu erwarten, dass mit wachsender Automatisierung von Fahrfunktionen auch die Anforderungen an deren sicheres Funktionieren konkreter zu regeln sind.

#### 2.2.3.3.2 Beispiele für Anforderungen an die passive Sicherheit

Es sind mehrere wichtige UNECE-Regelungen in Kraft, die im Rahmen der Typgenehmigung ein Mindestmaß an Sicherheit von Kraftfahrzeugen im Falle eines Unfalles bzw. einer Kollision gewährleisten sollen. So bestehen beispielsweise Anforderungen an die Sicherheitsgurte und deren Verankerungen (UNECE-R 14 und R 16), an Fahrzeugsitze und Kopfstützen (UNECE-R 17 und R 25), Kinderrückhaltesysteme (UNECE-R 44 und R 129), Türschlösser und -scharniere (UNECE-R 11) und Lenkanlagen (UNECE-R 12).

Einen großen Beitrag zur deutlichen Verbesserung der Fahrzeugsicherheit haben sicherlich die UNECE-Regelungen zum Frontalaufprall R 94 und Seitenaufprall R 95 geleistet, die basierend auf den Arbeiten des European Enhanced Vehicle-Safety Committee (EEVC) erstellt und fortgeschrieben wurden und Mitte/Ende der 1990er Jahre in Kraft traten (siehe Abb. 2.15). Testverfahren zum Frontal- und Seitenaufprall von Verbraucher-

**Euro-VI-Emissionsgrenzwerte**

| | Grenzwerte | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CO (mg/kWh) | THC (mg/kWh) | NMHC (mg/kWh) | $CH_4$ (mg/kWh) | $NO_x$ [1] (mg/kWh) | $NH_3$ (ppm) | Partikelmasse (mg/kWh) | Partikelzahl [2] (#/kWh) |
| WHSC (CI) | 1500 | 300 | | | 400 | 10 | 10 | $8{,}0 \times 10^{11}$ |
| WHTC (CI) | 4000 | 160 | | | 460 | 10 | 10 | $6{,}0 \times 10^{11}$ |
| WHTC (PI) | 4000 | | 160 | 500 | 460 | 10 | 10 | [3] |

PI = Fremdzündungsmotor
CI = Selbstzündungsmotor
[1] Der Wert des zulässigen $NO_2$-Anteils am $NO_x$-Grenzwert kann zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt werden.
[2] Vor dem 31. Dezember 2012 wird ein neues Messverfahren eingeführt.
[3] Vor dem 31. Dezember 2012 wird ein Grenzwert für die Partikelzahl eingeführt.

**Abb. 2.16** Euro-VI-Emissionsgrenzwerte für Lkw und Busse

schutzorganisationen (New Car Assessment Programmes NCAPs) wie z. B. Euro NCAP, ANCAP, Latin NCAP, KNCAP basieren auf diesen beiden UNECE-Regelungen.

#### 2.2.3.3.3 Beispiele für Anforderungen an den Umweltschutz

Im Rahmen der Typgenehmigung werden Kraftfahrzeuge auf Abgasrollenprüfständen bzw. Motorprüfständen anhand verbindlicher Prüfprozeduren und regional gültiger Fahrzyklen zertifiziert. Oberster Grundsatz ist dabei die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, da diese als Typprüfwerte in die Homologationsdokumente eingetragen werden.

Entsprechend der politischen Philosophie orientiert sich die Abgasgesetzgebung bzw. deren Fortschreibung an den

- Erfordernissen zur Verbesserung der Luftqualität und
- an der technischen Machbarkeit zur Erreichung dieser Ziele.

Infolge gestiegener Luftqualitätsanforderungen wurden bzw. werden die gesetzlichen Vorgaben zur Begrenzung der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen stufenweise verschärft.

Für schwere Nutzfahrzeuge (Busse und Lkw) ist in der Europäischen Union aktuell die Abgasnorm Euro IV vorgeschrieben (Verordnung (EG) Nr. 595/2009). Seit dem 31.12.2012 sind für neue Fahrzeugtypen bzw. Motoren die dort festgelegten Euro VI-Emissionsgrenzwerte verbindlich (siehe Abb. 2.16) [44].

Parallel müssen neue Fahrzeugtypen der Fahrzeugklasse Pkw und der leichten Nutzfahrzeuge seit dem 01.09.2014 gemäß Verordnung (EG) Nr. 715/2007 die Euro 6-Standards erfüllen (siehe Abb. 2.17) [45].

Darüber hinaus verfolgt die EU-Kommission die Strategie, die Kohlendioxidemissionen des Verkehrssektors zu reduzieren, wobei insbesondere Pkw und leichte Nutzfahrzeuge für einen großen Teil der $CO_2$-Emissionen verantwortlich gemacht werden. In den Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 bzw. (EG) Nr. 510/2011 werden die $CO_2$-Emissionen von Pkw-Neuwagen und neuen leichten Nutzfahrzeugen geregelt. Dementsprechend sind die durchschnittlichen $CO_2$-Emissionen der europäischen Neuwagenflotte stufenweise zu mindern [46, 47]. Erreicht die Pkw-Flotte eines Herstellers den vorgegebenen Zielwert im Durchschnitt nicht, sind vom Hersteller entsprechend Strafzahlungen zu leisten.

Bereits im Jahre 2015 soll für Pkw der Zielwert von 120 g $CO_2$/km erreicht werden; für das Jahr 2020 wird der Wert 95 g/km anvisiert. Korrespondierend müssend neu zugelassene leichte Nutzfahrzeuge schrittweise bis zum Jahr 2017 den mittelfristigen $CO_2$-Zielwert von 175 g/km erreichen. Bis zum Jahr 2020 soll dieser Wert weiter bis auf 147 g/km abgesenkt werden.

Basis für die Ermittlung der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Pkw und

**Euro-6-Emissionsgrenzwerte**

| | | Bezugsmasse (RM) (kg) | Grenzwerte | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Masse des Kohlenmonoxids (CO) | | Masse der gesamten Kohlenwasserstoffe (THC) | | Masse der Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMHC) | | Masse der Stickstoffoxide ($NO_x$) | | Summe der Massen der Kohlenwasserstoffe und der Stickstoffoxide (THC + $NO_x$) | | Partikelmasse (PM)[1] | | Partikelzahl (PN) | |
| | | | $L_1$ (mg/km) | | $L_2$ (mg/km) | | $L_3$ (mg/km) | | $L_4$ (mg/km) | | $L_2 + L_4$ (mg/km) | | $L_5$ (mg/km) | | $L_6$ (#/km) | |
| Fahrzeugklasse | Gruppe | | PI | CI | PI | CI | PI | CI | PI | CI | PI | CI | PI[2] | CI | PI[2][3] | CI |
| M | – | Alle | 1 000 | 500 | 100 | – | 68 | – | 60 | 80 | – | 170 | 4,5 | 4,5 | $6{,}0 \times 10^{11}$ | $6{,}0 \times 10^{11}$ |
| $N_1$ | I | RM ≤ 1 305 | 1 000 | 500 | 100 | – | 68 | – | 60 | 80 | – | 170 | 4,5 | 4,5 | $6{,}0 \times 10^{11}$ | $6{,}0 \times 10^{11}$ |
| | II | 1 305 < RM ≤ 1 760 | 1 810 | 630 | 130 | – | 90 | – | 75 | 105 | – | 195 | 4,5 | 4,5 | $6{,}0 \times 10^{11}$ | $6{,}0 \times 10^{11}$ |
| | III | 1 760 < RM | 2 270 | 740 | 160 | – | 108 | – | 82 | 125 | – | 215 | 4,5 | 4,5 | $6{,}0 \times 10^{11}$ | $6{,}0 \times 10^{11}$ |
| $N_2$ | – | Alle | 2 270 | 740 | 160 | – | 108 | – | 82 | 125 | – | 215 | 4,5 | 4,5 | $6{,}0 \times 10^{11}$ | $6{,}0 \times 10^{11}$ |

Erläuterung: PI = Fremdzündungsmotor, CI = Selbstzündungsmotor.
1) Bei der Partikelmasse gilt für Fahrzeuge, die vor dem 1. 9. 2011 mit dem vorherigen Messverfahren für die Partikelmasse nach den Emissionsgrenzwerten dieser Tabelle typgenehmigt wurden, ein Emissionsgrenzwert von 5,0 mg/km.
2) Bei Fahrzeugen mit Fremdzündungsmotoren gelten die Grenzwerte für die Partikelmasse und die Partikelzahl nur für Fahrzeuge mit Direkteinspritzmotoren.
3) Bis zu drei Jahre nach den Zeitpunkten für neue Typgenehmigungen bzw. neue Fahrzeuge gemäß Artikel 10 Absätze 4 und 5 gilt nach Wahl des Herstellers für Euro-6-Fahrzeuge mit fremdgezündetem Direkteinspritzmotor ein Emissionsgrenzwert für die Partikelzahl von $6{,}0 \times 10^{12}$ #/km. Spätestens zu diesen Zeitpunkten ist ein Typgenehmigungs-Prüfverfahren einzuführen, das die wirksame Begrenzung der Zahl der Partikel, die Fahrzeuge unter tatsächlichen Betriebsbedingungen ausstoßen, sicherstellt.

**Abb. 2.17** Euro-6-Emissionsgrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge

leichten Nutzfahrzeugen in Europa ist derzeit der „Neue Europäische Fahrzyklus" (NEFZ), der bereits vor gut 20 Jahren (d. h. im Jahre 1996) eingeführt wurde. Da vor allem die Realitätsnähe aber auch die Repräsentativität und Reproduzierbarkeit des NEFZ bzw. das Design der Testprozedur zunehmend kritisiert werden, wird bereits seit Längerem bei den Vereinten Nationen (UNECE) in der Arbeitsgruppe WP.29 daran gearbeitet, eine neue und weltweit harmonisierte Testprozedur (**W**orldwide Harmonized **L**ight Duty **T**est **P**rocedure) zu entwickeln [48]. Ziel ist insbesondere die Gestaltung eines – gegenüber dem NEFZ – realitätsnäheren Prüfzyklus. Ein weiterer Kernpunkt der Arbeiten ist es, zusätzlich auch die zugehörigen Testverfahren und -parameter, die während der Typgenehmigung von Fahrzeugen angewendet werden, zu überarbeiten.

Der neue Prüfzyklus (WLTC) setzt sich aus verschieden Phasen zusammen („low phase", „medium phase", „high phase" und „extra high phase"). Von den Kennzahlen her weist der gegenüber dem NEFZ dynamischere WLTP – bezogen auf die Dauer des Zyklus und die Streckenlänge – höhere Zahlenwerte aus. Neu ist außerdem, dass – anders als beim NEFZ – eine Einteilung der Fahrzeugtypen in verschiedene Gewichts- bzw. Leistungsklassen vorgesehen ist, wobei die „leistungsschwächeren" Klassen bestimmte Phasen des WLTP-Zyklus nicht durchfahren müssen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass der WLTP auch für Märkte bzw. Regionen (z. B. Indien) mit schwach motorisierten Fahrzeugen vorgesehen ist. Die in der Europäischen Union anzutreffenden Fahrzeuge werden gewöhnlich der höchsten Klasse zuzuordnen sein. Der Geschwindigkeits-/Zeitverlauf des WLTC für diese Fahrzeugklasse ist in Abb. 2.18 dargestellt.

Um die realen Emissionen besser zu kontrollieren und um den „in-service conformity process" (Prüfung der Übereinstimmung in Betrieb befindlicher Fahrzeuge) zu erleichtern, gibt es von Seiten der EU-Kommission Pläne, den Umfang der Typprüfung um RDE-Messungen (**R**eal-**D**riving-**E**missions) zu erweitern. Für diese Messungen, die im realen Fahrbetrieb auf öffentlichen Straßen unter Verwendung portabler Abgasmesstechnik („**P**ortable **E**mission **M**easurement **S**ystems (PEMS))" durchgeführt werden sollen, müssen die

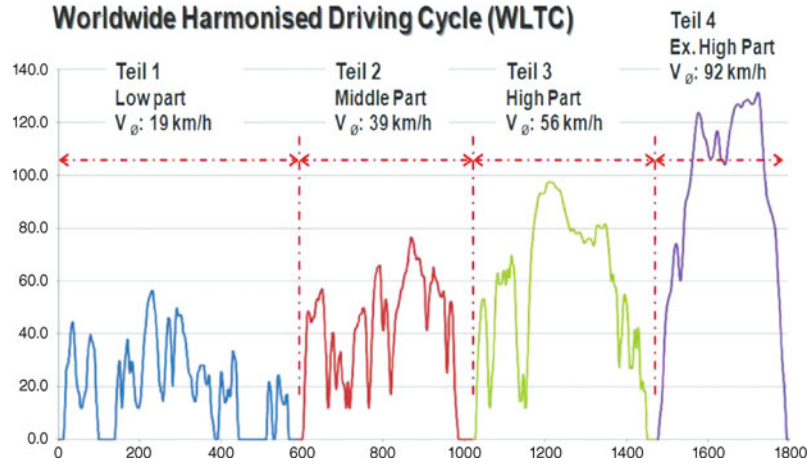



**Abb. 2.18** Geschwindigkeits-/Zeitverlauf des WLTC

entsprechenden Rahmenbedingungen, Parameter, Anforderungen, Messdatenauswertung, Nachbearbeitung usw. gesetzlich festgelegt werden. Die Federführung des Gesetzgebungsverfahrens liegt bei der EU-Kommission, wobei die Diskussionen und Verhandlungen über die RDE-Vorschriften noch nicht abgeschlossen sind.

Mit Einführung der RDE-Vorschriften werden grundsätzlich neue Anforderungen formuliert, da die Emissionen nicht mehr nur auf dem Abgasrollenprüfstand in einem festgelegten Prüfzyklus gemessen und bewertet werden, sondern mobil im realen Verkehr. Bei der RDE-Untersuchung kann gleichsam der gesamte Betriebsbereich des Motors, d. h. das gesamte Kennfeld „durchfahren" werden, so dass die Emissionen aller Betriebspunkte erfasst werden.

## 2.2.4 Anforderungen des Verbraucherschutzes

Der Gesetzgeber legt mit den Anforderungen für die Typgenehmigung Mindeststandards fest, die erfüllt werden müssen, um ein neues Fahrzeug auf den Markt bringen zu können. Da im Rahmen der Tests für die Typprüfung nur die Einhaltung dieser Mindeststandards in Form von „bestanden" oder „nicht bestanden" abgeprüft wird, kann keine Aussage zu der Höhe des Sicherheitsniveaus des Fahrzeugtyps im Vergleich zu anderen Fahrzeugtypen im Markt getroffen werden. Jeder Typ oder auch jede Variante eines Typs kann in Bezug auf Sicherheit unterschiedlich weit über die Mindestanforderungen hinausragen.

Im Gegensatz zur Gesetzgebung können Verbraucherorganisationen vergleichende Bewertungen verschiedener Fahrzeuge vornehmen (siehe Abb. 2.19).

Durch eigene Tests soll das unterschiedliche Sicherheitsniveau bereits genehmigter Fahrzeugmodelle ermittelt und als Verbraucherinformation differenziert publiziert werden. Hierfür würde es nicht ausreichen, die nicht differenzierenden Typgeneh-

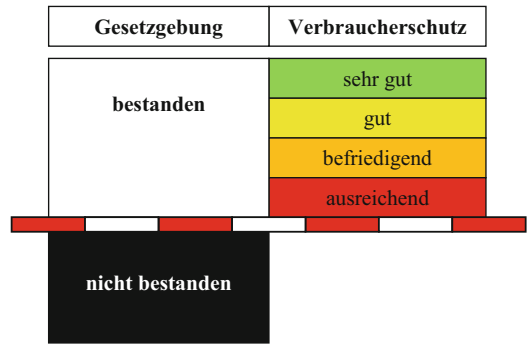



**Abb. 2.19** Prinzipieller Unterschied in der Bewertung von Fahrzeugsicherheitseigenschaften im Rahmen der Gesetzgebung und des Verbraucherschutzes

migungstests mit ihren Anforderungen zu wiederholen. Eine graduelle Differenzierung der Produkteigenschaften wird erst dadurch erreicht, dass sowohl die Testbedingungen als auch die Bewertungskriterien verglichen mit den Tests des Gesetzgebers verschärft und erweitert werden. Insbesondere wird eine abgestufte Bewertungsskala benötigt.

Ziel der Verbraucherorganisationen ist es, die internen Anforderungen der Fahrzeughersteller um weitere für den Verbraucher als sinnvoll erachtete Anforderungen zu ergänzen. Mit der Veröffentlichung von Testergebnissen wird dann für den Verbraucher sichtbar, welche Modelle einen gewissen „Mehrwert" an Sicherheit bieten. Eine schlechte Bewertung oder eine fehlende Bewertung kann dann dazu führen, dass ein bestimmtes Fahrzeug oder Modell weniger oft gekauft wird. Die Bewertung der Verbraucherschutzorganisation erhält damit unmittelbar wirtschaftliche Bedeutung auch für den Fahrzeughersteller, der nun abschätzen muss, welche Investitionen in die Sicherheit seiner Modelle er wegen der Verbraucherschutztests tätigt. Wegen dieser betriebs- und volkswirtschaftlichen Bedeutung der Bewertungsverfahren im Rahmen des Verbraucherschutzes, ist ein transparentes und am Unfallgeschehen ausgerichtetes Bewertungsverfahren anzustreben.

Aufgrund seiner Entscheidungsfreiheiten und Gestaltungsspielräume ist der Verbraucherschutz auch Vorreiter bei der Einführung von Tests für neue Sicherheitssysteme, lange bevor es der Gesetzgeber als sinnvoll und nötig erachtet, Vorschriften für diese in das Regelwerk aufzunehmen. Damit kommt dem Verbraucherschutz auch die Rolle zu, Sicherheitsgewinne frühzeitig zu identifizieren, aufzuzeigen und den Weg für spätere gesetzliche Regelungen zu bahnen.

### 2.2.4.1 Euro NCAP

Wesentliches Merkmal von Versuchen des Verbraucherschutzes ist, dass diese Versuche grundsätzlich ohne fahrzeughersteller- oder systemherstellerspezifisches Wissen durchführbar sein müssen. Da die Ergebnisse den Verkaufserfolg eines Fahrzeugs deutlich beeinflussen können, besteht die Forderung nach einem hochreproduzierbaren Verfahren mit transparenten Bewertungskriterien, das oftmals über die technisch erforderliche Reproduzierbarkeit (und damit über die Anforderungen der Typgenehmigung) hinausgeht.

Verbraucherschutztests werden weltweit von den New-Car-Assessment-Programmes (NCAP) und ihren Mitgliedern nach transparenten Verfahren durchgeführt und bewertet. Es gibt dabei gelegentlich auch Tests ohne vorherige Information, deren Zweck dann ist, einen Missstand medienwirksam aufzuzeigen (Beispiel: ADAC-Test zur Notbremsassistenz für Fußgänger, 2013 [49]).

In Europa übernimmt das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) die Verbraucherschutzbewertung neuer Fahrzeuge. Euro NCAP ist ein eingetragener Verein nach belgischem Recht mit Sitz in Brüssel. Mitglieder des Vereins sind 12 verschiedene europäische Staaten, Automobilclubs, Verbraucherschutz- und Versicherungsorganisationen, darunter auch Deutschland (vertreten durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur) und der ADAC.

Neue Fahrzeuge werden anhand standardisierter Tests bewertet, die von unabhängigen Testinstituten im Auftrag oder von den Mitgliedern selbst durchgeführt werden.

Bei den Euro NCAP Testverfahren werden pro Fahrzeugmodell bis zu vier „full scale" Kollisionsfahrversuche durchgeführt sowie drei Whiplash-Tests und Fußgängerschutztests.

Bei dem sog. Offset-Frontalaufprall fährt das Fahrzeug unter 40 %-iger Frontüberdeckung mit 64 km/h gegen eine deformierbare Barriere. Bei diesem Test ist das Fahrzeug mit zwei Hybrid III 50 % männlichen Dummies auf den Vordersitzen und zwei Kinderdummies (Q1.5 und Q3, ab 2016 mit Q6- und Q10-Dummies) auf den äußeren Rücksitzen in Kinderrückhaltesystemen besetzt.

Seit 2015 wird ein weiterer Frontalaufprall mit voller Frontüberdeckung gegen eine starre Barriere mit 50 km/h durchgeführt. Hierbei ist das Fahrzeug auf dem Fahrersitz und auf dem rechten Rücksitz mit Hybrid III 5 % weiblichen Dummies besetzt. Optional kommt ein dritter Hybrid III 5 % Dummy auf dem Beifahrersitz zum Einsatz.

Abb. 2.20 zeigt beispielhaft eine schematische Übersicht der Frontalaufpralltests, die bei Euro NCAP zum Einsatz kommen.

Beim Barrieren-Seitenaufprall steht das Fahrzeug und eine deformierbare Barriere (AEMDB –

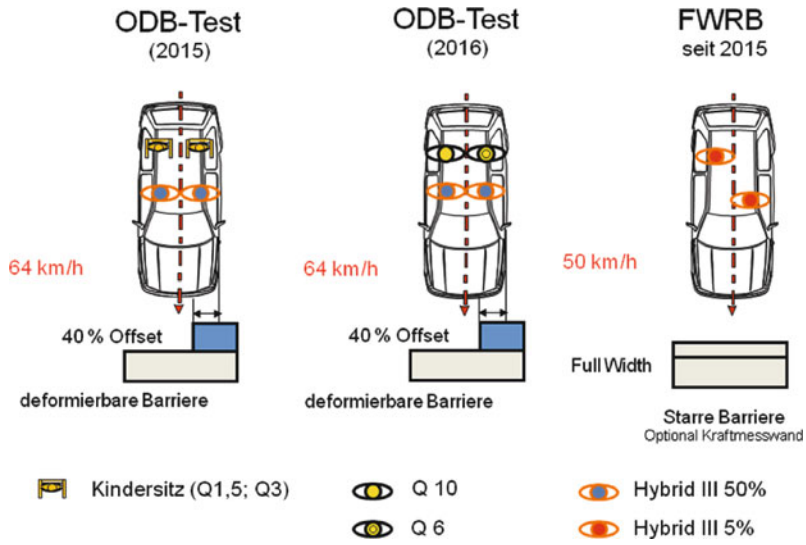



**Abb. 2.20** Euro NCAP Frontalaufpralltests

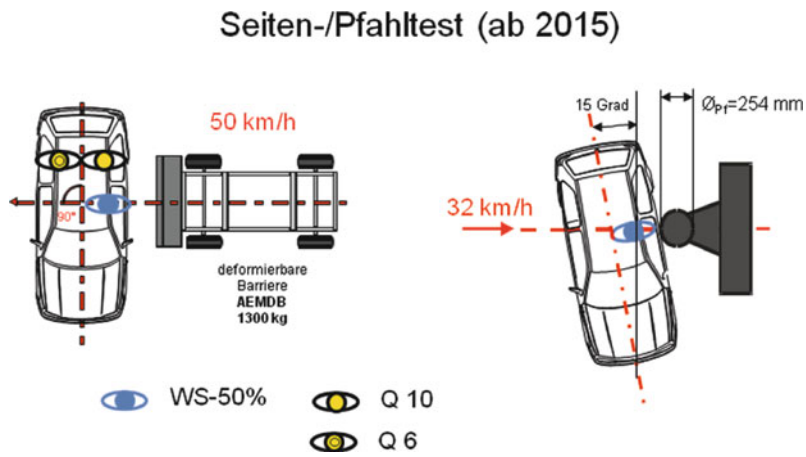



**Abb. 2.21** Euro NCAP AEMDB Seitenaufprall- und Pfahltest

Advanced European Mobile Deformable Barrier) mit der Masse 1300 kg stößt mit 50 km/h in die Fahrzeugseite des Fahrers. Das Fahrzeug ist hierbei mit einem WorldSID 50 % Dummy auf der Fahrerseite und mit zwei Kinderdummies (Q1.5 und Q3, ab 2016 mit Q6- und Q10-Dummies) auf den äußeren Rücksitzen in Kinderrückhaltesystemen besetzt.

Ein weiterer Seitenaufprall wird seit 2015 in Anlehnung an die Globale Technische Regelung Nr. 14 dergestalt durchgeführt, dass das auf einem sog. „Flying Floor" unter einem Winkel von 75 Grad positionierte Fahrzeug mit 32 km/h gegen einen Pfahl (Durchmesser 254 mm) gefahren wird. Das Fahrzeug ist hierbei mit einem WorldSID 50 % Dummy auf der Fahrerseite besetzt.

Abb. 2.21 zeigt beispielhaft eine schematische Übersicht der Seiten- und Pfahlaufpralltests, die bei Euro NCAP zum Einsatz kommen.

Darüber hinaus wird die Belastung eines Fahrzeuginsassen bei einem Heckaufprall mit drei dynamischen sogenannten „Whiplash"-Tests simuliert.

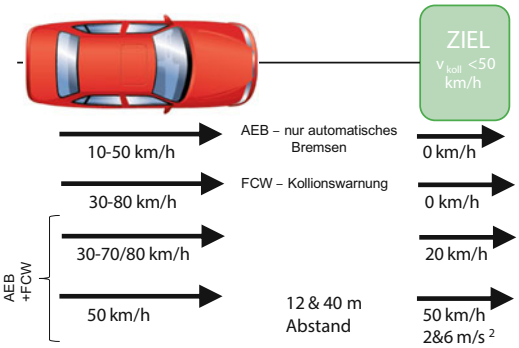



**Abb. 2.22** Testszenarien für Notbremssysteme



**Abb. 2.23** Test von Notbremssystemen (Foto: BASt)

Diese Tests beinhalten geometrische Aspekte sowie dynamische Schlittentests unterschiedlicher Schwere.

Fußgängerschutztests der passiven Sicherheit werden mit Prüfkörpern durchgeführt, die folgende Körperteile repräsentieren: Erwachsenen-Kopf, Kinder-Kopf, Hüfte und Bein.

Über die zerstörenden Versuche hinaus untersucht Euro NCAP die Fähigkeit von Notbremssystemen, einen Unfall zu verhindern oder die Unfallschwere zu mindern – entweder durch automatisches Einsteuern einer (Voll-)Bremsung oder durch frühzeitiges Warnen des Fahrers. In diesen Tests wird das zu testende Fahrzeug auf eine stehende, langsam fahrende oder verzögernde Pkw-Attrappe gelenkt und die vor der eventuellen Kollision erzielte Geschwindigkeitsreduktion bewertet. Beim Test von Fahrerwarnungen wird die vom hypothetischen Fahrer initiierte Notbremsung nach der erfolgten Warnung durch Einsatz eines Bremsroboters simuliert. Eine Zusammenstellung der Testszenarien, die Auffahrunfallszenarien repräsentieren, ist in Abb. 2.22 dargestellt. Als Fahrzeugattrappe dient das standardisierte „Euro NCAP Vehicle Target“ (EVT), links in Abb. 2.23 dargestellt. Detaillierte Informationen finden sich im aktuellen Testprotokoll von Euro NCAP [50].

Ab 2016 wird Euro NCAP auch Notbremssysteme bewerten, die Unfälle mit Fußgängern verhindern können. In den Testszenarien wird eine Fußgängerattrappe durch ein automatisiertes Bewegungssystem passend vor das Fahrzeug gezogen. Über die endgültige Ausführung der Fußgängerattrappe mit bewegten oder unbewegten Beinen ist noch nicht entschieden, fest steht aber bereits, dass die Attrappe von beiden Seiten und mit verschiedenen „Laufgeschwindigkeiten“ kommen wird. Außerdem wird die Kinderattrappe hinter einer Verdeckung gestartet – für aktuelle Notbremssysteme sicherlich eine der schwierigsten Hürden. Eine schematische Übersicht über die Testszenarien ist in Abb. 2.24 dargestellt.

Die Ergebnisse der verschiedenen Testprozeduren werden thematisch in vier Einzelwertungen („Boxen“) zusammengefasst: Insassenschutz, Fußgängerschutz, Kindersicherheit und Sicherheitsassistenz. Je „Box“ wird eine zusammenfassende Sicherheitsbewertung für das jeweilige Thema berechnet. Aussagekräftiger für den Verbraucher ist aber die Gesamtwertung des Fahrzeugs. Dafür wird anhand von Gewichtungskriterien zwischen den Teilergebnissen und durch Mindestpunktzahlen innerhalb der einzelnen Boxen eine Gesamtnote zwischen 0 und 5 Sternen berechnet, mit der Fahrzeughersteller gegebenenfalls auch werben dürfen.

Bei dem bisherigen Vorgehen zur Erstellung neuer Bewertungsbereiche hat Euro NCAP sowohl das Bewertungsverfahren spezifiziert als auch die Bewertung selbst durchgeführt. Der Fahrzeughersteller hat „lediglich“ eine technische Lösung angeboten, die dann – wenn sie bei Euro NCAP positiv bewertet wurde und das Bewertungsverfahren korrekt entwickelt war – auch einen Nutzen im realen Unfallgeschehen gezeigt hat.



| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Fußgänger | Ferne Seite | Nahe Seite | | |
| | Erwachsener | | | Kind |
| | 8 km/h | 5 km/h | | |
| | 50% | 25% | 75% | 50% |
| Pkw | 20 – 60 km/h | | | |

**Abb. 2.24** Testszenarien für Notbremssysteme zum Fußgängerschutz [51]

Durch das standardisierte Testverfahren können nur solche Sicherheitssysteme berücksichtigt werden, die bei der Standardisierung bereits bekannt sind. Euro NCAP hat daher für die Bewertung der Sicherheitswirkung von zunächst unbekannten Innovationen einen generischen Bewertungsprozess definiert, den sogenannten „Beyond NCAP"-Prozess.

Nach dem Beyond NCAP-Gedanken soll nun der Fahrzeughersteller nicht nur ein neues Sicherheitssystem entwickeln und auf den Markt bringen. Der Hersteller soll vielmehr auch wissenschaftlich abgesicherte Daten liefern, mit denen er den zu erwartenden Nutzen im realen Unfallgeschehen aufzeigt, sowie ein Testverfahren vorschlagen, mit dem das neue Sicherheitssystem geprüft und bewertet werden kann. Euro NCAP übernimmt in diesem Fall lediglich die Rolle, alle gelieferten Informationen zu verifizieren, um auf dieser Basis eine Bewertung durchzuführen.

### 2.2.4.2 Global NCAP und Verbraucherschutzprogramme in anderen Regionen der Welt

Im Rahmen der „Decade of Action for Road Safety 2011–2020" der Vereinten Nationen wurden fünf Themenbereiche zur Verbesserung der weltweiten Verkehrssicherheit identifiziert. In einem Bereich geht es darum, die Fahrzeugsicherheit zu verbessern. Aus diesem Anlass wurde 2011 Global NCAP als registrierte Wohltätigkeitsorganisation im Vereinten Königreich (UK) mit folgenden Zielen gegründet:

- Förderung und Durchführung von unabhängigen Forschungs- und Testprogrammen hinsichtlich der Sicherheits- und Umwelteigenschaften von Kraftfahrzeugen und Publikation der vergleichenden Ergebnisse und
- Förderung und Entwicklung von neuen Fahrzeug-Bewertungs-Programmen (NCAP) durch finanzielle und technische Unterstützung und durch Unterstützung von internationalen Kooperationen mit und zwischen den NCAPs.

Durch die Aktivitäten von Global NCAP entstand das Latin NCAP für die südamerikanische Region, das ASEAN NCAP für den süd-ost-asiatischen Raum mit Sitz in Malaysia und als jüngste Initiative das „BHARAT New Vehicle Safety Assessment Programme" (BNVSAP) in Indien. Alle diese neuen NCAP-Initiativen haben gemein, dass diese auf die technische Unterstützung von Euro NCAP und dessen Test- und Bewertungsmethoden zurückgreifen und ausgewählte Teile hiervon (manchmal in abgeschwächter Form) anwenden.

Bereits 1979 wurde in den USA von der amerikanischen Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA das weltweit erste New Car Assessment Programme ins Leben gerufen. 1995 wurde ebenfalls für die USA ein Verbraucher-Informationsprogramm der Versicherungswirtschaft durch das Insurance Insti-

tute for Highway Safety (IIHS) eingeführt. Dieses orientierte sich anfänglich noch an dem Frontal-Crashtest von Euro NCAP. Ebenfalls seit 1995 gibt es in Japan das J-NCAP. Bereits 1992 wurde in Australien das A-NCAP und 1999 in Korea das K-NCAP gegründet. In China folgte 2009 das C-NCAP. Die letztgenannten NCAP-Initiativen nutzen i. d. R. Test- und Bewertungsmethoden aus den USA oder Europa. Im Detail kann es jedoch zu Abweichungen bei den Tests und den Bewertungsmethoden zwischen den verschiedenen Programmen kommen. Eine globale Harmonisierung erscheint in den etablierten Bereichen der passiven Sicherheit sehr schwierig. Aufgrund der Tatsache, dass zunehmend Elemente der aktiven Sicherheit geprüft werden und Euro NCAP hier weltweit eine Vorreiterrolle einnimmt, besteht die Chance, dass sich zumindest in diesen neuen Bewertungsaspekten eine Harmonisierung einstellt.

## 2.2.5 Normen

### 2.2.5.1 Einleitung

Normung ist die planmäßige, gemeinschaftlich durchgeführte Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit. Sie beschreibt das technisch Mögliche, das wirtschaftlich Sinnvolle und das praktisch Erprobte. Die Normungsarbeit basiert auf Konsens und Transparenz. Technische Normen dokumentieren den Stand der Technik. Normung fördert Rationalisierung und Qualitätssicherung, darf aber nicht zu einem wirtschaftlichen Sondervorteil einzelner führen.

### 2.2.5.2 Nationale und internationale Struktur

Im Rahmen der historischen Entwicklung der Normungsarbeit haben sich für die Bereiche Elektrotechnik und Telekommunikation branchenspezifische Organisationen gebildet, während die verbleibenden Branchen, und dazu gehört auch die Automobilindustrie, weiter unter den allgemeinen Normungsorganisationen tätig werden. Diese Aufteilung gilt nicht nur für die europäische und internationale Ebene, sie gilt auch für Deutschland und die Mehrzahl der anderen hoch industrialisierten Ländern.

Die für die Normungsarbeit zuständige Institution in Deutschland ist das DIN – Deutsches Institut für Normung. Dies regelt ein mit der Bundesregierung seit 1975 bestehender Vertrag, der das DIN als nationale Normungsorganisation anerkennt und zur Berücksichtigung des öffentlichen Interesses verpflichtet. Die Vertretung Deutschlands in den europäischen und internationalen Normungsorganisationen erfolgt nach diesem Vertrag durch das DIN und nach dem Delegationsprinzip an die auf einzelne Fachbereiche spezialisierten Normenausschüsse.

Abb. 2.25 zeigt die auf nationaler und internationaler Ebene tätigen Normungsorganisationen für die jeweiligen Branchen.

### 2.2.5.3 Grundregeln der Normungsarbeit und Anwendung von Normen

Die Normung basiert auf Konsensfindung und orientiert sich dabei an den folgenden fairen Regeln:

- Die Erarbeitung erfolgt in fachbereichsorientierten Arbeitsgremien in denen alle interessierten Kreise (z. B. Hersteller, Anwender, Wissenschaft, Prüforganisationen) angemessen beteiligt werden.
- Jede Norm wird der Öffentlichkeit im Entwurf zur Stellungnahme vorgelegt, bevor sie Gültigkeit erlangt.
- Eine Norm spiegelt den aktuellen Stand der Technik unter Einbeziehung verfügbarer wissenschaftlicher Erkenntnisse wider.
- Normen sollten wirtschaftliche Gegebenheiten berücksichtigen, so dass Anwender und Nutzer nicht über Gebühr belastet werden.
- Eine Überprüfung in einem festen Rhythmus (maximal alle fünf Jahre) garantiert die Aktualität jeder Norm.

Normen werden durch eigenverantwortlich handelnde Experten erarbeitet und sind freiwillige Übereinkünfte. Die Normungsorganisationen achten auf die Einhaltung der Regeln und steuern und betreuen die Normungsarbeit in den Fachgremien. Eine Pflicht zur Anwendung besteht nicht, sofern




**Abb. 2.25** Struktur der Normungsorganisationen – national und international

ein Regelungsgeber die Erfüllung bestimmter Normen nicht ausdrücklich vorschreibt.

Der Verweis auf Normen durch nationale oder internationale Regelungsgebende Organe wird im Allgemeinen als „New Approach" bezeichnet. In der Automobilindustrie ist dieser Ansatz im Gegensatz zur Elektroindustrie jedoch bis auf wenige Ausnahmen nicht üblich.

Dennoch bieten die Normen dem Anwender eine Reihe von Vorteilen, so dass diese auch ohne gesetzliche Verpflichtung intensiv von der Wirtschaft genutzt werden:

- **Terminologienormen** verbessern die Effizienz der Kommunikation unter den Experten, schließen Missverständnisse aus und sind vor allem im internationalen Bereich unabdingbar.
- **Prüfnormen** ermöglichen eine vergleichende Bewertung von Produkten und damit eine signifikanten Reduzierung der Aufwendungen für das Beurteilungsverfahren.
- **Qualitäts- und Managementsystemnormen** sorgen für eine ausgewogene Qualität der Produkte und Angebote.
- **Maßnormen** leisten in der Serienfertigung einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Stückkosten.
- Zur Sicherstellung der Austauschbarkeit von Bauteilen und die Vernetzung von Komponenten verschiedener Hersteller sind **Schnittstellennormen** unabdingbar.

### 2.2.5.4 Erarbeitung einer Norm

Um dem Anspruch der Einbeziehung aller interessierten Kreise und der Anerkennung durch die Öffentlichkeit gerecht zu werden, erfolgt die Erarbeitung einer Norm nach strengen Regeln. Diese Regeln gelten sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene und werden von allen drei großen Branchenorganisationen gleichermaßen genutzt.

Abweichend von der in Abb. 2.26 gezeigten Verfahrensweise für die Erstellung einer Norm gibt es andere Veröffentlichungen (Spezifikationen, Berichte), die Wertigkeit einer Norm haben, aber als Vorabveröffentlichungen ggf. den Weg für eine spätere Norm bereiten. Zweck solcher Spezifikationen und Fachberichte ist vor allem die schnelle Besetzung eines Themas und eine sehr kurze Bearbeitungszeit, u. a. durch den Verzicht auf einen Vollkonsens.

### 2.2.5.5 Facharbeit in Normenausschüssen

Innerhalb der DIN-Gruppe wird die fachliche Normungsarbeit in mehr als 80 Normenausschüssen (NA), die die gesamte Bandbreite der möglicher

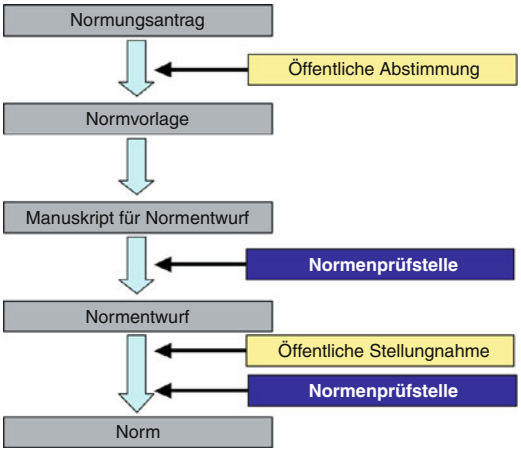



**Abb. 2.26** Prozess zur Erstellung einer Norm

Normungsaktivitäten abdecken, durchgeführt. Neben **branchenübergreifenden** NA, wie z. B.:

- NA Akustik, Lärmminderung und Schwingungstechnik,
- NA Materialprüfung,
- NA Mechanische Verbindungselemente,
- NA Schweißtechnik,
- NA Verpackungswesen

gibt es auch **branchenspezifische** NA, wie z. B.:

- NA Maschinenbau,
- NA Automobiltechnik,
- NA Kautschuktechnik,
- NA Bergbau,
- NA Schienenfahrzeugtechnik.

Die branchenspezifischen NA werden häufig direkt von den entsprechenden Fachverbänden getragen und sind oft auch dort als sogenannte externe NA angesiedelt.

### 2.2.5.6 Normung in der Automobiltechnik

Seit mehr als 85 Jahren betreut der *Normenausschuss Automobiltechnik* (*NA Automobil* vormals FAKRA) die Institutionen und Unternehmen der Automobilindustrie, um gemeinsam interessierende Themen der Normung zuzuführen. Der *NA Automobil* vertritt die nationalen und internationalen Normungsinteressen der Automobilindustrie, vorzugsweise für alle produktspezifischen Normungsthemen von Straßenfahrzeugen (ausgenommen Ackerschlepper sowie Spezialfahrzeuge wie Kommunal-, Feuerwehr- und Rettungsfahrzeuge). Darüber hinaus ist er zuständig für die Normung der multimodalen Transportbehälter wie Frachtcontainer und Wechselbehälter, sowie – gemeinsam mit der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE) – für Normung auf dem Gebiet der Straßenverkehrs-Telematik.

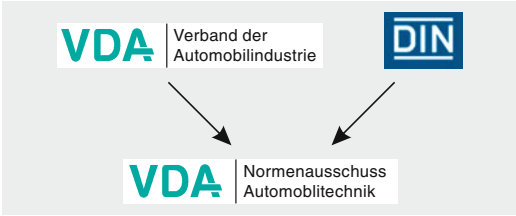



**Abb. 2.27** Träger der Automobilnormung

Der *NA Automobil* ist, wie aus Abb. 2.27 ersichtlich, organisatorisch, finanziell und personell dem Verband der Automobilindustrie (VDA) angegliedert. Die Normungsarbeiten werden nach den allgemeinen Grundsätzen des DIN durchgeführt, die geprägt sind durch klare, transparente Bearbeitungsschritte, Kompetenz und öffentliches Mitspracherecht.

Der *NA Automobil* vertritt das DIN auf internationaler Ebene der ISO (International Organization for Standardization) vor allem in den technischen Komitees:

- TC 22 Straßenfahrzeuge,
- TC 104 Frachtcontainer und
- TC 204 Straßenverkehrstelematik

sowie auf europäischer Ebene in CEN in den technischen Komitees:

- TC 119 Wechselbehälter,
- TC 278 Straßenverkehrstelematik und
- TC 301 Straßenfahrzeuge.

Der *NA Automobil* unterhält zur Zeit über 60 aktive Arbeitsgremien (Ausschüsse und Kreise) zu diversen Fachthemen. Die Mehrzahl dieser Gremien spiegeln internationale und europäische Arbeitsgruppen und Komitees. In den Gremien arbeiten vor allem Vertreter der Fahrzeughersteller, der

Anhänger- und Aufbautenhersteller und der Teile- und Zubehörindustrie. Neben diesen Experten nehmen Vertreter von Behörden, Prüforganisationen, Wissenschaftseinrichtungen und Verbrauchervertreter an der Normungsarbeit teil.

Im Zuge der Einführung der Elektromobilität ist eine enge Kooperation mit der Elektroindustrie unumgänglich. Auf nationaler Ebene wurden dabei zu wichtigen Schlüsselthemen der Sicherheit und der Schnittstelle zum Stromnetz gemeinsame Arbeitskreise gebildet. Je nach Arbeitsschwerpunkt liegt dabei die administrative Leitung entweder bei der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE), dem Normenausschuss für die Elektrotechnische Normung, oder beim *NA Automobil*. Auf internationaler Ebene garantiert ein entsprechendes Abkommen zwischen der ISO und der IEC (International Electrotechnical Commission) die Zusammenarbeit der beiden Branchen.

#### 2.2.5.7 Aufgaben des NA Automobil

Der *NA Automobil* erfüllt im Rahmen der Betreuung und der Organisation der Normungsarbeit im Wesentlichen die folgenden Aufgaben:

a) **bei neuen Themen:** Die Herbeiführung einer Entscheidung über die Annahme eines Projektvorschlages und die damit verbundene Beurteilung des Nutzens für einen größeren Anwenderkreis sowie der Vermeidung wirtschaftlicher Sondervorteile einzelner.
b) **bei laufenden Projekten:** Das Management des Normenprojektes verbunden mit der Konsensfindung und der Einhaltung der vorgegebenen Zeiträume. Dazu gehört die Durchführung der öffentlichen Umfragen, die Steuerung der Kommentierung sowie die Kommunikation mit der zuständigen Normungsorganisation bis hin zur Durchführung ggf. nötiger Einspruchsverhandlungen.
c) **bei der Bestandspflege:** Die regelmäßige Aktualitätsprüfung des gesamten Normenwerkes und die Einleitung ggf. notwendiger Überarbeitungen zur Sicherstellung des Standes der Technik.
d) **bei der internationalen Harmonisierung:** Die angemessene Vertretung der deutschen Interessen in den internationalen und europäischen Normungsgremien.

#### 2.2.5.8 Normungsfelder

Das Automobil ist ein Musterbeispiel für die Komplexität der Technik und damit auch der Normungsaufgaben. Nicht nur einfache grundlegende normative Festlegungen sind zu treffen, vielmehr gilt es die zunehmende Komplexität und Vernetzung der Komponenten und Systeme im Automobil durch entsprechende Normen zu flankieren.

Die zunehmende elektronische Vernetzung der elektrischen und elektronischen Systeme (E/E-Systeme) im Fahrzeug zur Steuerung der Sicherheits- und Komfortfunktionen (z. B. ABS, ESP, Klimatisierung, Diagnose) erfordert Normen für die fahrzeuginterne Datenkommunikation und die elektromagnetische Verträglichkeit. Der Ausbau der On-Board-Diagnose und die Einbeziehung der Verkehrstelematik verlangt nach Kommunikationsschnittstellen vom Fahrzeug zur Außenwelt und der straßenseitigen Kommunikationseinrichtungen. Ohne einen globalen Standard zur Funktionalen Sicherheit kann die komplexe Struktur der E/E-Systeme sicherheitstechnische und haftungsrelevant nicht mehr beherrscht werden.

Die Automobilindustrie setzt im Zuge der Nachhaltigkeit auf alternative Antriebskonzepte. Neben dem Einsatz von alternativen Kraftstoffen, wie Erdgas und Biokraftstoffe oder dem Einsatz von „*AdBlue*©“, in der Abgasnachbehandlung, wird der Antriebsstrang zunehmend elektrifiziert. Hierfür braucht es neben Schnittstellennormen für Komponenten, Normen zu Betankungssystemen oder zur Kontrolle der Qualität und Zusammensetzung der Kraftstoffe und Kraftstoffzusätze.

Nicht nur die Batteriesysteme zum Antrieb von elektrischen Fahrzeugen erfordern entsprechende Prüfnormen. Auch für die elektrischen und elektronischen Bestandteile dieser hoch komplexen Batteriesysteme bis hin zu modernen Lithium-Ionen Zellen für den automobilen Einsatz müssen Normen geschaffen werden. Parallel dazu wurden und werden Normen für zukunftsweisende Systeme, wie für Wasserstoff und Brennstoffzellen basierte Antriebe, erarbeitet.

Der Anschluss des Elektrofahrzeuges ans Stromnetz zum Aufladen der Antriebsbatterien ist ein typisches Schnittstellenthema. Die Herausforderung besteht hier nicht nur darin, hoch komplexe

und mobile Fahrzeugtechnik mit der stationären, in der Umstrukturierung hin zum SmartGrid befindlichen, Elektrotechnik zu verbinden. Während Fahrzeuge als internationale Produkte eine lange Tradition und eine entsprechend international ausgerichtete Normung haben, sind die Stromnetze noch oft national orientiert und unterliegen entsprechenden regional spezifischen Normen. Entsprechend komplex ist die Konsensfindung für den elektromechanischen Anschluss und die dazugehörige Kommunikation zur Steuerung des Ladeprozesses. Dazu kommt der historisch gewachsene unterschiedliche Ansatz bei der Normung. Während die elektrotechnische Normung nach dem „New Approach" Festlegungen bis hin zu produktspezifischen Details trifft, folgt die Normung in der Automobilindustrie vielfach direkten technischen Regelungen, die durch produktoffene Normen flankiert werden.

Zusätzlich zu dieser, im Zuge der Nachhaltigkeit nötigen, Normung rund um die alternativen Antriebskonzepte läuft die herkömmliche Normungsarbeit weiter. Dazu gehören Projekte zur mechanischen und elektronischen Anbindung von Kindersitzen in Personenkraftwagen, zu ergonomischen Festlegungen, zur Fahrdynamik und Fahrsituationen oder zur Dummytechnik.

Normen für „konventionelle" Fahrzeugteile und -systeme (wie z. B. für Zündausrüstung, elektrische Leitungen und Steckverbinder, Sicherungen, Beleuchtungseinrichtungen, hydraulische und pneumatische Leitungssysteme, Kraftstoffleitungen, Filter für Kraftstoff, Schmieröl und Luft (Verbrennungsluft und Insassenraum), Verbindungseinrichtungen für Anhängefahrzeuge, Diesel-Einspritzausrüstungsteile wie Pumpen und Düsen, Motorteile wie Kolbenringe und Kolbenbolzen) müssen nicht nur turnusmäßig auf Aktualität geprüft werden, sondern vielmehr oft auch an den aktuellen technischen Stand angepasst werden.

### 2.2.5.9 Nutzen der Normung

Die aktive Teilnahme an Normungs- und Standardisierungsvorhaben bietet zahlreiche Vorteile, da

- ein Wissens- und Zeitvorteil im Forschungs- und Entwicklungsprozess geschaffen wird,
- die Investitionssicherheit erhöht wird,
- Vertrauen und damit Marktakzeptanz für innovative Produkte und Dienstleistungen erzeugt wird,
- die Sicherheit zum Schutz von Menschen, Tieren und Sachen garantiert wird und
- das Innovationssystem stimuliert wird, da neue Lösungen am Markt immer honoriert werden.

Schließlich schafft Normung den gemeinschaftlichen Erfolg durch die Stärkung einer schnellen Diffusion von Innovationen im Markt, die nach Meinung verschiedener Experten wirksamer sein kann, als die durch Patente und Lizenzen.

Neben Arbeitserleichterung und Kosteneinsparung durch branchenübergreifende und branchenspezifische Normen schaffen Normen auch Wettbewerb. Durch klare Definition der Anforderungen an Komponenten und Schnittstellen, haben alle potentiellen Zulieferer eine Chance, mitzubieten. Der dadurch erzeugte Wettbewerbsdruck führt zu weiteren Kostensenkungen. Der Markt der Wertschöpfungspartner weitet sich damit aus, mit Chancen für alle Beteiligten.

Eine konkrete Bezifferung des gesamtwirtschaftlichen Nutzens der Normung ist jedoch schwierig und kann nur beispielhaft erfolgen. So wurde im Zusammenhang mit dem Trend zur „Just-in-time" Logistik im Jahre 1986 im VDA die Notwendigkeit für eine Behälterstandardisierung erkannt. Dies führte zu entsprechenden Normungsaktivitäten, die mit Veröffentlichung von Europäischen Normen für sogenannte Kleinladungsträger (DIN EN 13199) im Oktober 2000 ihren Abschluss fanden. Inzwischen sind rund 25 Millionen genormte Kleinladungsträger im Umlauf. Das entspricht einem Investitionsvolumen von etwa 125 Mio. EUR. Der wirtschaftliche Nutzen des Systems liegt primär in der Kostenreduzierung durch die Mehrfachverwendung. Die Mehrkosten für die stabil gebauten Transportkästen haben sich bereits nach etwa 6 bis 8 Umläufen amortisiert. Nach Erfahrungswerten können die Systemelemente mindestens 100 Umläufe unbeschadet überstehen. So gilt für die Kosteneinsparung ein Multiplikator von mindestens 90. Nicht berücksichtigt dabei ist die Einsparung des früheren Aufwandes für die Einwegverpackungen, die gesammelt, sortiert und entsorgt hätten werden müssen. Dieses Beispiel eines

einzelnen Normungsprojektes zeigt, dass Normung ein Schlüssel zur Rationalisierung ist.

## 2.3 Neue Technologien

Muss das Rad immer wieder neu erfunden werden?

Neue Technologien sind nur in Sonderfällen Selbstzweck. Manchmal sind sie ingenieurgetrieben („technology push"). Um letztlich erfolgreich zu sein, müssen sie vor allem kundengetrieben sein („market pull"). In einigen Fällen sind neue Technologien notwendig, wenn bestimmte Gesetze und Vorschriften (z. B. des Umweltschutzes) dies erfordern.

Es gibt also eine Reihe von Gründen zum Einsatz neuer Technologien (◘ Abb. 2.28). Konkrete Lösungen können meist mehreren der genannten Kategorien zugeordnet werden.

Die Technologievielfalt kann in mehrere Bereiche zusammengefasst werden (◘ Abb. 2.29).

Schon heute sind Mikroelektronik und Software an der gesamten Funktionserfüllung des Automobils in hohem Maße beteiligt. Zweck des weiter steigenden Einsatzes ist es, das Fahrzeug mit all seinen Systemen optimal an die jeweiligen Fahr- und Betriebssituationen sowie an die Wünsche der Insassen anzupassen. Darüber hinaus werden Telematiksysteme das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, der Infrastruktur und mit anderen Verkehrsträgern vernetzen, mit dem Ziel von mehr Sicherheit, Umweltschutz, Verkehrseffizienz und Komfort. Für all diese Aufgaben steht der gesamte Funktionsumfang der Elektronik (einschl. vernetzbarer Technologiebereiche) von der Informationsaufnahme bis zur selbstständigen Planung und Ausführung von Aktionen zur Verfügung, was als „technische Intelligenz" bezeichnet werden kann (◘ Abb. 2.30). Ein wichtiger Innovationstreiber ist hierbei das weite Gebiet der Sensorik.

Wesentliche Zielrichtungen der anderen in ◘ Abb. 2.29 genannten Kategorien sind, neben allen fahrzeugtechnischen Aspekten, grundsätzliche Verbesserungen hinsichtlich Ressourcenschonung, Umweltschutz, Wirtschaftlichkeit und damit Nachhaltigkeit des Automobils.

Nur ein Teil der vielfältigen Zielkonflikte des Automobils [54] lässt sich mit der geometrischen Auslegung des Gesamtkonzeptes, seinen Werkstoffen und mit den Mitteln der „Mechanik" lösen oder mildern. Wie aus ◘ Abb. 2.31 ersichtlich, tragen elektronische Systeme hier ganz wesentlich zur Lösung bei. Damit erhält auch die Software einen immer

- Verbesserung vorhandener Eigenschaften
- Erzielung bisher nicht möglicher Eigenschaften
- Bewältigung von Zielkonflikten
- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit
- Erreichung strategischer Ziele der Hersteller
- Verbesserung der Nachhaltigkeit des Automobils und des Straßenverkehrs
- ...

◘ **Abb. 2.28** Gründe für den Einsatz neuer Technologien

**Produkttechnologien**

- Mikroelektronik, Software, Mechatronik, Telematik
- Neue Werkstoffe, Oberflächen, Bauweisen
- Additive/alternative Energieträger und Antriebe
- ...

**Prozesstechnologien**

- Fertigungs- und Recyclingverfahren
- Verfahren des Produktentstehungsprozesses
- Qualitätssicherungsverfahren
- ...

◘ **Abb. 2.29** Bereiche neuer Technologien

**Möglicher Definitionsansatz:**

Eigenschaft eines technischen Systems, sich in seiner Umgebung so zu verhalten, dass einem Menschen bei entsprechendem Verhalten eine Intelligenzleistung zugesprochen würde, kann „technische Intelligenz" genannt werden (nach Turing).

**Merkmale:**

- Fähigkeit zur Informationsaufnahme, -Verarbeitung und -Umsetzung in situationsadäquates Verhalten
- Fähigkeit zum Abspeichern von Informationen im „Gedächtnis", Wiederauffinden, Ableiten von Führungsgrößen
- Fähigkeit zum dynamischen Lernen bezüglich wechselnder System- und Umfeld-Zustände
- Fähigkeit, bei wechselnden System- oder Umfeld-Zuständen eigenständig nützliche Entscheidungen zu treffen
- und in Zukunft:
  Fähigkeit zur selbsttätigen Planung von Aktionen aufgrund von Erfahrungen und Frühindikationen von System- oder Umfeld-Änderungen
- Dazu gehört auch:
  Mit zunehmender Reife der Intelligenz zunehmende Kommunikationsfähigkeit zwischen Systemen und zwischen Mensch und Systemen

◘ **Abb. 2.30** Intelligenz technischer Systeme – Eine langfristige Entwicklungsrichtung

höheren Stellenwert, die zudem in steigenden Maße den Charakter eines Fahrzeugs prägt [58]. Die Mechanik darf dabei aber nicht vergessen werden: Als Beispiel sei das ins Schwungrad integrierte Fliehkraftpendel genannt, mit dessen Hilfe das Fahren mit sehr niedrigen Motordrehzahlen beherrschbar ist.

Neue Technologien kommen nicht nur für Produkte (einschl. neuer Design-Konzepte), deren Herstellung, Wartung/Reparatur und Recycling, sondern auch für den Produktentstehungsprozess (Entwicklung bis zur Nullserie) in Frage.

Die zugehörige Gesamtthematik beginnt mit der systematischen Erkennung und Umsetzung der zielkonfliktbehafteten Anforderungen. Deren Erfüllung setzt inzwischen fast alle Technologie-Bereiche voraus, mit der Konsequenz rasant steigender Systemkomplexität der Fahrzeuge. Deren Beherrschung wiederum erfordert u. a. Baukästen und Modulkonzepte sowie eine Fülle sich ergänzender und computergestützter Produktentstehungsverfahren, die von der Findung der Grundkonzepte bis hin zum Kundendienst und Recycling reichen. Eine nächste Kategorie betrifft die heute zumeist weltumspannende Wertschöpfungsketten-Komplexität, mit vielen System- und Komponentenlieferanten an allen Produktionsstätten samt zugehörigen Logistiksystemen. Zu all diesen (und weiteren) Komplexitätsdimensionen müssen Produktinnovationen kompatibel sein, wobei oftmals zusätzlich Prozessinnovationen erforderlich sind [73, 74].

Das führt zu weiteren Gründen für neue Technologien wie:

- Reduzierung der Komplexität,
- Erhöhung der Flexibilität,
- Verringerung des Bauraumbedarfs,
- Multifunktionalität, Bauteilintegration,
- Vermeidung von Problemwerkstoffen,
- Einsatz nachwachsender Rohstoffe.

Bei der Umsetzung solcher Ziele können jedoch neue Zielkonflikte entstehen.

Aus all dem folgt, dass schon in frühen Entwicklungsphasen entschieden werden muss, welche neuen Technologien in welchen Bereichen eingesetzt werden sollen und geklärt werden muss, ob in Fällen des Nicht-Erreichens wichtiger Entwicklungs-Meilensteine Ersatzlösungen vorhanden sind. Besonders sorgfältig ist dann vorzugehen, wenn eine Basistechnologie durch eine andere ersetzt werden soll: Der Einsatz der Brennstoffzelle statt des Verbrennungsmotors wird das gesamte Antriebssystem einschl. aller Nebenaggregate fast vollständig verändern. Somit muss die Vorentwicklung den ersten wichtigen Meilenstein, die Konzeptsicherheit, bestätigen, bevor mit der Serienentwicklung begonnen werden kann. Mit dem ersten serienfähigen Prototyp (Meilenstein „Produktsicherheit“) kann die Fertigungsplanung „in die Vollen gehen“, bis mit der Prozesssicherheit der Beginn der Serienfertigung festgelegt werden kann.




**Abb. 2.31** Grundsätze zur Bewältigung fahrzeugtechnischer Zielkonflikte

Nicht alle Konzepte, geschweige denn Ideen und Ansätze für neue Technologien können zum Erfolg führen. Abb. 2.32 zeigt am Beispiel des früheren Forschungsprogramms PROMETHEUS [60], dass alle Vorschläge verschiedene „Filter“ zu durchlau-




**Abb. 2.32** Von der PROMETHEUS-Idee zur konkreten Umsetzung

fen haben, und dass am Ende nur ein Teil der Ansätze in die Praxis umgesetzt werden kann.

Manchmal dauerte es Jahrzehnte, bis sich neue Technologien nach einem zunächst schwachen Ersteinsatz auf breiter Front durchsetzen konnten. Hin und wieder gelang dies aber auch in relativ kurzer Zeit, wie das aktuelle Beispiel der Fahrstabilitätssysteme zeigt. So manche Innovationen wurden bald wieder verlassen, manchmal später wieder aufgenommen.

Neue Technologien sollten erst dann eingesetzt werden, wenn alle kritischen Pfade der gesamten Prozesskette des Lebenszyklus eines Automobils beherrscht werden. Damit sprechen Forderungen nach Zuverlässigkeit und Langzeitqualität, häufig auch nach Wirtschaftlichkeit, nicht selten zunächst gegen Neuerungen. Möglichkeiten, sie dennoch einzuführen, bestehen z. B. im beschränkten Ersteinsatz (wie bei Nischenmodellen, für die besondere Maßnahmen getroffen werden können), oder in der anfänglichen Beschränkung auf spezielle Kunden oder Märkte. Hierzu gehören Hybrid- und Elektroautos. Bei aller Würdigung der Potentiale neuer Technologien dürfen jedoch deren Grenzen nicht unerwähnt bleiben:

- Die physikalischen und chemischen Grundgesetze können auch durch noch so intelligente Werkstoffe und noch so raffinierte Regelsysteme nicht übersprungen werden.
- Geometrische Zielkonflikte können nur teilweise mit anderen Konstruktionsprinzipien gelöst werden. Weil die „negative Wandstärke“ wohl auf Dauer Traum bleiben wird, kann es ein Auto „innen größer als außen“ nicht geben.
- Neue Technologien müssen kompatibel sein. Das gilt sowohl auf der Komponenten- und Systemebene im Fahrzeug als auch bei der Integration des Fahrzeugs in das Verkehrssystem.

Bei Technologie- und Produktentscheidungen müssen zu den klassischen Kriterien zusätzlich Rohstoffverfügbarkeiten, Energieaufwendungen „von der Wiege bis zur Bahre“, Herstell- und Recyclingverfahren sowie alle zur Ökobilanzierung gehörenden Wirkungen und Prozessketten, also ganzheitliche Bilanzen im gesamten Life Cycle berücksichtigt werden [72].

Da zudem mit steigender Komplexität der Technik grundsätzlich die Entwicklungszeiten, meist auch die Kosten, ansteigen, ist das „Genial-Einfache“ anzustreben, das letztlich ein besonders günstiges Nutzen-Aufwand-Verhältnis aufweist, und damit hohe Wahrscheinlichkeit der Marktakzeptanz besitzt.

## Literatur

**Literatur zu Abschnitt 2.1**

1. Ford: Automotive Zeitgeiststudie 2.0, 2014
2. ACATECH: Mobilität 2020. Fraunhofer IRB Verlag
3. Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/171605/umfrage/wichtige-kriterien-beim-autokauf/
4. Mercedes Daimler AG: Smart 2015
5. Mercedes Daimler AG, Maybach 2015
6. Braess, H.-H., et al.: 25 Jahre ESV-Entwicklung, Chancen und Risiken von regierungsseitigen vorgegebenen Zielen, Proceedings ESV-Conference, Amsterdam 2001
7. Proceedings IRCOBI International Conference on the Biomechanics of Impact. München, 18.–20. September 2002
8. Seiffert, U.: Möglichkeiten und Grenzen der Erhöhung der Sicherheit im Kfz. ÖVK II/97. Technische Universität Wien (1997)
9. Bundesministerium für Verkehr: Verkehr in Zahlen 2013/2014. Deutscher Verkehrs-Verlag
10. Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
11. Wiedemann, J.: Institut für Verbrennungsmotoren. Universität Stuttgart (2002)
12. Schreiber, W., et al.: Das neue Doppelkupplungsgetriebe. Volkswagen. ATZ **11**, (2003)
13. Volkswagen AG
14. Leohold, J.: Mehr Fahrspass, weniger Emission-Hybridisierung bei Volkswagen, Vortag ETH-Zürich 20.11.2014
15. Lösche-ter Horst, T. et al.: Analyzing the life cycle carbon emissions of powertrains and fuels: making environmental performance measurable and plannable, 12: Symposium Hybrid und Electric Vehicles, ITS-Niedersachsen 2015, ISBN 978-3-937655-35-2
16. Toyota: Pressemitteilung 2015
17. Reitzle, W.: Das Automobil: Zukunft durch Innovation und Faszination. ATZ/MTZ Sonderheft Geschichte und Zukunft des Automobils (1998) und eigene Daten
18. Prasser, J.: Intelligent Operating Strategy of BMW Plugin-Hybrid Vehicles, 12. Symposium Hybrid- und Electric Vehicles, ITS-Niedersachsen 2015, ISBN 978-3-937655-35-2
19. Verband der Automobilindustrie e.V.: Auto 2006. Jahresbericht, Frankfurt am Main (2006)
20. Schäper, S.: Unerwünschte Nebeneffekte der EU-Altautorichtlinie auf ökologische Fahrzeugkonzepte. VDI-Bericht, Bd. 1653. Düsseldorf (2001)

**Allgemeine Literatur zu Abschnitt 2.1**

21. von Fersen, O.: Ein Jahrhundert Automobiltechnik. Personenwagen. VDI-Verlag, Düsseldorf (1986)
22. ATZ/MTZ Sonderheft „Geschichte und Zukunft des Automobils“, (1998)
23. ATZ/MTZ: Jahresbände. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
24. VDI-FVT: 100 Jahre aktiv für die Mobilität. ATZ Sonderheft März 2004 D58922, (2004)

**Literatur zu Abschnitt 2.2**

25. http://www.now-gmbh.de
26. http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020
27. http://www.assess-project.eu
28. http://www.aspecss-project.eu
29. „Straßenverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 28. August 2013 (BGBl. I S. 3313) geändert worden ist“, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
30. Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr (Fahrzeug-Zulassungsverordnung – FZV): „Fahrzeug-Zulassungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 139), die zuletzt durch Artikel 1 u. 2 der Verordnung vom 8. Oktober 2013 (BGBl. I S. 3772) geändert worden ist“, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
31. „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die durch Artikel 7 der Verordnung vom 16. April 2014 (BGBl. I S. 348) geändert worden ist“, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
32. Verordnung über die EG-Genehmigung für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger sowie für Systeme, Bauteile und selbstständige technische Einheiten für diese Fahrzeuge (EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung – EG-FGV): „EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 126), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 19. Oktober 2012 (BGBl. I S. 2232) geändert worden ist“, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
33. „Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge“, Amtsblatt der Europäischen Union, L 263 vom 9. Oktober 2007
34. Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union, L 60/52 vom 2. März 2013
35. Verordnung (EU) Nr. 167/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Februar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union, L 60/1 vom 2. März 2013
36. Anlage XXIX zu § 20 Absatz 3a Satz 4 StVZO: EG-Fahrzeugklassen, BGBl. I 2012, 931–935
37. Directive 2014/45/EU of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 on periodic roadworthiness tests for motor vehicles and their trailers and repealing Directive 2009/40/EC, Official Journal of the European Union, L127/51, 29. April 2014

38. http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm
39. Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit, Amtsblatt der Europäischen Union, L 200/1 vom 31. Juli 2009
40. R. Sferco, Y. Page, J.-Y. Le Coz, P. A. Fay: „Potential effectiveness of electronic stability programs (ESP): what European field studies tell us", Paper Number 2001-S2-O-327, in: Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Amsterdam, June 2001
41. J. Gail, M. Pöppel-Decker, M. Lorig, A. Eggers, M. Lerner, U. Ellmers: „Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen", Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F70, Bergisch Gladbach, Dezember 2008
42. J. Funke, H. Winner: „Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit", Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F46, Bergisch Gladbach, Februar 2004
43. H. Baum, U. Westerkamp, T. Geißler: „Nutzen-Kosten-Analyse für ABS bei Motorrädern" Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F68, Bergisch Gladbach, Juli 2008
44. Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG, Amtsblatt der Europäischen Union, L 188/1 vom 18.07.2009
45. Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Union, L 171/1 vom 29.6.2007
46. Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der $CO_2$-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/1 vom 5.6.2009
47. Verordnung (EU) Nr. 510/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der $CO_2$ -Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Amtsblatt der Europäischen Union L 145/1 vom 31.5.2011
48. UNECE GTR No. 15 – Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (ECE/TRANS/180/Add.15) http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob_registry.html
49. ADAC Pressemitteilung: „Fahrerassistenzsysteme im ADAC Test: Aktiver Fußgängerschutz kann Leben retten/Erkennungs- und Notbremsfunktion bei Volvo und Lexus überzeugen", 14.11.2013
50. Euro NCAP: Assessment Protocol – Adult Occupant Protection, Version 6.0. July 2013, S. 30. Download unter http://www.euroncap.com/files/Euro-NCAP-Assessment-Protocol---AOP---v6.0---0-6da8ddb2-ac3e-4115-927d-180de4eb8d18.pdf.
51. Thatcham et al.: AEB Test Procedures, November 2011, Download unter http://www.trafikverket.se/contentassets/6382e9eb37da4733a2fbed12cbeb47db/bilaga_2_aeb_test_procedures_nov11.pdf


**Literatur zu Abschnitt 2.3**


52. Seiffert, U.: The Automobile in the Next Century, Paper K 0011. FISITA-Kongress, Prag, 1996
53. Mehrere Autoren: Geschichte und Zukunft des Automobils. ATZ Sonderheft „100 Jahre ATZ" (1998)
54. Eiletz, R.: Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte am Beispiel Pkw-Entwicklung. Diss., TU München (1999)
55. Mehrere Autoren: Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert. Automobiltechnik, VDI-Ber. 1653 (2001)
56. Mehrere Autoren: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Ber. 1653 (2001) und VDI-Ber. 1789 (2003)
57. Indra, F.: Intelligent simplicity – Follow up. Fort.-Ber., VDI Reihe 12, Nr. 490, Bd. 1, S. 1–22 (2002)
58. Dais, S.: Hardware oder Software: Wer bestimmt Funktion und Charakter eines Fahrzeugs? 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Berichtbd., S. 29–33 (2002)
59. VDA Techn. Kongresse 2001 bis 2013
60. Braess, H.-H.: Das intelligente Auto auf der intelligenten Straße – Was hat PROMETHEUS gebracht? 5. Int. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Tagungsbericht S. 608–627 (2003)
61. Mehrere Autoren: 100 Jahre Fahrzeugtechnik im VDI. ATZ Sonderausgabe (2004)
62. Mehrere Autoren: Innovationsmotor Automobilindustrie. VDA-Forschungstag. FAT Schrift 183 (2004)
63. Mehrere Autoren: Fahrzeugelektronik im Fokus. VDI-Ber. 1866 (2004), 1957 (2006), 2000 (2007), 2075 (2009), 2172 (2012)
64. Mehrere Autoren: 50 Jahre mot. Heft 1 + 2 (2005)
65. Mehrere Autoren: Innovative Fahrzeuggetriebe. VDI-Ber. 2030 (2008), 2158 (2012)
66. Werkstoffe im Automobil. ATZ extra (Januar 2007)
67. Mehrere Autoren: Jahrbücher VDI FVT, Innovationen im Fahrzeug und Verkehr. ATZ extra (2008, 2009, 2010, 2011, 2012)
68. Mehrere Autoren: Kunststoffe im Automobilbau 2002 bis 2013. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik

69. Winner, H., et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2012)
70. Mehrere Autoren: Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit. VDI-Ber. 2104 (2010), 2166 (2012)
71. Mehrere Autoren: Elektrisches fahren machbar machen. VDI-Ber. 2098 (2010)
72. Klöpffer, W., Grahl, B.: Ökobilanz (LCA), ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley (2009)
73. Braess, H.-H.: „Komplexität im Automobilbau“ ATZ 07-08/2015, S. 98 sowie zugehöriges Forum der Meinungen (ATZ 09/2015, S. 8–13)
74. ATZelektronik 07/2015 (mehrere Beiträge zur Komplexitätsbeherrschung)

# Fahrzeugphysik

*Dr.-Ing. Mihiar Ayoubi, Dr. Andreas Eilemann, Dr.-Ing. Heinz Mankau, Dr. Eberhard Pantow, Dr.-Ing. Carsten Repmann, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert, Dr. Markus Wawzyniak und Dr. Achim Wiebelt*

3.1 **Grundlagen – 58**

3.2 **Aerodynamik – 63**

3.3 **Wärmetechnik – 75**

3.4 **Akustik und Schwingungen – 93**

**Literatur – 127**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_3

## 3.1 Grundlagen

3

Die Fahrzeugphysik stellt die Vernetzung von physikalisch-technischen Aufgaben an den Fahrzeugentwickler dar.

Beispielhaft zeigt ◘ Abb. 3.1 die Anforderungen an die Karosserie, d. h. bauteilbezogen [1] und ◘ Abb. 3.2 die funktionsbezogene Vernetzung unterschiedlicher Anforderungen an das Gesamtfahrzeug und für die einzelnen Subsysteme [2]. Die physikalischen Grundgesetze und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Teilgebiete sind bei der Auslegung des Fahrzeuges besonders zu berücksichtigen. Analog gilt dies auch für Fahrzeuge mit reinem Elektromotor (Batterie oder Brennstoffzelle).

Ein sehr aktuelles Beispiel ist der Verbrauch an elektrischer Energie „on board" des Fahrzeuges. Er kann eine Größenordnung von einem Äquivalent von bis zu 3 l/100 km annehmen. Die Fahrzeugphysik erfordert die vernetzte Betrachtung aller Anforderungen innerhalb des Produktentstehungsprozesses. Dies gilt verstärkt für die elektrisch/elektronischen Komponenten, wo neue Hard- und Softwarestrukturen nach dem Motto, 1+1+Vernetzung ist leistungsfähiger als 2, im Bordnetz einsetzen müssen. Nicht die Optimierung einer einzelnen Eigenschaft oder Größe, sondern die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems entscheidet über den Produkterfolg.

### 3.1.1 Definitionen

Obwohl in den einzelnen Kapiteln spezielle Definitionen erläutert werden, wird im Folgenden eine Gesamtübersicht gegeben.

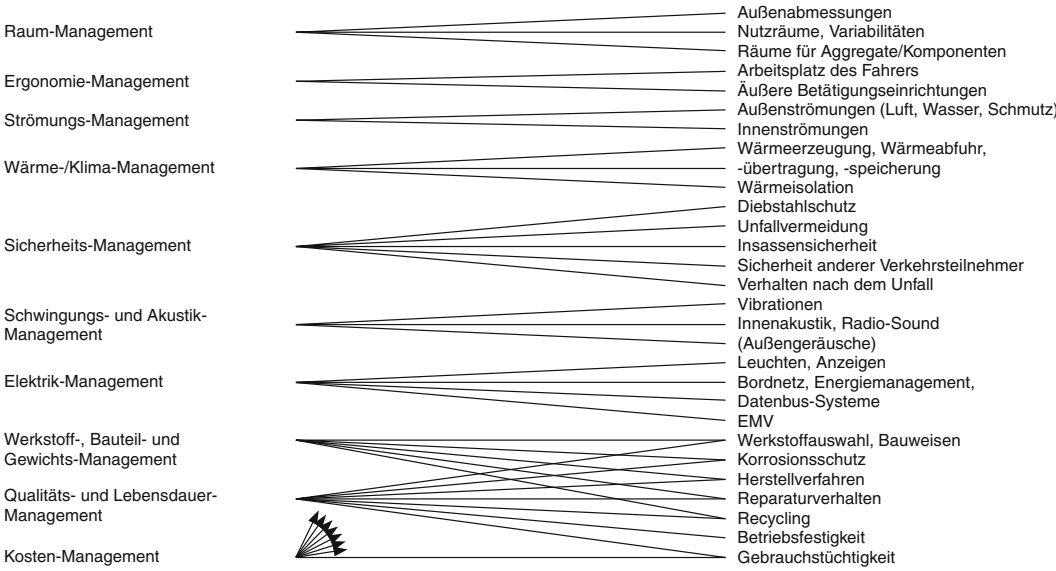
Die Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft [3, 4] definieren die verschiedenen Fahrzeugklassen. Allgemein wird unterteilt in

- Straßenfahrzeuge,
- mit Anhängefahrzeugen (nicht selbstfahrend),
- als Fahrzeugkombination.

Innerhalb der Gruppen gibt es beispielhaft folgende Unterteilung:

Straßenfahrzeuge mit der Untergruppe Kraftfahrzeuge – hierzu gehören:

- Krafträder (einspuriges mit 2 Rädern), z. B. Motorrad, Motorroller mit Hilfsmotor,
- Kraftwagen (mehrspuriges Kfz). Hier unterscheidet man in Personenkraftwagen (Pkw) und Nutzkraftwagen (Nkw).




◘ **Abb. 3.1** Physikalisch-technische Aufgaben der Fahrzeugentwicklung am Beispiel der Karosserie [1]

| Komponenten, wichtige Auslegungsparameter / Anforderungen; Teildisziplinen der Fahrzeugphysik | Karosserie | | | | | | | Antrieb | | | | Fahrwerk | | | | | | Fahrzeugübergreifende Subsysteme | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Rohkarosserie-Struktur | Rohkarosserie-Begrenzungsflächen | Kühllufteintrittsfläche | Bremsenbelüftungseintrittsfläche | Heizung, Lüftung, Klimaanlage | Karosserie-Ausstattung | Schallisolierung | Motor | Nebenaggregate | Getriebe | Kraftübertragung | Vorderachse | Lenksystem | Hinterachse | Federungssystem | Bremssystem | Räder, Reifen | Motorraum | Geräuschkapsel | Abgasanlage | Kühlsystem | Aggregatlagerung | Kraftstoffsystem*) | Fahrzeugelektrik | Zentralhydraulik |
| **Aerodynamik** | X | XX | XX | X | X | X**) | | XX | X | X | | X | | X | | X | X | X | X | X | XX | | | | |
| **Wärmetechnik** | | XX | XX | XX | X | X | | XX | XX | X | | X | X | X | | XX | X | XX | XX | XX | XX | X | XX | XX | X |
| **Kraftstoffabhängige Faktoren** | | | | | | | | XX | | | | | | | | | | X | | X | | | XX | | |
| **Außengeräusche** | | | X | | | | | XX | XX | XX | XX | | | | | X | XX | | XX | XX | X | XX | X Pumpe | | X Pumpe |
| **Innengeräusche** | XX | XX | | | XX | X | XX | XX | XX | XX | XX | XX | X | XX | XX | | XX | XX | XX | XX | X | XX | X Pumpe | X | X |
| **Schwingungstechnik** | XX | XX | | | | X | X | XX | X | X | X | XX | XX | XX | XX | XX | XX | | | XX | | XX | | XX | |

XX starke Vernetzung
X schwache Vernetzung

**) äußere Teile

*) Zum Kraftstoffsystem gehören insbesondere:
- Tank, Einfüllstutzen
- Kraftstoffpumpen
- Aktivkohlebehälter
- On board-System (Betankungsemission)
- Rollover-Ventil

**Abb. 3.2** Fahrzeugphysik als Vernetzung von Funktionen mit Systemen, Aggregaten und Bauteilen [2]

Zu den Personenkraftwagen zählen Fahrzeuge, die max. 9 Personen befördern können, Limousine, Coupé, Kabriolett, Kombi, Nkw-Kombi, spezielle Pkw's wie Wohnmobile und Multipurpose-Fahrzeuge (MPV), SUV Sport Utility Vehicle sowie Geländewagen. Zu den Nutzfahrzeugen gehören Fahrzeuge für den Transport von Personen und vorrangig Gütern, z. B. der Kraftomnibus (mehr als 9 Personen inkl. Gepäck), Kleinbus (max. 17 Personen), Linienbus, Überlandbus, Reisebus, Gelenkbus und Spezialbusse. Zu den Lastkraftwagen (Lkw), die für den Transport von Gütern vorgesehen sind, gehören der Vielzweck-Lkw für alle Transportaufgaben und der Spezial-Lkw.

Zu den Zugmaschinen, die dem Ziehen von Anhängern oder Geräten dienen, gehören die Anhänger- und Sattelzugmaschine und der Traktor.

Anhängerfahrzeuge beinhalten die Starr- und Gelenkdeichselanhänger. Die Fahrzeugkombinationen sind alle Zugfahrzeuge, Pkw und Nkw mit Anhänger.

Die Klasseneinteilung selbst unterscheidet in Klasse L, M, N und O.

**L** – sind Kraftfahrzeuge mit weniger als 4 Rädern,

**M** – sind Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung mit mindestens 3 oder 4 Rädern mit einem Gesamtgewicht > 1 t

$M_1$ $\leq$ 9 Personen,
$M_2$ > 9 Personen, < 5 t Gesamtgewicht,
$M_3$ > 9 Personen, > 5 t Gesamtgewicht,

**N** – sind Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung mit mindestens 3 oder 4 Rädern mit einem Gesamtgewicht > 1 t
$N_1$ $\leq$ 3,5 t Gesamtgewicht,
$N_2$ > 3,5 t $\leq$ 12 t Gesamtgewicht,
$N_3$ > 12 t Gesamtgewicht,

**O** – bedeutet Anhänger oder Sattelhänger
$O_1$ einachsige Anhänger $\leq$ 0,75 t Gesamtgewicht,
$O_2$ > 0,75 t $\leq$ 3,5 t Gesamtgewicht,
$O_3$ > 3,5 t $\leq$ 10 t Gesamtgewicht,
$O_4$ > 10 t Gesamtgewicht.

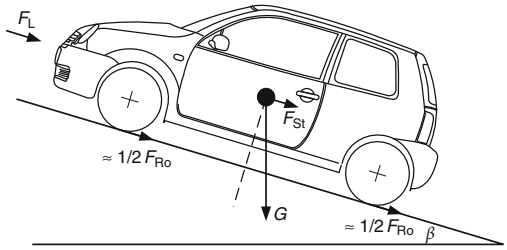
## 3.1.2 Fahrwiderstand und Antrieb

### 3.1.2.1 Gesamtwiderstand

Der Gesamtfahrwiderstand (Abb. 3.3) wird wie folgt berechnet:

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{St}$$

Die Fahrwiderstandsleistung entspricht $P_W = F_W \cdot v$.




$F_W$ = Fahrwiderstand
$F_{Ro}$ = Rollwiderstand
$F_L$ = Luftwiderstand
$F_{St}$ = Steigungswiderstand
$P_W$ = Fahrwiderstandsleistung
$v$ = Fahrgeschwindigkeit
$f$ = Rollwiderstandsbeiwert
$g$ = Erdbeschleunigung
$m$ = Fahrzeugmasse

**Abb. 3.3** Gesamtfahrwiderstand

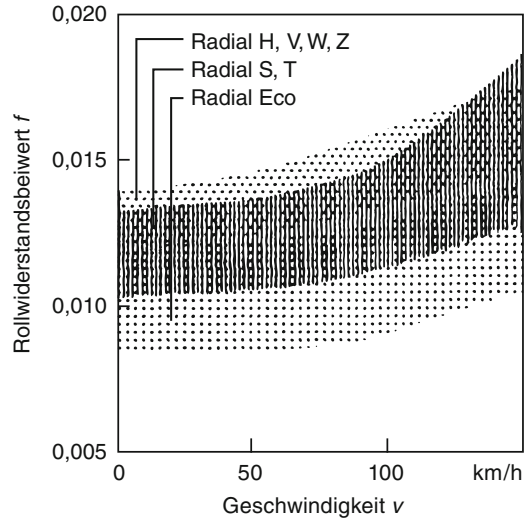



**Abb. 3.4** Rollwiderstand als Funktion der Fahrgeschwindigkeit [3]

### 3.1.2.2 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand entsteht aus der Formänderungsarbeit zwischen Reifen und Fahrbahn:

$$F_{\mathrm{Ro}} = f \cdot G = f \cdot m \cdot g$$

Nur im Gelände spielt der Verformungswiderstand des Untergrunds eine Rolle, er kann bei weichem Boden mehr als 15 % des Fahrzeuggewichts betragen.

Auf befestigten Straßen ergibt sich der Rollwiderstand fast ausschließlich aus der Walkverlustarbeit des Reifens. Bestimmend sind die Walkamplitude (Einfederung, Radlast, Reifeninnendruck) und Walkfrequenz (Fahrgeschwindigkeit). Reibung im Antriebsstrang erhöht den Rollwiderstand. Neue rollwiderstandsarme Reifen erreichen im unteren Geschwindigkeitsbereich Werte von 0,008. Bei 150 km/h werden Werte von 0,017 erreicht. Abb. 3.4 zeigt die Abhängigkeit des Rollwiderstandes als Funktion der Fahrgeschwindigkeit. Da der $F_{\mathrm{Ro}}$ in Radlängsachse definiert ist, ist er vom Fahrwiderstand aus der Seitenkraft (Vorspurwiderstand) zu unterscheiden. Bei Kurvenfahrt nimmt mit steigenden Schräglaufwinkeln auch der Rollwiderstand zu (Kurvenwiderstand [5]).

### 3.1.2.3 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand $F_{\mathrm{L}}$ wird nach folgender Formel berechnet:

$$F_{\mathrm{L}} = c_W A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

$\rho$ Luftdichte
$v$ Anströmgeschwindigkeit
$A$ Querschnittsfläche
$c_W$ Luftwiderstandsbeiwert

Die Luftwiderstandsbeiwerte betragen beim Pkw $c_W = 0{,}25$ bis 0,4. Beim Lkw $c_W = 0{,}4$ bis 0,9, die Querschnittsfläche $A$ beim Pkw 1,5 bis 2,5 $\mathrm{m}^2$ und beim Lkw 4 bis 9 $\mathrm{m}^2$. Der Luftwiderstand entsteht durch die Umströmung und Durchströmung des Fahrzeugs. Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit konnte er in den letzten Jahrzehnten deutlich reduziert werden. Bei höheren Geschwindigkeiten bestimmt der Luftwiderstand den Fahrwiderstand und ist damit die dominierende Größe für den Kraftstoffverbrauch. Bei Schräganströmung unter einen Winkel $e$ zur Fahrzeuglängsachse ändern sich die Widerstandswerte $c_T(e)$. Mit derselben Querschnittsfläche und einer schrägen Anströmgeschwindigkeit $v_{\mathrm{A}}$ gibt dann:

$$F_{\mathrm{L}} = c_T \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} v_{\mathrm{A}}^2$$

Die Luftwiderstandsleistung $P_{\mathrm{L}}$ beträgt:

$$P_{\mathrm{L}} = F_{\mathrm{L}} \cdot v$$

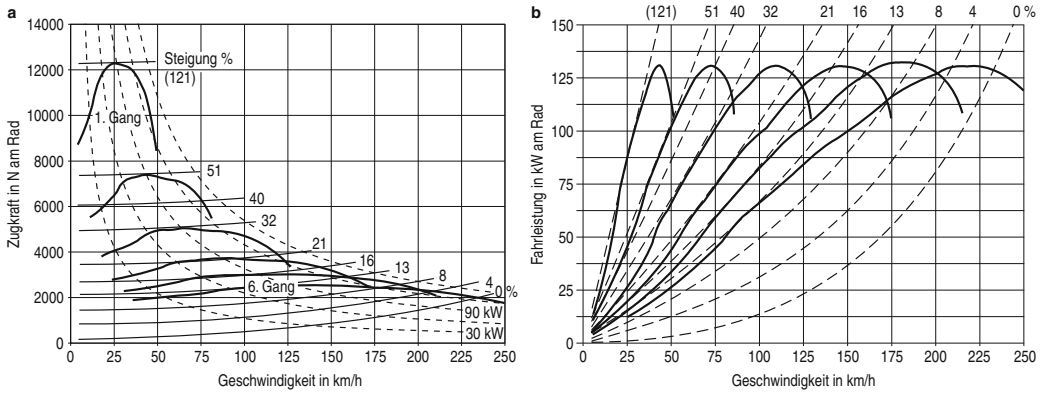



**Abb. 3.5** Zugkraft- und Fahrleistungsdiagramm (Quelle ZF)

### 3.1.2.4 Antriebswiderstand

Der Antriebswiderstand beträgt $F_A = (1-\eta)P/v$, er beinhaltet die mechanischen Verluste vom Motor über Getriebe bis zu den Radnaben ($\eta = \eta_1\eta_2\eta_3 \ldots \eta_n$) mit $P$ als Leistung und $v \approx$ der Fahrgeschwindigkeit.

### 3.1.2.5 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand $F_{st} = m \cdot g \sin\beta$ mit der Masse $m$, die Steigungsleistung beträgt:

$$P_{st} = F_{st} \cdot v$$

### 3.1.2.6 Beschleunigungswiderstand

$F_B = m_{red} dv/dt$. Bei Vernachlässigung der rotierenden Bauteile mit kleineren Trägheitsmomenten an Wellen und im Getriebe sowie mit dem Ansatz konstanter Rotationsenergie ($J \cdot w^2 = \text{const}$) ist:

$$m_{red} = m + \frac{J_R + i^2 J_m}{r_{stat} \cdot r_{dyn}}$$

mit $J_R$, $J_M$ den Massenträgsheitsmomenten der Räder und des Motors, $i$ der Übersetzung, $r_{stat}$, $r_{dyn}$ den Reifenhalbmessern (statisch und dynamisch).

### 3.1.2.7 Zugkraftausnutzung

Bei gegebener Zugkraft $F_x$ an den Rädern ergibt sich für die Beschleunigung und Steigung

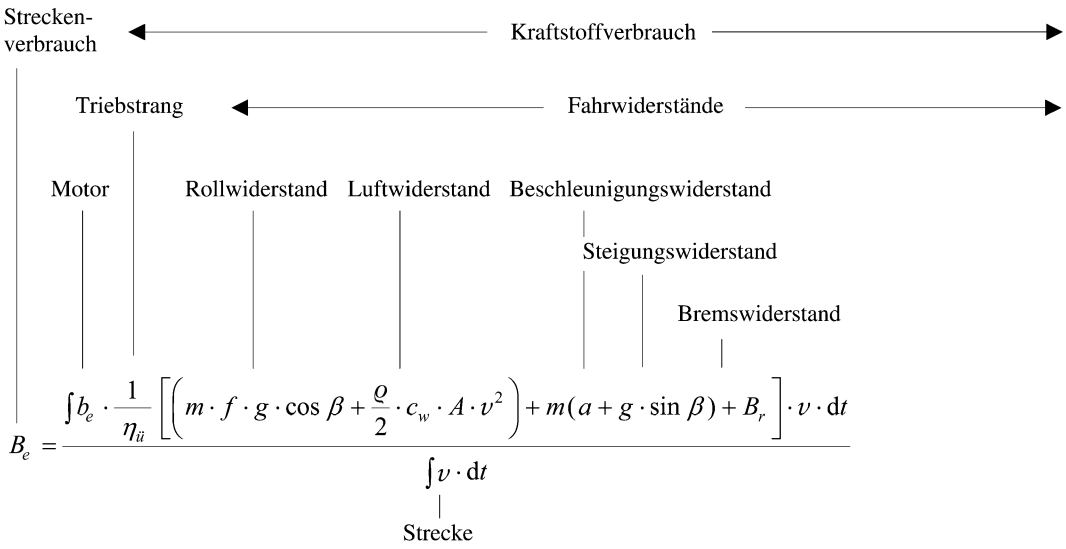
$$F_B + F_{St} = F_x - (F_R + F_L)$$

### 3.1.2.8 Zugkraftdiagramm

Aus dem Motorkennfeld $M(n)$ können unter Berücksichtigung des inneren Widerstandes $F_I$ die Zugkräfte, die in den verschiedenen Gängen verfügbar sind, als Funktion der Fahrgeschwindigkeit $F_x(v)$ ermittelt werden. Die Volllastkurven sollten sich möglichst ohne große Lücken an die Grenzhyperbel aus der maximalen Motorleistung $F_x = P_{max}/v$ anschmiegen. Auf der anderen Seite stehen die Summe der Fahrwiderstände $\sum F_w(v)$. Abb. 3.5a ist ein Beispiel, aus dem das Getriebe, Abb. 3.5b, ein auf gleichen Daten beruhendes Fahrleistungsdiagramm für ein 6-Gang-Getriebe abgeleitet ist. Die Betriebspunkte, Steigungs- und Beschleunigungsreserven können den Kurven entnommen werden. Man kann das Getriebe auch für einen optimalen Kraftstoffverbrauch abstimmen. In der Praxis fahren die Kunden doch sehr häufig in den verbrauchsungünstigeren Gängen.

### 3.1.3 Kraftstoffverbrauch beeinflussende Maßnahmen






Der Leerlaufverbrauch und der Wirkungsgrad der elektrischen Verbraucher müssen zusätzlich berücksichtigt werden.

| Größe | | Einheit |
|---|---|---|
| $B_e$ | Streckenverbrauch | g/m |
| $\eta_{ü}$ | Übertragungswirkungsgrad des Triebstranges | – |
| $m$ | Wagenmasse | kg |
| $f$ | Rollwiderstandsbeiwert | – |
| $g$ | Erdbeschleunigung | 9,81 m/s$^2$ |
| $\beta$ | Steigungswinkel | ° |
| $\rho$ | Dichte der Luft | kg/m$^3$ |
| $c_w$ | Luftwiderstandsbeiwert | – |
| $A$ | Stirnfläche | m$^2$ |
| $v$ | Fahrgeschwindigkeit | m/s |
| $a$ | Beschleunigung | m/s$^2$ |
| $B_r$ | Bremswiderstand | N |
| $t$ | Zeit | s |
| $b_e$ | spezifischer Kraftstoffverbrauch | g/kWh |

### 3.1.4 Dynamische Kräfte

Die Massenkräfte erzeugen beim Antreiben und Bremsen nach ◘ Abb. 3.6 die dynamische Achsverlagerung $\Delta F$.

#### 3.1.4.1 Fahrdynamik und Fahrverhalten

Bei der Fahrt in der Ebene, ◘ Abb. 3.6a, verändern sich die Vertikalkräfte:

$$|\Delta F_z| = m \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \frac{h_s}{l}$$

$\Delta F_z$ Veränderung der Vertikalkräfte
$m$ Fahrzeugmasse
$\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ Fahrzeugbeschleunigung, -bremsung
$h_S$ Schwerpunkthöhe
$l$ Radstand

Die beschleunigte Fahrt bewirkt eine Veränderung von $\Delta F_z$, die beim Antreiben zu einer Erhöhung der Achslast an der Hinterachse und beim Bremsen an der Vorderachse führt; diese Nickbewegungen müssen bei der Fahrwerksauslegung berücksichtigt werden. Besonders störend werden im Fahr-

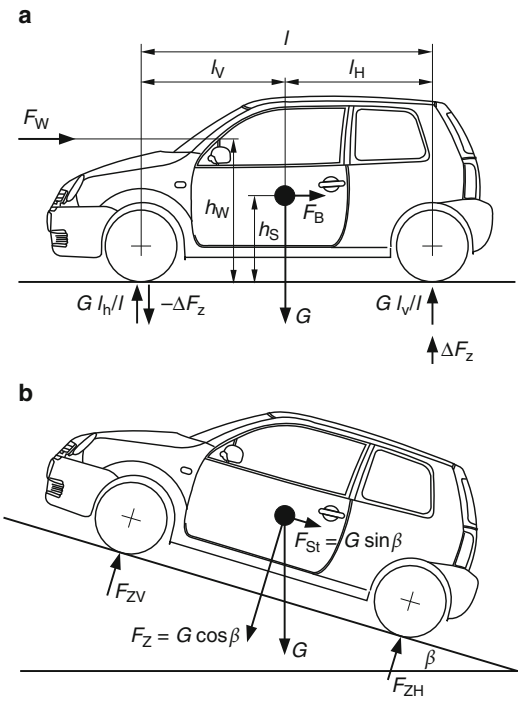



**Abb. 3.6** Statische und dynamische Achslasten in der Ebene und in der Steigung

betrieb die Längsschwingungen, die meistens mit Nickbewegungen einhergehen, empfunden, so dass die Radaufhängungen in Längsrichtung möglichst weich angebunden werden, ohne dass die anderen Steifigkeiten zu gering werden.

Bei der stationären Fahrt greift der Fahrwiderstand $F_w$ in der Höhe $h_w$ am Fahrzeug an, damit ergibt sich $\Delta F_z = F_w \cdot \frac{h_w}{l}$ = Angriffspunkt der Widerstandskraft.

Bei Steigungen muss die Gewichtskomponente berücksichtigt werden. Entsprechend Abb. 3.6b gilt

Achslast vorn:

$$F_{zV} = \frac{G}{l} \cdot (l_H \cdot \cos\beta - h_S \cdot \sin\beta) \pm \Delta F_z$$

Achslast hinten:

$$F_{zH} = \frac{G}{l} \cdot (l_V \cdot \cos\beta + h_S \cdot \sin\beta) \pm \Delta F_z$$

### 3.1.5 Weitere Definitionen

Zur Fahrdynamik sind weitere Definitionen wie Größen der linearen Bewegung, der Drehbewegung, Kräfte und Momente, Radaufhängungen, Lenkung und für Reifen und Räder in der ISO 8855 [6] und DIN 70000 [7] festgelegt.

## 3.2 Aerodynamik

### 3.2.1 Grundlagen

Der Strömungswiderstand eines Körpers hängt von seiner Form, dem Medium, durch das er sich bewegt und seiner Größe ab. Im Falle eines Pkw ist das Medium Luft, die in dem üblichen Geschwindigkeitsbereich als inkompressibel angesehen werden kann. Ihre Stoffeigenschaften lassen sich durch die Dichte und die kinematische Zähigkeit beschreiben, die ihrerseits Funktionen des Luftdruckes und der Temperatur sind.

Unter Normalbedingungen, $p = 1013\,\text{hPa}; t = 10\,°\text{C}$ sind

$$\rho = 1{,}225\,\text{kg/m}^3;\ \nu = 1{,}492 \cdot 10^{-5}\,\text{m}^2/\text{s}.$$

Die Dichte $\rho$ ist die auf das Volumen bezogene Masse der Luft und die Zähigkeit $\nu$ (Viskosität) die Eigenschaft, zwischen verschiedenen Luftschichten Schubspannungen übertragen zu können, d. h. die physikalische Ursache für das Auftreten eines u. U. auch turbulenten Reibungswiderstandes.

Bei der Wärmeabfuhr im Kühler und an Bremsen ist die Wärmeleitfähigkeit der Luft von Bedeutung:

$$\lambda = 0{,}0242\,\text{J/m s K}.$$

Der Luftwiderstand des Fahrzeugs entsteht durch die Relativbewegung zwischen Fahrzeugoberfläche und Luft, und es ist demnach physikalisch zunächst (bei Vernachlässigung drehender Räder, Grenzschicht auf der Fahrbahn usw.) ohne Belang, ob sich der Körper durch die ruhende Luft bewegt, oder ob ein ruhender Körper mit gleicher Geschwindigkeit

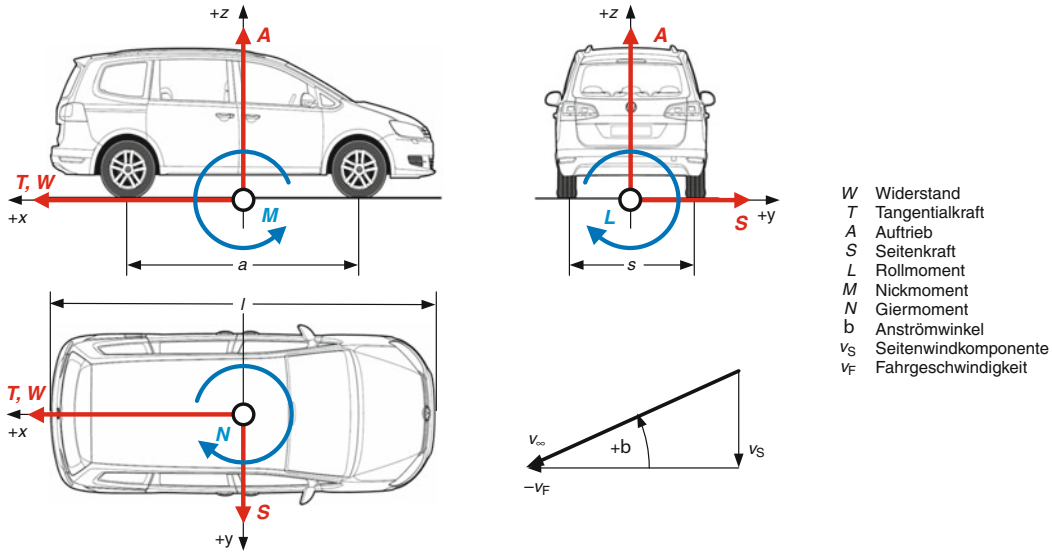



**Abb. 3.7** Koordinatensystem, Kräfte und Momente

angeblasen wird, wie z. B. ein Fahrzeugmodell im Windkanal. Das Fahrzeug muss auf der Vorderseite Luft beiseiteschieben, wodurch diese aufgestaut wird. Auf der Rückseite können die Luftteilchen nicht störungsfrei zusammenströmen, was Unterdruck hervorruft. Die Summe dieser Drücke bildet den Druckwiderstand eines Fahrzeugs. Durch Reibung zwischen der Oberfläche und der zähen Luft entsteht der Reibungswiderstand und durch Erzeugung von Wirbeln der induzierte Widerstand. Bei einem Pkw beträgt der Reibungswiderstand 5–10 %. Die beiden anderen Anteile sind von der Form abhängig. So erzeugt ein Vollheckfahrzeug mit steiler Rückfront ein großes Gebiet mit abgelöster Strömung und damit großem Druckwiderstand, während ein Fließheckfahrzeug zwar einen kleinen Druckwiderstand, dafür aber intensive Wirbel und damit einen hohen induzierten Widerstand aufweist. Ein weiterer Widerstandsanteil entsteht als innerer Luftwiderstand als Folge der Durchströmung von Kühlern, Fugen und Lüftungssystemen.

Die aerodynamische Güte eines Fahrzeugs wird beschrieben durch den Widerstandsbeiwert $c_W$, der als dimensionsloser Widerstand nach der Formel

$$c_W = W/A \cdot q$$

bestimmt wird. Es gelten:

| | |
|---|---|
| $W$ [N] | Widerstand |
| $A$ [m$^2$] | Bezugsfläche (beim Auto die Projektionsfläche quer zur Fahrtrichtung) |
| $q$ [N/m$^2$] | Staudruck $= \rho \cdot v^2/2$ |
| $v$ [m/s] | Fahr-/Windgeschwindigkeit |

In analoger Weise werden Auftriebs- und Seitenkraftbeiwerte gebildet. Für Windkanalmessungen und Strömungsberechnung wurde ein Koordinatensystem gemäß Abb. 3.7 definiert. Die Momente um diese Achsen können im Windkanal in der Regel direkt gemessen werden. Als Bezugslänge für die Momentenbeiwerte wurde der Radstand gewählt.

Die Windkräfte werden üblicherweise in Windkanälen gemessen, wobei für die Beiwertbestimmung der Serienfahrzeuge Messungen an Originalfahrzeugen in entsprechend großen Windkanälen herangezogen werden, Abb. 3.8. In der Entwicklungsphase kommen auch maßstäbliche Modelle zum Einsatz. Dabei ist die Feststellung wichtig, ob die sinngemäße Übertragung der Versuchsergebnisse kleiner geometrisch ähnlicher Modelle auf die Großausführung möglich ist. Dies ist dann zulässig, wenn die Strömungen mechanisch ähnlich sind, und die dimensionslose Kennzahl (Reynoldszahl) $\mathrm{Re} = v_\infty l/\nu$ eingehalten wird. Bei Messungen im Windkanal bedeutet dies, dass die Geschwindigkeit

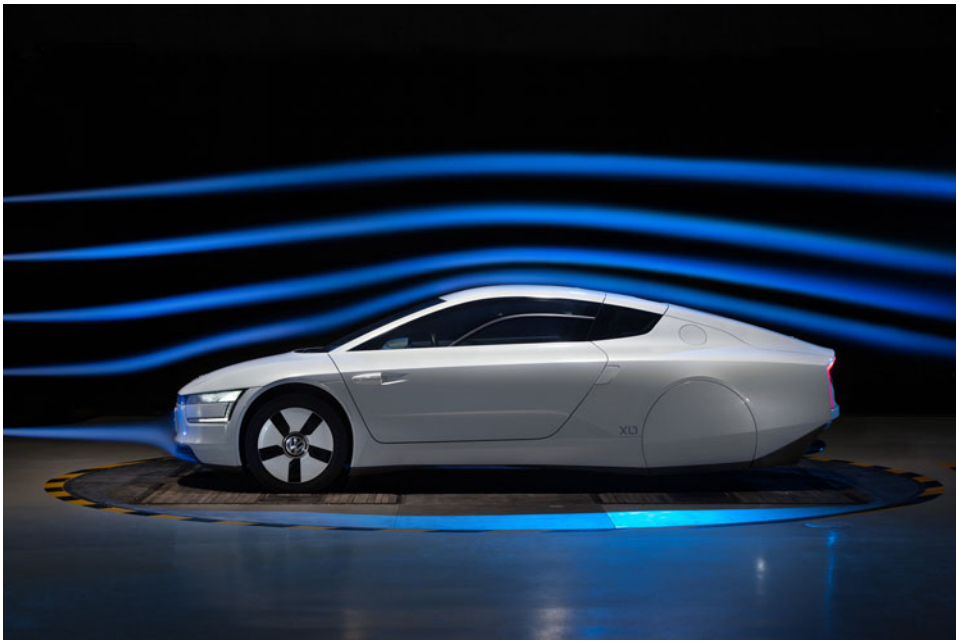


**Abb. 3.8** Automobil in 1:1-Windkanal mit Strömungsvisualisierung

um den Maßstabsfaktor vergrößert werden muss. Da andererseits die Machzahl $\mathrm{Ma} = v/a_\infty$ nicht zu groß werden darf, um Kompressibilitätseffekte auszuschließen, werden Modellversuche bei Windgeschwindigkeiten zwischen 60 m/s und 80 m/s mit Modellmaßstäben nicht unter 1/5 durchgeführt. Dieser Maßstab reicht zur genauen Festlegung von Radien u. U. nicht mehr aus.

Seit Mitte der 1930er Jahre ist bekannt, dass Windkanäle für Kraftfahrzeugmessungen zweckmäßigerweise einen annähernd rechteckigen Düsenquerschnitt aufweisen, und sich der Messstreckenboden unmittelbar an Düse und Auffangtrichter anschließt. Etwa genauso lang gilt die Simulation mit bewegtem Messstreckenboden (Laufband) als die physikalisch richtigere, aber auch als relativ aufwändig. Darüber hinaus wird auch aus dem gleichen Grunde die Grenzschichtbeeinflussung (Absaugen und Ausblasen) bzw. eine Kombination aus beidem zur Verbesserung der Simulation angewandt. Bisher haben sich diese Techniken im Renn- und Sportfahrzeugbereich durchgesetzt; dies als Folge der geringen Bodenfreiheiten. Seit einigen Jahren erfolgen Neubauten von Automobilwindkanälen i. d. R. mit Bodensimulationseinrichtungen. Deren Ausführung unterscheidet sich u. a. in der Anzahl und Anordung der Laufbänder [18].

Die numerische Simulation (CFD) ist zu einem fest etablierten Bestandteil des Entwicklungsprozesses in der Automobilindustrie geworden. Sie wird insbesondere in frühen Projektphasen eingesetzt, wenn noch keine qualitativ hochwertigen Versuchsträger zur Verfügung stehen [17]. CFD erlaubt aufgrund der Fortschritte bei Hard- und Software mittlerweile ein breites Anwendungsspektrum, das neben dynamischen Versuchsanordnungen (bewegter Boden, drehende Räder) auch die Betrachtung thermischer Aspekte (Wärmeübergangsphänomene) beinhaltet.

Aufgrund der Komplexität der Strömungsfelder um Automobile sind jedoch nur solche Rechenverfahren industriell einsetzbar, die einen relativ geringen Rechenaufwand erfordern. Diese Verfahren arbeiten mit sogenannten Turbulenzmodellen, die das numerische Problem durch Modellannahmen soweit vereinfachen, dass der rechnerische Aufwand in akzeptablen Grenzen bleibt – trotzdem sind selbst bei Nutzung einiger hundert Prozessor-

kerne oftmals Berechnungsdauern von einem oder mehreren Tagen notwendig. Die Modellannahmen führen fast immer zu gewissen Abweichungen zwischen simuliertem und realem Strömungsfeld. Deshalb wird CFD bis auf weiteres die Durchführung von Experimenten ergänzen, aber nicht vollständig ersetzen. Es ist zu bedenken, dass die Strömungsverhältnisse im Windkanal wiederum nur eine Näherung der Verhältnisse einer Straßenfahrt darstellen.

Gründe für Abweichungen sind Einflüsse der Windkanalwände auf das Strömungsfeld und Druckgradienten entlang der Messstrecke des Windkanals. Darüberhinaus erfolgt in Windkanälen in der Regel eine weitgehend stationäre Anströmung des Fahrzeugs. In realen Fahrsituationen können hingegen Windböen auftreten, und es kann bei Überholvorgängen zu instationären und inhomogenen Strömungszuständen kommen. Derartige Phänomene, die auch Einfluss auf die Fahrstabilität nehmen und damit sicherheitsrelevant sein können, sind in den letzten Jahren Gegenstand verschiedener Forschungsarbeiten gewesen [19, 20].

Ebenso wird die Rückwirkung von Messinstrumenten im Windkanal auf das Strömungsfeld untersucht. [21]

## 3.2.2 Wirkungsbereiche

### 3.2.2.1 Luftwiderstand/Fahrleistung

Die Aerodynamik oder präziser der Luftwiderstand ist einer der Faktoren, welche die Fahrleistung und den Verbrauch beeinflussen. Der Einfluss des Luftwiderstands auf den Verbrauch hängt neben anderen Parametern besonders vom Einsatzprofil eines Fahrzeugs ab. Je höher der Schnellfahranteil (Autobahn), desto größer der Einfluss. Setzt man einen Autobahnanteil von 1/3 voraus, und nimmt jeweils angepasste Getriebe an, dann zeigen Verbrauchsrechnungen für einen Mittelklassewagen eine Reduktion des Verbrauchs um ca. 3 % bis 4 % bei einem um 10 % abgesenkten Luftwiderstand. Gleichzeitig nimmt die Höchstgeschwindigkeit um ca. 3 % zu. Die Trendaussage lässt sich auch auf andere Fahrzeuge übertragen.

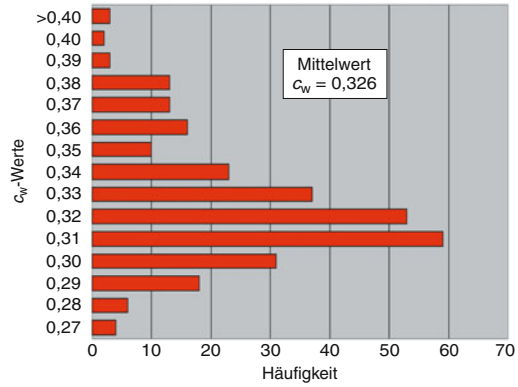



**Abb. 3.9** $c_W$-Wert von 412 Pkws und Häufigkeit im Jahre 2010

Aus diesem Sachverhalt leitet sich das Bestreben her, Fahrzeuge mit niedrigem Luftwiderstand und niedrigem $c_W$ zu entwickeln. Abb. 2.7 veranschaulicht, wie sich die durchschnittlichen $c_W$-Werte im Laufe der Zeit veränderten. Dieses Diagramm ist weniger vom Stand der Erkenntnisse geprägt, als von der Akzeptanz der Fahrzeugformen bei den Kunden. Der Unterschied der technisch möglichen Forschungsfahrzeuge zu den tatsächlich gebauten verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Abhängigkeit vom Kundengeschmack erschwert den Versuch, dieses Diagramm anhand von Forschungsergebnissen in die Zukunft zu extrapolieren.

Aus Abb. 3.9 geht hervor, in welchem Bereich heutige Fahrzeuge angesiedelt sind. Das Diagramm enthält im Wesentlichen Pkw, die in Deutschland verkauft werden. Alle Fahrzeuge wurden unter gleichen Bedingungen im gleichen Windkanal gemessen. Im Bereich der niedrigen $c_W$-Werte finden sich nahezu ausschließlich Stufenheckfahrzeuge. Die hohen Werte gehören zu älteren Fahrzeugen und solchen, bei denen wegen einer festgeschriebenen Designaussage keine Kompromisse hinsichtlich der Aerodynamik gemacht wurden.

In der Vergangenheit wurden in der Literatur [8] zwei Verfahren vorgestellt, anhand derer man Fahrzeuge mit niedrigen $c_W$-Werten entwickeln kann:

- die Formoptimierung, die ausgehend von einem Grundkörper geringen Widerstandes über Grundform und Grundmodell zum Serienfahrzeug führt,

- die Detailoptimierung, die von einem unbehandelten Designmodell zu einem akzeptablen Serienfahrzeug führt.

Dabei wurde unterstellt, dass die Formoptimierung grundsätzlich niedrigere Luftwiderstandsbeiwerte ergibt. Heute wird in der Automobilindustrie, von Sonderfahrzeugen abgesehen, die Detailoptimierung eingesetzt, wobei aber die Erfahrung der letzten Jahre dazu geführt hat, dass die Ausgangsmodelle der Designer mit deutlich niedrigeren $c_W$-Werten starten, als das zur Zeit der Entwicklung der beiden Verfahren der Fall war. Die Detailoptimierung startet meistens mit einer Phase der Strömungsberechnung, der sich eine weitere mit zahlreichen Messungen im Windkanal anschließt. Auf Grund der vielfältigen Möglichkeiten zur Auswertung der umfangreichen Ergebnisdaten einer Strömungsberechnung liefert diese auch in späteren Entwicklungsphasen eines Kfz oftmals wertvolle Hinweise auf Potentiale für aerodynamische Verbesserungen. Je nach Firmenphilosophie wird die Detailoptimierung nur an vollmaßstäblichen Modellen oder häufiger, beginnend mit kleinen Maßstäben und dann im Vollmaßstab durchgeführt. Das Endresultat dieser Methode hängt davon ab, inwieweit die Entwickler und Designer bereit sind, in einem Zielkonflikt auf Forderungen der Aerodynamik einzugehen und kann durchaus mit dem der Formoptimierung vergleichbar sein.

Um ein Fahrzeug mit niedrigem $c_W$-Wert zu entwickeln, müssen alle Karosserieparameter optimiert werden. In der Literatur sind vielfältige Parametervariationen dargestellt. Es muss allerdings beachtet werden, dass diese Ergebnisse jeweils nur für die untersuchten Modelle gelten und nicht beliebig übertragen werden können. Die Effekte sind nicht allgemein superponierbar. Dies hat auch zur Folge, dass Messungen an Modellen nur dann verlässliche Aussagen liefern, wenn alle Details, wie Motorraum und Fahrwerk dargestellt sind. Abb. 3.10 zeigt z. B. den Einfluss von Heckneigungswinkel und Hecklänge auf den $c_W$-Wert. Diese Kurvenschar wird aber noch deutlich beeinflusst von dem Radius zwischen Dach und Heckscheibe, der Form der C-Säulen, der Form des Kofferraumdeckels, dem Heckdiffusorwinkel und der Heckdiffusorlänge. Auch das Vorhandensein eines Bugspoilers zeigt Auswirkungen. Diese Abhängigkeiten erfordern genaugenommen, die Modelle in mehreren Iterationsschleifen zu optimieren. Aus Kosten- und Zeitgründen werden oft nur einzelne Parameter, und die jeweils in einer Messreihe optimiert.

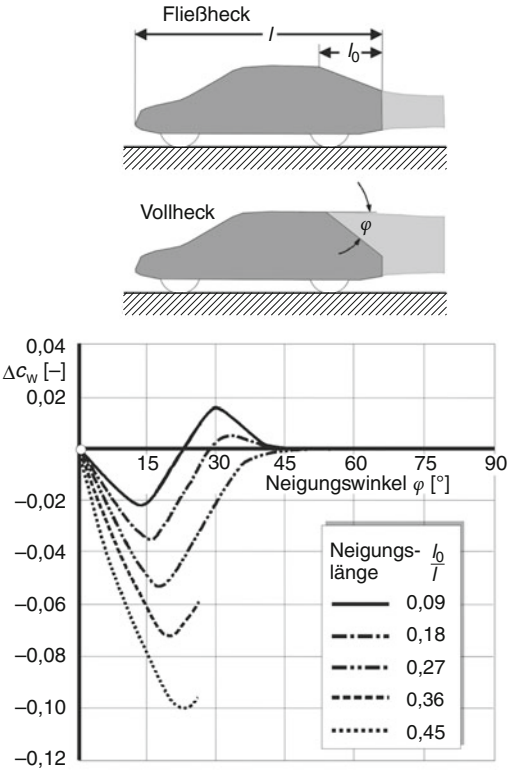



**Abb. 3.10** Einfluss der Heckgestaltung auf den $c_W$-Wert

Im Zielkonflikt zwischen der aerodynamisch gewünschten Außenform und den Wünschen und Forderungen der anderen Entwicklungspartner wird oft auf das Potential des Unterbodens verwiesen, den der Aerodynamiker modifizieren könne, ohne das Styling des Fahrzeugs zu beeinflussen. Die Fahrzeugunterseite hat am Gesamtwiderstand einen Anteil von ca. 50 %. Davon werden aber ca. 10 % durch die offenen Radhäuser und ca. 25 % durch die Räder erzeugt. Der Unterboden ist mithin nur mit etwa 15 % am Gesamtwiderstand beteiligt. An heutigen Pkw ist er schon weitgehend geglättet. Es bleiben unvermeidliche Störstellen für die Abgasanlage, die gekühlt werden und für die Ausdehnungsspielraum zur Verfügung stehen muss, für

Achsen, die eine gewisse Bewegungsfreiheit aufweisen müssen, für Spalte zwischen Tank und Bodenblech, die im Falle eines Heckaufpralls Verformungsweg für die Karosse bereitstellen, ohne den Tank zu zerstören und so weiter. Es bleibt bei einem üblichen Pkw ein Potential, von $\Delta c_W = 0{,}01$ bis 0,02, das durch Unterbodenverkleidungen ausgenutzt werden kann.

Insbesondere bei der Optimierung von Unterbodendetails liefern Windkanalmessungen und Computersimulationen unter Einbeziehung drehender Räder und der Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Straße (Laufbandtechnik) genauere Ergebnisse [9].

#### 3.2.2.2 Fahrsicherheit

Die Umströmung eines Fahrzeugs führt zu Kräften in die drei Richtungen und zu Momenten um die drei Achsen des fahrzeugfesten Koordinatensytems (◘ Abb. 3.7). Während die Kraft in Längsrichtung, der Widerstand, die Fahrleistungen beeinflusst, haben die anderen Kräfte und Momente Auswirkungen auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit. Bei Seitenwind und im strömungsmechanischen Einflussbereich anderer Fahrzeuge werden die Kräfte unsymmetrisch.

Das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit werden fahrzeugseitig beeinflusst durch:

- Fahrwerk,
- Schwerpunktlage,
- Aerodynamik,
- Antriebsleistung.

Die Auswirkungen der Aerodynamik auf das Fahrverhalten waren vor 1930 wegen der erreichten geringen Geschwindigkeiten und des kaum vorhandenen Interesses von untergeordneter Bedeutung. In den dreißiger Jahren wurden zunehmend widerstandsreduzierte Fahrzeuge entwickelt, die große Giermomentanstiege über dem Schiebewinkel, schlechte Fahrwerke und teilweise konzeptbedingt weit hinten liegende Schwerpunkte aufwiesen. Da durch den Autobahnbau zeitgleich höhere Geschwindigkeiten auch gefahren werden konnten, trat erstmals das Phänomen Seitenwindempfindlichkeit in Zusammenhang mit der „Stromlinie" auf [10]. Es entstand der Ruf, dass widerstandsarme Fahrzeuge seitenwindempfindlich seien. Die Weiterentwicklung der Fahrwerke und der Übergang zu vorne liegenden Motoren haben dieses Problem jedoch soweit reduziert, dass heute meist wenig Aufwand betrieben wird, um Formen mit niedrigem Giermoment zu finden. In Einzelfällen können jedoch bei Fahrzeugen mit gerundeten vertikalen Heckkanten, d. h. ohne definierte Abrisslinien, spürbare Seitenwindeffekte auftreten. Daher sind definierte Abrisslinien am Heck – auch seitlich – anzustreben.

Andererseits erreichen die Fahrzeuge heute Geschwindigkeiten, die den Auftrieben an den Achsen Bedeutung zukommen lassen. Ab ca. 160 km/h werden folgende Bewertungskriterien durch Auftriebe beeinflusst:

- Verhalten beim Einlenken,
- Kurvenwechselverhalten,
- Verhalten beim Spurwechsel,
- Lastwechselverhalten,
- Lenkrückmeldung bei hohen Geschwindigkeiten,
- Hochgeschwindigkeitspendeln.

Summarisch werden ein niedriger Auftriebsbeiwert an der Hinterachse und ein nicht zu weit darunter liegender Auftriebsbeiwert an der Vorderachse angestrebt. Die akzeptierten Werte sind firmenspezifisch und werden auch durch die Abstimmung des Fahrwerks beeinflusst. So können ungünstige Auftriebsverteilungen teilweise durch Fahrwerksmodifikationen kompensiert werden (siehe ▶ Kap. 7).

Wie schon der Luftwiderstand, so sind auch die anderen aerodynamischen Kräfte und Momente durch die äußere Form zu beeinflussen. Derartige Modifikationen sollten in einer frühen Entwicklungsphase in das Design eingebracht werden. Zu diesem Zeitpunkt stehen ausschließlich nicht fahrfertige Modelle zur Verfügung, so dass Windkanalmessungen und Strömungsberechnungen zur Beurteilung herangezogen werden müssen. Diese liefern quasistationäre Aussagen, d. h. Böen usw. werden nicht richtig nachgebildet, und enthalten noch keine Verknüpfung mit den anderen Parametern des Fahrverhaltens. Es gibt Bestrebungen, dies in Fahrsimulatoren nachzubilden [11] und aus Vergleichsmessungen vorherzusagen [12]. In der Regel

werden jedoch Erfahrungen mit Vorgängermodellen benutzt, um von den Windkanalergebnissen auf das Fahrverhalten zu schließen.

#### 3.2.2.3 Benetzung und Verschmutzung

Ein fahrendes Auto ist oft einer partikelbehafteten Strömung ausgesetzt [14]. Die Bandbreite der Teilchen reicht von Gas, Staub über Wasser bis zu Insekten und Steinen. Entsprechend ihrer Historie ist die Flugbahn der Teilchen zunächst unterschiedlich zu den Stromlinien der Luft. Diese Unterschiede führen zu Relativgeschwindigkeiten, aus denen wiederum Kräfte resultieren, welche die Flugbahn der Teilchen in Abhängigkeit von der Dichte beeinflussen. Während sich Abgase nach kurzer Übergangszeit nahezu gleichförmig mit der Luftströmung bewegen, fliegen Steinchen fast unbeeinflusst weiter. Demgemäß ist bei einer Betrachtung der Verschmutzung nach der Dichte der Teilchen zu unterscheiden:

- Gasförmige Stoffe folgen weitgehend der Luftströmung. Hier ist besonders das Abgas von Interesse, das nicht ins Fahrzeuginnere gelangen soll. Da die Abgaskonzentration in Bodennähe zunimmt, sollten Lufteinlassöffnungen möglichst hoch angebracht werden. Aus diesem Grund werden diese in der Regel im Windlauf vor der Windschutzscheibe platziert.

Das Fahrzeug ist aber auch seiner eigenen Abgasschleppe ausgesetzt. ◘ Abb. 3.11 zeigt die für ein Vollheckfahrzeug typische Strömung am Heck. Sie ist dadurch charakterisiert, dass sich hinter dem Stoßfänger ein Wirbel bildet, der Luft und Inhaltsstoffe von der Stoßfängerunterkante etwa 0,5 m nach hinten und dann wieder zur Heckklappe zurücktransportiert. Darüber befindet sich ein Wirbel mit entgegengesetztem Drehsinn. Diese beiden Wirbel haben eine gemeinsame Mischzone, in der die Teilchen übergeben werden. Der obere Wirbel trägt diese Teilchen dann bis zur Abrisskante am Dach. Wird Abgas in den unteren Wirbel geblasen, dann breitet es sich durch diese Wirbel über die gesamte Heckfläche aus. Da es Fahrzustände gibt, in denen im Fahrgastraum großer Unterdruck herrscht, kann das Abgas ins Fahrzeuginnere gesogen werden. Die Gefahr wächst mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Gegenmaßnahmen sind zum einen die vollständige und auch bei hohen Geschwindigkeiten sichere Abdichtung des Hecks und zum anderen eine geeignete Wahl des Abgasendrohres, die Abgas gar nicht erst in diese Wirbelstruktur gelangen lässt. Als vorteilhaft haben sich nach unten abgekröpfte Endrohre erwiesen. Noch besser sind Endrohrlagen, bei denen das Abgas hinter ein Hinterrad geblasen wird.



◘ **Abb. 3.11** Heckströmung am Vollheck-Pkw

- Staub folgt den im vorigen Abschnitt beschriebenen Gesetzmäßigkeiten und kann daher ebenfalls ins Fahrzeug gesogen werden. Der von den Rädern unter die Fahrzeugmitte geschleuderte Staub gelangt durch die Heckwirbel auf das Fahrzeugheck. Gegen ein Eindringen ins Fahrzeuginnere hilft nur ein geeignetes Dichtungssystem. Staub gelangt aber auch aus den vorderen Radhäusern an die Türfugen und dabei insbesondere an jene oberhalb der Schweller [13]. Im Falle großer Unterdrücke im Fahrzeug, wie zum Beispiel bei angehobenem Hubdach, kann der Staub durch die Türfugen und durch Wasserablauflöcher ins Türinnere und von da entlang der Scheibenführung in den Fahrgastraum gelangen. Da die Druckverteilung entlang der äußeren Türfugen variiert, entsteht eine Strömung in den Schächten. Auf diese Weise kann Staub unterhalb der hinteren Türen, z. B. vor den hinteren Radläufen, in die Schächte gesogen und zur vertikalen Türfuge an der A-Säule hinter dem Vorderrad oder oben zur Fuge an

den C-Säulen transportiert werden. Dieser Staubeintritt kann zuverlässig nur durch ein umlaufendes Dichtungssystem außen an den Türfugen verhindert werden.

- Wassertropfen sind nach ihrer Größe und Herkunft zu unterscheiden. Die von den Rädern auf nasser Fahrbahn unter das Fahrzeug geschleuderten Tropfen verhalten sich teilweise wie Abgas und Staub. Leichte Tropfen werden wie Staub bis oben an die Heckscheibe transportiert und mittelschwere erreichen nur die untere Heckfläche. Schwere Tropfen können der Luftströmung nicht folgen und bleiben im Strömungsnachlauf des Fahrzeugs. Schmutzfänger hinter den Rädern verstärken die Sprühwirkung in Richtung zur Fahrzeugmitte und sorgen damit eher für eine verstärkte Heckverschmutzung.
- Regentropfen sind infolge ihres Gewichtes und ihrer Trägheit durch die Fahrzeugumströmung kaum zu beeinflussen. Ein Freiblasen der Windschutzscheibe scheitert schon aus energetischen Gründen. Um das auf die Windschutzscheibe auftreffende und von den Scheibenwischern zu den A-Säulen geschobene Wasser daran zu hindern, auf die Seitenscheibe zu gelangen und dabei die Sicht auf die Außenspiegel zu behindern, werden oft Wasserfangprofile auf den A-Säulen eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Auswahl der Spiegelanbindung an die Tür. Direkt angebundene Spiegel haben eine bessere Schutzwirkung als Spiegel mit Fuß. Leider führen die Abschirmmaßnahmen gegen Seitenscheibenbenetzung meist zu höheren Luftwiderständen und Windgeräuschen, so dass ein Zielkonflikt zu lösen ist.

Bei nahezu allen Fahrzeugen entstehen auf den Seitenscheiben hinter den A-Säulen Tütenwirbel, die auf dem Glas zu den A-Säulen hin drehen. Deren Intensität ist so groß, dass das über die A-Säulen tretende Wasser oft schon ab 100 km/h zunächst nach oben und dann entlang des oberen Scheibenrahmens nach hinten transportiert wird. Das Problem der Seitenscheibenverschmutzung stellt sich daher vorwiegend in dem Geschwindigkeitsbereich 50 bis 100 km/h.

- Ein Sonderproblem stellt die Wasserschleppe hinter Scheibenwischern dar. Bei einer Reihe von Fahrzeugen befindet sich der fahrerseitige Wischer in der Umkehrlage nahe bei und parallel zur A-Säule. In dieser Position befindet sich relativ viel Wasser neben dem Wischerblatt und die Luftströmung über den Wischer erzeugt dahinter einen Wirbel, der in Scheibennähe zum Wischerblatt hin dreht. Dieser Wirbel transportiert das Wasser teilweise wieder zum Wischer hin, so dass bei der Rückbewegung des Blattes eine Wasserschleppe entsteht. Abhilfe muss im Einzelfall gesucht werden.
- Schwere Teilchen, wie hochgeschleuderte Steinchen sind durch Strömungsmaßnahmen nicht zu beeinflussen.

### 3.2.2.4 Einzelkräfte

Die Umströmung wirkt nicht nur auf das Fahrzeug als Ganzes, sondern auch auf einzelne Bauteile. Die Druckverteilung führt auf Teilbereichen der Oberfläche (z. B. auf einer Seitenscheibe) zu örtlichen Kräften und Belastungen, die aus Widerstand, Auftrieb und Seitenkraft nicht direkt abzuleiten sind. ◘ Abb. 3.12 zeigt die Druckverteilung auf der Fahrzeugoberseite im Längsmittelschnitt für die Fahrzeugtypen

- Vollheck-Pkw,
- Stufenheck-Pkw,
- Kastenwagen.

Die Unterdruckspitze am Fahrzeugbug des Pkw erzeugt z. B. eine Kraft, welche die Motorhaube anhebt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h beträgt die aufwärts gerichtete Kraft im vorderen Motorhaubenbereich je nach Bugform 300 bis 500 Newton. Die Kräfte auf die Seitenscheiben, unmittelbar hinter den A-Säulen sind etwa halb so groß, erreichen aber unter Seitenwindbedingungen vergleichbare Werte. Diese Kräfte bewegen die Bauteile und öffnen u. U. die Dichtungssysteme, oder führen durch Strömungsablösung zu erhöhten Widerständen. Auch die Funktion kann beeinträchtigt werden. So ist beim Schließen abgesenkter Seitenscheiben das Einlaufen in die Fensterführung zum Teil nicht möglich.

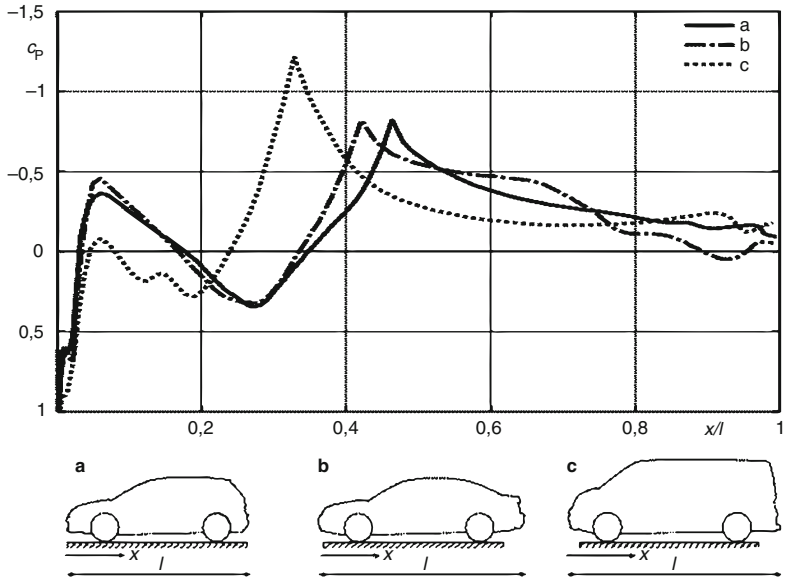



**Abb. 3.12** Druckverteilung im Längsmittelschnitt (Berechnung)

Druckbelastungen können zum Eindellen von Bugspoilern führen, zum Abbrechen von Flügeln, zum Verstellen von Außenspiegeln usw. Dabei sind nicht nur stationäre Kräfte zu berücksichtigen. Durch periodische Ablösungen können Schwingungen angeregt werden, welche die Lebensdauer beeinträchtigen oder die Funktion stören. So bewirken periodische Wirbelballen, die vom Spiegelgehäuse ablösen, bei hohen Fahrgeschwindigkeiten oft unerwünschte Schwingungen des Rückspiegelglases. Es wurde auch schon bei hohen Fahrgeschwindigkeiten Schwingen der Motorhaube beobachtet.

Die aus den Windlasten resultierenden Formänderungen führen häufig zu kantigeren Außenkonturen und erhöhen damit noch Druckbelastungen. Schwingende Bauteile steuern zum Teil selbst die periodische Druckbelastung und verschärfen die Situation.

Diese Kräfte und Drücke sollten durch Windkanalversuche oder Strömungsberechnung möglichst frühzeitig erfasst werden, um sie entweder durch Formänderung zu entschärfen oder in der konstruktiven Auslegung zu berücksichtigen.

### 3.2.2.5 Kühlung/Bauteiltemperaturen

Das Kühlsystem hat die Aufgabe, unter allen Betriebsbedingungen des Fahrzeugs Motor- und andere Bauteile so zu kühlen, dass keine Funktionsstörungen oder Beschädigungen auftreten. Weiter sollen die Heizung gut funktionieren, der Verschleiß minimiert und der Verbrauch sowie die Leistung optimiert werden (Einzelheiten siehe ► Abschn. 3.3).

Die Wärmeabfuhr geschieht entweder direkt vom Bauteil an die umgebende Luft, wie z. B. bei den Bremsscheiben, oder über Kühlflüssigkeit (auch Öl) und durch Kühler. Ladeluftkühler unterscheiden sich aus aerodynamischer Sicht nicht von Wasserkühlern. Alle Fälle setzen einen (Fahrzeug-)internen Luftstrom voraus.

Um interne Luftströme zu erzeugen ist Energie notwendig. Bei schneller Fahrt wird bei den meisten Fahrzeugen das Druckgefälle zwischen Fahrzeugvorder- und Unterseite ausgenutzt, um die Luft durch die Kühler bzw. durch den Motorraum zu leiten. Die Energie kann auch von Gebläsen aufgebracht werden, was insbesondere bei Langsamfahrt oder in Standphasen erforderlich ist. Interne Strömungen erzeugen wegen der größeren Widerstände

grundsätzlich höhere Verluste, als gleiche Volumenströme um das Auto herum. Dies äußert sich in einem Anstieg des Luftwiderstandes bzw. einem höheren $c_W$-Wert. Im Interesse eines niedrigen Verbrauchs sind daher der Kühlluftanteil des Widerstandes und damit der Kühlluftvolumenstrom auf das notwendige Minimum zu beschränken. Maßnahmen dazu sind:

- Abschotten der Luftführung vom Eintritt bis zum Kühler,
- Eintrittsöffnung so positionieren und Strömungskanal so formen, dass der Kühler gleichförmig durchströmt wird,
- Widerstandskörper und Ablösungen in der Luftführung vermeiden,
- Kühlerquerschnitt anpassen,
- Kühler mit hoher spez. Wärmeübertragungsleistung verwenden.

Zur Bauteilkühlung wird oft ein Luftstrahl gezielt auf das Teil gelenkt. Geschlossene Kanäle sind für diesen Zweck deutlich besser geeignet, da Freistrahlen infolge des zur Verfügung stehenden Druckgefälles oft nur eine geringe Reichweite haben und durch andere Strömungen abgelenkt werden können.

Die aerodynamische Optimierung der Kühlluftströmung profitiert, wie die aerodynamische Optimierung selbst, vom Einsatz der neuen Bodensimulationstechniken [15].

### 3.2.2.6 Innenraumklima

Das Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystem eines Fahrzeugs hat die Aufgabe, den Komfort und die Sicherheit der Passagiere, soweit sie von diesem System beeinflussbar sind, auf möglichst hohem Niveau zu gewährleisten (siehe ► Abschn. 6.4.3). Im relativ kleinen Pkw-Innenraum wirken folgende Größen auf die Passagiere:

- Temperatur und Temperaturschichtung,
- Luftgeschwindigkeit und Verteilung,
- Luftfeuchte,
- Strahlung von Bauteilen,
- Direkte Sonneneinstrahlung,
- Luftinhaltsstoffe.

Diese Parameter werden zum Teil durch den Luftstrom im Fahrzeug beeinflusst. Die Luftströme sind

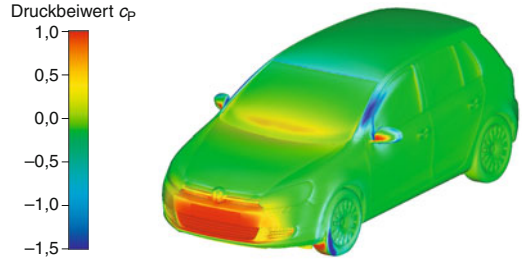



**Abb. 3.13** Druckverteilung auf der Oberfläche (Berechnung)

ihrerseits abhängig von beeinflussbaren Einstellungen der Lüfter, Ausströmer usw., der Plazierung der Zu- und Abluftöffnungen und der Position von konstruktiv und funktional nicht beabsichtigten Öffnungen (Undichtigkeiten).

Durch die Umströmung der Karosserie ergibt sich eine Druckverteilung auf der Oberfläche, die beim Positionieren von Öffnungen ausgenutzt werden kann. Austrittsöffnungen werden bevorzugt in Unterdruckgebiete gelegt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht im Falle starker Unterdrücke im Fahrzeug, wie bei geöffneten vorderen Seitenscheiben, Schadstoffe in den Fahrgastraum gesaugt werden. Liegen die Austrittsöffnungen zu nahe an den Ohren, können Geräuschbelästigungen auftreten. Eintrittsöffnungen werden oft in Überdruckgebiete gelegt um die notwendige Lüfterleistung zu minimieren. Andererseits ist es von Vorteil, wenn der Heizungsbetrieb geschwindigkeitsunabhängig funktioniert. Aus diesem Grund wäre eine Position mit geringem Überdruck zu bevorzugen, Abb. 3.13.

### 3.2.2.7 Windgeräusche

Die Fahrzeuginsassen sind in einem Auto einer Reihe von Geräuschen ausgesetzt, die teilweise außerhalb des Fahrzeugs erzeugt und durch dessen Dämmung gemildert werden. Die wichtigere Gruppe von Geräuschen wird aber durch das Fahrzeug bzw. im Fahrzeug selbst hervorgerufen (siehe auch ► Abschn. 3.4). Wenn man von den gewollten Geräuschen, wie Radio, Warnsummer usw. absieht, werden drei Quellen unterschieden: Motor-, Roll- und Windgeräusche. Bedingt durch die erfolgreiche Verminderung der Motor- und Rollgeräusche

in den letzten Jahren können Windgeräusche heute nicht mehr außer Acht gelassen werden.

Windgeräusche haben folgende Ursachen:

- Undichtigkeiten, vor allem in den Tür- und Fensterdichtungen, aber auch durch Öffnungen im Blech. Bedingt durch die Verdrängung der Luft entstehen auf der Außenseite der Karosserie zum Teil erhebliche Unterdrücke. Die Bereiche unmittelbar hinter den A-Säulen sind davon besonders betroffen. Im Fahrzeuginnern finden sich, je nach Betriebszustand der Lüftung und Heizung, vergleichsweise geringe Unter- oder Überdrücke. Falls die Dichtungen nicht vollständig anliegen, kommt es zu einem Durchströmen dieser Spalte von innen nach außen. Dieses Durchströmen ruft Geräusche hervor, die sich hauptsächlich im Frequenzbereich 4 bis 10 kHz bemerkbar machen.

Als Folge der Unterdruckkräfte auf den Seitenscheiben der vorderen Türen bewegen sich die Türrahmen bei hohen Geschwindigkeiten um bis zu 2 mm nach außen. Falls das Türdichtungssystem nicht ausreicht, um auch in dieser Situation noch zu dichten, kommt es zu besonders lauten Durchströmungsgeräuschen im gesamten relevanten Frequenzbereich. Die Konstruktion eines effektiven Dichtungssystems ist die wichtigste Aufgabe, um ein niedriges Windgeräuschniveau zu erreichen.

- Resonanzen in Hohlräumen, die durch die Strömung hervorgerufen werden. Strömungsrauschen von ca. 500 Hz bis 3 kHz entsteht, wenn offene Tür- und Klappenfugen quer überströmt werden. Der Querschnitt der Kanäle hinter den Fugen bestimmt ebenfalls den Frequenzbereich. Die Lautstärke ist besonders davon abhängig, ob die Hinterkante der Fuge in die Strömung hineinragt, oder zurückspringt (Schuppeneffekt). Durch entsprechende Dichtungen kann dieses Rauschen vermieden werden, ein geeigneter Schuppeneffekt ist aber nur unwesentlich schlechter.

In diese Gruppe gehört auch das Schiebedachwummern, das typischerweise bei ca. 20 Hz und häufig bei einer Fahrgeschwindigkeit von 40 bis 60 km/h auftritt. Durch die Überströmung des offenen Daches wird nach Art eines Helmholtzresonators der ganze Innenraum zum Schwingen gebracht. Als Abhilfmaßnahmen werden Windabweiser eingesetzt, die auf das jeweilige Fahrzeug abgestimmt werden müssen. Gelochte-, gezackte oder Netzwindabweiser sind in der Regel wirkungsvoller als glatte, erzeugen aber bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ein unerwünschtes Eigenrauschen. Die Tiefe des Dachausschnittes hat ebenfalls einen großen Einfluss, so dass einige Hersteller auf Schiebeweg verzichten, um mit einem glatten Windabweiser auszukommen.

Wummern wird auch bei geöffneten Seitenscheiben, insbesondere hinten beobachtet, eine technische Abhilfmaßnahme ist bisher nicht bekannt. Der Fahrgast kann diesen Zustand aber vermeiden, indem er zusätzlich zum hinteren Seitenfenster auch ein vorderes teilweise öffnet, beziehungsweise umgekehrt.

- Strömungsablösung an der Kontur. Als Folge der Ablösungen entstehen Wirbel und turbulente Druckschwankungen, welche die Fahrzeugoberfläche beaufschlagen und zum Schwingen anregen. Diese Schwingungen teilen sich dem Insassen als Geräusch mit. Bekannt sind insbesondere die A-Säulen-Wirbel, die ein breitbandiges Rauschen erzeugen. Die A-Säulen-Wirbel fallen besonders unter wechselnden Seitenwindbedingungen auf, und müssen entsprechend im Windkanal oder auf der Straße untersucht werden. Diese Geräuschbelästigung kann vermindert werden, indem die A-Säulen-Wirbel durch Formgebung der A-Säulen reduziert werden oder die Dämmung der Seitenscheiben erhöht wird. Die von den Ablösungen am Heck erzeugten Geräusche liegen infolge der ursächlichen Fluktuationen im Bereich von 20 Hz, sind aber nur in Sonderfällen auffallend, wie z. B. bei Cabriolets mit weicher Plastikheckscheibe geringer Dämmung.
- Ablösungen an vorstehenden Teilen wie Antennen, Achsen, Spiegeln und Scheibenwischer. Hinter Stabantennen entstehen Karmánsche Wirbelstraßen, die einzelne Töne hoher Intensität erzeugen. Gegenmaßnahmen sind das Schrägstellen der Stäbe um mindestens 45° und Gebrauch von Wendeln um die Stäbe. Damit verschwindet der einzelne Ton,

allerdings entsteht ein weniger auffälliges Rauschen. Achsen und Scheibenwischer sind aus funktionalen Gründen nicht strömungsgünstig zu profilieren, daher sollten sie weitestgehend aus der direkten Anströmung entfernt werden. So können Scheibenwischer z. B. unterhalb der Motorhaube abgelegt werden.

Außenspiegel werden häufig als Geräuschquelle angesehen, da der Fahrer Geräusche aus ihrer Richtung wahrnimmt. Sie sind aber nicht immer die Ursache der Belästigung, Wirbel und Dichtungen an den A-Säulen können ebenfalls beteiligt sein. Die Spiegelgeräusche selbst werden weniger vom Gehäuse oder Ablösungen dahinter verursacht, als vielmehr durch die beschleunigte Strömung in einem zu engen Spalt zwischen Gehäuse und Scheibe, durch die Umströmung des Spiegelfußes und durch Undichtigkeiten zwischen Spiegelfuß und Tür bzw. vom Spiegelfuß ins Fahrzeuginnere.

- Turbulente Schwankungen in der fahrzeugnahen Strömung, d. h. der Grenzschicht. Dieser Anteil ist der nicht unterschreitbare Grenzwert, beim Fahrzeug aber von untergeordneter Größenordnung.

Die verschiedenen Geräuschursachen haben zur Folge, dass eine aerodynamische Optimierung des Fahrzeugs die Geräuschsituation nur in Einzelfällen verbessert. Die weitaus wichtigsten Geräuschquellen sind unvollkommene Dichtungssysteme, die wenig Rückwirkung auf die Aerodynamik haben und dadurch auch wenig beeinflusst werden.

### 3.2.3 Einordnung in die Gesamtentwicklung

Aerodynamische Erfordernisse haben direkten Einfluss auf die Außenform eines Fahrzeugs. Dementsprechend muss die aerodynamische Entwicklung parallel zur Designphase verlaufen [11]. Die Strömungsberechnung ist dafür prädestiniert. Es hängt von den Firmengebräuchen ab, ob die Designmodelle im Windkanal optimiert, oder ob zusätzliche Windkanalmodelle eingesetzt werden. Im zweiten Fall ist es unbedingt notwendig, die Parallelmodelle rechtzeitig herzustellen und fortlaufend an den aktuellen Designstand anzupassen. Aerodynamische Anbauteile sollten an Prototypen entwickelt oder zumindest überprüft werden. Im Regelfall ist es wenig hilfreich, vorab Aerodynamikstudien anzufertigen, da sie vom konkreten Entwicklungsziel zu weit abweichen und von den anderen Entwicklern nicht beachtet werden. Ausnahme sind Sonderentwicklungen, bei denen sehr niedrige $c_W$-Werte hohe Priorität haben.

Die für die Fahrsicherheit notwendigen Werte sollten vor Entwicklungsbeginn definiert sein und in der Aerodynamikentwicklung überprüft und sichergestellt werden. Dabei sind Auswirkungen auf die Form zu erwarten. Nachträglich lassen sich diese Beiwerte nur durch Spoiler und andere Anbauteile beeinflussen. Derartige Zusatzteile verursachen jedoch Mehrkosten und besitzen oftmals nur eine geringe Akzeptanz bei Designern, Konstrukteuren und Kunden.

Die Optimierung des Kühlluftanteils am Widerstand beginnt ebenfalls in der Designphase, in der auch die Kühllufteinlässe gestaltet werden. Sie wird fortgesetzt mit Versuchsträgern, bei denen neue Vorderwagendetails an aktuellen, ähnlich aufgebauten Serienwagen getestet werden. Es folgt die Prototypenphase, in der Versuchsergebnisse weitere Modifikationen notwendig machen. Erfahrungen mit Vorgängermodellen beschleunigen den Entwicklungsprozess.

Benetzung und Verschmutzung werden üblicherweise in der Prototypenphase untersucht, jedoch sind einige Entscheidungen, wie z. B. Verwendung von Wasserfangrinnen an den A-Säulen, schon vorher zu treffen. Funktionstests im Windkanal erfolgen ebenfalls in der Prototypenphase.

Bei den heute üblichen kurzen Entwicklungszeiten droht die Aeroakustik-Entwicklung zu spät einzusetzen. Sinnvolle Messergebnisse sind erst zu erwarten, wenn weitgehend seriennahe Prototypen mit richtigen Dichtungen und vollständiger Innenraumausstattung zur Verfügung stehen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Entwicklung aber soweit fortgeschritten, dass bis zum Serieneinsatz keine größeren Modifikationen mehr möglich sind. Die aeroakustische Entwicklung muss daher ebenfalls schon in der Designphase beginnen, in der allerdings nur auf Erfahrungen mit Vorgängermodellen zurückgegriffen werden kann.

Die in jüngster Zeit entwickelten Hybrid- oder Elektrofahrzeuge unterscheiden sich hinsichtlich der Aerodynamik, Aeroakustik usw. in keiner Weise von den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Die geschilderten Betrachtungen, Verfahren und Forderungen gelten daher für sie in gleicher Weise.

## 3.3 Wärmetechnik

### 3.3.1 Kühlung von Verbrennungsmotoren

Die Abwärme von Verbrennungsmotoren wird über verschiedene Wege abgeführt. Während der Anteil im heißen Abgas direkt abgegeben wird, müssen die an die Motorbauteile übertragenen Abwärmen indirekt mittels eines flüssigen Mediums abgeführt werden. Motorblock und Zylinderkopf werden dabei über das Kühlmittel gekühlt, das seinerseits die Abwärme über den Kühlmittelkühler an die Umgebungsluft abgibt (◘ Abb. 3.14). Der Kolben wird dagegen durch das Motoröl heruntergekühlt. Bei Motoren höherer Leistung reicht die Wärmeabfuhr über die Ölwanne nicht mehr aus, so dass ein separater Ölkühler eingesetzt werden muss.

Dabei müssen die Temperatur und der Massenstrom des Kühlmediums in jedem Betriebspunkt gewährleisten, dass an keiner Stelle im Motor schädigende Überhitzungen entstehen.

Aufgeladene Motoren erfordern Ladeluftkühler, die die bei der Kompression im Turbolader oder Kompressor entstehende Wärme abführen. Dadurch erhöht sich die Dichte der Ladeluft (Dichterückgewinn) und man erreicht eine höhere Zylinderfüllung und damit eine höhere spezifische Motorleistung. Die $NO_x$-Entstehung wird durch die einhergehende Absenkung der Verbrennungstemperatur vermindert.

Seit der Einführung schärferer Abgasvorschriften (EU4) ist die Kühlung des rückgeführten Abgases beim Dieselmotor weit verbreitet. Sie beeinflusst die Dieselruß- und $NO_x$-Emission günstig [22].

Automatikgetriebe müssen ebenfalls gekühlt werden. Besonders hohe Anforderungen an die Getriebeölkühler stellen CVT-Getriebe.

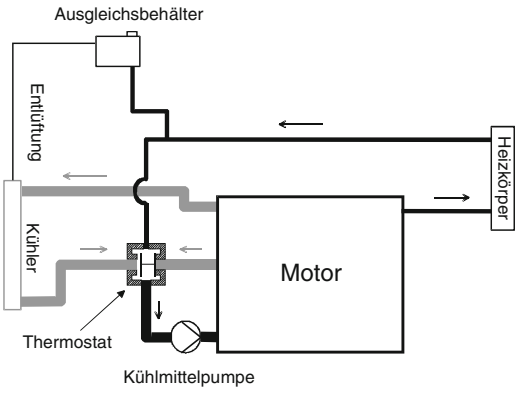
Weiterer Kühlbedarf entsteht an Nebenaggregaten wie Servoölpumpe, Kraftstoffpumpe und Kältekreislauf des Klimasystems. In Einzelfällen erfordern heute auch schon Elektronikbauteile eine spezielle Kühlung, weil auch dort die Leistungsdichten zunehmen und eine konvektive Luftkühlung nicht mehr ausreicht. Bei Hybridfahrzeugen ist dies für die Leistungselektronik bereits der Regelfall [52].

Die gängigen Übertragungswege der Abwärme für die einzelnen Kühlaufgaben sind nachfolgend zusammengestellt:

- Motor über Kühlmittel und Kühlmittelkühler an Luft,
- Motoröl über Öl-Kühlmittelkühler an Kühlmittel oder über Öl-Luftkühler direkt an Luft,
- Luft oder Ladeluft über Ladeluft-Luftkühler direkt an Luft oder über Ladeluft-Kühlmittelkühler an Kühlmittel (Niedertemperaturkreislauf ist dann erforderlich) [50],
- Abgas über kühlmittelgekühlten Abgaskühler an Kühlmittel,
- Getriebeöl über Getriebeöl-Kühlmittelkühler an Kühlmittel oder über Getriebeöl-Luftkühler direkt an Luft,
- Kühlung von Nebenaggregaten direkt an Luft oder über Kühlmittel.

Letztendlich wird die Abwärme immer an die Umgebungsluft abgeführt.

Die steigenden Anforderungen bezüglich Kraftstoffverbrauch, Gewicht, Abgasemissionen, Lebensdauer, Fahrkomfort und geringem Bauraum




◘ **Abb. 3.14** Kühlkreislauf mit Ausgleichsbehälter

haben dazu geführt, dass moderne Kühlsysteme von Verbrennungsmotoren im Kraftfahrzeug mit wenigen Ausnahmen die folgenden Merkmale aufweisen:

- Wasserkühlung der Motoren mit Zwangsumlauf des Kühlmittels durch eine über Riemen angetriebene Kreiselpumpe,
- Betrieb des Kühlsystems bei bis zu 1,5 bar Überdruck,
- Einsatz einer Mischung von Wasser und Frostschutzmittel, meist Äthylenglykol mit einem Volumenanteil von 30 … 50 % mit Inhibitoren gegen Korrosion,
- Aluminium in korrosionsbeständigen Legierungen als dominierender Kühlerwerkstoff,
- Kunststoff als dominierender Werkstoff für Wasserkästen, Lüfter und Lüfterzarge,
- In vielen Fällen Vormontage aller Kühlungskomponenten des Frontendbereichs in einer funktionalen Einheit, dem sog. Kühlmodul.

Die heutigen Entwicklungstendenzen gehen in Richtung:

- Optimierung des Kühlluftstromes durch das Kühlmodul und den Motorraum,
- Einführung einer getrennten bzw. regelbaren Kühlung von Motorblock und Zylinderkopf zur schnelleren Erwärmung und damit Kraftstoffreduzierung durch Verminderung von Reibungsverlusten,
- Regelungseingriffe über Lüfterantrieb, Kühlmittel-Thermostate (sog. Kennfeldthermostat) und Ventile,
- Einsatz von Elektropumpen zur Regelung des Kühlmittelstromes,
- Niedertemperaturkreisläufe mit einem Temperaturniveau von ca. 60 °C zur Kühlung von Ladeluft, Elektronik und anderer sensibler Bauteile,
- Integration von Ladeluft-Kühlmittelkühlern in das Ansauggehäuse zur Reduzierung des Ladeluftvolumens bzw. Ladeluftdruckabfalls [53, 54],
- Erhöhung der Kühlleistung durch zusätzliche Aufgaben wie weitere Abgaskühlung oder Kühlmittelkühlung des Abgaskrümmers [51, 52],
- Verringerung der Bauhöhe der Kühler zur Erfüllung der Vorschriften des Fußgängerschutzes.

Neben den zahlreichen Entwicklungsaktivitäten für noch kompaktere, leichtere und effizientere Komponenten bekommt vor allem das ganzheitlich konzipierte Kühlsystem bzw. Thermomanagement immer mehr Bedeutung im Hinblick auf die eingangs erwähnten Anforderungen [49, 52, 55]. Im Nutzfahrzeug gilt dies verstärkt, hier ist die Komplexität noch größer. Neben zweistufiger Aufladung mit Zwischenkühlung für die Ladeluft zeichnen sich weitere Massnahmen zur Nutzung der im Abgas verbliebenen thermischen Energie ab, die vornehmlich durch Wärmeübetragung aus dem Abgas nutzbar gemacht werden kann [56].

#### 3.3.1.1 Auslegung von Kühlern

Grundsätzliches Ziel der Auslegung des Kühlsystems ist, die geforderten Kühlleistungen mit möglichst kompakten, leichten und kostengünstigen Kühlern innerhalb des verfügbaren Bauraums zur Verfügung zu stellen. Dafür ist ein Optimierungsprozess hinsichtlich der Anordnung und Dimensionierung der Wärmeübertrager im Modul, der Auswahl der Rippen/Rohr-Geometrie der Kühler, der Leistungsaufnahme des Lüfters, der Abstimmung auf die fahrzeugseitigen Randbedingungen, oftmals auch des $c_W$-Wertes und des Crashverhaltens durchzuführen.

Gängiges Hilfsmittel für die Auslegung sind analytische Programme zur Wärmeübertrager-Berechnung nach der eindimensionalen Stromfadentheorie (► Abschn. 11.3). Bei Vorgabe der Kühlergeometrie, der Wärmeübergangs-, Wärmeleitungs- und Druckabfallbeziehungen sowie der Stoffströme können aus den Eintrittsgrößen Druck und Temperatur die gleichen Größen am Austritt des Wärmeübertragers berechnet werden. Unterstützt mit empirischen Daten aus langjähriger Messerfahrung mit einer großen Bandbreite von Ausführungen können mit diesen Simulationsprogrammen im Rahmen der Ähnlichkeitstheorie fast beliebige Rippen/Rohr-Varianten in beliebigen Abmessungen und für beliebige Betriebspunkte sehr zielgenau vorausberechnet werden.

Heute sind fast nur noch Auslegungen ganzer Kühlmodule mit Voll- und Teilüberdeckungen von Wärmeübertragern, Lüftern und Zargen gefordert. Entsprechend werden für diese Module sog. Topologie-Modelle mit mehreren Strompfaden erstellt, von denen jeder wieder nach der Stromfadentheorie berechnet werden kann. Die gegenseitige Beeinflussung der Komponenten wird dabei berücksichtigt [23, 36].

Schließlich wird dieses Hilfsmittel um Elemente wie Fahrtwind, Lüfter und alle Druckverbraucher im Fahrzeug wie z. B. Kühlergrill und Motorraumdurchströmung ergänzt. Damit wird die iterative Berechnung des Kühlluftdurchsatzes im Fahrzeug und folglich aller thermodynamischen Kenngrößen der Kühlanlage möglich. Gekoppelt mit einer breiten Erfahrung aus Kühlleistungsmessungen im Windkanal erhält man ein sehr zuverlässiges und schnelles Simulationshilfsmittel, das den Bedarf an Fahrzeugmessungen deutlich reduziert.

Zur detaillierten Ermittlung der Kühlluftströmung durch den Fahrzeugvorderbau, die Wärmeübertrager und den Motorraum kommen CFD-Methoden zum Einsatz (► Abschn. 11.3). Mit ihrer Hilfe wird die Luftströmung dreidimensional berechnet. Dazu werden die geometrischen Daten des Fahrzeugs benötigt. Man erhält die Geschwindigkeitsverteilung aus der sich Luftmassenströme und Druckverluste berechnen lassen. In der Kopplung mit der Strompfadmethode kann so bereits in der Konzeptphase der Einfluss inhomogener Anströmung auf das Verhalten des Kühlsystem ermittelt und geeignete Optimierungsschritte vorgeschlagen werden [36].

Die Auslegung des Kühlsystems orientiert sich am Anforderungsprofil des Fahrzeuges. Thermisch kritische Fahrzustände treten in der Regel bei maximaler Motorleistung $P_{max}$ oder maximalem Drehmoment $M_{max}$ auf. Der Betriebsfall „Maximalgeschwindigkeit in der Ebene“ muss bei leistungsstarken Motoren zunehmend durch „mehrfache Vollbeschleunigung“ ersetzt werden, da bei Erreichen hoher Geschwindigkeiten die Motoren vielfach abgeregelt und nicht mehr unter Vollast betrieben werden. Das Zusammenspiel zwischen Kühlmittelkühler, Kühlmittelmassenstrom (mechanisch angetriebene Pumpe) und die Unterstützung des mangelnden Fahrtwindes durch den Lüfter in den Fahrzuständen „Schnelle Bergfahrt“ oder „langsame Bergfahrt mit Anhänger“ sind für die Auslegung relevant. Ebenso werden Einsätze in Europa oder Heißländern unterschieden. Immer sind Fahrgeschwindigkeit, Umgebungstemperatur, abzuführende Wärmemengen und die Sollwerte für maximal zulässige Kühlmittel-, Ladeluft- und Öltemperaturen vorgegeben. Leistungsminderung durch Alterung wird in der Auslegung indirekt durch höhere Sollwerte berücksichtigt. Typische Faustformeln und Sollwerte für die wesentlichen Pkw Kühlungsarten sind in ◘ Tab. 3.1 zusammengestellt.

◘ **Tabelle 3.1** Typische Faustformeln und Sollwerte zur Kühlauslegung

| Objekt | Sollwert |
|---|---|
| Kühlmitteltemperatur | 90–105 °C |
| Kühlmittelvolumenstrom | 5000 … 25.000 l/h |
| Ladeluftmassenstrom | 0,05 … 0,6 kg/s |
| Maximal aus dem Kühlmittel abzuführende Wärmemengen | |
| beim Ottomotor | 0,5 … 0,6 $P_{mech}$ |
| beim Dieselmotor DI | 0,65 … 0,75 $P_{mech}$ |
| Maximal zulässige Temperaturdifferenz: | |
| Kühlmittel am Kühlereintritt zu Umgebungstemperatur | ca. 80 K |
| Ladeluft am Kühleraustritt und Umgebungstemperatur | ca. 35 K |

### 3.3.1.2 Kühlerbauarten

Die verschiedenen Leistungsanforderungen wie sie aus oben aufgeführten Daten hervorgehen und die unterschiedlichsten Bauraumanforderungen an Kühlmittel-, Öl- und Ladeluftkühler haben zu den unterschiedlichsten Kühlerbauarten geführt [24], eine Ausführung zeigt ◘ Abb. 3.15.

So reichen z. B. die Systemtiefen (Erstreckung in Kühlluftströmungsrichtung) für Kühlmittelkühler vom kleinsten Pkw- bis zum größten Nkw-Kühler von 12 mm bis 55 mm, die kühlluftseitigen Stirnflächen von 15 $dm^2$ bis 85 $dm^2$.

Für die Leistungsfähigkeit der Kühler ist in erster Linie die Konstruktion der Rippen/Rohr-Geometrie, die so genannte Kühlermatrix, entschei-

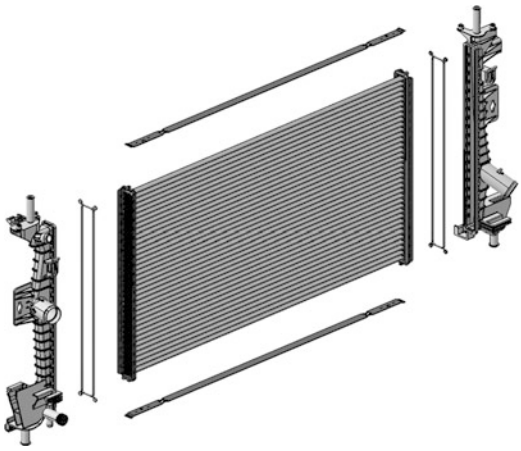


**Abb. 3.15** Konstruktiver Aufbau eines Aluminium-Kühlmittelkühlers mit Kunststoffkästen

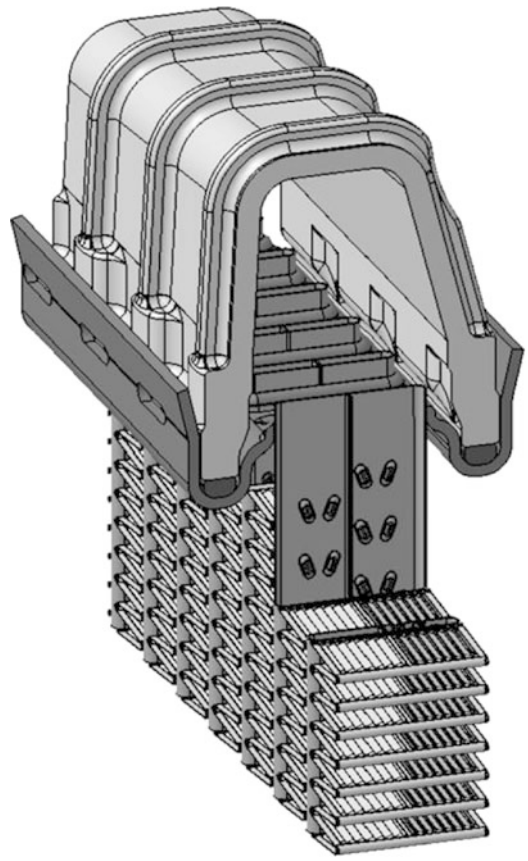


**Abb. 3.16** Gelötetes Flachrohrsystem

dend. Die in der Vergangenheit vielfältig vorhandenen mechanisch gefügten Systeme verlieren an Bedeutung und finden sich heute vor allem noch im unteren Leistungssegment. Am Markt vorherrschend sind die gelöteten Systeme, die durch stoffschlüssige Verbindung eine bessere Wärmeübertragung und damit höhere Leistungsdichte ermöglichen.

Gelötete Systeme aus lotplattierten Flachrohren und gewalzten Wellrippen, Abb. 3.16, werden heute üblicherweise mit nur einem Rohr in der Systemtiefe gefertigt, das zur Festigkeitssteigerung mit Sicken versehen oder gefaltet sein kann. In beiden Fällen werden die Rohre in so genannten Böden in die Verteilerkästen geführt, in denen das Kühlmittel oder die Ladeluft auf die Rohre verteilt wird, Abb. 3.15.

Motorölkühler werden im Pkw bevorzugt motornah untergebracht. Die Kühlung des Öls erfolgt dabei durch das Kühlmittel. Daher werden hier Bauformen wie Flachrohr-, Rundscheiben- oder Stapelscheibenölkühler, Abb. 3.17, aus Aluminium eingesetzt. Getriebeölkühler bei Pkw mit Automatikgetriebe können wiederum luftgekühlte Flachrohr-Ausführungen sein oder ebenfalls eine Stapelscheibenausführung haben, bei der das Öl durch das Kühlmittel rückgekühlt wird. Eine Integration des Ölkühlers in den Verteilerkasten des Kühlmittelkühlers ist möglich, der Einsatz nimmt aber mit zunehmender Leistungsanforderung ab.

Bei Ladeluftkühlern reichen die Systemtiefen von ca. 30 mm bis zu über 100 mm, die Stirnflächen von 3 $dm^2$ bei Pkw bis zu 80 $dm^2$ bei Nkw. Im Pkw sind viele Anordnungen gebräuchlich: großflächig vor dem Kühlmittelkühler, lang und schlank unter oder neben dem Kühlmittelkühler oder ganz abseits des Moduls z. B. im Radlauf; daher die große Bandbreite in den Systemtiefen. Ladeluftkühler sind überwiegend gelötete Flachrohrkühler aus Aluminium und direkt von Kühlluft gekühlt. Zunehmend erfolgt die Ladeluftkühlung auch motornah mit Kühlmittel [50]. Dadurch entfällt die aufwändige Verschlauchung für die Ladeluftführung vom Lader zur Fahrzeugfront und zurück.

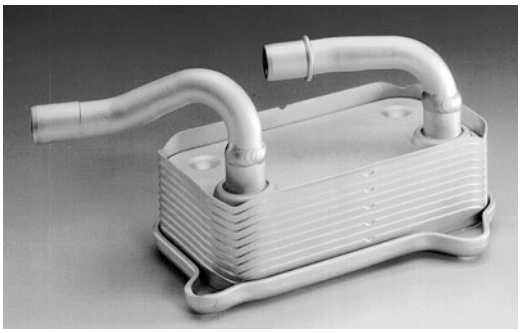


**Abb. 3.17** Ölkühler in Stapelscheibenbauweise (Werkbild MAHLE)

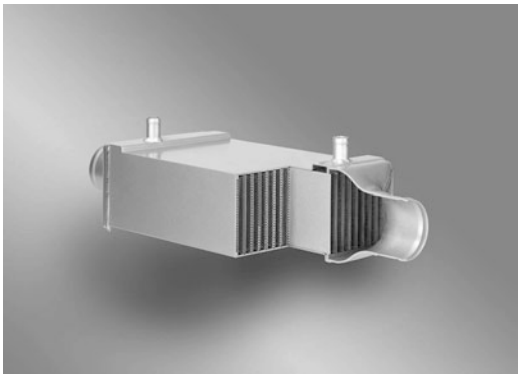


**Abb. 3.18** Indirekter Ladeluftkühler in Rohrbündelbauweise (Werkbild MAHLE)

Als Bauarten finden wir bei der so genannten indirekten Ladeluftkühlung heute Rippe/Flachrohr-, Rippe/Scheibe-, aber auch Rohrbündelsysteme mit kühlmittelseitigen Turbulenzeinlagen zur Effizienzsteigerung, Abb. 3.18.

Abgaskühler sind sehr hohen Temperaturen sowie starker Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt, daher wird hier Edelstahl als Werkstoff bevorzugt. Als Fügeverfahren sind das Laser-Schweißen oder Nickel-Löten üblich. Konstruktiv sind diese Kühler als Rohrbündel ausgeführt, wobei die abgasführenden Rohre einfache Rundrohre oder Rohre mit speziellen leistungssteigernden, aber verschmutzungsunanfälligen Strukturen sein können.

### 3.3.1.3 Lüfter und Lüfterantriebe

Lüfter für die Motorkühlung werden heute fast ausnahmslos in axialer Bauart in Kunststoff ausgeführt. Zu der axialen Beschaufelung kommen je nach Betriebszuständen im Fahrzeug noch Mantelringe und Einlaufdüsen an den Blattspitzen hinzu. Weitere typische Lüftermerkmale können gesichelte Blätter und ungleichmäßige Blatt-Teilung sein. Mit solchen Maßnahmen kann der Lüfterwirkungsgrad gesteigert und die Geräuschemission vermindert werden.

Beim Pkw werden Lüfter in einfacher oder doppelter Anordnung meist saugend eingesetzt mit maximalen Lüfterdurchmessern von ca. 500 mm. Die als Lüfterantrieb eingesetzten Elektromotoren nehmen bis zu 850 W el. Leistung auf, wobei eine stufige Drehzahlvariation über Regler, gegebenenfalls auch mit bürstenlosen Elektromotoren, vorgesehen wird. Direkt angetriebene, über eine Viskositätskupplung gesteuerte Lüfter sind nur noch bei größeren Nutzfahrzeugen im Einsatz.

### 3.3.1.4 Kühlmodule

Kühlmodule sind vormontierte Baueinheiten, die aus verschiedenen Komponenten des Kühlsystems und dem Klimakondensator bestehen und eine Lüftereinheit mit Antrieb einschließen, Abb. 3.19. Die Modultechnik, bietet prinzipiell mehrere technische und wirtschaftliche Vorteile [25]:

- Optimale Auslegung und Abstimmung der Komponenten,
- dadurch besserer Wirkungsgrad im Fahrzeug oder kleinere, leichtere und kostengünstigere Komponenten möglich.
- Weniger Aufwand beim Fahrzeughersteller für Logistik und Montage, wenn das Modul vorgefertigt angeliefert wird.

In normalen Straßenfahrzeugen werden fast ausschließlich karosseriefeste Kühlmodule eingesetzt, die an den fahrzeugseitig vorhandenen Längs- und Querträgern befestigt werden. Meist dient einer der Wärmeübertrager als tragendes Modulelement, an seine Wasser- oder Luftkästen und Seitenteile werden die anderen Komponenten mittels Rast-, Klemm- oder Clipsverbindung befestigt. Zur Vereinfachung der Montage und im Falle hoher Variantenvielfalt kommen auch Tragrahmen zum Einsatz.

Durch neue Kühlmodul-Architekturen, ermöglicht durch die Entwicklung neuer indirekter Komponenten und durch neue Kühlsystem-Auslegun-

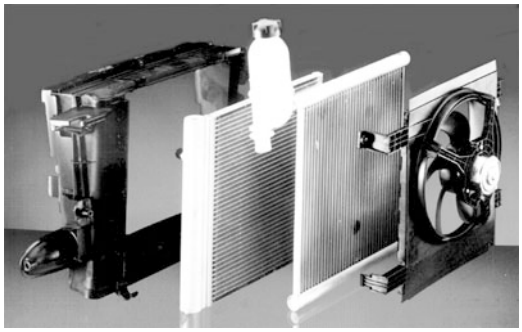


**Abb. 3.19** Kühlmodul für Pkw (Werkbild MAHLE)

gen, können die Anforderungen nach Einsparung von Bauraum in der Fahrzeuglängsachse, verbesserter Fußgängerschutz und Crashverhalten und um neue Freiheiten beim Styling erfüllt werden. Dies ist insbesondere durch Einführung eines 2-Ebenen-Kühlmoduls in Verbindung mit einem indirekten Kondensator vorteilhaft, da sich in $x$-Richtung signifikante Packagevorteile und gegebenenfalls auch Verbrauchsvorteile ergeben [71, 72].

#### 3.3.1.5 Gesamtsystem Motorkühlung

Der Kühlungsbedarf ist vom momentanen Betriebszustand des Motors, der Nebenaggregate insbesondere Klimakreislauf und von der Umgebungstemperatur abhängig. Die erforderlichen Regelungseingriffe erfolgen in gängigen Kühlsystemen heute noch durch verhältnismäßig einfache Einrichtungen:

Ein Thermostat, dessen wachsgefülltes Dehnelement auf die Temperatur des ihn umströmenden Kühlmittels reagiert, lenkt den Kühlmittelstrom bei der gewünschten „Öffnungstemperatur" durch den Kühlmittelkühler hindurch. Bei tieferen Temperaturen wird der Kühler im Kurzschluss umgangen. So wird bei sehr niedrigen Kühlmitteltemperaturen und im Kaltstart Kühlung weitgehend vermieden und bei sehr hohen Temperaturen für maximale Kühlung gesorgt.

Elektrisch betriebene Lüfter werden in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur im Wasserkasten in verschiedenen Drehzahlstufen oder stufenlos zugeschaltet.

Alle weiteren Komponenten des Kühlsystems sind auf kritische Betriebsbedingungen ausgelegt, werden dann aber ungeregelt betrieben. So wird die Kühlmittelpumpe über einen Riementrieb von der Kurbelwelle angetrieben, die Ölkühlung wird nur in Einzelfällen thermostatisch geregelt. Ladeluftkühlung erfolgt meistens ungeregelt.

Einfache Kühlsysteme waren bisher völlig ausreichend und zeichnen sich durch einen sehr zuverlässigen Betrieb aus. Die Zukunft wird aber auch hier, wie in vielen anderen Systemen des Fahrzeugs, der elektronischen Regelung gehören. Über Sensoren, die den thermischen Zustand von Motor und Kühlanlage erfassen, wird ein Steuergerät mittels der abgelegten Regelungsalgorithmen Eingriffe an Förderorganen (Lüfter, Pumpen) und Stellorganen (Ventile, Klappen, Jalousien) auslösen, um über eine bedarfsorientierte Kühlung Antriebsenergie an Nebenaggregaten einzusparen, Abgas- und Geräuschemissionen günstig zu beeinflussen und zur Komfortsteigerung und Verschleißreduzierung Aufheizphasen verkürzen [55]. Dafür müssen alle Förder- und Stellorgane elektrisch ansteuerbar sein, was heute schon bei el. Lüftern und Kühlmittelpumpen möglich ist. Der so genannte Kennfeldthermostat ist in der Lage verschiedene Öffnungstemperaturen zu fahren. Damit kann das Temperaturniveau des Kühlmittels an den Betriebszustand des Motors angepasst werden. Weitere Nebenaggregate und Stellglieder des Kühlsystems werden zukünftig elektrisch ansteuerbar sein [26, 27, 55]. Mit zunehmender Nutzung der indirekten, kühlmittelgekühlten Ladeluftkühlung ergeben sich zusätzliche Eingriffsmöglichkeiten durch Regelung des Niedertemperaturkühlmittelstromes. Während in der Vergangenheit bei der Turboaufladung die Leistungssteigerung im Vordergrund stand, ist es heute zunehmend die Energieeffizienz durch Downsizing bei höherer Leistungsdichte des Motors. Damit kommt der Ladelufttemperatur eine größere Bedeutung zu, da der spezifische Kraftstoffverbrauch durch Absenkung der Ladelufttemperatur gesenkt werden kann [68, 69]. Zukünftige Motoren werden eine 2-stufige Ladeluftkühlung erfordern, da die Ladedrücke und Ladelufttemperaturen nach Kompressor weiter ansteigen.

Das Kühlsystem ist schon heute ein sehr komplexes System mit einer großen Zahl von Parametern, die sich gegenseitig beeinflussen. In Auslegung

und Optimierung wird die virtuelle Kühlsystementwicklung in zunehmenden Maße eingesetzt. ([36, 54], siehe auch ► Abschn. 11.3).

## 3.3.2 Beheizen und Kühlen des Fahrgastraumes

Die Klimatisierung des Fahrgastraumes erfüllt mehrere Aufgaben:

- freie Sicht durch die Scheiben gewährleisten,
- ein behagliches Klima für alle Insassen schaffen und dadurch
- dem Fahrer ein wenig ermüdendes Umfeld bieten,
- die Insassen vor unangenehmen Gerüchen und belastenden Stoffen bewahren.

Die Klimatisierung trägt nicht nur zum Komfort bei. Sie leistet auch einen Beitrag zur Fahrsicherheit, da die Konzentrationsfähigkeit des Fahrers in einem behaglichen Klima signifikant höher ist als in heißer oder kalter Umgebung (siehe hierzu auch ► Abschn. 6.4.3.1 und [28]). Eine sicherheitsrelevante und deshalb gesetzlich geregelte Funktion [29] besteht darin, die Scheiben von Beschlag und Vereisung freizuhalten.

Fragen des Komforts und der Funktion des Klimageräts werden in ► Abschn. 6.4.3 dieses Buches behandelt. Der Fahrzeugklimatisierung kommt mit der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges eine zusätzliche Bedeutung zu, da der elektrische Energiespeicher und die Leistungselektronik ausreichend gekühlt werden müssen. Ferner steht je nach Grad der Hybridisierung der Innenraumheizung deutlich weniger Motorabwärme als bei herkömmlichen Fahrzeugen zur Verfügung. Im Falle des rein elektrischen Antriebs entfällt diese Wärme sogar vollständig.

Damit die Klimaanlage ihre Funktion erfüllen kann, muss sie durch den Heiz- und Kältekreislauf ausreichend versorgt werden. Die Komponenten dieser Kreisläufe und ihre Wechselwirkungen zum Fahrzeug werden hier erläutert.

Die Klimatisierung von Fahrzeugen erfolgt durch einen konditionierten Luftstrom, symbolisiert durch Pfeile in ◘ Abb. 3.20, der durch Düsen an der Instrumententafel, im Fußraum und auch im Fondraum in die Kabine eintritt. Das Klimagerät (3) ist hinter der Instrumententafel angebracht. Die Außenluft wird unterhalb der Windschutzscheibe mithilfe eines Radialgebläses (1) über einen Filter (2) angesaugt, im Klimagerät zunächst durch den Verdampfer (4) geführt, in dem die Luft gekühlt und dabei getrocknet werden kann. Danach erwärmt sich die Luft am Heizkörper (5).

### 3.3.2.1 Die Funktion Heizen und ihre Komponenten

Kraftfahrzeuge werden in der Regel durch die Abwärme des Verbrennungsmotors beheizt. Ein Teil des Kühlmittels wird nach der Durchströmung des Motorblockes für den Heizkreislauf abgezweigt und strömt durch den Heizkörper, der im Klimagerät angeordnet ist. Dort wird die im Kühlmittel enthaltene Wärme an die Luft, die in die Fahrgastkabine strömt, abgegeben.

Die Konstruktionsprinzipien der Heizkörper ähneln denen von Kühlmittelkühlern, wie sie in ► Abschn. 3.3.1.2 beschrieben sind. Die Kühlmittelkästen sind in vielen Fällen allerdings aus Aluminium. Die Heizleistung ist in ◘ Abb. 3.21 für Kühlmittelmengen in Abhängigkeit des Luftmassenstromes dargestellt. Die angegebenen Werte gelten für eine Lufteintrittstemperatur von −20 °C und eine Kühlmitteleintrittstemperatur von +80 °C. Für andere Eintrittstemperaturdifferenzen ändert sich die Leistung entsprechend.

Die Regelung der Heizleistung, die in die Fahrgastzelle eingebracht wird, erfolgt entweder auf der Kühlmittelseite durch elektrische Taktventile oder kontinuierlich verstellbare Ventile (wasserseitige Temperatursteuerung) oder durch Mischung von kalter und warmer Luft im Heiz-/Klimagerät nach Heizkörper, der in diesem Fall immer mit dem vollen Kühlmittelstrom beaufschlagt wird (luftseitige Steuerung, näheres hierzu siehe ► Abschn. 6.4.3).

Die Versorgung des Heizkörpers mit warmem Kühlmittel hängt vom momentanen Betriebszustand des Motors ab. Massenstrom und Temperatur des Kühlmittels variieren stark mit der Motordrehzahl und der Motorlast. Bei der Auslegung des Kühlmittelkreislaufes ist bei allen Fahrzeuggrößen darauf zu achten, dass für den Heizkörper im Fahrgastraum ein Kühlmittelstrom über 600 l/h zur Verfügung steht, damit eine gute Wärmeübertra-

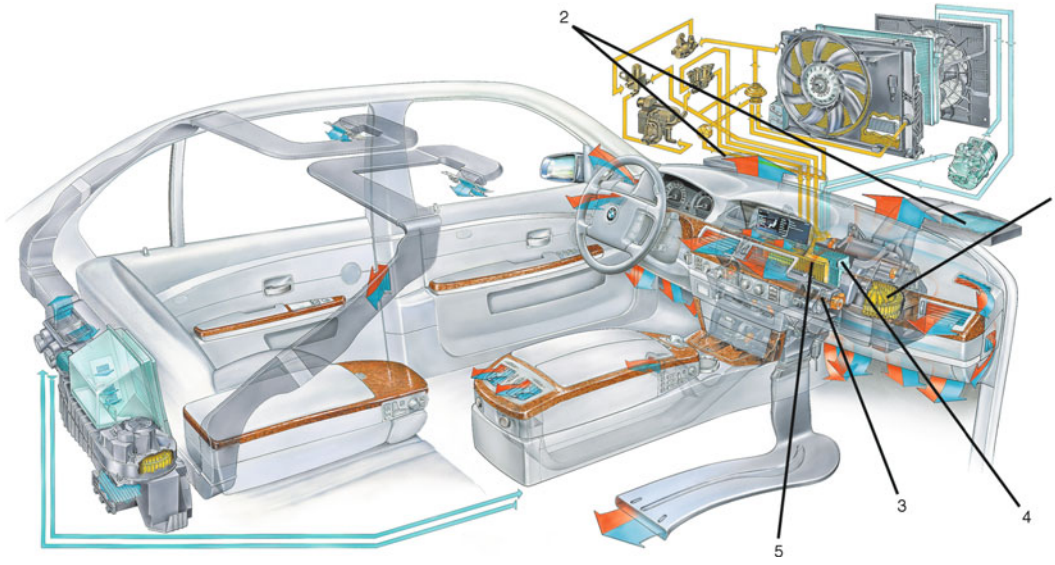



**Abb. 3.20** Die Klimaanlage in einem Fahrzeug der Oberklasse

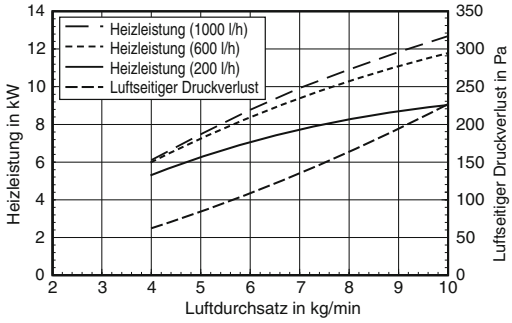



**Abb. 3.21** Leistung und luftseitiger Druckverlust am Heizkörper

gung vom Kühlmittel an die Luft gewährleistet ist. Kann auslegungsbedingt kein ausreichend hoher Kühlmittelmassenstrom im Heizkreislauf von der Wasserpumpe des Motors zur Verfügung gestellt werden, werden elektrisch betriebene Zusatzwasserpumpen eingesetzt (der typische Förderstrom dieser Pumpen liegt bei 1000 l/h bei 1000 mbar Förderhöhe). Diese verhindern dann auch im Leerlauf einen Abfall der Heizleistung.

Die Steigerung der Motorwirkungsgrade führt zunehmend zu einem Mangel an verfügbarer Wärme im Kühlmittel. Bei −20 °C Außentemperatur liegt die erforderliche Heizleistung im Beharrungszustand etwa bei 7 kW. Insbesondere bei modernen direkteinspritzenden Diesel- aber auch zukünftig bei Ottomotoren sowie im elektrischen Betrieb von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen reicht die Abwärme nicht aus, um eine schnelle Aufheizung nach Kaltstart zu gewährleisten oder sogar überhaupt ein komfortables Temperaturniveau zu erreichen. Als Lösung stehen mehrere Zuheizkonzepte [30] zur Auswahl: Aktive Systeme decken die Differenz zwischen Wärmeangebot im Kühlmittel und dem Wärmebedarf des Innenraums durch eine weitere Wärmequelle, d. h. durch Einsatz zusätzlicher Primärenergie. Dies können sein: Brennstoffzuheizer (Abb. 3.22), luftseitige elektrische Zuheizung (PTC-Heizung, Abb. 3.23) oder zukünftig auch Wärmepumpen. Tab. 3.2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Zuheizkonzepte.

In [31] und [32] werden Zuheizsysteme ausführlicher verglichen. [33] und [34] beschreiben neuere Entwicklungen zum Brennstoffzuheizer und zu elektrischen Zuheizsystemen. Alle elektrischen Zuheizer besitzen über die zusätzliche Belastung des Motors aus dem notwendigen Generatorbetrieb eine indirekte Zuheizwirkung. Näherungsweise wird etwa die gleiche Wärmemenge, die direkt elektrisch eingebracht wird, auf indirektem Wege dem Kühlmittel zugeführt.

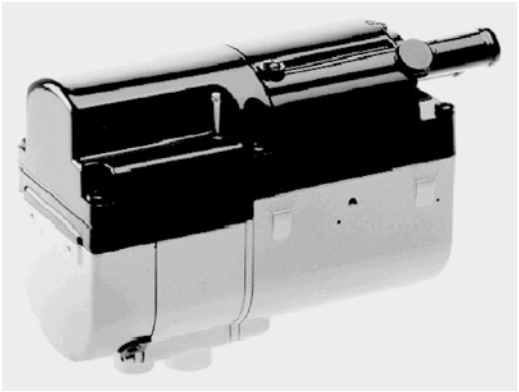


**Abb. 3.22** Brennstoffzuheizer



**Abb. 3.23** PTC-Heizung mit Leistungsregler (Werkbild MAHLE)

Neben aktiven Systemen werden passive Systeme betrachtet, wie z. B. Wärmerückgewinnung aus dem Abgas mithilfe eines Abgaswärmeübertragers.

### 3.3.2.2 Die Funktion der Kälteanlage und ihre Komponenten

Die Kälteanlage im Fahrzeug beruht auf dem Kaltdampfprozess und funktioniert im Prinzip ähnlich wie ein Kühlschrank. Der Zuluftstrom zur Fahrgastzelle wird an der Außenseite des Verdampfers abgekühlt, Abb. 3.25. Dabei kann die Luftfeuchtigkeit kondensieren. Auf der Innenseite des Verdampfers nimmt das Kältemittel die Wärme der Luft auf und verdampft dabei bei Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur und bei niedrigem Druck. Im Verdichter (Kompressor) wird der Kältemitteldampf auf einen höheren Druck gebracht und kann nun Wärme bei höherer Temperatur (oberhalb der Umgebungstemperatur) am Kondensator,

**Tabelle 3.2** Zuheizsysteme im Überblick

| Zuheizsystem | Beschreibung | Merkmale |
|---|---|---|
| Brennstoffzuheizer | Verbrennung von Kraftstoff erzeugt zusätzlich Wärme, die direkt an das Kühlmittel abgegeben wird. Der Brennstoffzuheizer ist in den Kühlmittelkreislauf integriert | Hohe Leistung, leicht zur Standheizung aufrüstbar, hoher Aufwand (Kosten, Gewicht, Bauraum) |
| Elektrische PTC Heizung im Luftstrom (**P**ositive **T**emperature **C**oefficient, elektrischer Widerstand steigt mit der Temperatur an) | Die Wärmeabgabe erfolgt direkt an die Luft, die in die Fahrgastzelle strömt. Die PTC-Charakteristik der Heizelemente verhindert unzulässig hohe Temperaturen (s. Abb. 3.24) | Spontane Wirkung, zusätzliche Heizwirkung durch höhere Motorbelastung über den Generator, hohe Belastung des elektrischen Bordnetzes, heute weit verbreitete Serienlösung |
| Wärmerückgewinnung aus dem Abgas | Die Wärmeabgabe erfolgt an das Kühlmittel, zusätzlicher Druckabfall im Abgasstrang und zusätzlicher Wärmeeintrag in den Motorkühlkreislauf muss berücksichtigt werden | Praktisch kein zusätzlicher Primärenergiebedarf, eventuell muss Motorsteuerung angepasst werden, hoher Aufwand (Bauraum, Kosten) |
| Wärmepumpe | Die Kälteanlage wird als Wärmepumpe eingesetzt | Geringer zusätzlicher Bauraumbedarf, abhängig von der Quellentemperatur (Luft oder Kühlmittel) hohe Leistung und Wirkungsgrade erzielbar, aufwändige Verschaltung erforderlich |

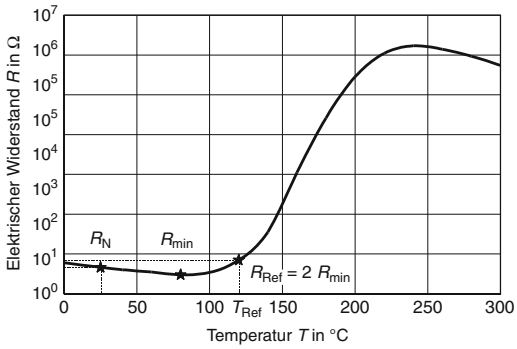



**Abb. 3.24** Widerstands-Temperatur-Kennlinie eines PTC-Elements

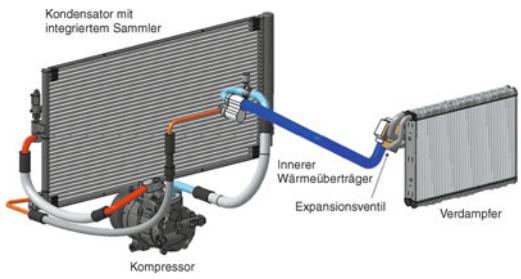



**Abb. 3.25** Schema Kältekreislauf im Fahrzeug

der im Motorraum vor dem Kühler angeordnet ist, an die Außenluft abgeben. Dabei verflüssigt sich das Kältemittel. Die Flüssigkeit durchströmt den Sammler, der Kältemittel für unterschiedliche Betriebspunkte speichert, und wird dann im Expansionsventil wiederum auf niedrigen Druck und Temperatur entspannt. Danach gelangt das Kältemittel wieder in den Verdampfer. Der Kreislauf ist geschlossen. Zur Leistungs- und Wirkungsgradoptimierung wird häufig zusätzlich noch ein so genannter „Innerer Wärmeübertrager" eingesetzt [44]. In diesem wird das flüssige Kältemittel nach Kondensator im Gegenstrom zum verdampften Kältemittel geführt, um so die mögliche Enthalpiedifferenz im Verdampfer zu erhöhen.

Für die energetische Systemeffizienz und das Package im Motorraum ist die Art des Expansionsorgans von großer Bedeutung. Ein thermostatisches Expansionsventil sorgt durch die Regelung des Kältemittelmassenstroms dafür, dass am Verdampferaustritt nur Kältemitteldampf vorliegt. Neben einer guten Ausnutzung des Verdampfers in allen Betriebszuständen wird damit auch der Kompressor vor so genannten Flüssigkeitsschlägen geschützt. In diesen Systemen wird der Sammler, wie oben beschrieben zwischen Kondensator und Expansionsventil eingebaut.

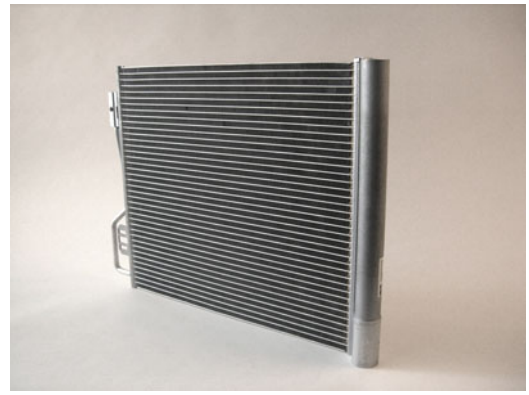


**Abb. 3.26** Flachrohrkondensator mit integriertem Sammler (Werkbild MAHLE)

Alternativ zum thermostatischen Expansionsventil kann als Drosselorgan ein Kapillarröhrchen („Orifice Tube") eingesetzt werden. Da das Orifice Tube keinen veränderlichen Querschnitt besitzt, kann am Verdampferaustritt noch Flüssigkeit vorliegen. Zum Schutz des Kompressors muss daher in diesen Systemen in der Kältemittelleitung vom Verdampfer zum Kompressor ein so genannter Akkumulator eingebaut werden, der die Flüssigkeit abscheidet und speichert. Ein Akkumulator hat etwa das doppelte Volumen eines Sammlers.

Für die Abstimmung des gesamten Wärmemanagements im Fahrzeug sind vor allem die Wechselwirkungen zwischen Kondensator und Motorkühlsystem wichtig. Zum einen muss die Wärmeabgabe des Kondensators bei der Auslegung der Motorkühlung berücksichtigt werden, zum anderen ist für die Leistung und den Wirkungsgrad der Kälteanlage eine gute Belüftung des Kondensators maßgebend. Es muss bei der Integration ins Fahrzeug darauf geachtet werden, dass Rückströmungen von bereits erwärmter Kühlluft durch den Kondensator vermieden werden. Der Kondensator wird als gelötetes System mit Flachrohren und Wellrippen, Abb. 3.26, ausgeführt [35].

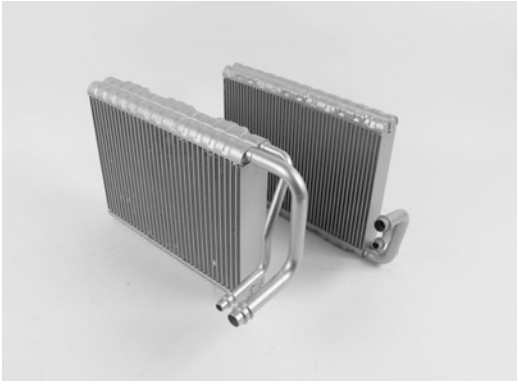


**Abb. 3.27** Flachrohrverdampfer (Werkbild MAHLE)

Der Verdampfer ist innerhalb des Klimagerätes untergebracht. Durch Erhöhung der Leistungsdichte konnten in den letzten Jahren die Bautiefen von ca. 65 auf 40 mm verringert werden. Abb. 3.27 zeigt einen Flachrohrverdampfer dieser Art. Beim Abkühlen der warmen Luft fällt am Verdampfer Luftfeuchtigkeit aus. Ein problemloser Wasserablauf ist deshalb wichtig. Hierzu dienen hydrophile Beschichtungen, die zudem Wachstum von Bakterien und Mikroorganismen hemmen, die zu einem unangenehmen Geruch führen können.

Der Arbeitsstoff einer Fahrzeugklimaanlage darf in der EU ab 2011 für neu typgeprüfte Fahrzeuge ein Treibhauspotenzial (GWP = Global Warming Potential) von nur noch kleiner 150 aufweisen. Damit darf das bisherig verwendete Kältemittel R134a (GWP von 1430) für diese Fahrzeuge nicht mehr eingesetzt werden. Ab 2017 gilt diese Vorgabe dann für alle Neufahrzeuge. Als mögliches Kältemittel wird R1234yf favorisiert, dessen GWP bei 4 liegt. Grundsätzlich wäre es thermodynamisch gesehen auch möglich, $CO_2$ (Kohlendioxid, auch als R744 bezeichnet) als Kältemittel einzusetzen.

Dem Kältemittel wird zur Schmierung des Verdichters etwa 10 bis 20 % Öl zugemischt, dadurch müssen Leistungseinbußen hingenommen werden.

Die in der Klimaanlage befindliche Menge an Kältemittel ist in jedem Fahrzeug unterschiedlich und wird wesentlich vom inneren Volumen der Bauteile, die flüssiges Kältemittel führen, bestimmt. Typische Werte sind 600 bis 900 g R134a bzw. R1234yf.

### 3.3.2.3 Verdichter und Regelung der Kälteleistung

Der Verdichter der Kälteanlage befindet sich im Riementrieb des Motors. Mit bis zu 6 kW Antriebsleistung zählt er zu den größeren Verbrauchern von Hilfsenergie, die durch den Motor zur Verfügung gestellt werden muss.

Nahezu ausschließlich werden in Fahrzeugen heute Taumelscheibenverdichter eingesetzt. Eine schräg stehende Scheibe wird durch die Verdichterwelle angetrieben und bewegt über ihre Taumelbewegung mehrere Kolben in kreisförmig angeordneten Zylinderbohrungen. Die Ansaugung und der Ausstoß des verdichteten Gases erfolgt über Bohrungen mit Ventilen im Zylinderkopf. In modernen Verdichtern lässt sich das Hubvolumen durch Neigung der Scheibe relativ zur Welle verändern. Dadurch kann man den Förderstrom und somit die Leistung des Verdichters einstellen. In Verdichtern mit unveränderlichem Hub (Fixed Displacement) wird die Leistungsanpassung durch periodisches Ein- und Ausschalten des Verdichters über eine Magnetkupplung erreicht. Der damit verbundene Einschaltruck muss besonders bei kleineren Motoren über die Motorsteuerung kompensiert werden.

Als Vorteile für Taumelscheibenverdichter sind zu nennen: der gute Liefergrad im unteren Drehzahlbereich, die leicht realisierbare Leistungsregelung und ein günstiges Verhalten im geregelten Bereich.

Der Trend geht zu geregelten Verdichtern mit veränderlichem Hubvolumen. Zwischenzeitlich lösen bereits die extern ansteuerbaren Verdichter diejenigen mit interner Saugdruckregelung ab [37, 38]. Ziel der Regelung ist der Ausgleich der Drehzahländerung des Motors. Die externe Ansteuerung ist notwendige Voraussetzung für kupplungslosen Betrieb. Der Verdichter wird dabei nicht mehr mechanisch getrennt, sondern auf Nullhub geregelt, wenn der Kältekreislauf ausgeschaltet ist. Außerdem kann über eine externe Regelung die Verdampfertemperatur so eingestellt werden, dass die Leistungsaufnahme am Verdichter bedarfsgerecht erfolgt. Diese

Maßnahme verringert den durch den Kältekreislauf verursachten Kraftstoffmehrverbrauch.



### 3.3.2.4 Auslegung der Klimaanlage

Der Bedarf eines Fahrzeugs zur Beheizung oder Abkühlung des Innenraums hängt von den fahrzeugseitigen und den klimatischen Randbedingungen ab:

**Fahrzeugseitige Randbedingungen**

- Masse und Wärmekapazität der Einbauten und Umschließungsflächen,
- Größe der Fahrzeugkabine,
- Wärmedämmung der Umschließungsflächen, z. B. Dach, Boden, Spritzwand,
- Abmessungen, Winkel und Strahlungseigenschaften der Scheiben,
- Entlüftung und Durchströmung der Kabine, Leckluftströme durch Undichtigkeiten der Karosserie,
- Umströmung des Fahrzeugs, je nach Fahrgeschwindigkeit ändern sich der Wärmeübergang außen und die Ansaugbedingungen.

**Klimatische Randbedingungen**

- Außentemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Sonneneinstrahlung.

Ausschlaggebend für die Auslegung der Fahrzeugklimatisierung sind die Anfahrvorgänge, die ein Mehrfaches der Leistung im Vergleich zur Erhaltung eines Beharrungszustandes erfordern. Eine Klimaanlage im Fahrzeug wird üblicherweise so dimensioniert, dass nach längerem Stillstand eine komfortable Temperatur des Fahrgastraumes nach kurzer Zeit erreicht wird. Im Sommer bei vollem Sonnenschein herrschen in einem parkenden Fahrzeug Temperaturen bis zu 70 °C. Typische Auslegungsbedingung ist 40 °C Außentemperatur, 40 % relative Luftfeuchtigkeit und 1000 W/m$^2$ Sonneneinstrahlung.

Im Winter kühlt sich der Fahrzeuginnenraum auf Außentemperatur ab. Man nimmt −20 °C als Auslegungswert an. Die Aufheizung mit optimalem Luftstrom um 5 kg/min, der unter dem maximal möglichen liegt, verläuft wie die obere Kurve in ◘ Abb. 3.28 zeigt. Die untere Kurve verdeutlicht die unkomfortable Situation für Fahrzeuge mit direkteinspritzendem Dieselmotor ohne Zuheizer.

Außer den klimatischen Bedingungen werden auch die Fahrzustände vorgeschrieben, typisch ist hier konstante Fahrt in der Ebene im 3. Gang mit 32 km/h oder 50 km/h. Zumeist wird auch das Verhalten des Klimasystems im Leerlauf des Motors betrachtet, da dieser Fahrzustand wegen der geringen Motordrehzahl zum Antrieb von Wasserpumpe und Klimaverdichter den ungünstigsten Fall sowohl für die Abkühlung als auch für die Aufheizung des Fahrzeugs darstellt.

Eine typische Abkühlkurve für Betrieb in Umluft bei voller Leistung des Radialgebläses erreicht Innenraumtemperaturen von 25 °C nach 20 min und 23 °C nach 60 min Betriebsdauer. Der zeitliche Temperaturverlauf mit maximaler Leistung der Klimaanlage zeigt zu Beginn einen großen Gradienten, der in einen Beharrungswert übergeht, siehe ◘ Abb. 3.29.

Zu Beginn der Abkühlung treten am Verdampfer Leistungen bis zu 8 kW auf, die jedoch in der Nähe eines Beharrungszustandes auf Werte um 2,5 kW fallen. Der Luftstrom in den Fahrgastraum beträgt hierbei zwischen 7 und 11 kg/min.

Für die Beurteilung einer Kälteanlage sind folgende Größen maßgebend:

- Kälteleistung,
- Wirkungsgrad,
- Geräusch/Vibration,
- Regelverhalten,
- Dauerlauffestigkeit.

Diese Größen werden von den Komponenten selbst sowie von der Systemumgebung beeinflusst – also vom Verlauf und den Eigenschaften der Kältemittelleitungen, von der Belüftung des Kondensators sowie von den Betriebsbedingungen vorgegebenen Drücken und Temperaturen im Kältekreislauf. Dies bedeutet, dass ein Kältekreislauf abschließend nur im Fahrzeug beurteilt werden kann.

Zur Auslegung der Heiz- und Kältekreisläufe gewinnen Simulationsverfahren eine immer größere Bedeutung [36, 39, 42]. Dabei können stationäre Betriebszustände mit einer hohen Genauigkeit abgebildet werden – dies gilt auch für die Aufheiz- und Abkühlvorgänge der Fahrgastzelle, da diese bezüglich der Kreisläufe mit ausreichender Genauigkeit

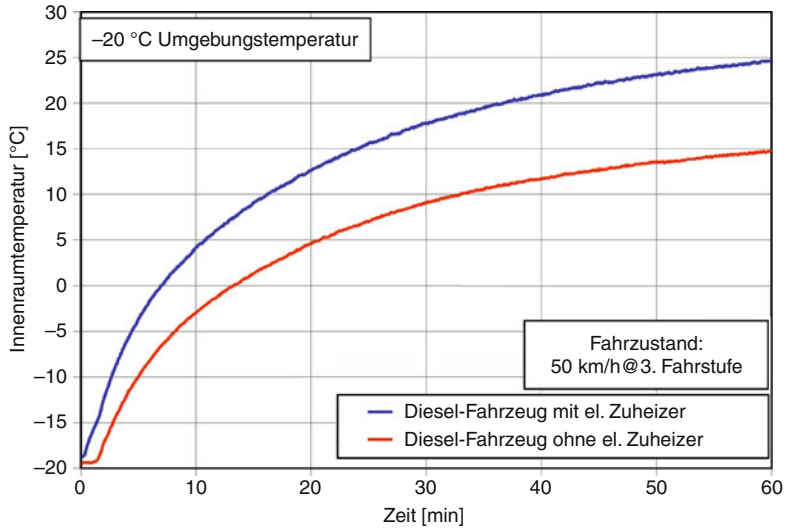



**Abb. 3.28** Aufheizkurve eines Fahrzeugs der Kompaktklasse

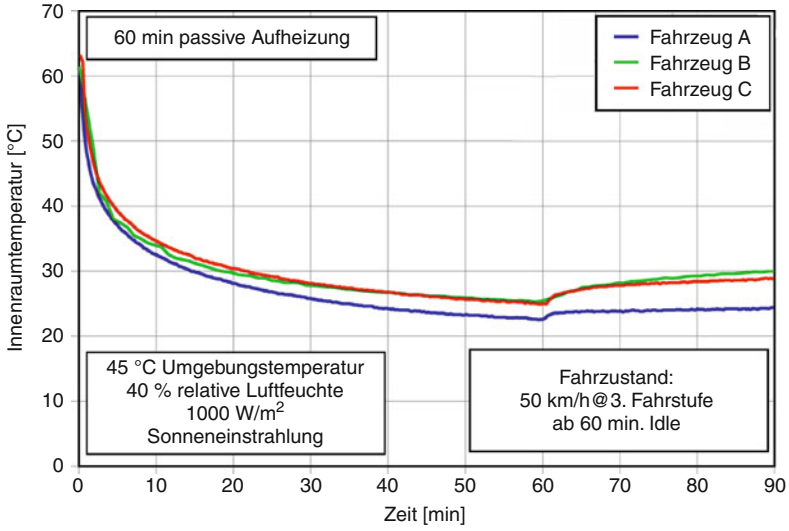



**Abb. 3.29** Typische Abkühlkurve des Innenraums

als quasi-stationär betrachtet werden können. Methoden zur Simulation von dynamischen Vorgängen (z. B. Schaltstöße oder auch Massenverlagerungen im Kältekreislauf) sind in Entwicklung.

### 3.3.2.5 Kraftstoffmehrverbrauch durch die Klimaanlage

Der von der Klimaanlage verursachte Kraftstoff-Mehrverbrauch eines Fahrzeuges für die Kühlung des Innenraums [43] setzt sich zusammen aus: 1. der für den Verdichterantrieb erforderlichen Motorleistung, 2. dem Mehrverbrauch aufgrund des höheren Fahrzeuggewichtes und 3. der benötigten elektrischen Leistung für Lüfter und Gebläse.

Die Extremfälle der klimatischen Randbedingungen bestimmen bei der Auslegung die notwendige Leistung und somit die Größe der Komponenten in Heiz- und Kältekreislauf. Für den Kraftstoff-

verbrauch des Klimatisierungssystems hingegen sind die am häufigsten auftretenden Betriebspunkte, nämlich Teillastfälle, maßgeblich. Daher berechnet man den Mehrverbrauch im Jahresmittel mithilfe von Lastprofilen, in denen der Kraftstoffverbrauch in mehreren Betriebspunkten bei verschiedenen Außentemperaturen und Fahrwerten nach ihrer Häufigkeit gewichtet werden [44].

Am Beispiel eines ausgewählten Fahrzeuges wurde die Leistungsaufnahme des Verdichters anhand eines Lastprofils für mitteleuropäisches Klima gemittelt und mit der jährlichen Betriebsdauer des Fahrzeugs multipliziert. Die Betriebsstundenzahl ist durch die Annahme einer Jahresfahrleistung von 15.000 km und durch die mittlere Geschwindigkeit des zugrunde liegenden Fahrzyklus von 33,6 km/h (Durchschnittsgeschwindigkeit im NEFZ – Neuer Europäischer Fahr-Zyklus) festgelegt. Damit ergibt sich ein durchschnittlicher jährlicher Kraftstoffbedarf von 0,5 l/100 km für die Kühlung des Innenraums. Weitere Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sind, nur so viel und so oft zu Kühlen, wie für Komfort, Fahrerkondition und Fahrsicherheit nötig ist. Wichtige Punkte sind die richtige Regelung, die Verringerung des Wärmeeintrags in die Kabine, des Stromverbrauchs und der Verdichterantriebsleistung.

## 3.3.3 Komponenten und Systeme zur Heizung und Kühlung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen

### 3.3.3.1 Einführung

Seit Bestehen von Kraftfahrzeugen wurden immer wieder Versuche unternommen, den klassischen Hubkolbenverbrennungsmotor (ICE = Internal Combustion Engine) durch andere Antriebsarten zu ersetzen. Bislang blieben alle diese Versuche ohne flächendeckenden Markterfolg, da die Kombination aus Verbrennungsmotor und hoher Energiedichte von flüssigen Kraftstoffen die Erfordernisse der Individualmobilität technisch und wirtschaftlich gut erfüllen.

Seit einigen Jahren richten sich das öffentliche Interesse, sowie die politischen und gesetzlichen Vorgaben auf den Kraftstoffverbrauch. Grund dafür sind die Klimaveränderungen bedingt durch den $CO_2$ Ausstoß und die endlichen Ölvorkommen und die damit einhergehende Verteuerung fossiler Kraftstoffe. Ein weiterer Treiber zur Suche nach emissionsfreien Antrieben ist die Smogbelastung in den Megastädten. Regional kommen dazu noch Bestrebungen zur Verringerung der Abhängigkeit vom Öl.

Großes Augenmerk liegt deshalb auf der weiteren Effizienzsteigerung des Verbrennungsmotors und der Komponenten des Antriebstrangs. Durch Reduzierung der Zylinderzahl in Verbindung mit Aufladung wurden bereits erhebliche Verbrauchseinsparungen erzielt. Darüber hinaus können weitere Potenziale durch zunehmende Elektrifizierung gewonnen werden [58]. Die Elektrifizierung reicht dabei von der Umstellung der Nebenaggregate auf besser regelbare Elektroantriebe über hybride Antriebssysteme bis zum reinen Elektroantrieb.

Als alternative Antriebe werden hier deshalb elektrifizierte Antriebsysteme einschließlich der Brennstoffzelle betrachtet. Alle anderen alternativen Antriebsarten wie z. B. Gasturbinen, Stirling Motoren oder Dampfprozesse spielen keine nennenswerte Rolle in der Pkw Entwicklung.

Aus der Sicht des Thermomanagement (TM) ergeben sich auf dem Weg der zunehmenden Elektrifizierung andere Randbedingungen bestehender Funktionen und gänzlich neue Aufgaben.

Generell steht mit zunehmender Effizienz des Antriebstrangs weniger Abwärme zur Verfügung. Dies führt dazu, dass es bei kalten Temperaturen ein Heizleistungsdefizit. Bereits heute werden deshalb in effizienten Dieselfahrzeugen elektrische Zuheizer eingebaut [59]. In reinen Elektrofahrzeugen steht zukünftig bei begrenztem Energieinhalt der Batterie die Kälteerzeugung im Sommer oder die Heizung im Winter mit der Reichweite in Konkurrenz [60]. Deshalb müssen neue Ansätze zur Heizung und Klimatisierung zum Einsatz kommen.

### 3.3.3.2 Microhybride

Ein Fahrzeug mit Microhybridantrieb ist im strengen Sinn kein Hybridfahrzeug, weil es ausschließlich mit einem Verbrennungsmotor fährt. Seine Merkmale sind [61]:

- Reduktion sämtlicher parasitärer Energieverbräuche,
- Start-Stopp Funktion im Stadtverkehr,

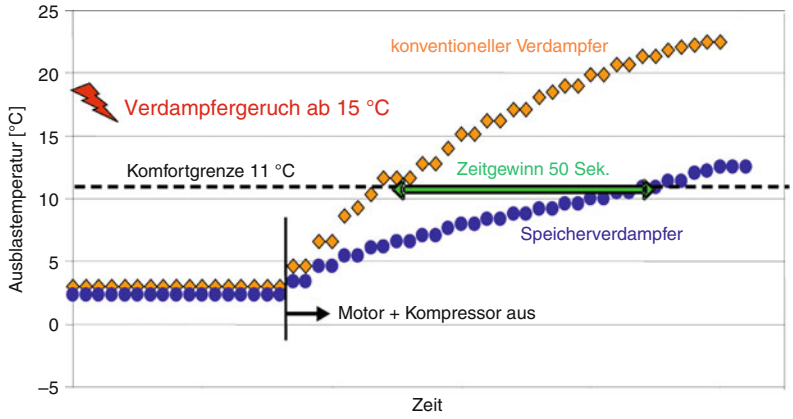



**Abb. 3.30** Ausblastemperatur mit und ohne Speicherverdampfer

- intelligentes Lademanagement vorwiegend im Schubbetrieb,
- Bordnetz ausschließlich auf 12 V,
- Energiequelle Kraftstoff,
- riemengetriebener Klimakompressor.

Das Fahrzeug besitzt ein konventionelles Motorkühlsystem abgestimmt auf den eingesetzten Verbrennungsmotor. Die effiziente Betriebsweise verursacht jedoch bei kalter Witterung ein Heizleistungsdefizit, das durch elektrische oder kraftstoffbetriebenen Zuheizer ausgeglichen wird.

Während der Stopp-Phase arbeitet der riemengetriebene Klimakompressor nicht. Hier kann ein Speicherverdampfer [62] den Klimakomfort aufrecht erhalten und unangenehme Gerüche durch den feuchtwarmen Klimaverdampfer verhindern. Der Speicherverdampfer besitzt in einer zweiten Rohrreihe eine wachsartige Substanz (PCM = Phase Change Material), das sich bei einer Temperatur von ca. 7 °C verfestigt. Fehlt bei Motorstopp der Kältemittelnachschub, kühlt das PCM die Kabinenzuluft bis es wieder aufgeschmolzen ist. Damit kann ein Ampelstopp von bis zu 50 Sekunden überbrückt werden. In der nachfolgenden Fahrphase wird der PCM „Kältespeicher" wieder geladen.

In Abb. 3.30 ist der Verlauf der Ausblastemperatur an den Kabinenausströmern mit und ohne Speicherverdampfer dargestellt. Es wird dabei deutlich, dass bei Motor- und damit Kompressorstopp die Ausblastemperatur bei Einsatz eines Speicherverdampfers deutlich schwächer ansteigt. Erst nach 50 Sekunden wird der kritische Wert von 11 °C überschritten. Ab 15 °C beginnt die Wahrnehmung eines unangenehm feuchten Geruchs.

### 3.3.3.3 Milde Hybride und Batteriekühlung

Als milde Hybride werden Fahrzeuge bezeichnet, die einen elektrischen Zusatzmotor im Antriebsstrang mit ca. 10 bis 20 kW Leistung haben. Dieser dient zur Unterstützung des Anfahr- und Beschleunigungsvorgangs (Boosten) und im Generatorbetrieb zur Rekuperation der Bremsenergie. Merkmale eines milden Hybriden sind:

- Start-Stopp Funktion s. o.,
- Boosten,
- Bremsenergie rekuperieren,
- Bordnetz 12 V (in jüngster Zeit teilweise auch 48 V zusätzlich) und Li-Ion Batterie mit > 120 V (oder 48 V),
- Energiequelle Kraftstoff und Hochvoltbatterie,
- Kühlbedarf für Batterie und Leistungselektronik,
- i. d. R. kein elektr. Fahren und kein Nachladen an der Steckdose (plug-in),
- elektrisch angetriebener Klimakompressor.

Da der Antrieb durch den ICE erfolgt und der E-Motor lediglich eine unterstützende Funktion hat, besitzen solche Fahrzeuge in vollem Umfang die Infrastruktur zur Motorkühlung. Darüber hinaus

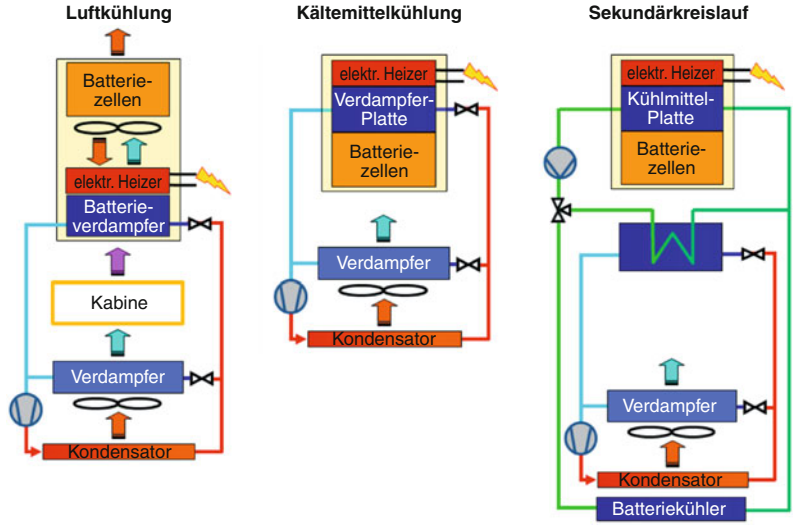



**Abb. 3.31** Systemvarianten zur Batteriekühlung

entsteht ein Kühlbedarf für die Batterie und für die Leistungselektronik. Die abzuführenden Wärmeströme sind im Vergleich zur Motorkühlung gering, da die Wirkungsgrade dieser Komponenten hoch sind. Es werden jedoch verschiedene Temperaturebenen der Kreisläufe benötigt:

- ICE < 100 °C,
- E-Motor und Leistungselektronik < 60 °C,
- Li-Ion Batterie < 40 °C.

Die Temperaturniveaus ergeben sich aus den Lebensdaueranforderungen der elektrischen Komponenten. Leistungshalbleiter und Li-Ion Zellen unterliegen einem temperaturabhängigen Alterungsprozess und dürfen deshalb über die o. a. Temperaturen hinaus nicht dauerhaft betrieben werden. Leistungselektroniken werden deshalb mit einem separaten Niedertemperatur-Kühlmittelkreislauf bei ca. 60 °C gekühlt.

Die Li-Ion Batterien benötigen bei hohen Außentemperaturen die Unterstützung durch das Klimasystem des Fahrzeugs, da die treibende Temperaturdifferenz zur Kühlung auf eine maximale Zelltemperatur von 40 °C nicht mehr ausreicht, s. dazu auch [63–66, 70]. Abb. 3.31 zeigt die verschiedenen Systemansätze zur Kühlung von Li-Ion Batterien mit Anbindung an den Kältekreislauf des Fahrzeugklimasystems.

Dargestellt ist jeweils der Kältekreislauf des Fahrzeugklimasystems mit Kondensator, Kompressor und Verdampfer zur Kabinenkühlung.

Bei der Luftkühlung fördert ein Gebläse Luft, die bei hohen Außentemperaturen über einen Zusatzverdampfer des Kältekreislaufs abgekühlt wird, in die Batterie. Die einzelnen Zellen in der Batterie sind auf Abstand angeordnet und werden von der kalten Luft umströmt.

Kompakter ist die Kühlung direkt mit Kältemittel aus dem Klimasystem. Die Batteriezellen sind dabei mit gutem Wärmekontakt auf einer Kühlplatte mit Kanälen angeordnet. In diesen Kanälen verdampft das Kältemittel und kühlt so die Batteriezellen gleichmäßig.

In Systemen mit Sekundärkreislauf wird ein separater Kühlmittelkreislauf (z. B. Wasser-Glysantin) zur Batteriekühlung eingesetzt. Wie bei der Kältemittelkühlung besitzt die Batterie eine Kühlplatte mit Kanälen für das Kühlmittel. Abb. 3.32 zeigt eine solche Batteriekühlplatte. Bei ausreichend niederen Außentemperaturen (< 20 °C) erfolgt die Kühlung durch einen Kühlmittel-Luft-Kühler. Höhere Außentemperaturen erfordern wieder die Unterstützung durch den Kältekreislauf des Klimasystems über einen Kältemittel-Kühlmittel-Wärmeübertrager (Chiller). Der Chiller ist als flüssig-flüssig Primärflächenwärmeübertrager ausgebildet,

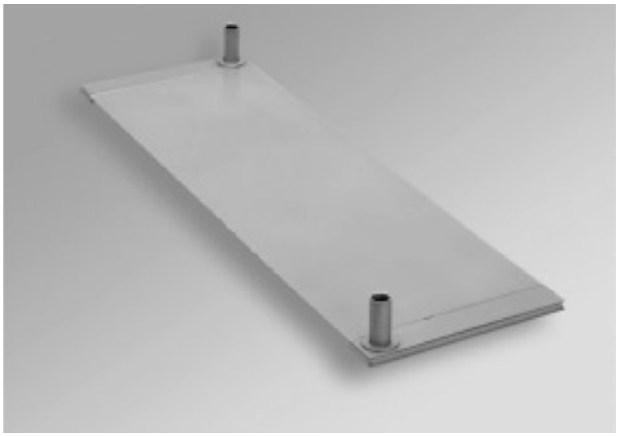


**Abb. 3.32** Batteriekühlplatte



**Abb. 3.33** Chiller zur Batteriekühlung mit TXV (Werkbild MAHLE)

Abb. 3.33. Verdampfendes Kältemittel kühlt darin das Kühlmittel.

### 3.3.3.4 Vollhybride und Plug-in-Hybride

Fahrzeuge werden dann als Vollhybride bezeichnet, wenn die installierte verbrennungsmotorische Leistung und die elektrische Leistung in der gleichen Größenordnung sind. Ist zudem ein externes Nachladen an der Steckdose vorgesehen, werden sie Plug-in-Hybride genannt. Merkmale dieser Fahrzeuge sind:

- Start-Stopp Funktion s. o.,
- Boosten s. o.,
- Bremsenergie rekuperieren s. o.,
- Bordnetz 12 V und >300 V (Li-Ion Batterie),
- Energiequelle Kraftstoff und Hochvoltbatterie,
- Kühlbedarf für Batterie und Leistungselektronik,
- rein elektrisches Fahren,
- eventuell Nachladen an der Steckdose (plug-in),
- elektrisch angetriebener Klimakompressor.

In der Betrachtung des Thermomanagements ähneln sie den milden Hybriden, solange die elektrische Reichweite sehr gering ist (300 m bis ca. 3 km). Notfalls wird auf elektrisches Fahren verzichtet, solange die elektrische Energie nicht als Antriebsquelle zur Verfügung steht. Dies kann z. B. bei der Aufheizung eines extrem abgekühlten Fahrzeugs mit vereisten Scheiben oder auch bei der Abkühlung eines von der Sonne extrem aufgeheiztem Fahrzeug der Fall sein. In diesen Fällen wird die elektrische Energie für die Zusatzheizung bzw. den Klimakompressor benötigt.

Sollen jedoch größere elektrische Reichweiten (bis ca. 50 km) bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor immer gewährleistet sein, um z. B. in ausgewiesenen städtischen Zonen nur rein elektrisch zu fahren, reduziert die erforderliche Energie zum Temperieren der Kabine die Reichweite. Prinzipiell gibt es zwar die Möglichkeit über den ICE oder eine separate Brennstoffheizung thermischen Komfort sicherzustellen, ob dies jedoch vom Markt und

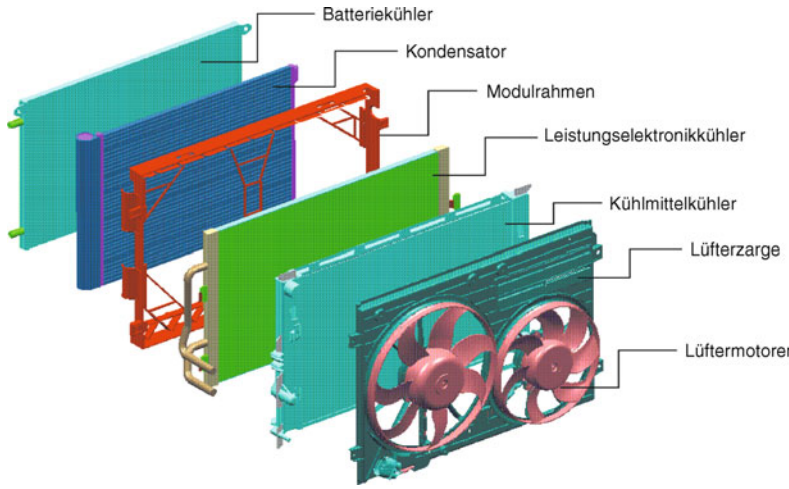



**Abb. 3.34** Kühlmodul eines REV

dem Gesetzgeber akzeptiert wird, ist noch nicht entschieden.

Unter den Vollhybriden nehmen die Range Extender Vehicles (REV) eine besondere Stellung ein. Der Antriebsstrang ist dabei elektrisch. Eine Einheit aus Verbrennungsmotor und elektrischem Generator lädt bei Bedarf die Batterie nach. Somit kann die elektrische Reichweite (ca. 50–80 km) auf den Wert von konventionellen ICE-Fahrzeugen erweitert werden. Als Range Extender können in Zukunft auch Brennstoffzellen dienen.

Abb. 3.34 zeigt ein Kühlmodulaufbau eines REV. Ein Beispiel für die Anordnung der Kühler entgegen der Fahrtrichtung entspricht der erforderlichen Temperaturlage Batterie (ca. 40 °C) – Klimakondensator (ca. 50 °C) – Elektronikkühlung (ca. 60 °C) – ICE-Kühlung (ca. 100 °C).

Plug-in-Hybride und REV, die am Stromnetz aufgeladen werden, können thermisch vorkonditionert werden. D. h., Innenraum und temperatursensible Komponenten werden vor Fahrtantritt auf die erforderliche Betriebstemperatur gebracht. Dies gilt besonders für Aufwärmung/Abkühlung des Innenraums und die Vorkonditionierung der Batterie.

Wird als Range Extender statt eines ICE eine Brennstoffzelle (BSZ) verwendet, ändern sich die Anforderungen der Antriebsstrangkühlung dahingehend, dass höhere Wärmeströme abgeführt werden müssen, da bei der BSZ keine Wärmeabfuhr über das Abgas erfolgt. Zudem beträgt das Temperaturniveau der BSZ-Kühlung lediglich ca. 80 °C statt ca. 100 °C.

Damit wird die treibende Temperaturdifferenz zur Umgebung kleiner. Die Komponenten zur Antriebsstrangkühlung sind gleicher Art wie diejenigen für Verbrennungsmotoren, jedoch sind sie entsprechend leistungsstark auszulegen.

#### 3.3.3.5 Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicle) unterscheiden sich aus energetischer Sicht in drei wesentlichen Punkten von allen Hybridfahrzeugen.

1. Die in der Batterie gespeicherte Energie beträgt nur ein Bruchteil derer von flüssigem Kraftstoff. Deshalb ist der Zwang zur Energieeffizienz zum Vortrieb und zum Thermomanagment sehr hoch.
2. Es besteht prinzipiell wie beim Vollhybrid bereits beschrieben die Möglichkeit zur thermischen Vorkonditionierung während des Ladevorgangs, wenn das Fahrzeug mit dem Stromnetz verbunden ist.
3. Die abzuführende Kühlleistung des Antriebstrangs ist um Faktoren geringer (< 1 kW im Durchschnitt). Dadurch steht aber auch zum Heizen so gut wie keine Abwärme mehr

zur Verfügung, erst recht nicht auf erforderlich hohem Temperaturniveau.

Die wesentlichen Funktionsmerkmale eines Elektrofahrzeugs sind:

- Bremsenergie rekuperieren, s. o.,
- Bordnetz 12 V und >300 V (Li-Ion Batterie),
- Hochvoltbatterie alleinige Primärenergiequelle,
- Kühlbedarf für Batterie, Leistungswandler und E-Motor, jedoch geringe Abwärmen auf relativ geringem Temperaturniveau,
- rein elektrisches Fahren,
- Laden an der Steckdose (plug-in),
- sämtliche Hilfsaggregate rein elektrisch (z. B. Klimakompressor), Kühlwasserpumpen.

Die Infrastruktur zur Kühlung des Antriebsstranges beschränkt sich auf Batterie, Leistungswandler und E-Motor mit sehr geringen Abwärmen, die im Durchschnitt deutlich unter 1 kW liegen. Hier kommen die Komponenten NT-Kühler und Batteriekühlplatten und je nach Systemwahl ein Chiller zum Einsatz, s. ► Abschn. 3.3.3.3.

Die besondere Herausforderung des Thermomanagements bei BEV besteht in der Heizung und Kühlung der Kabine. Der Leistungsbedarf dieser Funktionen ist in der gleichen Größenordnung wie der des Vortriebs und die Funktionen müssen auch im Stillstand, wenn der E-Motor steht, betrieben werden. D. h., der Energiebedarf wird durch die Betriebsdauer und nicht durch die Fahrstrecke bestimmt. Dabei muss zumindest immer eine freie Sicht durch die Scheiben gewährleistet sein.

Effizientes Heizen und Kühlen von E-Fahrzeugkabinen beinhaltet deshalb ein ganzes Bündel von Maßnahmen. Passive Maßnahmen zielen darauf ab die Wärmeverluste im Winter bzw. den Wärmeintrag im Sommer zu verringern z. B. über Isolierungsmaßnahmen oder über die Veränderung der Strahlungseigenschaften von Scheiben.

Eine weitere Zielrichtung ist, Wärme und Kälte gezielt nur dort einzusetzen, wo diese benötigt werden, z. B. durch Sitzheizung, Scheibenheizung oder gezielte Luftführung (Luftschleier).

Die Kälteerzeugung zur Klimatisierung/Kühlung erfolgt weiterhin über den Kompressionkreislauf, allerdings mit elektrischem Verdichter. Erforderliche Antriebsleistungen liegen bei ca. 3 kW.

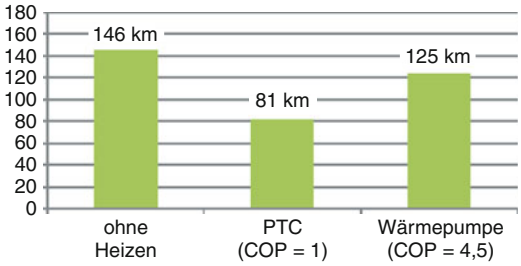



**Abb. 3.35** Reichweite eines E-Fahrzeugs ohne und mit Wärmepumpe bei 0 °C; COP = Coefficient of Performance

Zur Wärmeerzeugung wird ein elektrischer PTC-Heizer verwendet, vergleichbar mit Zuheizer in Dieselfahrzeugen zur Anwendung kommt. Die max. Leistung beträgt 3 bis 5 kW. Der PTC-Heizer wird mit Hochspannung (>300 V) betrieben und muss entsprechend sicher ausgeführt sein. An kalten Tagen reduziert ein rein elektrischer Heizer allerdings die Reichweite eines Elektrofahrzeugs erheblich. Abb. 3.35 zeigt eine Reichweitenreduktion von 146 auf 81 km durch einen Einsatz eines solchen Heizers bei einer Außentemperatur von 0 °C. Durch Einsatz einer Wärmepumpe kann die Reichweite wieder auf 125 km erhöht werden.

Solche Wärmepumpensysteme können durch Modifikation des bestehenden Kältekreislaufs dargestellt werden. Entsprechende Entwicklungen laufen bei Automobilherstellern und Zulieferern.

## 3.4 Akustik und Schwingungen

### 3.4.1 Einleitung

Die Anforderungen an die schwingungstechnische und akustische Wertigkeit von Fahrzeugen (NVH, für engl.: Noise, Vibration and Harshness) haben sich in den vergangenen Jahrzenten stark erhöht [94]. Verantwortlich dafür waren der kontinuierlich steigende Komfortanspruch der Kunden und die steigende Wertigkeit der Fahrzeuge in allen Segmenten. (Abb. 3.36).

Grundsätzlich werden die akustischen Phänomene nach Wind-, Roll- und Antriebsgeräuschen eingeteilt, die auch unter dem Begriff Fahrgeräusch behandelt werden. Darüber hinaus unterscheidet




**Abb. 3.36** Anforderungsentwicklung Akustik und Schwingungen

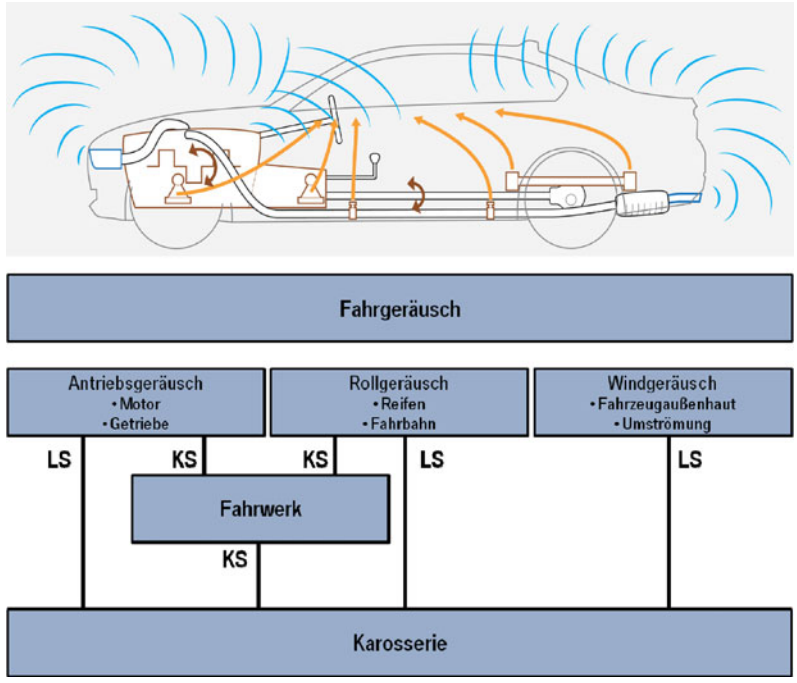



**Abb. 3.37** Geräuschquellen und Übertragungspfade

man noch Störgeräusche und sog. Betätigungsgeräusche, wie z. B. das vertraute Blinkergeräusch. Die Übertragung der Geräusche in den Innenraum kann sowohl über Luftschall-, als auch über Körperschallpfade erfolgen. Die verschiedenen Pfade und Geräuschquellen sind in Abb. 3.37 schematisch dargestellt.

Wind- und Rollgeräusch hingegen gehören zu den Eckpfeilern der akustischen Hygiene eines Autos. Sie bestimmen wesentlich den akustischen Komforteindruck und manifestieren die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse von Fahrzeugen, vom Kleinwagen bis zur Oberklasse. So war über Jahrzehnte hinweg ein stetiges Absenken der Schall-

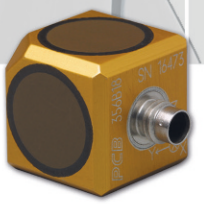
Hochwertige Messtechnik und Beratung aus einer Hand

PCB SYNOTECH

Ein Unternehmen der PCB Piezotronics, Inc.

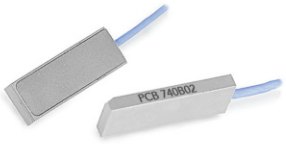
## Sensoren und Instrumente für die Automobilentwicklung







UHT-12™













Vibrationssensoren

Hochtemperatursensoren

MEMS Beschleunigungssensoren

Dehnungssensoren

Wasserfeste Mikrofone

Kraftsensoren

Elektrodynamische Shaker

Lassen Sie sich von unseren Produktspezialisten beraten oder fordern Sie weiteres Informationsmaterial über **www.synotech.de/automotive** an.

**PCB Synotech GmbH** ▪ Porschestraße 20 – 30 ▪ 41836 Hückelhoven
Tel.: 0 24 33/44 44 40 – 0 ▪ info@synotech.de ▪ **www.synotech.de/automotive**

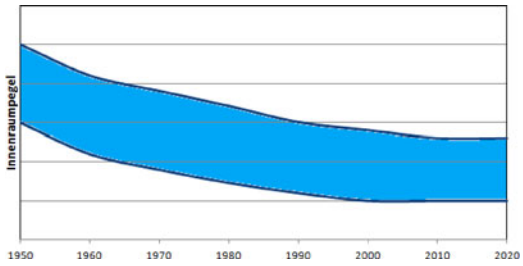



**Abb. 3.38** Historische Entwicklung der Innenraumgeräuschpegel

druckpegel im Innenraum zu beobachten, welche sich jedoch seit den 1990er Jahren zunehmend asymptotisch entwickeln (Abb. 3.38).

Neben dem Komfort ist das sportliche Akustik-Klangbild (Sound) der zweite Freiheitsgrad bei der Positionierung eines Derivats im Wettbewerbsumfeld, bzw. im markeneigenen Portfolio (Abb. 3.39). Antriebsgeräusche ermöglichen im Rahmen des Sounddesigns den größten Spielraum für einen markentypischen Auftritt. Wesentliches Kriterium ist dabei ein angemessener Pegelsprung unter Last, der dem Fahrer ein erwartungsgemäßes akustisches Feedback zur erlebten Beschleunigung gibt [90]. Je sportlicher ein Derivat positioniert ist, desto größer ist die Bedeutung dieses akustischen Feedbacks.

Eine besondere Herausforderung – sowohl für die Soundgestaltung als auch für den Schwingungskomfort – stellen die sich ändernden Antriebskonzepte dar. Da sind zum einen die von der Verbrauchsreduktion getriebenen Veränderungen in der konventionellen Antriebstechnik. Kleinere Hubräume (Downsizing), umgesetzt durch die Reduktion der Zylinderzahl oder teilweise Abschaltung von Zylindern und die zum Normalfall gewordene Aufladung der Motoren, die früher meistens Sportwagen vorbehalten war, führen in der Regel zu weniger Lastfeedback und einem als flacher oder weniger dynamisch erlebten Klang.

Dies bedeutet gerade bei sportlichen Derivaten einen Mehraufwand in der Soundgestaltung, um den Hörgewohnheiten der Kunden, die in der Regel von großvolumigen Saugmotoren herrühren, auch mit kleineren Hubräumen gerecht zu werden. Ebenso verändern sich die Schwingungseigenschaften dieser Motoren, z. B. die Leerlaufqualität. Ressourcenschonende Maßnahmen wie eine Start-Stopp-Funktion müssen sowohl hinsichtlich der Akustik als auch des Schwingungskomforts optimiert werden.

Auch die zunehmende Elektrifizierung der Antriebe bedeutet eine neue Herausforderung für die Fahrzeugakustik. Hybridfahrzeuge bedürfen einer besonderen akustischen Gestaltung, wobei z. B.

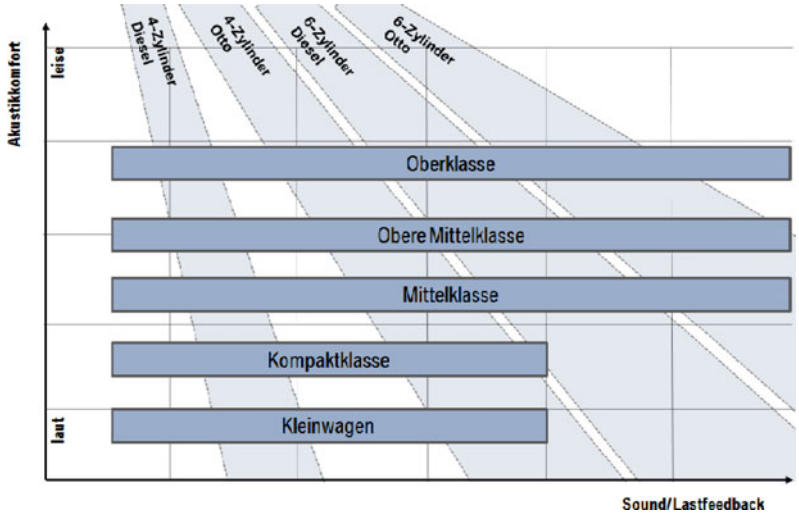



**Abb. 3.39** Soundportfolio

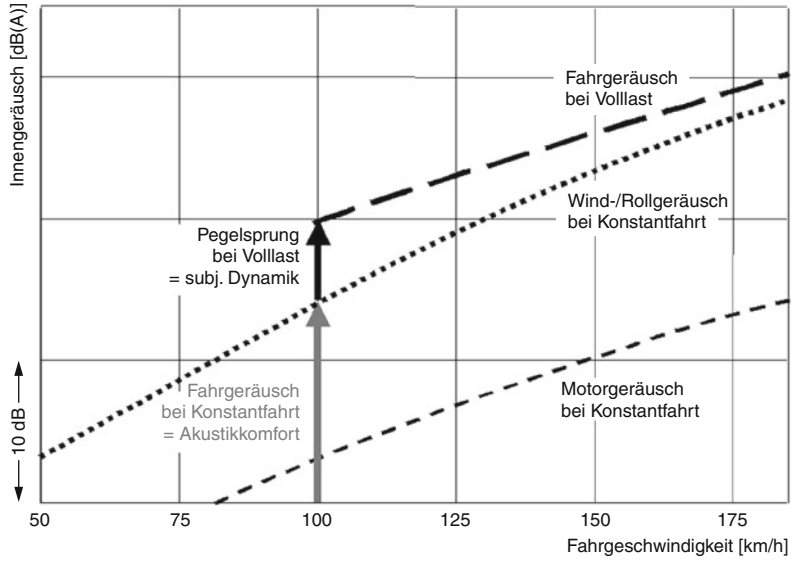



**Abb. 3.40** Konstantfahrtpegel vs. Volllastpegel

dem unaufdringlichen Zustart des Verbrennungsmotors nach reiner Elektrofahrt besondere Aufmerksamkeit zukommt. Beim E-Fahren erfordert der quasi lautlose Antrieb ein gesteigertes Augenmerk auf andere Geräuschquellen im Auto. Außerdem erschwert er die Ausprägung eines markentypischen Antriebsgeräusches.

Ob konventionelle oder elektrifizierte Antriebstechnik: alle Maßnahmen dienen letztlich dem Ziel, ein markentypisches akustisches Erscheinungsbild zu prägen, das dem Kunden ein wertiges und über das gesamte Produktportfolio stimmiges Ganzes präsentiert. Ein Garant eines gelungenen Gesamteindrucks ist die Integration der Belange aus Akustik und Schwingungskomfort auch in alle nicht-akustischen Gestaltungsmaßnahmen der Fahrzeugentwicklung.

## 3.4.2 Fahrgeräusche

Das Fahrgeräusch bei Konstantfahrt ist mit Ausnahme des Langsamfahrbereichs durch Wind- und Rollgeräusch dominiert. Erst beim Beschleunigungsvorgang kommt durch die ansteigende Motorlast ein hörbarer Anteil Motorgeräusch hinzu, der bei Volllast pegelbestimmend wird und sich im Klangbild signifikant vom Wind-Rollgeräusch abhebt. Differenzierungspotenzial im Sinne von Soundgestaltung bietet nur der Teil des Antriebsgeräusches, der sich aus dem Wind-Rollgeräusch abhebt. Er wird durch den Pegelsprung in Abb. 3.40 charakterisiert.

Der akustische Komforteindruck im Fahrzeug-Innenraum wird maßgeblich über das Konstantfahrtgeräusch und damit vom Wind-Rollgeräusch bestimmt. Das Motorgeräusch spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Fahrzeugdynamik bei Längsbeschleunigung wird dagegen subjektiv durch das Hervortreten des Motorengeräusches stark unterstützt. Ein Maß für die akustische Rückmeldung bei Beschleunigung ist der Pegelsprung unter Volllast. Soundgestaltung im Fahrzeug bedeutet daher, die Pegel von Wind-Rollgeräusch und Motorgeräusch so aufeinander abzustimmen, dass der geforderte Konstantfahrtkomfort erreicht wird und gleichzeitig bei Beschleunigung der Pegelsprung das Motorgeräusch adäquat hervortreten lässt (Abb. 3.41). Der Gestaltungsspielraum für den Fahrzeugsound wird somit einerseits durch das Wind-Rollgeräusch eingeengt, andererseits durch den maximal vertretbaren Gesamtpegel begrenzt. Dieser wird im Innengeräusch durch Kundenerwartung und Wettbewerbsfeld und im Außenge-

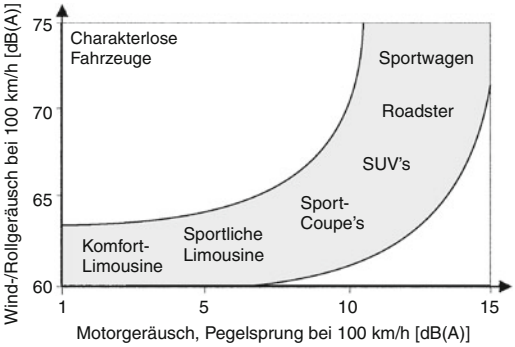



**Abb. 3.41** Akustische Positionierung von Fahrzeugen

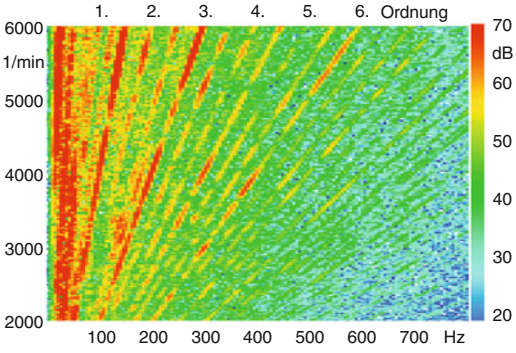



**Abb. 3.42** Ordnungsanalyse eines Motorengeräusches

räusch zusätzlich durch gesetzliche Vorschriften limitiert.

Neben der absoluten Pegelhöhe des Antriebsgeräusches bei Lastanforderung ist dessen spektrale Zusammensetzung für den gewünschten Sound-Eindruck von essentieller Bedeutung (Abb. 3.42). Es ist bekannt, dass die ganzzahligen Motorordnungen ab der 3. Ordnung, wie sie insbesondere für R6 Motoren charakteristisch sind, den „seidenweichen" Lauf akustisch unterstreichen, während die 2. Ordnung bei Vierzylindermotoren für deren eher „brummigen" Klangeindruck verantwortlich ist. Vielfache der halben Motorordnung erzeugen dagegen einen rauen und eher aggressiven Klangeindruck, der nur zu Sportfahrzeugen passt. Spektralanteile oberhalb der soundprägenden Ordnungen sollten möglichst vermieden werden, um den Klangeindruck nicht zu verfälschen.

Psychoakustische Untersuchungen zeigen, dass die ungestörte Kommunikationsfähigkeit im Fahrzeug-Innenraum bei höheren Geschwindigkeiten in hohem Maße mit dem subjektiven Komfortempfinden korreliert. Sie ist stark abhängig vom Wind-Rollgeräusch und kann z. B. durch die Messung der Silbenverständlichkeit quantifiziert werden. Abb. 3.43 zeigt das erreichte Niveau für ein typisches Fahrzeug der gehobenen Mittelklasse. Bei 100 km/h sinkt hier die Silbenverständlichkeit bereits auf 50 % ab. Aufgrund der kognitiven Fähigkeiten der Fahrzeuginsassen beträgt die korrespondierende Satzverständlichkeit allerdings immer noch ca. 95 %.

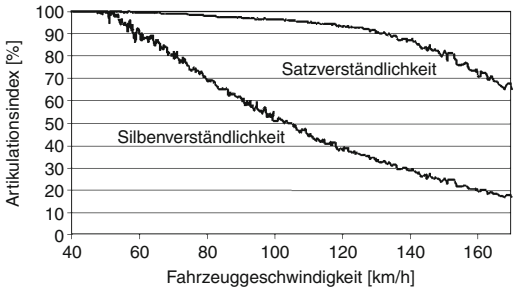



**Abb. 3.43** Silben- und Satzverständlichkeit im Fond, langsame Beschleunigung im längsten Gang

## 3.4.3 Antriebsgeräusch

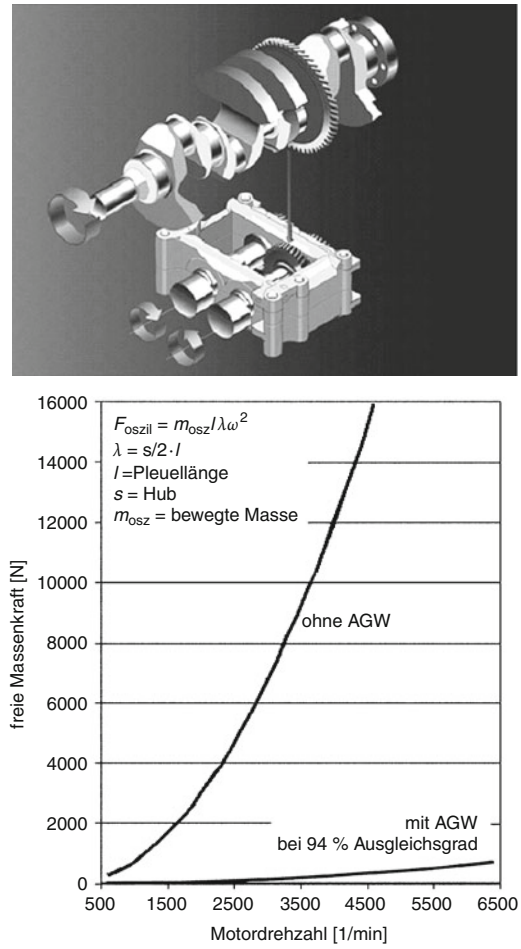
Die Antriebseinheit, bestehend aus den zumeist aneinander gekoppelten Verbrennungsmotor- und Getriebekomponenten, bildet die vibroakustische Hauptanregungsquelle in einem Fahrzeug. Insofern ist die Akustikoptimierung des Antriebsaggregats von größter Bedeutung. Werden bei der Entwicklung des Antriebs wesentliche Akustikmerkmale vernachlässigt, so kann beim Gesamtfahrzeug in der Regel kein zufrieden stellendes Ergebnis mehr erreicht werden.

Die Akustikauslegung des Antriebs erweist sich als zunehmend anspruchsvoll, da der Trend zu immer leichteren und komplexeren Aggregaten oft im Gegensatz zu den Akustikanforderungen steht. Leichtbau-Kurbelgehäuse aus Aluminium bzw. Magnesium sowie vollvariable Ventiltriebe und Hochdruck-Direkteinspritzung seien hier beispielhaft genannt. Nur die optimale Gestaltung des Motor-Ge-

triebe-Verbundes zur Minimierung der vibroakustischen Emissionen verbunden mit der gezielten Entkopplung aller relevanten Luft- und Körperschallpfade bei der Integration des Antriebs in das Fahrzeug machen gute akustische Eigenschaften möglich.

Die schwingungstechnische Optimierung des Kurbeltriebs ist ein wesentliches Element der vibroakustischen Auslegung einer Antriebseinheit. So sind u. a. die Zylinderanordnung (Reihen- oder V-Motor), die Zündfolge, das Lagerungskonzept der Kurbelwelle, die Anzahl der Ausgleichsgewichte, die fundamentalen Biege- und Torsionseigenfrequenzen der im Motorblock verbauten Kurbelwelle sowie das Schubstangenverhältnis $\lambda$ Parameter, die einen großen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften haben. (► Abschn. 5.1) Hier gilt es, schon im Motorkonzept auf die akustischen Belange Rücksicht zu nehmen. Bei Motorkonzepten ohne inneren Massenausgleich, z. B. bei R4 Motoren, sind Ausgleichswellen ein wirksames Mittel zur vibroakustischen Optimierung des Triebwerks (◘ Abb. 3.44).

Von großem vibroakustischem Einfluss ist auch der Ventiltrieb. Aus Emissions- und Verbrauchsgründen werden neben der Mehrventiligkeit immer aufwändigere variable Ventilsteuerungssysteme eingeführt. Daraus resultieren in der Regel höhere bewegte Massen. Deren Auswirkung auf die dynamischen Motoreigenschaften bedarf einer sorgfältigen Analyse und eventuell geeigneter Kompensationsmaßnahmen, z. B. durch Ausgleichsgewichte. Vom Ventiltrieb erzeugte Schwingungen besitzen im Allgemeinen eine vielfache Frequenz der 0,5ten Motorordnung, was einen subjektiv rauen Geräuscheindruck hervorruft, der oft unerwünscht ist.




◘ **Abb. 3.44** Ausgleichswellen, Bauform und freie Massenkräfte mit und ohne AGW beim Vierzylindermotor

### 3.4.3.1 Luftschall

Der Luftschall eines Aggregats wird hauptsächlich durch Schallabstrahlung der schwingenden Oberflächen erzeugt. Die Geräuschemission eines modernen Kfz-Verbrennungsmotors liegt bei Nennlast gemittelt über die Hüllfläche in 1 m Abstand bei ca. 95–100 dB(A). Der akustische Wirkungsgrad beträgt ca. $10^{-6}$. Das entspricht einem Schalldruckpegel im Motorraum von bis zu 115 dB(A). Dieselmotoren sind im Teillastbereich tendenziell lauter, im Volllastbereich leiser als vergleichbare Ottomotoren. Der Luftschall wird entweder über Öffnungen im Motorraum nach außen emittiert oder über die Stirnwand und Nebenwege in die Fahrgastzelle übertragen. Um die Innenraumpegel auf Werte von 65–75 dB(A) zu begrenzen, muss die Einfügedämmung der Stirnwand ca. 40–50 dB betragen.

Ventiltriebe mit vielen Variabilitäten, Aufladung und Direkteinspritzung – auch beim Otto-Motor, führen zunehmend zu hochfrequenter Schallabstrahlung oberhalb der soundprägenden Motorordnungen. Diese Spektralanteile verursachen ein unerwünscht hart und metallisch klingendes Motorgeräusch. Die Schallabstrahlung der Begrenzungsflächen des Motors muss durch ge-

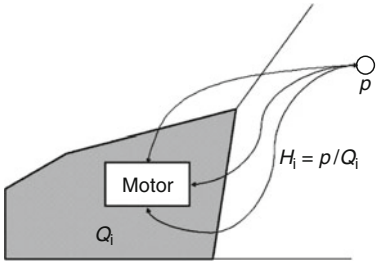



**Abb. 3.45** Luftschall-Übertragungspfade

zielte Versteifungsmaßnahmen auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Bei Bedarf ist auch der Einsatz von Dämpfung durch Verbundblechkonstruktionen, z. B. bei der Ölwanne möglich. Die Abstrahlung des Ventiltriebs wird durch Abdeckungen aus Kunststoffträgermaterialien mit Absorbern motornah reduziert. Auch die akustische Auslegung der Ansaug- und Abgassysteme gestaltet sich oftmals als schwierig, da hier eine ganze Reihe von Zielkonflikten vorliegt. So wird für hohe Motorleistung ein geringer Abgasgegendruck in der Abgasanlage benötigt, verbunden mit großen inneren Durchmessern der Abgasrohre und den daraus resultierenden negativen Effekten auf das Einfügedämmmaß der Anlage. Kompensiert werden kann dieser Effekt durch größere Schalldämpfervolumina, die aber nur schwer im Package unterzubringen sind. Saugseitig sind u. U. Resonatoren vorzusehen, die unerwünschte Frequenzanteile dämpfen.

Entscheidend für eine signifikante Reduzierung des Luftschalls ist jedoch die Beherrschung und Optimierung aller Übertragungswege. Dabei muss jeder einzelne Übertragungspfad von der motorraumseitigen Anregungskavität über die Stirnwand, Zwischenkavitäten wie Energieräume und Wasserkästen, bis hin zur Absorption im Innenraum der Fahrgastzelle betrachtet und durch geeignete Dämmungs- und Absorptionsmaßnahmen beeinflusst werden.

Der Luftschall am Fahrerohr kann als Summe über die Volumenflüsse $Q_i$ aller abstrahlenden Oberflächen multipliziert mit der akustischen Transferfunktion (ATF) $H_i$ dargestellt werden (Abb. 3.45). $Q_i$ errechnet sich dabei als Produkt von Schwingschnelle $v_i$ und Teilfläche $S_i$ [77]. Es ist darauf hinzuweisen, dass die so definierte ATF nur nach der inversen Methode ermittelt werden kann.

$$p_{\mathrm{Ohr}} = \sum_i Q_i \cdot H_i \,,$$

$$Q_i = S_i \cdot v_i \,.$$

Beim Aufbau von Schallisolierungen unterscheidet man zwischen Masse-Absorber-Systemen, Feder-Masse-Systemen und Entdröhnfolien. Bei den Masse-Absorber-Systemen werden biegeweiche Schwerschichtmaterialen zur Dämmung eingesetzt und mit einem auf der freien Oberfläche verbauten Absorber kombiniert. Dadurch wird die Grunddämmung einer Karosseriefläche proportional zur Masse des eingesetzten Materials erhöht. Der Dämmungsverlauf steigt entsprechend dem Berger'schen Massegesetz mit 6 dB/Oktave an. Der Absorber reduziert zusätzlich die Schallbelastung auf der Emissionsseite um bis zu 6 dB im Vergleich zu vollständig reflektierenden Flächen. Im Falle des Feder-Masse-Systems wird zwischen Karosseriefläche und biegeweicher Schwerschicht mit Schaum oder Vliesmaterialen eine Feder aufgebaut. Damit werden bei höheren Frequenzen deutlich bessere Isolationswerte bei gleichem Material- und Gewichtseinsatz erreicht (Abb. 3.46). Nachteil dieser Systeme ist ein charakteristischer Dämmungseinbruch bei der Resonanzfrequenz des Feder-Masse-Systems. Die Abstimmung des Systems setzt daher die präzise Kenntnis des anregenden Frequenzspektrums voraus. Entdröhnfolien aus hoch dämpfenden Materialien werden eingesetzt, um großflächige Blechstrukturen zu bedämpfen. Sie sind damit genau genommen eine Maßnahme zur Bekämpfung von unerwünschtem Körperschall. Für tieffrequente Abstrahlung können die Blechfelder auch durch Versickung so versteift werden, dass ihre Eigenschwingformen ausreichend angehoben werden, um störende Vibrationen und Wummererscheinungen zu vermeiden.

Die Stirnwanddämmung heutiger Fahrzeuge besteht aus bis zu 12 Schichten: Stahl- oder Alublech, ein- oder mehrschichtige Entdröhnfolien, sowie entsprechende Schallisoliersysteme im Motorraum und in der Fahrgastzelle (Abb. 3.47). Bei tiefen Frequenzen werden mit einem solchen System aufgrund der geringen Masse nur Grunddäm-

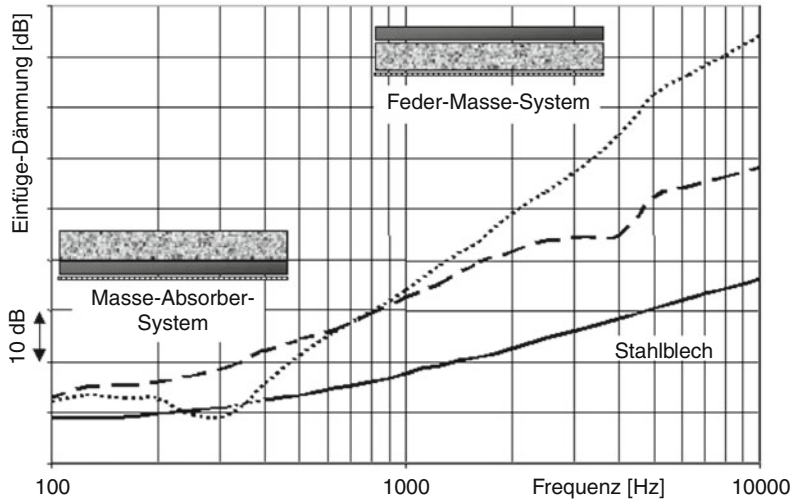



**Abb. 3.46** Dämmungsverhalten

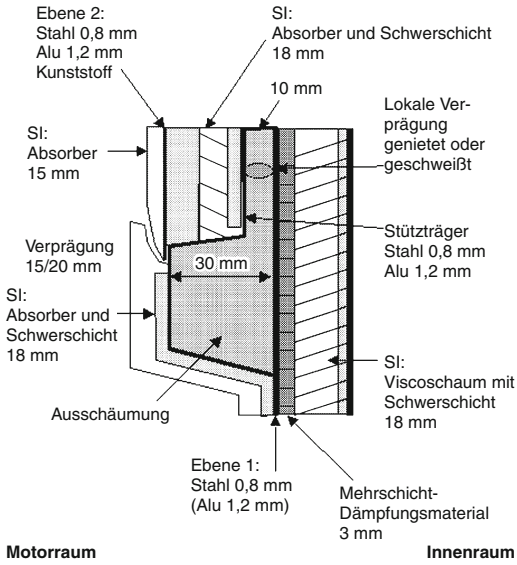



**Abb. 3.47** Dämmungsaufbau einer Stirnwand

mungen von bis zu 30 dB erreicht. Im mittleren Frequenzbereich steigt die Dämmwirkung mit 9 dB/Oktave an, während die Dämmung hochfrequent aufgrund der Leckagen bei ca. 70–80 dB begrenzt wird.

Voraussetzung für die Wirksamkeit eines Schallisoliersystems ist die „akustische Dichtheit". Dicht heißt in diesem Zusammenhang, dass außerhalb der Fahrgastzelle vorhandener Luftschall nicht durch direkte Luftschallübertragung in diesen Raum gelangen kann. Bedingung dafür ist, dass alle potentiellen Leckagen zwischen dem Fahrgastraum und seiner Umgebung abgedichtet sind. Kritisch sind hier u. a. die Durchbrüche in der Stirnwand zur Einfügung des Heiz/Klimasystems, zur Durchführung der Lenksäule, des Kabelbaums und der Pedalerieanschlüsse. Alle diese Durchbrüche müssen schalldicht abgeschlossen werden. Sind bewegliche Elemente, wie z. B. das Lenksäulensystem abzudichten, so können sich konstruktiv recht komplizierte Systeme, z. B. in Form von Tüllen mit mehreren Dichtungsebenen (Abb. 3.48), ergeben.

Bei der Konzeption von Luftschallpfaden hat sich die statistische Energieanalyse (SEA) als rechnerische Methode im relevanten Frequenzbereich über 400 Hz bewährt. Die rechnerische Betrachtung der Luftschallpfade ermöglicht eine optimale Auslegung der Schallisolierung bereits in frühen Projektphasen. Mit entsprechendem Modellierungsaufwand kann der Energiefluss von den Eingangskavitäten im Motorraum bis zum Innenraum der Fahrgastzelle genau beschrieben werden. Im SEA-Modell lassen sich neben dem Dämmungsverhalten einzelner Stirnwandbereiche auch Leckageeinflüsse berücksichtigen (Abb. 3.49).

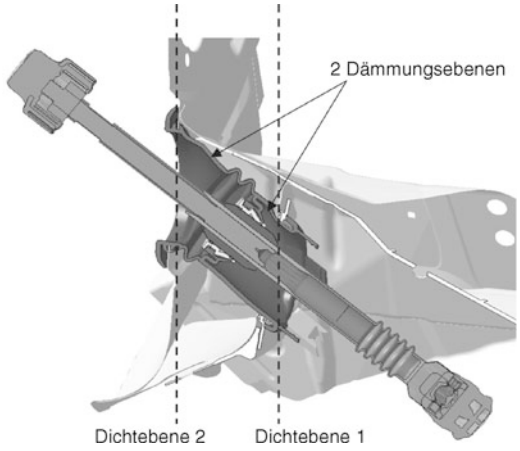
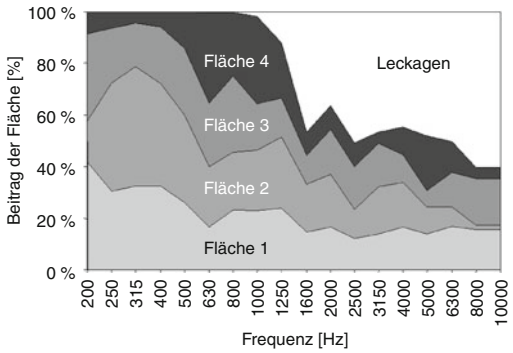



**Abb. 3.48** Lenksäulenabdichtung



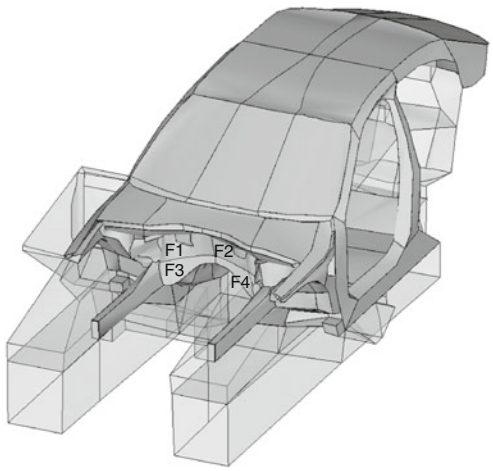




**Abb. 3.49** SEA-Ergebnisse und Modell zur Luftschall-Übertragung vom Motorraum in den Innenraum

### 3.4.3.2 Aktive Luftschallbeeinflussung

Die Antriebsakustik eines Fahrzeugs trägt einen großen Teil zum Fahrzeugcharakter bei und hat direkte Rückwirkung auf die subjektiv erlebte Fahrdynamik und den akustischen Fahrkomfort. Klassische Gestaltungselemente sind bei einem vorgegebenen Motorkonzept die Motorapplikation, Modifikationen in der Ansauganlage und die Auslegung der Abgasanlage. Dabei gilt es immer einen Kompromiss aus hohem antriebsakustischen Fahrkomfort und der sportlichen Rückmeldung bei Lastanforderung zu finden. Um diesen Konflikt aufzulösen, kommen dabei unter anderem geschaltete Soundsymposer in der Ansaugung oder gesteuerte Abgasklappen zum Einsatz.

Durch die zunehmende Verbreitung von Turbomotoren und dem Trend nach immer kleineren Hubräumen unterscheidet sich die dadurch erzeugte Antriebsakustik deutlich von der herkömmlichen Klangcharakteristik großvolumiger, freisaugender Motoren. Zur Erhöhung des akustischen Fahrkomforts bzgl. des Eintrags von äußeren Transmissionen steigt die passivakustische Fahrzeugdämmung in den letzten Jahren immer weiter und mindert so neben den Roll- und Windgeräuschen auch die Antriebsakustik. Darüber hinaus unterliegt die Abgasanlage als klassisches Gestaltungselement in den kommenden Jahren auch immer restriktiveren Vorschriften zur Senkung der Geräuschemissionen, so dass auch auf diesem Wege ein immer geringerer Spielraum für die herkömmliche Antriebsakustik übrigbleibt.

Diese technischen und gesetzlich bedingten Entwicklungen erfordern den Einsatz neuer Technologien in der Gestaltung der Antriebsakustik.

In den letzen Jahren etablierte sich daher die aktive Antriebsakustik, auch Active Noise Control (ANC) genannt, als ein weiteres hoch wirksames Gestaltungselement. Durch die gezielte Überlagerung des bestehenden Schallfeldes mit einem, durch einen oder mehreren elektrodynamische Wandler erzeugten Sekundärschallfeldes, lassen sich Geräusche wirksam verändern. Dabei ist es nicht nur möglich, das Klangbild additiv anzureichern. Durch eine gegenphasige, im Pegel angeglichene Überlagerung lassen sich darüber hinaus auch kohärente Störgeräusche mindern.

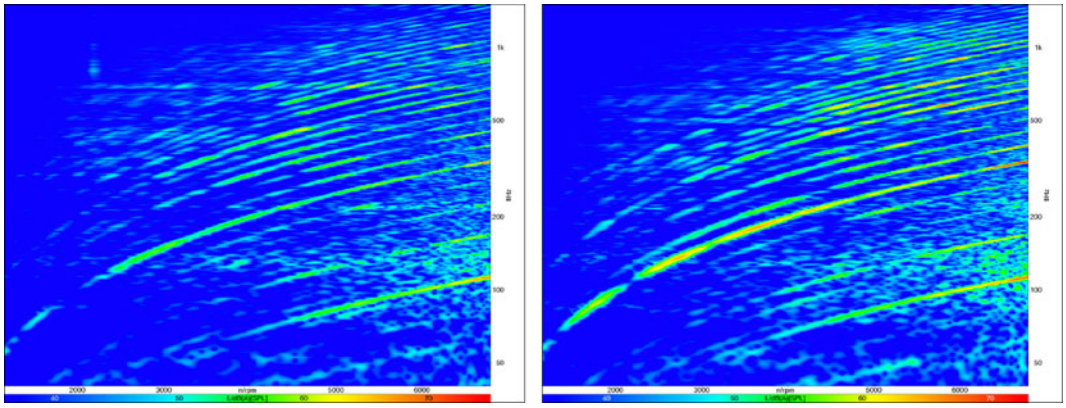


**Abb. 3.50** Veränderung der Klangcharakteristik dargestellt in einem Ordnungsanalysediagramm

Neben der Reduktion hat die additive Klanggestaltung weitgehend emotionale Wirkung. Ausgehend von der typischen Klangcharakteristik des Verbrennungsmotors werden hier einzelne Motorordnungen gezielt verstärkt, um den gewünschten, markenspezifischen Klangcharakter zu erzeugen. Wesentliche Einflussparameter sind dabei CAN-Daten des Motors wie Drehzahl, Drehmoment, Gaspedalwinkel, Längsbeschleunigung und Geschwindigkeit. Diese Parameter steuern dabei die Intensität und die Phase von additiv hinzugefügten harmonischen Schwingungen.

$$|p|_X| = \Big| p_{\text{Orig}} + H^{-1}(x - x') \otimes \sum_{i=1}^{k} (A|_{x'}(n, L) * \cos(\omega_i t) + B|_{x'}(n, L) * i \sin(\omega_i t)) \Big| .$$

Für jeden Drehzahl-/Lastpunkt $(n, L)$ werden dazu die orthogonalen Koeffizienten des Sinus-/Cosinuspaares für alle $k$ zu ergänzende Motorordnungen $i$ vorgegeben. Nach Faltung mit der Übertragungscharakteristik $H$ des Audiosystems überlagert sich das synthetisierte mit dem originalen Schallfeld des Antriebs.

Aufbauend auf die antriebsakustische Grundakustik ist es somit möglich, das Motor-Klangbild im Innen- und/oder Außenraum sportlicher zu gestalten ohne aber an antriebsakustischem Fahrkomfort zu verlieren.

Im hier dargestellten Beispiel (Abb. 3.50) ist exemplarisch die Wirkung eines aktiven Systems für den Innenraum dargestellt. Dabei repräsentiert die Y-Achse die Frequenz, die X-Achse die Drehzahl und die Farbskala den Schalldruckpegel in dB(A). Die linke Abbildung zeigt das Fahrzeug bei einer Volllastbeschleunigung ohne aktive Maßnahmen, so dass hauptsächlich die Zündordnung und deren Vielfache sichtbar sind. In der rechten Abbildung wurde das bestehende Klangbild mittels eines aktiven Systems verstärkt und authentisch in Richtung Sportlichkeit geändert. Neben der Anhebung der ursprünglich dominanten Motorordnungen sind jetzt auch höhere Motorordnungen stärker betont, die insbesondere die objektiv vorhandene Drehfreude des Motors akustisch hervorheben.

### 3.4.3.3 Körperschall

Im Gegensatz zum Luftschall wird das Motorgeräusch als Körperschall nur über eine begrenzte Zahl von Lagerpunkten des Motor-Getriebe-Verbunds sowie über die angetriebene Achse und deren Lagerstellen in den Fahrzeug-Innenraum geleitet (Abb. 3.51).

Zur Reduzierung des Anregungsniveaus an den Schnittstellen zwischen der Antriebseinheit und ihrer direkten Umgebung ist besonderer Wert auf die Minimierung der aus den bewegten Massen und aus der Verbrennung resultierenden (äußeren) Kräfte zu legen.

Das aus Verbrauchsgründen durchgeführte Downsizing der Motoren durch Übergang zu

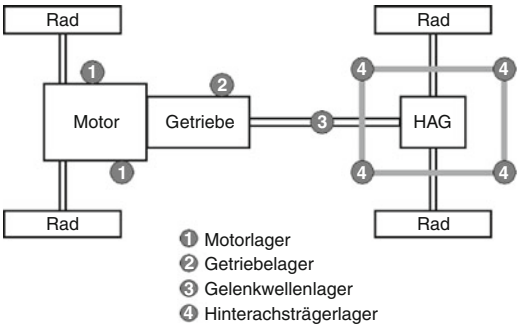



**Abb. 3.51** Körperschallpfade des Motorengeräusches bei einem Fahrzeug mit Standardantrieb

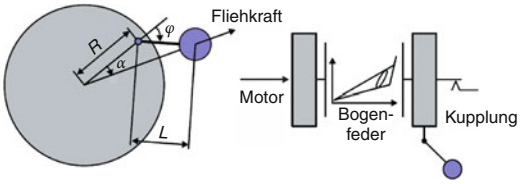



**Abb. 3.52** Funktionsweise des Fliehkraftpendels [101]

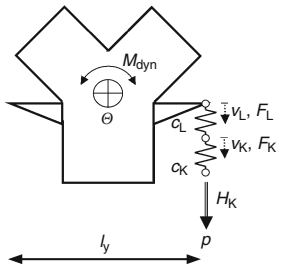
weniger, aber aufgeladenen Zylindern und Verlagerung des Betriebspunktes zu deutlich geringeren Motordrehzahlen unter Last hat zu deutlich höheren Drehungleichförmigkeiten und daraus resultierenden Brummfrequenzen geführt, die das beherrschende Problem darstellen und mit herkömmlichen Lager- und Isolationskonzepten nicht mehr zu beherrschen sind.

Die Verwendung eines Zweimassenschwungrades zur Reduzierung der Drehungleichförmigkeiten bei Fahrzeugen ohne Drehmomentwandler ist nicht mehr zielführend, da der wirksame Drehzahlbereich nicht ausreichend groß ist. Als Lösung bietet sich ein Schwungrad auf Basis des Fliehkraftpendels an (Abb. 3.52), dessen Drehzahlspreizung (aufgrund der drehzahlunabhängigen Ordnungstreue) deutlich höher ist und das auch bei den gewünschten Drehzahlen bis hinab zu 1000/min unter Volllast noch wirksam ist [97–99]. Das bisher bei Fahrzeugen mit Drehmomentwandlern zur Dämpfung der Drehungleichförmigkeiten angewandte Verfahren des geregelten Schlupfs der Wandlerüberbrückungskupplung ist aus Verbrauchsgründen zu vermeiden. Durch Übergang auf Zweidämpferwandler wird versucht, diese Problemstellung ohne Erhöhung des Trägheitsmomentes auf der Pumpenseite zu lösen. Bei höheren Anregungen sind für diese Antriebsart neuartige Isolationselemente einzusetzen, wie z. B. Drehschwingungsdämpfer auf der Gelenkwelle.

Darüber hinaus ist wesentlich für die Körperschallübertragung des Antriebsaggregats die Ausführung der Motor-Getriebe-Lagerung. Hierbei sind sowohl die Starrkörper- als auch die Elastizitätseigenschaften der Antriebseinheit zu berücksichtigen. So ist es zur Vermeidung von Brummgeräuschen im Fahrzeug wichtig, dass der gesamte Motor-Getriebe-Verbund über eine hinreichende dynamische Steifigkeit verfügt. Weisen die fundamentalen Biege- und Torsionsschwingungen zu niedrige Werte ihrer Eigenfrequenzen auf, werden bei Anregung dieser Eigenschwingungsformen über die internen Motorkräfte fast zwangsläufig tieffrequente Schwingungen in die benachbarten Komponenten Karosserie und Antriebsstrang übertragen. Zur weitgehenden Reduzierung solcher Phänomene ist es deshalb z. B. im Fall von 4-Zyl.-Aggregaten wichtig, ein Eigenfrequenzniveau höher 200 Hz für die Grundbiegung der Antriebseinheit zu erreichen. Daraus resultiert, dass die wesentliche Motoranregung infolge der zweiten Motorordnung bis in den Drehzahlbereich von 6000 U/min keine weitere Verstärkung durch Resonanzen der elastischen Antriebseinheit erfährt. Weiterhin ist auf eine akustisch günstige Anordnung der Tragarme (Motortragböcke und Getriebeaufnahme) an der Antriebseinheit zu achten.

Sie sollten weder infolge der globalen Schwingformen noch aufgrund lokaler Nachgiebigkeiten stark angeregt werden. Schließlich ist eine dynamisch steife Auslegung der Tragarme selbst erforderlich. Diese lässt sich vorteilhaft durch eine möglichst schmale Lagerbasis verwirklichen, die – wie nachstehend gezeigt – auch günstig für einen geringen Körperschalleintrag in die Karosserie ist, Abb. 3.53.

Der überkritisch gelagerte Motor erzeugt über die Weganregung an den Motorlagern Reaktionskräfte des Motormoments, die proportional zur Ab-




$M_{dyn}$ Motor-Wechselmoment
Θ Motor-Trägheitsmoment
$F_L$ Kraft am Tragarm
$F_K$ Kraft an Karosserie
$c_L$ Lagersteifigkeit
$c_K$ lokale Karosseriesteifigkeit
$v_L$ Schwingschnelle am Tragbock
$v_K$ Schwingschnelle Karosserie
$H_K$ vibroakustische Transferfunktion
$p$ Schalldruck am Ohrpunkt

**Abb. 3.53** Motorlagerung

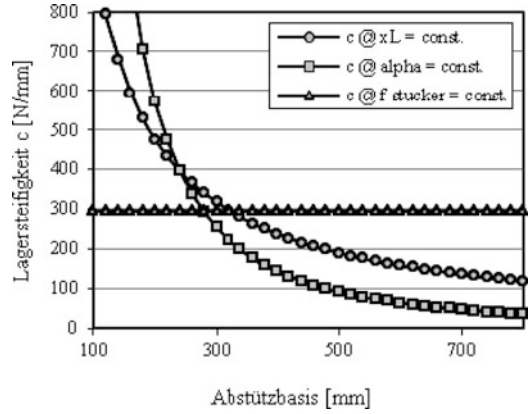



**Abb. 3.54** Verlauf der Lagersteifigkeit

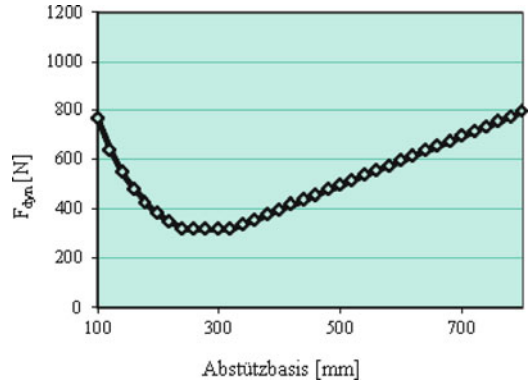



**Abb. 3.55** Dynamische Lagerkräfte

stützbasis und zur Lagerbasis sind:

$$F_{\text{dyn}} \sim c_{\text{L}} \cdot l_y$$

Zur Abstützung des statischen Motormoments müssen die Motorlager jedoch mit abnehmender Lagerbasis steifer werden, um aus Bauraumgründen den maximalen Weg $x_{\text{L}}$ im Lager bzw. den maximalen Verdrehwinkel $\alpha$ des Motor-Getriebe-Verbandes zu begrenzen:

$$c_{\text{L}} \sim \frac{1}{x_l l_y}$$

bzw.

$$c_{\text{L}} \sim \frac{1}{a l_y^2}$$

Gleichzeitig gibt es eine Steifigkeitsanforderung an die Motorlagerung, die unabhängig von der Lagerbasis ist: Zur Vermeidung von Stuckerschwingungen (► Abschn. 3.4.9.1) ist die Lagersteifigkeit auf einem Mindestniveau zu halten.

In ◘ Abb. 3.54 sind die prinzipiellen resultierenden Steifigkeitsverläufe für die Anforderungen konstanter Lagerweg, konstanter Verdrehwinkel und konstante Stuckerfrequenz aufgetragen. Aus der Erfüllung dieser Anforderungen ergibt sich die resultierende dynamische Kraft am Motorlager.

In ◘ Abb. 3.55 ist zu erkennen, dass sich in Abhängigkeit von Geometrie- und Masseeigenschaften des Antriebs ein Minimum der dynamischen Lagerkraft und damit ein Optimum für die Lagerbasis ergibt.

Der Zielkonflikt Akustik-Schwingungskomfort kann mit Hilfe von Hydrolagern teilweise aufgelöst werden, da diese frequenzabhängig unterschiedliche dynamische Steifigkeiten besitzen. Pneumatisch oder elektrisch schaltbare Lager können im Motorleerlauf eine gegenüber dem Fahrbetrieb dynamisch noch weichere Variante darstellen (siehe auch ► Abschn. 7.4.2 Elastokinematik).

Ein weiterer Einleitungspfad für motorinduzierten Körperschall in die Karosserie liegt wie bereits angesprochen in der Übertragung der Wechselmomente aus der Kurbelwelle in die angetriebene Achse und von dort in die Karosserie. In ◘ Abb. 3.56 sind die Verhältnisse für ein heckangetriebenes Fahrzeug dargestellt.

Körperschall des Motors kann auch über die Aufhängepunkte der Abgasanlage (AGA) in die Karosserie eingeleitet werden. Gegenmaßnahmen sind einerseits der Einbau eines flexiblen Elements

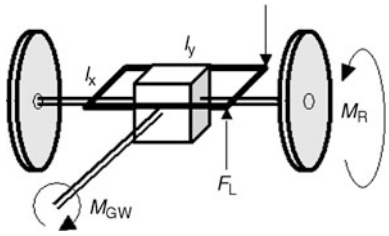



**Abb. 3.56** Einleitung des Motor-Wechselmomentes über den Hinterachsträger in die Karosserie

zwischen Krümmer und hinteren Teil der Anlage und andererseits eine entsprechende Isolation der AGA durch weiche Lager und hohe karosserieseitige Eingangsimpedanzen. Zur Vermeidung von Strukturresonanzen der AGA werden die Anbindungen im Schwingungsknoten angeordnet (Eigenschwingform-Abstimmung). Für den Leerlauf werden die AGA-Eigenfrequenzen vom Frequenzbereich der Hauptverbrennungsordnungen getrennt (Eigenfrequenz-Abstimmung).

#### 3.4.3.4 Auslegung Akustik und Schwingungskomfort am Beispiel eines 3-Zylinder-Motors

Auf Grund deutlich verschärfter Gesetzesanforderungen werden in der Kraftfahrzeugindustrie enorme Anstrengungen unternommen, Maßnahmen zur Reduktion von Verbrauch und Emissionen zu entwickeln. Durch technologischen Fortschritt ist es heute möglich, hohe Leistungspotenziale pro Zylinder auszuschöpfen und gleichzeitig die Kundenansprüche hinsichtlich Leistungsentwicklung und Drehmoment zu erfüllen. In einem hochaufgeladenen 3-Zylinder-Motor werden diese Ansätze vereint.

Neben einem eigenständigen Akustik- und Schwingungsverhaltens besitzt der 3-Zylinder in seiner Leistungsklasse Soundgene, welche denen des 4-Zylinder-Motors deutlich überlegen sind. Z. B. kann mit einer gezielten Auslegung der Abgasanlagen-Volumina der Soundcharakter des 3-Zylinder-Motors durch seinen hohen Anteil der 3. Motorordnung nahe am Soundcharakter des 6-Zylinder-Motors positioniert werden (Abb. 3.57).

Zusätzlich unterstützt die wahrnehmbare Drehfreudigkeit durch den schnelleren Frequenzanstieg der 3. Motorordnung beim 3-Zylinder-Motor gegenüber der 2. Motorordnung beim 4-Zylinder-Motor den sportlichen Charakter.

Auch bezüglich des Massenausgleichs ist der 3-Zylinder dem 6-Zylinder verwandt. Prinzipiell ist der 3-Zylinder-Motor wie ein halbierter Reihen-6-Zylinder-Motor zu betrachten. Wegen des fehlenden „zweiten" 3-Zylinders entstehen Massenmomente 1. und 2. Ordnung (Abb. 3.58).

Die Massenmomente 1. Ordnung werden, wegen ihres tieffrequenten Charakters, bei höherwertigen Fahrzeugen mit einer Ausgleichswelle ausgeglichen. Die Massenmomente 2. Ordnung sind deutlich geringer als die Massenkräfte eines 4-Zylinder-Motors und müssen nicht ausgeglichen werden.

Die Herausforderungen des Akustik- und Schwingungskomforts eines 3-Zylinder Motors ergeben sich aus folgenden Faktoren:

Die höhere Aufladung bedingt höhere Gaswechselmomente, wodurch die Anregung ebenfalls ansteigt. Gleichzeitig sinkt die Anregungsfrequenz aufgrund der niederfrequenteren 1. Zündordnung und der Ertüchtigung von niedrigen Betriebsdrehzahlen, dem sogenannten Downspeeding. Zusätzlich erhöhen sich die Zündabstände im Vergleich zum 4-Zylinder signifikant, Abb. 3.59.

Technisch charakteristisch ist auch das Übertragungsverhalten des Antriebsstrangs und der Entkoppelungssysteme zu tieferen Frequenzen hin. Diese Faktoren bedingen Maßnahmen, um den sogenannten Drehungleichförmigkeiten entgegenzuwirken und somit den gewünschten Anforderungen bzgl. Akustik- und Schwingungskomfort gerecht zu werden, Abb. 3.60.

Als geeignete Maßnahmen bieten sich höhere Massenträgheiten im Antriebsstrang, verdrehweichere Abtriebswellen oder spezielle Wandler/ZMS-Systeme an. Exemplarisch dargestellt ist hier ein konventionelles Zweimassenschwungrad im Vergleich zu einem Zweimassenschwungrad mit integriertem Fliehkraftpendel, Abb. 3.61.

### 3.4.4 Rollgeräusch

Die Interaktion von Fahrbahnbeschaffenheit, der Profilierung des Reifens, sowie weiteren Reifenei-

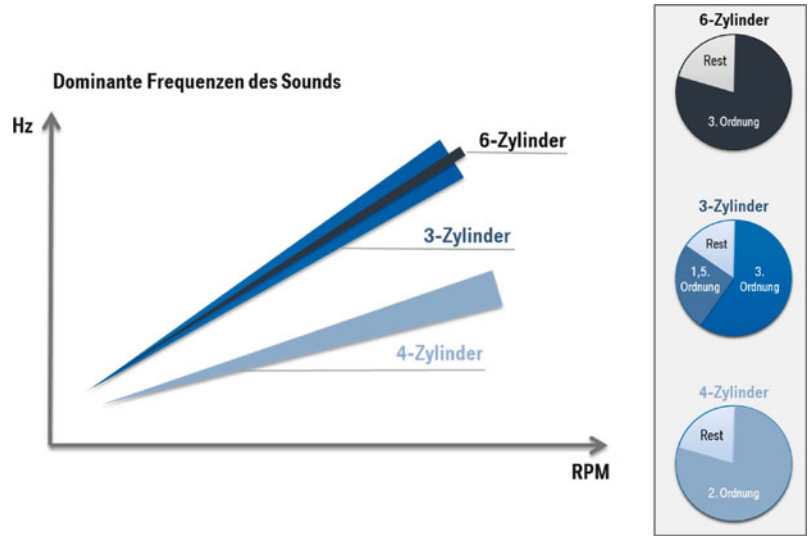
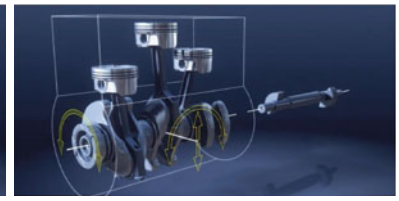



**Abb. 3.57** Soundausprägung verschiedener Motorisierungen



6-Zylinder Reihenmotor:
Keine Massenkräfte und -momente



3-Zylinder Reihenmotor:
Keine Massenkräfte, aber Massenmomente
1. und 2.Ordnung, Ausgleichswelle
1. Ordnung dargestellt

**Abb. 3.58** Massenkräfte und Momente von 6- und 3-Zylinder

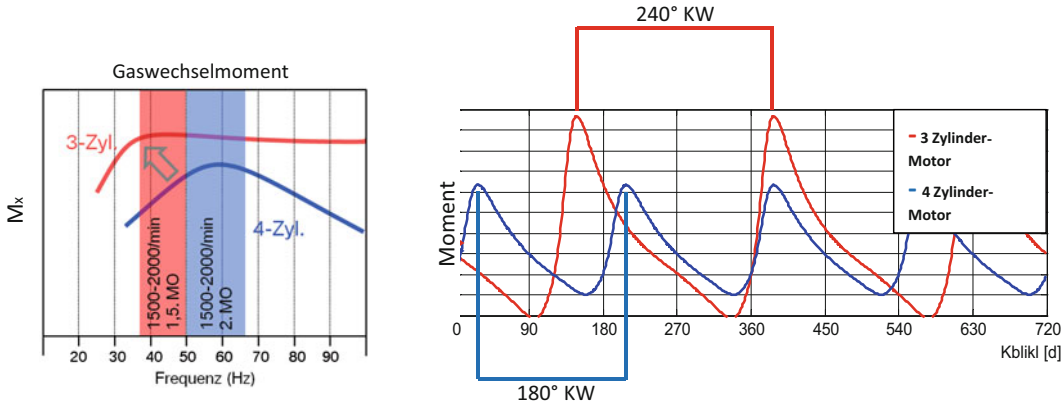



**Abb. 3.59** Darstellung Gaswechselmoment und Zündabstände

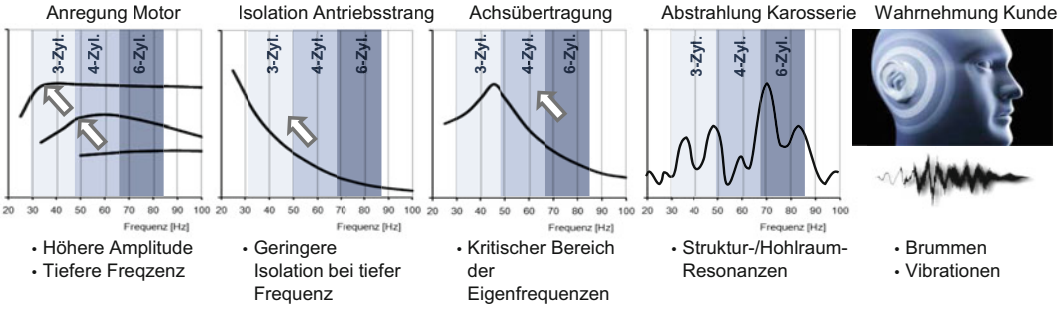



**Abb. 3.60** Wirkkette im Vergleich

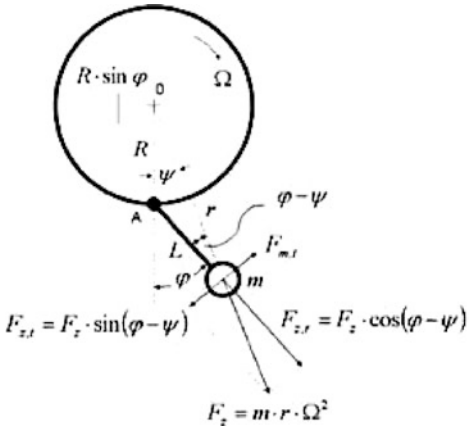



**Abb. 3.61** Prinzipskizze FKP-Funktion

genschaften führt beim Abrollen des Rades auf der Fahrbahn zur Emission von Luft- und Körperschall.

Abb. 3.62 zeigt exemplarisch die spektrale Verteilung, sowie die auftretenden akustischen Phänomene der Abrollakustik im Innengeräusch an der Fahrerohrposition auf verschiedenen Fahrbahnbelägen.

Die hierbei auftretenden Geräuschphänomene sind je nach Fahrzeugkonzept bis ca. 400–500 Hz körperschallinduziert, bei höheren Frequenzen liegen diese i. d. R. in der Luftschallübertragung begründet.

Auftretende Rollgeräuschphänomene lassen sich frequenzspezifisch klassifizieren. Im tieffrequenten Bereich bis 100 Hz spricht man vom Poltern/Wummern, erregt durch gröbere Fahrbahnunebenheiten. Auf rauen bzw. groben Fahrbahnbelägen treten zwischen 100 und 500 Hz Rauigkeiten sowie tonales Dröhnen auf. Hochfrequente Luftschallereignisse wie z. B. Singen/Heulen nimmt der Fahrer auf glatteren Fahrbahnen und bei höheren Geschwindigkeiten wahr.

Luftschallphänomene lassen sich gezielt über eine ausreichend hohe Grunddämmung, optimal abgestimmte Feder-Masse-Systeme, hohe Absorptionskoeffizienten der umliegenden Bauteile sowie über eine ausreichend hohe Dichtigkeit der Karosseriestruktur beeinflussen.

Die Einleitung des körperschallerregten Rollgeräusches erfolgt über die Fahrwerkskomponenten. Hierbei ist der Beitrag von Vorder- und Hinterachse zum auftretenden Innengeräusch frequenzabhängig und phänomenspezifisch.

Abb. 3.63 beschreibt die Wirkkette des körperschallerregten Rollgeräusches von der Fahrbahnanregung bis hin zum Luftschallereignis an der Fahrerohrposition.

Der von der Fahrbahn erregte Energieeintrag wird abhängig vom jeweiligen Achskonzept über die Fahrwerksbauteile auf die Struktur übertragen. Elastische Lagerungen ermöglichen eine Reduktion des induzierten Körperschalls. Man spricht hierbei von Lagerdämmung bzw. -isolation. Weiteres Glied in der Wirkkette stellt die Karosserie dar. Tragstrukturen leiten die eingetragene Energie, Blechflächen der Karosserie fungieren als Membran und strahlen Körperschall in Luftschall ab. Der dort aus Körperschall entstehende Schalldruck wird, zusammen mit dem raderregten Luftschallbeitrag, vom Fahrer als Rollgeräusch wahrgenommen.

Um ein robustes Gesamtsystem zu gewährleisten, welches auch auf wechselnden Fahrbahnbelägen nicht mit signifikanten Niveauunterschieden

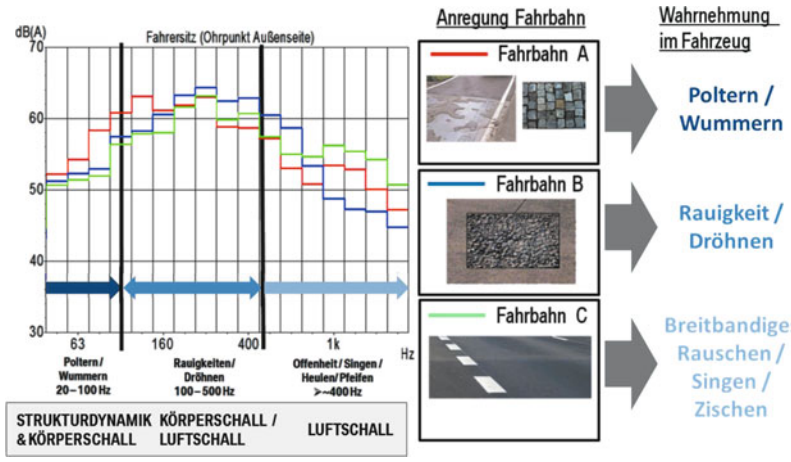



**Abb. 3.62** Luftschallereignisse Fahrerohr – spektrale Verteilung des Rollgeräusches




**Abb. 3.63** Wirkkette – körperschallerregtes Rollgeräusch

im Innengeräusch reagiert, ist es notwendig, das Gesamtsystem von der Anregung, der Übertragung bis hin zur Abstrahlung hinsichtlich Abrollakustik auszulegen.

## 3.4.5 Windgeräusch

Windgeräusche entstehen infolge von Wirbelbildung bei abgelöster Strömung unter Grenzschichteinflüssen. Sie dominieren im Innengeräusch von Fahrzeugen bereits ab ca. 80–100 km/h (Abb. 3.64).

Nach dem Entstehungsmechanismus können tieffrequente Windgeräusche bis 400 Hz und hochfrequente Windgeräusche bis ca. 10 kHz unterscheiden werden (Abb. 3.65).

Tieffrequente Windgeräusche entstehen u. a. durch Strömungsablösungen mit hoher Energie an der Karosserie und am Unterboden. So können

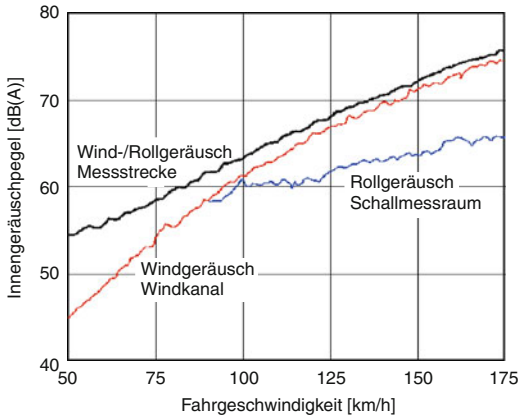



**Abb. 3.64** Wind- und Rollgeräusch

z. B. abgehende Wirbel das gesamte Blechfeld der Bodengruppe zum Schwingen bringen. Werden dadurch die Eigenmoden des Innenraums bei 40–50 Hz angeregt, kann sehr unangenehmes Hochgeschwindigkeitswummern die Folge sein. Speziell Randwirbel an Spoilern und Unterbodenabdeckungen sind hier aeroakustische Störquellen. Ein aerodynamisch optimierter glatter Unterboden wirkt in erster Linie durch verminderten Luftwiderstand und niedrigen Auftrieb, er hat aber durch die störungsfreiere Unterbodenströmung in der Regel auch ein niedrigeres akustisches Störpotenzial.

Höherfrequente Geräuschanteile im Bereich über 400 Hz können auch auf direktem Weg durch Leckagen in den Innenraum gelangen. Dieses Windgeräusch ist vom Fahrer in den meisten Fällen leicht zu orten und wirkt dadurch besonders störend. Anfällig für diese Störungen sind die Abdichtungen von Fenstern und Türen, da sie bei höheren Geschwindigkeiten genau in dem für das menschliche Gehör empfindlichsten Frequenzbereich lästige Geräusche erzeugen können. Daher gilt der Abdichtung der gesamten Fahrgastzelle in der Entwicklung große Aufmerksamkeit. Die Mehrfachdichtungssysteme der Türen vieler Hersteller zeigen den konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand, um das Ziel einer unter allen Fahrzuständen dichten Fahrgastzelle zu erreichen. Neben den Dichtungen sind Karosseriefugen, Schiebedächer und Anbauteile wie Außenspiegel, Scheibenwischer, Wasserfangleisten und Dachträgersysteme potentielle Quellen von hochfrequenten Windgeräuschen. Windgeräusche werden auch über die

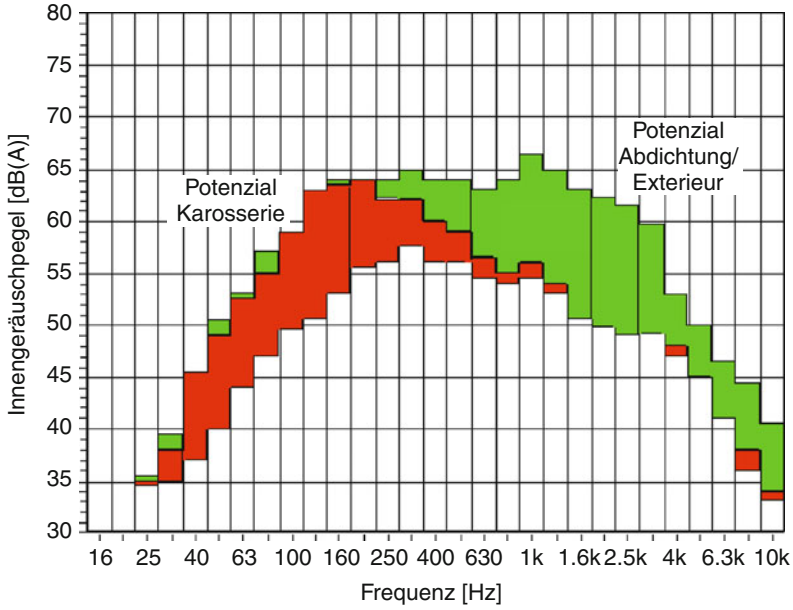



**Abb. 3.65** Windgeräusch

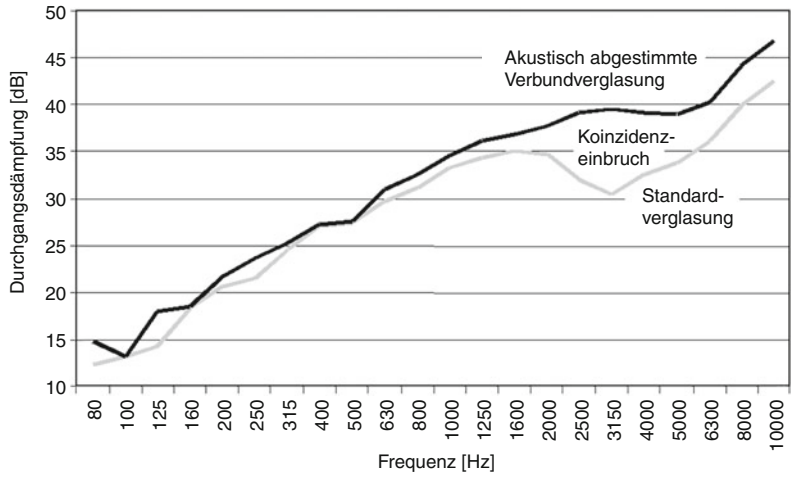



**Abb. 3.66** Dämmungsverhalten der Verglasung

Scheiben unmittelbar in den Innenraum geleitet. Da die Dämmung proportional mit der Masse zunimmt, ist die Scheibenstärke maßgebend für die Isolation des Windgeräusches. Biegeschwingungen der elastischen Scheiben verursachen bei höheren Frequenzen einen störenden Dämmungseinbruch. Um Fahrzeuggewicht einzusparen, werden häufig reduzierte Scheibenstärken mit entsprechend negativen Auswirkungen auf das Windgeräusch eingesetzt. Gewichtsparende Sandwich-Konstruktionen mit hochdämpfenden Folien können den Konflikt zwischen Akustik und Gewicht entschärfen. (Abb. 3.66).

In der Serienentwicklung ist die „Fenstermethode" ein wichtiges Verfahren zur Beurteilung und Optimierung einzelner Bauteile bezüglich Windgeräusch-Entstehung bzw. Übertragung. Dabei wird das Fahrzeug zunächst im Ausgangszustand gemessen. Anschließend wird durch Abdichtung, Isolation oder Überdämmung aller windgeräuschrelevanten Bauteile das Innengeräusch im relevanten Frequenzbereich um ca. 10 dB abgesenkt. Durch gezielte Entdämmung können nun interessierende Komponenten aus dem Gesamtgeräusch „herausgelöst" und einzeln betrachtet werden. Mit dieser Methode können zuverlässige Aussagen über die Quellenpegel aller Bauteile und deren Frequenzcharakteristik getroffen werden.

In der frühen Auslegungsphase werden verstärkt numerische Methoden angewendet. Durch

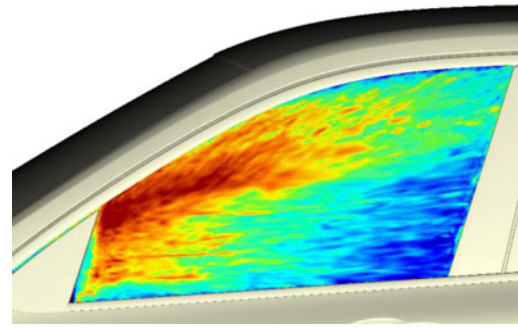


**Abb. 3.67** Simulation Schalldruck auf der Seitenscheibe

den Einsatz von CFD-Codes ist eine akustisch und strömungstechnisch optimale Vorauslegung der Karosserieform möglich (Abb. 3.67). Da die finale Außenform immer das Gesamtergebnis vieler Anforderungen (Design, Aerodynamik, …) ist, bietet der Einsatz der CFD-Simulation die Möglichkeit der Bewertung verschiedenster Varianten. Dadurch ist es möglich, Auslegungsfehler zu vermeiden und das Gesamtoptimum zu finden.

## 3.4.6 Mechatronische Geräusche

Als mechatronische Komponenten im Kraftfahrzeug werden Bedien- und Stelleinheiten zusammengefasst, die Fahr- oder Komfortfunktionen er-

| | **Störgeräusch** (unbewusste Beeinflussung) | **Betätigungsgeräusch** (bewusste Beeinflussung) |
|---|---|---|
| Betriebsdauer niedrig | Lenkhilfe<br>Niveauregulierung<br>Sekundärluftpumpe | Fensterheber<br>Sitzverstellung<br>Spiegelverstellung |
| Betriebsdauer hoch | Motorlüfter<br>Kraftstoffpumpe<br>Wankstabilisierung | Klimagebläse<br>Scheibenwischer<br>Sitzlüfter |

**Abb. 3.68** Einteilung mechatronischer Geräusche

füllen. Dies geschieht unter Zuhilfenahme elektrischer oder hydraulischer Aktuatoren.

Das Einsatzgebiet umspannt Kühllüfter für Verstärkereinheiten des Navigationssystems, geht über Fensterheber und Zusatzwasserpumpen bis zu kompletten aktiven Fahrwerken. Aus akustischer Sicht ist eine Unterteilung der Geräusche nach dem Grad der Beeinflussung in Funktions- und Störgeräusche sinnvoll. Eine weitere Klassifizierung über die Betriebsdauer des Geräuschs ist möglich (Abb. 3.68), je nach Positionierung des Fahrzeugs aber nicht immer eindeutig.

Mechatronische Geräusche aufgrund bewusster Bedienhandlungen werden als Funktionsgeräusche dann positiv wahrgenommen, wenn das Klangbild in der subjektiven Erwartung des Kunden zur gewünschten Funktion passt. Typische Beispiele sind hier das „Relaisklackern" bei Blinklichtbetätigung oder ein breitbandiges Strömungsrauschen des Klimagebläses.

Unbewusste Bedienungen sind z. B. bei der Kraftstoffförderung durch Primär- und Sekundärpumpe oder beim Ventilschalten der hydraulischen Wankstabilisierung gegeben. Der subjektiv tolerierte Geräuscheintrag reicht hier von nicht störend hörbar bei kurzzeitiger Einwirkung bis unhörbar bei periodischen oder dauerhaft einwirkenden Geräuschen.

Durch den Wegfall der verbrennungsmotorischen Geräusche bei neuen Fahrzeugkonzepten mit rein elektrischem Fahren, kommt der Ausprägung mechatronischer Geräusche eine höhere Bedeutung zu. Durch die fehlende Maskierung reicht an einigen Stellen eine einfache Evolution bestehender Konzepte nicht mehr aus. Neue Konzepte müssen gefunden und integriert werden.

### 3.4.6.1 Stellmotoren

Stellmotoren sind die häufigste Form von akustisch relevanten Aktuatoren. In Fahrzeugen der Oberklasse werden z. B. weit über 100 mechatronische Aktuatoren in Form von elektrischen Antrieben und Stellmotoren verbaut (Abb. 3.69). Die dadurch verursachten Geräusche besitzen vielfältige

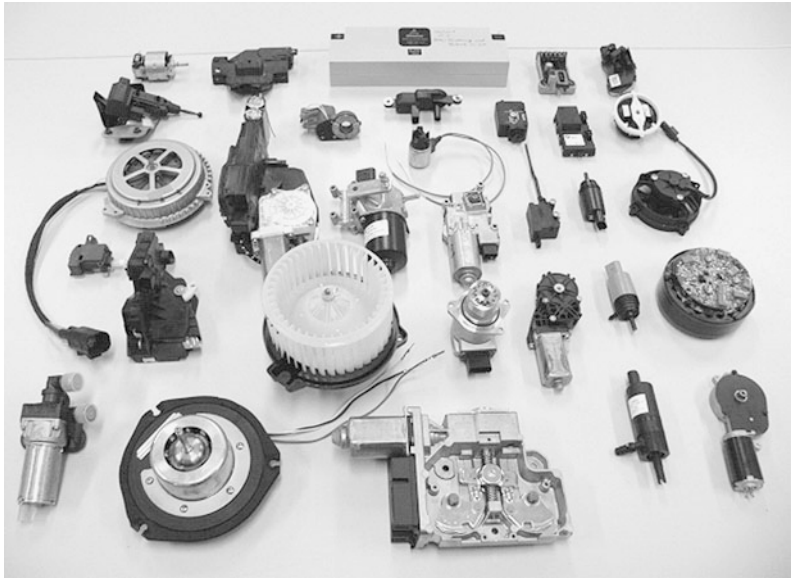


**Abb. 3.69** Ausgewählte Stellmotoren

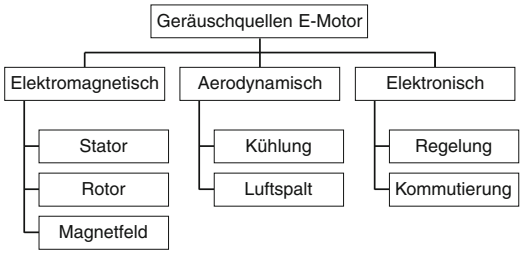



**Abb. 3.70** Geräuschquellen bei E-Motoren

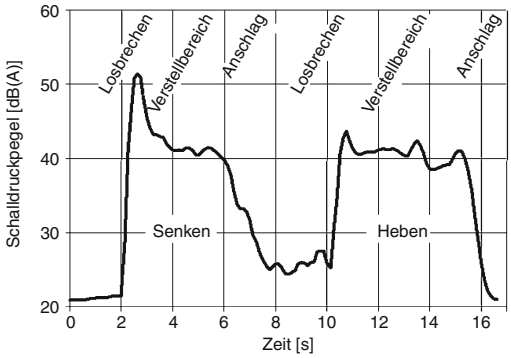



**Abb. 3.71** Geräuschverlauf Fensterheberbetätigung

Ursachen. Abb. 3.70 zeigt die wesentlichen Geräuschquellen auf. Sie können elektromagnetischer, aerodynamischer oder elektronischer Natur sein.

Ein klassisches Beispiel für Betätigungsgeräusche ist der elektrische Fensterheber. Hier können unterschiedliche Ursachen exemplarisch erläutert werden, die für die Geräuschemission in Summe verantwortlich sind. Dargestellt ist diese am zeitlichen Ablauf des Fensteröffnens und -schließens in Abb. 3.71. So entsteht beim Einschalten oder Abschalten ein impulshaltiges Losbrech- und Anschlaggeräusch. Der subjektive Geräuscheindruck beim eigentlichen Heben und Senken der Scheibe wird durch Modulationen von Lautstärke oder Frequenz bestimmt. Diese müssen unbedingt vermieden werden, um nicht einen qualitativ minderwertigen Antrieb zu vermitteln.

Ein bedeutender Stellhebel ist dafür die Vermeidung von leicht wahrnehmbaren Einzeltönen im Geräuscheindruck, da deren Modulation sehr deutlich wahrgenommen werden kann. Diese sog. Tonhaltigkeit wird durch die Ordnungen des Elektromotors erzeugt. Die Homogenität des Magnetflusses, bestimmt durch Luftspalt zwischen Rotor und Stator, Anzahl der Wicklungen, Qualität des Magnetfeldes, Kommutierungsart, ist maßgeblich für das Ordnungsverhalten verantwortlich.

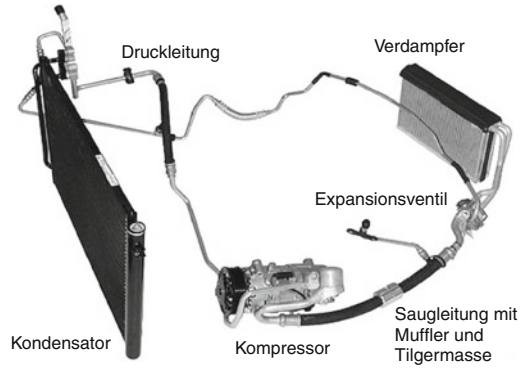



**Abb. 3.72** Klassische Klimaanlage mit Akustikbauteilen

### 3.4.6.2 Fahrzeugklimatisierung

Klimaanlagen gehören im Premiumsegment zur Serienausstattung. In Abb. 3.72 sind die Bauteile einer klassischen Fahrzeugklimaanlage dargestellt. Erkennbar als sekundäre Geräuschminderungsmaßnahmen sind zum einen der Schalldämpfer, auch Muffler genannt, am saugseitigen Kompressoreingang und zum anderen eine Tilgermasse auf der Klimasaugleitung zur Reduzierung der vibroakustischen Übertragung in den Fahrzeuginnenraum.

Die Geräuschemission ist abhängig von der konzeptionellen Systemauslegung. Bei Kolbenkompressoren mit Magnetkupplungen können beim Einschalten der Klimaanlage Impulsgeräusche aufgrund des Anziehens der Magnetkupplung oder dem Verdichten von Kondensatrückständen des Kältemittels auf der Saugseite entstehen. Die Ungleichförmigkeit der Verdichtung und damit auch der Pulsationsgeräusche im Lastbereich wird durch die konstruktive Zylinder- und Ventilanordnung, sowie durch den drehungleichförmigen Antrieb des Verbrennungsmotors hervorgerufen. Drehschwingungen führen zu erhöhter Pulsations- und Körperschallabstrahlung des Kompressors, welche durch die Schallnebenwege der Leitungen in den Fahrzeuginnenraum gelangen. Bei der Drosselung des

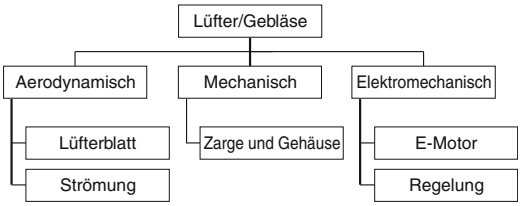



**Abb. 3.73** Geräuschquellen Lüfter/Gebläse

Kältemittels am Expansionsventil gelten die Gesetzmäßigkeiten der adiabaten Düsenströmung, mit überkritischem Druckabbau und Ausströmen mit Schallgeschwindigkeit. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit und dem anschließenden Verdampfen des Kältemittels kommt es zu Zischgeräuschen. Die Schallemission des Kältekreislaufes ist dabei lastabhängig und kann im Betriebskennfeld aus Kompressordrehzahl und Verdichtungsdruck aufgespannt werden.

Bei rückwirkungsfreien Leitungsnetzen steigt mit Drehzahl und Druck auch der Geräuschpegel kontinuierlich, der in der Regel durch das Verbrennungsmotorgeräusch maskiert wird. Reicht dieser Effekt nicht aus, sind weitere Schalldämpfer am Kompressor notwendig.

Klimaanlagen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen können von der klassischen Ausführung stark abweichend sein. Bei Verwendung von Klimakompressoren werden diese elektrisch angetrieben. Kompressorantrieb und Hydraulikanregungen müssen bei elektrischem Fahren erhöhte Geräusch- und Vibrationsanforderungen erfüllen, da keine Maskierung durch einen Verbrennungsmotor stattfindet.

### 3.4.6.3 Lüfter und Gebläse

Die typischen Geräuschquellen von Lüftern und Gebläsen sind in Abb. 3.73 aufgezeigt. Neben stochastischem Rauschen aufgrund der Durchströmung von Klimakanälen, Lüftungsgittern, Luftweichen oder Kühlmodulen, können auch stark tonale Ordnungen emittiert werden. Als subjektiv besonders störend erweisen sich die Drehklänge des Lüfterblattes und des E-Motors. Ursache können repetierende Druckwechsel am äußeren Umfang des Lüfterblattes, fehlende Steifigkeit der Lüfterzarge oder erhöhte Rastmomente des E-Motors sein.

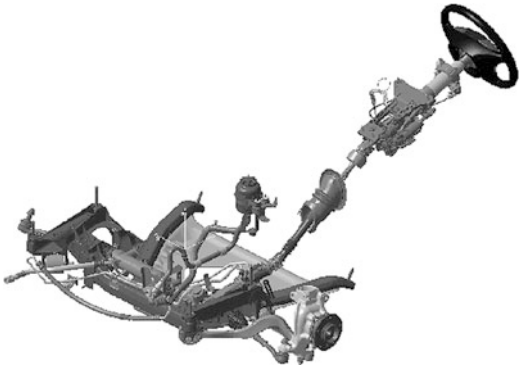


**Abb. 3.74** Lenkungssystem

Bei geregelten Lüftern kann durch Ausblenden der Resonanzdrehzahlen ein kritischer Lüfterbetrieb vermieden werden. Aeroakustische Berechnungsverfahren (CAA) erlauben Geräuschprognosen für Lüfter und Ausströmkanäle. Neben den aeroakustischen Geräuschen von Lüftern und Gebläsen treten auch Körperschallphänomene auf. Erzeugt werden diese durch den dynamischen Wechseldruck der Schaufelgeometrie des Rotorblattes, sowie durch resultierende Wechselkräfte, welche von Motor- und Zargenlagerung aufgenommen werden müssen.

### 3.4.6.4 Lenkungssystem

Innerhalb der mechatronischen Systeme sticht die Bedeutung der Lenkung deutlich heraus, prägt sie doch wesentlich das Fahrgefühl. Der Zielkonflikt zwischen Komfort, Agilität und Fahrbahnrückmeldung wird durch aufwendig geregelte Servo-Aktuatoren aufgelöst. Die geregelte Lenkhilfe kann hydraulisch, elektrohydraulisch oder elektrisch erfolgen. Für akustische Untersuchungen wird das gesamte Lenkungssystem, wie in Abb. 3.74 gezeigt, auf Komponentenprüfständen aufgebaut.

Abb. 3.75 zeigt die vielfältigen vibroakustischen Phänomene, welche im Fahrzeugbetrieb auftreten können.

Bei der fahrzeugunabhängigen akustischen Qualifizierung von Komponentensystemen muss die Korrelation zum Gesamtfahrzeug gewährleistet sein. An allen Schnittstellen werden hierzu die dynamischen Kräfte oder Körperschallbeschleunigungen messtechnisch erfasst. Eine akustische Immissionsbewertung erfolgt dann durch Ver-

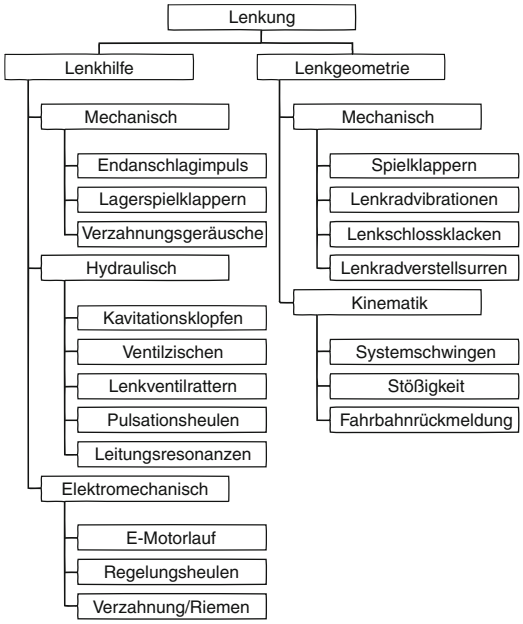



**Abb. 3.75** Vibroakustische Phänomene eines Lenkungssystems

rechnen der Komponentenmesswerte mit der virtuellen Karosserie. Bei der akustischen Optimierung werden u. a. die Luftschallabstrahlung sowie die Körperschallanregung der Pumpe, das Übertragungsverhalten der Hydraulikleitungen hinsichtlich der Körper-, Fluid- und Rohrschallübertragung, Spiele von Verzahnungen und Wellenführungen und die Systemlagerungen im vorgesehenen Fahrzeug bearbeitet.

### 3.4.6.5 Fahrwerksregelung

Die Regelgeräusche der Sicherheitsfunktionen sind akustisch untergeordnet. Jedoch kann auch hier nicht auf eine akustische Auslegung verzichtet werden, kommt es doch gerade auf Fahrbahnen mit Niedrigreibwerten bei regennasser oder vereister Oberfläche leicht zu Irritationen des Fahrers. Eine moderate akustische Rückmeldung ist gewünscht, welche den Regeleingriff signalisiert aber den Fahrer nicht zu Schreckreaktionen animiert. Akustisch besonders kritisch sind Regelungen bei geringen Drücken im Komfortbereich. Es sind nur einzelne Räder betroffen und der Fahrer erwartet keinen Regeleingriff, was sich bei schneebedeckter Fahrbahn allerdings nicht vermeiden lässt. Ursache ist der zu geringe Druckunterschied zum Blockierdruck beim Radbremsen und der zu große Druckunterschied nach dem Blockieren zum Anlaufen des Rades.

Wirksame Geräuschminderungsmaßnahmen der Regelhydraulik sind der Verbau von mehrzylindrigen Kolbenpumpen mit großen Kolbenquerschnitten bei geringen Hüben und niedrigen Drehzahlen. Sekundär können auch vereinzelt Pulsationsdämpfer verbaut werden. Proportionalventile und eine Begrenzung des Druckgradienten ermöglichen im Feinsteuerbereich die Regelung von geringen Differenzdrücken und vermeiden damit hohe Pulsgeräusche. Vom Regelprinzip sind Druckdifferenzregelungen günstiger als Volumenstromregelungen. Um unnötige Regelungen und damit auch geräuschrelevante Druckänderungen zu vermeiden, muss ein Optimum der Taktzeit gefunden werden. So sind geringe Taktzeiten bei der schnellen dynamischen Stabilitätskontrolle notwendig aber für eine Antiblockierbremsung überzogen. Des Weiteren müssen während der Fahrzeugentwicklungsphasen alle Karosserieanbindungen hinsichtlich ausreichender Körperschallisolation ausgelegt werden.

### 3.4.6.6 Biegeschlaffe Leitungen

Biegeschlaffe Bauteile wie Schlauchleitungen von hydraulischen Lenksystemen, elektrohydraulischen Verdecken, Heiz/Klimaanlagen, Kühlwassersystemen oder auch elektrische Kabelführungen stellen Schallübertragungswege dar. In Summe stellen die übertragenen Teilschallleistungen aller Bauteile, welche eine Verbindung vom Verbrennungsmotor bzw. akustisch aktiven Nebenaggregaten zur Karosserie haben, einen erheblichen Anteil dar. In Abb. 3.76 sind die wichtigsten biegeschlaffen Leitungen in der Silhouette einer Fahrzeugaußenkontur grafisch dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Vielzahl der sich hieraus ergebenden Schallnebenwege.

Neben der hydroakustischen Druckpulsationsübertragung ist die Bedeutung der Körperschallweiterleitung der Schlauchleitungen für das Motorgeräusch von großer Bedeutung. So wird das Klangbild des Verbrennungsmotors im Innengeräusch neben der Auslegung von Aggregatlagerungen maßgeblich durch die Schlauchleitungsverle-

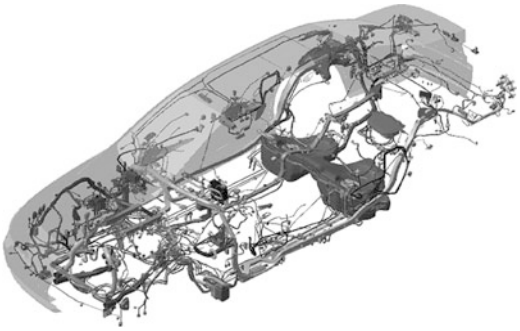


**Abb. 3.76** Leitungen in einem Fahrzeug

gung beeinflusst. Eine akustisch günstige Verlegung bedingt allerdings eine frühzeitige Layoutfestlegung im Package.

## 3.4.7 Klappern, Knarzen, Quietschen

Da der durch Fahrgeräusche verursachte Geräuschpegel im Innenraum von Kraftfahrzeugen in den letzten Jahren immer geringer wurde, treten heute Störgeräusche verstärkt in Erscheinung. Speziell Klapper-, Knarz- und Quietschgeräusche aufgrund von Relativbewegungen von Bauteilen zueinander werden dabei nicht nur als störend empfunden, sie beeinträchtigen vielmehr auch den allgemeinen Qualitätseindruck eines Fahrzeuges nachhaltig.

Die Relativbewegung hat entweder eine Haft-Gleitreibung (Stik-Slip Effekt), ein Anschlagen oder einen Hemmungseffekt mit entsprechenden Quietsch-, Klapper- und Knarzgeräuschen zur Folge. Durch systematische Präventiv-Vorgehensweisen müssen potenziell Geräusche verursachende Kontaktstellen gefunden und durch entsprechende Materialpaarungen oder konstruktive Gestaltungen entschärft werden. Typischerweise sind dabei bis zu 1000 relevante Kontaktstellen in einem Fahrzeug zu betrachten.

Die Erfahrung zeigt, dass selbst bei systematischer Bündelung des vorhandenen Ingenieur-Wissens in der präventiven Phase immer noch Restprobleme übrig bleiben, die nicht bedacht wurden. Um diese Probleme aufzudecken und Abhilfemaßnahmen zu bewerten sind Tests mit Hilfe geräuscharmer Gesamtfahrzeug- und Komponenten-Störgeräusch-Prüfeinrichtungen notwendig. Zur objektiven Qualifizierung der Störgeräusche wurden Methoden und Messsysteme zur Echtzeit-Erfassung, Analyse und Bewertung von Störgeräuschen entwickelt [95, 96]. Die so ermittelten Daten bilden auch die Grundlage für Qualitätsvorgaben an Zulieferanten.

## 3.4.8 Außengeräusch

### 3.4.8.1 Standgeräusch

Da im Stand und bei sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten nahezu keine weiteren Geräuschquellen auftreten, ist die Akustik des Antriebsstranges hier von besonderer Bedeutung (Abb. 3.77).

Das Außenstandgeräusch ist einerseits erlebbar für den Fahrer, sobald er bei laufendem Motor aus dem Fahrzeug aussteigt oder z. B. an Parkschranken das Seitenfenster öffnet. Andererseits ist auch die Wirkung auf Passanten entscheidend, beispielsweise bei wartenden Fahrzeugen an Verkehrsampeln oder bei langsam fahrenden Fahrzeugen auf Parkplätzen. Das Standgeräusch eines Fahrzeugs war bis vor kurzem vor allem für Dieselfahrzeuge aufgrund ihrer „nagelnden" Verbrennungsgeräusche ein entscheidendes Wertigkeitskriterium. Da sich Einspritzdrücke und Zylinderdruckverlauf bei modernen Otto- und Dieselmotoren aufgrund fortgeschrittener Brennverfahren immer weiter annähern, ist das Außenstandgeräusch inzwischen für beide Verbrennungsverfahren ein wichtiger Gegenstand der Akustikentwicklung.

Der Druckgradient zwischen Brennbeginn und Druckmaximum regt den mittleren Frequenzbereich des emittierten Luftschalls an. Beim Druckabklingen bilden sich Brennraumresonanzen aus, die wesentlich die höheren Frequenzen im Spektrum prägen. Ziel aus akustischer Sicht ist es, den Druckimpuls bzw. die entstehenden Brennraumresonanzen abzuschwächen. Dies kann bei Dieselmotoren durch neue Einspritztechnologien mit Piezoaktuatoren mittels gezielter Vor- und Nacheinspritzungen erreicht werden. Brennraumresonanzen lassen sich durch Nacheinspritzung von Kleinstmengen in den Brennraum abschwächen. Bei Benzinmotoren sind die Stellhebel Zündzeitpunkt und Einspritzzeitpunkt. Diese Maßnahmen

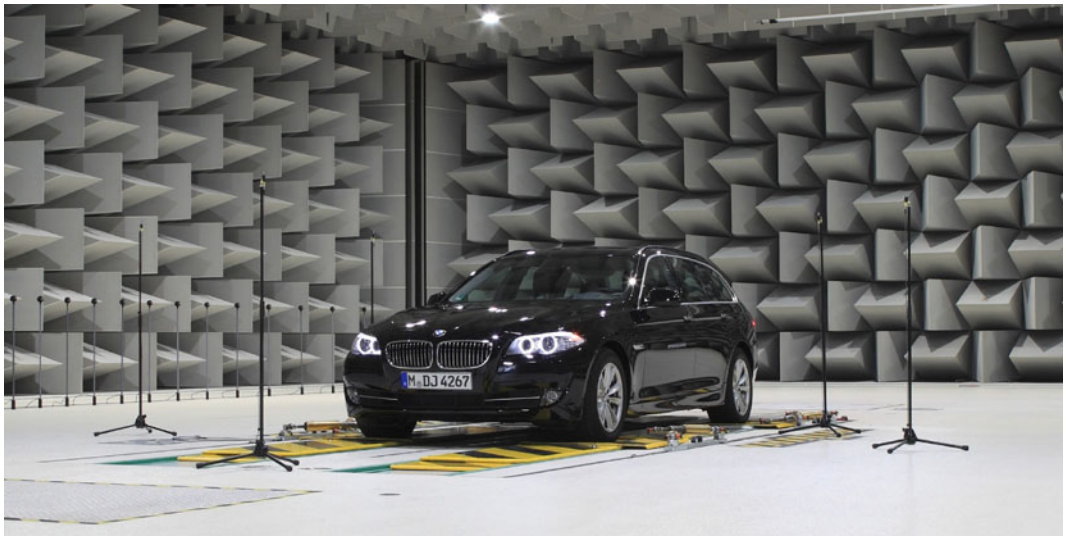



**Abb. 3.77** Außenstandgeräuschmessung

laufen aber teilweise dem Ziel der Effizienzsteigerung und Abgasemissionsreduktion zuwider. Hier hilft eine differenzierte, drehzahlabhängige Einspritzvorgabe, die speziell im Leerlauf für eine weichere Verbrennung sorgen kann.

Eine zusätzliche Geräuschquelle moderner direkteinspritzender Motoren ist das Kraftstoff-Hochdrucksystem. Sowohl Injektoren als auch die Hochdruckpumpe emittieren aufgrund ihrer mechanischen Arbeitsweise Schall im höherfrequenten Bereich, der sich auch über Anbauteile wie das Kraftstoffrail oder die Grundmotorstruktur weiter ausbreiten kann.

Bei immer rigideren gesetzlichen Anforderungen bezüglich der Abgasemission ist der Spielraum für Akustikverbesserungen durch primäre Maßnahmen am Motor geringer geworden. Hier greifen zunehmend verschiedene passive Maßnahmen bei der Akustikoptimierung von Fahrzeug und Antrieb.

Primär gilt es, die Motorstruktur selbst von Grund auf unter akustischen Gesichtspunkten zu optimieren. Eine konstruktiv möglichst steife Gestaltung des Grundmotors, der Einsatz dämpfender Werkstoffe und eine Optimierung mechanischer Komponenten sind Grundvoraussetzungen für eine effiziente quellenorientierte Geräuschvermeidung.

Übliche Kapselmaßnahmen in der Motorperipherie und im Motorraum sind im Bereich der Injektoren die Injektorabdeckung sowie eine seitlich abgedichtete Motorhaube mit innenliegendem Absorber. Im Bereich der Fahrzeugfront gilt der Einsatz von temperaturgesteuerten Klappen als Stand der Technik. An der Fahrzeugunterseite sind vor allem als Schallquellen die Ölwanne und das Getriebe, sowie Teile des Abgaskrümmers, Abgasnachbehandlungssysteme und der weiterführenden Abgasanlage, sowie Leckagen des Motorraums durch Dämmungsmaßnahmen reduzierbar. Aus Gründen des Wärmemanagements sind der vollständigen Kapselung jedoch Grenzen gesetzt. Deshalb wird zusätzlich mit Absorptionsmaßnahmen im Motorraum, unter der Motorhaube und im Unterbodenbereich des Innenraums gearbeitet. Auch Absorptionsmaßnahmen auf der Außenfläche der Unterbodenverkleidungen und in den Radhäusern sind derzeit im Einsatz.

### 3.4.8.2 Fahrgeräusche

Das Vorbeifahrtgeräusch setzt sich im Wesentlichen aus den zwei Teilschallquellen Antriebsgeräusch und Reifen-Fahrbahngeräusch zusammen (Abb. 3.78).

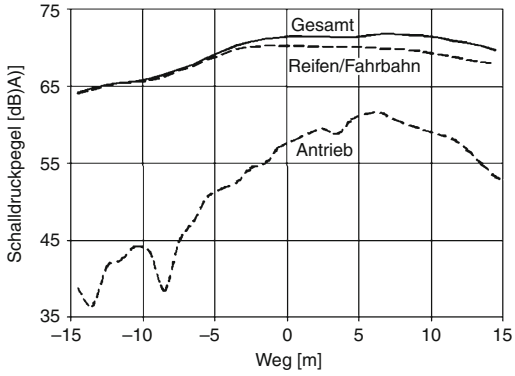



**Abb. 3.78** Teilschallquellen Antriebsgeräusch und Reifen-Fahrbahngeräusch in der beschleunigten Vorbeifahrt

Als Ausdruck des langjährigen Entwicklungsfortschrittes an den Aggregaten des Antriebsstranges zeigen sich die spektralen Anteile zweier vergleichbarer Fahrzeuge deutlich verändert. Reduziert wurden vor allem die Oberflächenabstrahlung des Motor-Getriebe-Verbunds und das Mündungsgeräusch der Abgasanlage (Abb. 3.79). Das R/F-Geräusch verbleibt in der Umgebung von 1 KHz als dominante Quelle und erschwert eine weitere Pegelabsenkung.

### 3.4.8.3 Vorbeifahrt nach ISO 362

Die gesetzlichen Grenzwerte in der Außengeräusch-Typprüfung sind durch ECE R51geregelt, die praktische Durchführung erfolgt nach ISO 362. Die Grenzwerte wurden seit 1980 schrittweise von 82 dB(A) auf 74 dB(A) abgesenkt. Seit 1996 ist dieser Prozess ausgesetzt, da erkannt wurde, dass die dadurch bewirkte akustische Optimierung der Fahrzeuge sich unter den Bedingungen des realen Verkehrsgeschehens nicht mehr schlüssig lärmmindernd auswirkt. Zur Zeit wird ein neues Typprüf-Verfahren (TP) formuliert. Es zielt auf eine verbesserte Abbildung der Lärmemissionen, wie sie bei Fahrzeugen im realen innerstädtischen Verkehrsgeschehen auftreten. Eine gesetzlich verbindliche Einführung als ECE R51.03 erfolgt am 01.07.2016.

In der bis zum 30.06.2016 gültigen TP-Norm ECE R51.02 werden die Vorbeifahrtpegel unter Volllast ermittelt (Abb. 3.80). Für Fahrzeuge mit manuellen Getrieben werden Pegelwerte des zweiten und dritten Ganges arithmetisch gemittelt, während automatische Getriebe in Stufe D gemessen werden. Eine Ausnahme stellen Fahrzeuge dar, die Hochleistungskriterien erfüllen; diese werden nur im dritten Gang gemessen. In der Neufassung der TP-Norm ISO362 (= ISO362-1) ist die Geräuschemission eines Fahrzeugs bei $v = 50$ km/h unter Teillastkriterien zu ermitteln, die von dessen „power to mass-Ratio“ (PMR = Leistung/Gewicht in KW/t) abhängen. Dazu erfolgen unter Auswahl geeigneter Gangstufen Vorbeifahrten am Mikrofon bei Volllast (wot) und zusätzlich Konstantfahrten (cruise) in diesen Gängen. Die Mittelungsprozedur

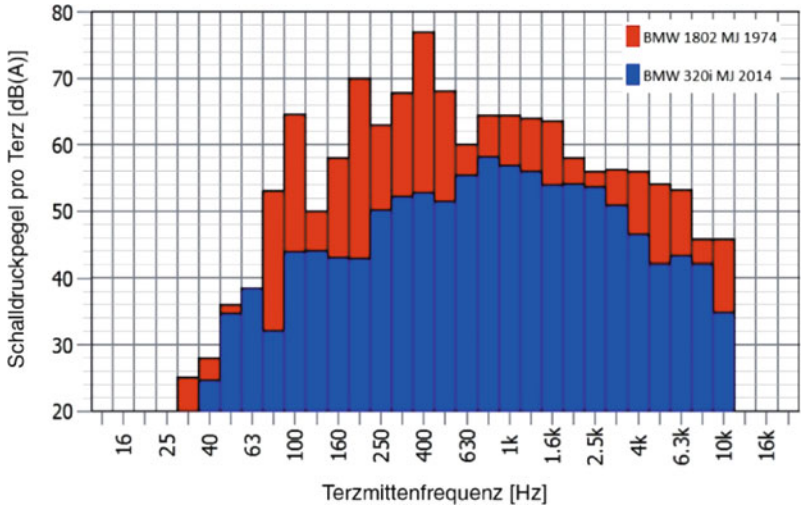
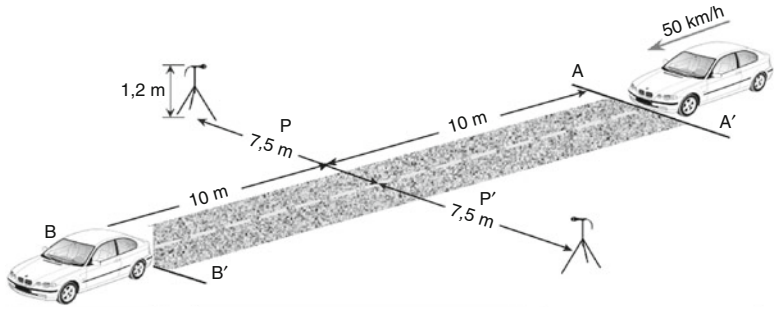



**Abb. 3.79** Spektrum des maximalen Vorbeifahrtgeräusches gestern und heute




| ISO 362 | ISO 362 neu | 2001/43/EG |
|---|---|---|
| $v_{AA'}$ = 50 km/h<br>2. und 3. Gang<br>Volllast<br>GW. 74 dB(A) | $v_{PP'}$ = 50 km/h<br>Gangwahl $a$ < 2,0 m/s$^2$<br>Teillastsimulation (VL, konstant)<br>GW in Diskussion | $v_{ref}$ = 80 km/h<br>$v_{mess}$ = 70–90 km/h<br>Rollen/Motor aus<br>GW: 76 dB(A) (>215 mm) |

**Abb. 3.80** Vorbeifahrt-Typprüfverfahren

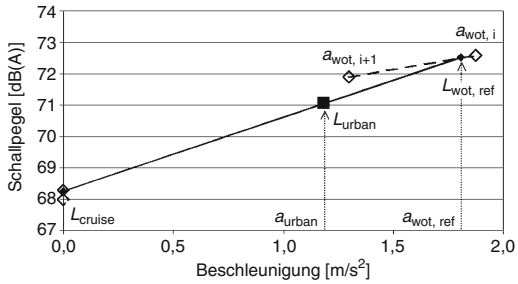



**Abb. 3.81** Neues Messverfahren ISO 362

für die dabei gemessenen Pegel führt auf die Hilfspegel $L_{wot,ref}$ und $L_{crs}$. Aus diesen wird der Typprüfpegel $L_{urban}$ interpoliert, der bei einer urbanen Beschleunigung aurban (vom PMR abhängig, und stets kleiner 2,0 m/s$^2$) vorliegt. Der Algorithmus ist aus Abb. 3.81 nachvollziehbar.

Derzeit laufen Bestrebungen, Vorbeifahrtstyp-Prüfungen auch in der Halle durchzuführen. Dabei wird das Fahrzeug auf Rollen betrieben und die Vorbeifahrt über „Durchschalten" einer Mikrofonreihe simuliert. Vorteil dieser Methode ist die wetter- und umfeldunabhängige Messung. Während des Entwicklungsprozesses lässt sich die Zielerreichbarkeit mittlerweile gut über Berechnungsmethoden prognostizieren. Im Rahmen einer COP-Prüfung (Conformity of Production) wird die Einhaltung der Grenzwerte vom Gesetzgeber auch in der laufenden Produktion gefordert.

### 3.4.8.4 Reifen/Fahrbahngeräusch

Das R/F-Geräusch tritt bereits ab ca. 30–40 km/h im öffentlichen Verkehr dominant in Erscheinung. Es spielt auch bei den gesetzlichen Grenzwerten im Rahmen der Typprüfung eine zunehmende Rolle (siehe ► Abschn. 3.4.8.3). Hier ergeben sich Zielkonflikte bereits innerhalb der Komponente Reifen, z. B. bei der gleichzeitigen Maximierung von Handlings- und Geräuscheigenschaften. Der R/F-Geräuschpegel bei beschleunigter Vorbeifahrt setzt sich aus der Summe der Teilschallquellen des Roll- und des Lastgeräusches zusammen (Abb. 3.82).

Für Reifen traten ab 2009 zur Begrenzung der Reifenrollgeräusche die Regulierungen der Typprüfung 661/2009/EG oder R117.02 in Kraft. Darin werden Grenzwerte bei 80 km/h für das Rollgeräusch in Abhängigkeit von der Reifenbreite festgelegt. Die neuen und alten Grenzwerte in Abhängigkeit der Dimension sind in Abb. 3.83 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Pegel nur durch Bezug auf die Reifenbreite nicht ausreichend charakterisiert werden können. Die Reifenindustrie hat erhebliche Verbesserungen im akustischen Verhalten der Reifen erzielt. Für die zu erwartenden Grenzwertverschärfungen in Stufe 1 und Stufe 2 nach neuer

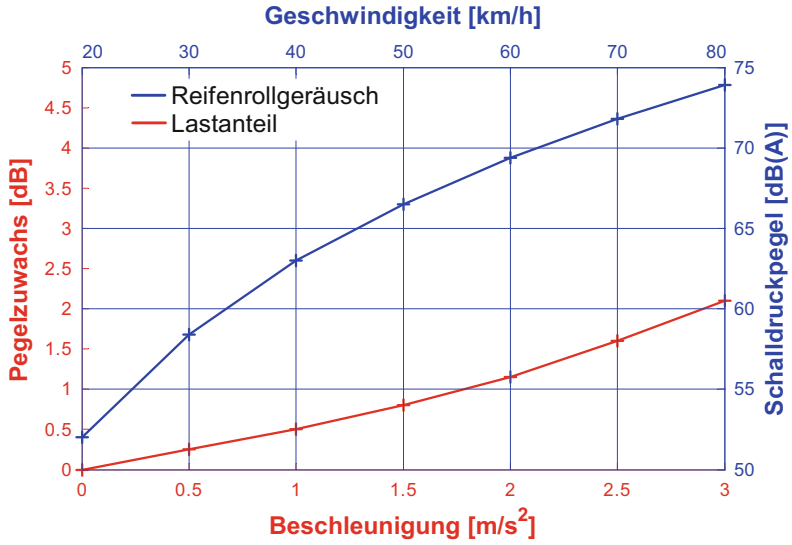



**Abb. 3.82** Roll- und Lastgeräusch eines Reifens

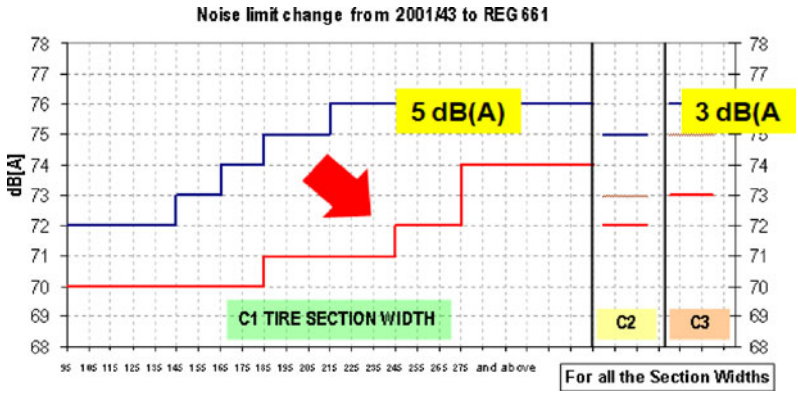



**Abb. 3.83** Grenzwerte alt/neu abhängig von der Reifenbreite

TP-Norm sind aus heutiger Sicht nochmals deutlich leisere Reifen erforderlich. Die gleichzeitige Minimierung der beiden konkurrierenden Eigenschaften Geräusch und Rollwiderstand wird für die Reifenindustrie in den nächsten Jahren eine große Herausforderung werden.

In Abb. 3.84 werden die relativen Anteile von R/F-Geräusch zum Motorgeräusch für ein typisches Fahrzeug abhängig vom gewählten Prüfverfahren aufgezeigt. In den benutzten Gängen werden die Unterschiede in den Geräuschanteilen hauptsächlich von der Motordrehzahl bei Volllast geprägt, während sich im R/F-Geräusch das unterschiedliche Drehmoment an den Rädern wenig auswirkt. Gegenüber dem Ergebnis für das gültige TP-Verfahren erscheint im künftigen Verfahren das R/F-Geräusch mit deutlich größerem Anteil.

Dies entspricht der realen Belästigungssituation in urbanen Bereichen, bedeutet aber auch, dass weitere Absenkungen der Grenzwerte mit motorischen Maßnahmen nur noch begrenzt möglich sind.

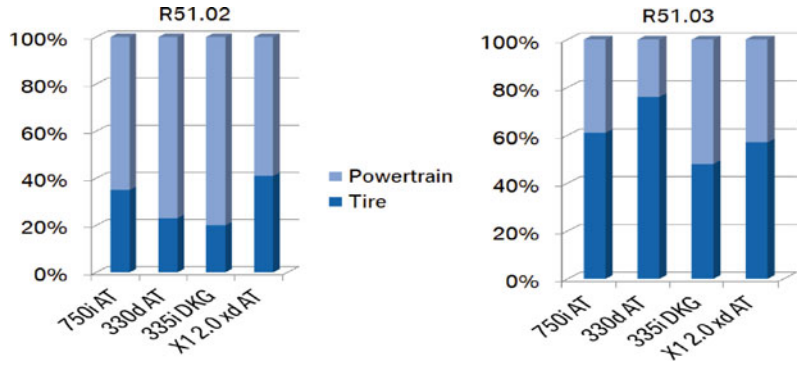



**Abb. 3.84** Anteile der Teilschallquellen Antriebsstrang (ASG) und Reifen (RFG) im Vergleich der Typprüfverfahren

## 3.4.9 Schwingungskomfort

Der Akustik- und der Schwingungskomfort eines Fahrzeugs sind zwei eng miteinander verknüpfte Disziplinen, da es sich in beiden Fällen um Körperschall-Phänomene handelt, allerdings in verschiedenen Frequenzbereichen. Zielkonflikte zwischen beiden Fachgebieten resultieren im Allgemeinen aus unterschiedlichen Anforderungen in Bezug auf das Schwingungsverhalten einerseits und die Körperschall-Isolationseigenschaften von Komponenten andererseits.

Die Empfindlichkeit eines Menschen auf Schwingungseinwirkung ist empirisch vielfältig abgesichert. In [89] wird die Empfindlichkeit auf Schwingungseinwirkung über den Sitz in Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude und Frequenz angegeben. Aus den Bewertungskurven kann gefolgert werden, dass die Empfindlichkeit des Menschen bzgl. Schwingungsanregungen zwischen 5 und 10 Hz am größten ist. Diese Empfindlichkeit resultiert aus der Tatsache, dass der Mensch im technischen Sinn ein Schwingungssystem darstellt, dessen einzelne Bestandteile, wie z. B. Kopf, Gliedmaßen, Magen, usw. im Frequenzbereich zwischen 5 und 10 Hz zu Resonanzschwingungen angeregt werden. Im Frequenzbereich darüber und darunter nimmt die Empfindlichkeit auf Schwingungsanregung kontinuierlich ab. Störungen durch Schwingungseinwirkung treten in der Regel nur zwischen ca. 1 Hz (Aufbauschwingungen) und 50 Hz (Kribbeln) auf.

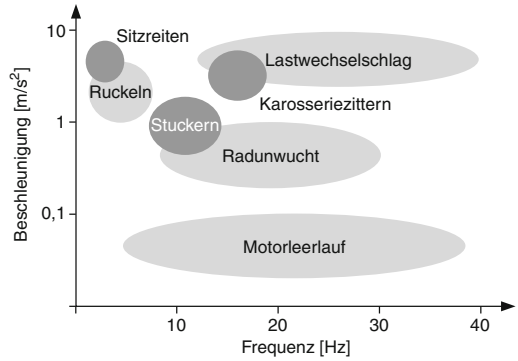



**Abb. 3.85** Schwingungsphänomene

Vor dem Hintergrund der Sensitivität des Menschen gegenüber Schwingungsanregungen müssen zu Beginn der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs Grenzwerte für Frequenzlagen und Amplituden der systembedingten Schwingungsphänomene beim späteren Serienprodukt definiert werden (Abb. 3.85). Eine Schwierigkeit bei der Definition solcher Gesamtfahrzeugziele besteht allerdings darin, das subjektive Empfinden eines Fahrzeuginsassen auf objektive Kriterien zurückzuführen. Die Objektivierung der vielfältigen Schwingungseinflüsse des Fahrzeugs auf den Menschen ist immer noch Gegenstand der Grundlagenforschung [92].

Nachstehend werden die verschiedenen Schwingungsphänomene in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Anregungsmechanismen näher betrachtet.

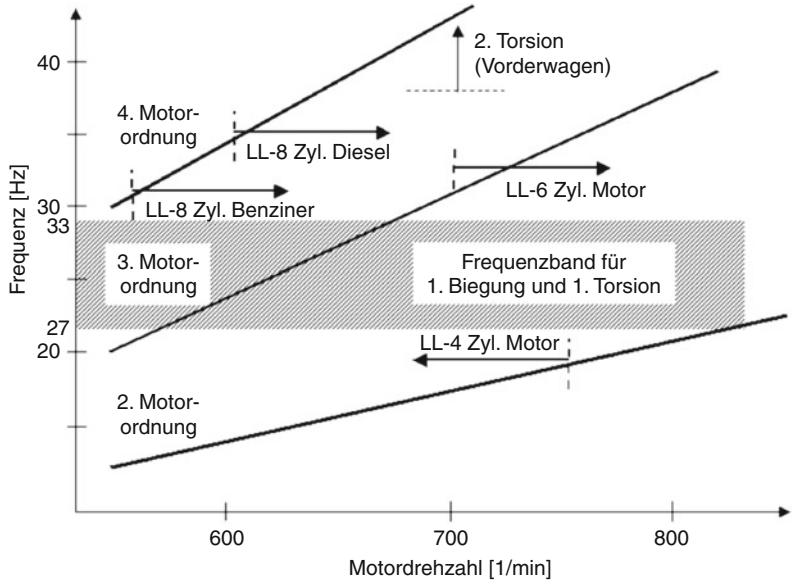



**Abb. 3.86** Schwingungstechnische Auslegung von Motorleerlauf und Gesamtfahrzeug-Eigenfrequenzen

### 3.4.9.1 Motorerregte Schwingungen

Zu den motorerregten Schwingungen gehören neben den Leerlaufschwingungen die Phänomene Lastwechselruckeln und Lastwechselschlag. Mit zunehmendem Einsatz von Motor-Start-Stopp-Systemen und hybriden Antrieben gewinnt der Schwingungskomfort während des Motor-Start- und Abstellvorgangs an Bedeutung.

Leerlaufschwingungen werden durch zyklische und auch stochastische Anregungen aus dem Motor verursacht. Dabei kommt es im ungünstigen Fall dazu, dass die dominierende Motorordnung im Bereich der globalen Gesamtfahrzeugeigenmoden liegt. Ist dies der Fall, verschlechtert sich der Schwingungskomfort im Leerlauf des Motors drastisch. In Abb. 3.86 wird dieser Zusammenhang über der Motordrehzahl beispielhaft aufgezeigt.

Dabei ist zu erkennen, dass beim 4-Zylinder-Motor der Leerlauf unterkritisch bezüglich der 2. Motorordnung abgestimmt wird, während beim 6- und 8-Zylindermotor eine überkritische Abstimmung des Leerlaufs bezogen auf die 3. bzw. 4. Ordnung gewählt wird. Damit es zu keiner Anregung der globalen Gesamtfahrzeugeigenmoden durch die Motorordnung kommt, müssen die 1. Biegung und 1. Torsion in einem Frequenzband zwischen 27 und 33 Hz liegen. Um unerwünschte Koppelschwingungen zu vermeiden, sollte zwischen den beiden ersten globalen Gesamtfahrzeugeigenmoden ca. 3 Hz Abstand bestehen. Da die Vorderwagentorsionsfrequenz über der 1. Torsion liegt, sollte sie so weit oberhalb liegen, dass sie auch oberhalb der 4. Motorordnung beim 8-Zylinder-Motor zu liegen kommt.

Zur Gruppe der motorerregten Schwingungen gehören neben den Leerlaufschwingungen auch die Lastwechselschwingungen. Bei diesem Schwingungsphänomen wird unterschieden zwischen dem Lastwechselruckeln und dem Lastwechselschlag. Beide Schwingungsphänomene werden verursacht durch eine sprungförmige Drehmomentänderung im Antriebsstrang infolge einer abrupten Fahrpedalbewegung.

Beim Lastwechselruckeln, auch bekannt unter der Bezeichnung „Bonanza-Effekt“, kann das Schwingungssystem als einfaches Feder-Masse-System beschrieben werden. Die translatorische Masse bildet die Karosserie als Starrkörper, die Feder ist bedingt durch die Elastizitäten im Antriebsstrangsystem, ausgehend von der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche bis hin zu den Lagerelementen zwischen Karosserie und Antriebsstrang. Dementsprechend

ist es verständlich, dass das Lastwechselruckeln in Abhängigkeit von der Antriebsstrangübersetzung (Gangwahl) bei unterschiedlichen Eigenfrequenzen auftreten wird. Besonders störend treten Ruckelschwingungen bei niedrigen Drehzahlen im 1. und 2. Gang – mit Frequenzen zwischen 1,5 und 4 Hz – auf. Grund für die Lästigkeit der Ruckelschwingungen sind vorrangig nicht die Amplitudenwerte des von den Insassen wahrgenommenen zeitlichen Verlaufs der Fahrzeuglängsbeschleunigung sondern vielmehr das mangelhafte Abklingverhalten.

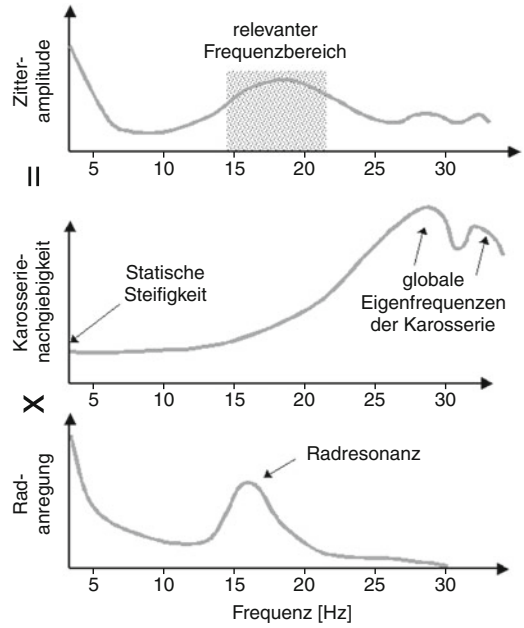
Der Lastwechselschlag tritt im Gegensatz zum Lastwechselruckeln nicht im tieffrequenten, sondern im höherfrequenten Frequenzbereich auf. Dabei kommt es durch die plötzliche Drehmomentänderung, hervorgerufen durch die Änderung der Fahrpedalstellung, neben einem deutlich wahrnehmbaren Ruck in der translatorischen Bewegung des Fahrzeugs zu einem dumpfen, einmaligen Schlaggeräusch, welches aus dem Anschlag der Lagerelemente des Hinterachsgetriebes resultiert. Daraus ergibt sich, dass bei diesem Schwingungsphänomen die Schwingungsamplitude von primärer Bedeutung ist.

Lastwechselruckeln und Lastwechselschlag lassen sich durch Eingriffe in die Motorsteuerung (Zusatzdämpfung durch Zündwinkelverstellung, Begrenzung des Momentenanstiegs) sowie durch gezielte Gestaltung der Steifigkeit des Antriebsstrangs beeinflussen. Die Ausführung der Motorlagerung hat ebenfalls Auswirkungen auf das Lastwechselruckeln, der Einbau eines ZMS bzw. dessen Kennlinie hat spürbare Auswirkungen auf den Lastwechselschlag (► Abschn. 5.4).

### 3.4.9.2 Fahrbahnerregte Schwingungen

Hier handelt es sich um Schwingungen im Fahrzeug, welche über die Fahrbahn angeregt werden und damit geschwindigkeitsabhängig sind. Zu dieser Gruppe zählen die Phänomene Karosseriezittern, Motorstuckern und Sitzreiten.

Karosseriezittern tritt vor allem bei Fahrzeugen mit großer Dach- oder Hecköffnung sowie bei offenen Fahrzeugen (Cabriolets, Roadster) auf. Dabei kommt es zur Überlagerung der Anregung aus der Radresonanz mit den Resonanzen aus den globalen Torsionseigenmoden des Fahrzeugs. Die Entstehung dieses Schwingungsphänomens ist in ◘ Abb. 3.87 schematisch dargestellt.




◘ **Abb. 3.87** Wirkmechanismus Karosseriezittern

Durch die Kopplung der beiden Komponentenresonanzen tritt eine Überhöhung des Amplitudenverlaufs im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 20 Hz auf. Für den Fahrzeuginsassen macht sich dieses Phänomen als Nachschwingen des Fahrzeugs beim Überfahren von Fahrbahnunebenheiten bemerkbar und führt zu einem unsoliden Komforteindruck. Neue Reifentechnologien (Runflatreifen) sowie straff abgestimmte Fahrwerke verstärken das Problem. Fahrzeuge mit sportlich straff abgestimmter Vertikaldynamik des Fahrwerks und hohen Radresonanzfrequenzen benötigen dementsprechend steifere Fahrzeugstrukturen mit einer höherliegenden ersten globalen Torsionseigenmode, um das Karosseriezittern ausreichend zu begrenzen.

Beim Motorstuckern kommt es durch gleichzeitige Anregung der beiden Vorderräder zu einer Hubbewegung des Gesamtfahrzeugs. Erfolgt diese Anregung im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 10 Hz, wird der Motor-Getriebe-Verband zu Schwingungen insbesondere seiner Hub- und Wankform angeregt. Dieses Schwingungsphäno-

men wird sehr störend als Unruhe im Vorderwagen wahrgenommen. Um das Motorstuckern zu reduzieren, ist das Lagerungskonzept von Motor und Getriebe von entscheidender Bedeutung. Es muss gewährleisten, dass die Eigenschwingformen des Motor-Getriebe-Verbundes in einen Frequenzbereich geringer Anregung liegen und ausreichend gedämpft werden. Bei einer steifen Anbindung des Motor-Getriebe-Verbands an die Karosserie wird jedoch die Körperschallanregung aus dem Motor vermehrt in die Karosserie eingeleitet, was neben einer Verschlechterung des Schwingungskomforts im Leerlauf auch zu einer Verschlechterung der akustischen Übertragung führt.

Diese gegensätzlichen Anforderungen lassen sich mit Hydrolagern auflösen, welche hochfrequent hohe Isolation und in der Stuckerfrequenz eine hohe Dämpfung aufweisen. Schaltbare Hydrolager erlauben darüber hinaus das Einstellen einer geringen Lagersteifigkeit im Leerlauf, für den Fall, wenn das Fahrzeug steht. Serienmäßig eingesetzt werden diese Schwingungsisolationselemente vor allem bei Diesel-Fahrzeugen mit entsprechend hoher Drehungleichförmigkeit des Antriebs im Leerlaufbetrieb. Zur Reduzierung der Vibrationen in die Fahrgastzelle werden im leerlaufnahen Bereich die Lagerelemente auf „weich“ geschaltet. Im Fahrbetrieb findet dann das Umschalten in die Stellung „steif“ statt, wodurch das Stuckerverhalten positiv beeinflusst wird.

Beim Sitzreiten kommt es zur Kopplung der Aufbauschwingungen mit der Sitz-Mensch-Eigenfrequenz zwischen 4 und 8 Hz, was zu starkem Unwohlsein des Fahrzeuginsassen führen kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Aufbaufederung unterhalb von 3Hz anzusiedeln.

Senkt man die Aufbaueigenfrequenz zu weit ab, werden die Federwege zu groß. Wichtige Charakteristika für die Aufbaueigenfrequenz sind neben der Aufbaumasse die Steifigkeit der Aufbaufeder und die Kennung der Aufbaudämpfer. Steifigkeit und Dämpfung sind ebenfalls wichtige Einflussgrößen für die Abstimmung der Sitzeigenfrequenz.

#### 3.4.9.3 Raderregte Schwingungen

Bei den raderregten Schwingungen handelt es sich um Schwingungsphänomene die infolge von Radungleichförmigkeiten entstehen. Diese regen u. a. die Karosserie zu geschwindigkeitsabhängigen Zitterschwingungen an. Die Radungleichförmigkeiten können zum einen aus einer Unrundheit oder Desaxierung des Rades resultieren, zum anderen können ungleiche Massen- oder Steifigkeitsverteilung im Reifen selbst eine Anregung des Fahrzeugs verursachen. Für einen guten Schwingungskomfort bei höheren Geschwindigkeiten hat sich die strukturdynamische Auslegung der Karosserie orientiert an der 1. Radordnung bewährt [81]. Diese ist direkt zur Fahrzeuggeschwindigkeit proportional. In Abb. 3.88 ist zu erkennen, dass die Leerlaufdrehzahl die obere Grenze des Frequenzbandes für die 1. Biegung und 1. Torsion darstellt, während die untere Grenze durch die 1. Radordnung festgelegt wird. Je kleiner die Eigenfrequenzen der beiden Eigenformen des Gesamtfahrzeugs sind, desto eher werden sie durch die 1. Radordnung angeregt und desto größer ist die Gefahr, dass es bei höheren Geschwindigkeiten zu einer Anregung der globalen Gesamtfahrzeugeigenmoden kommt.

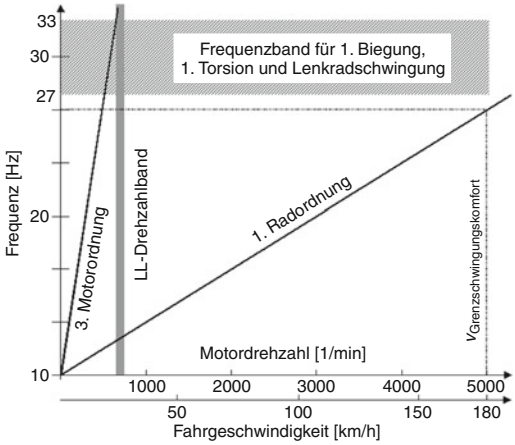



**Abb. 3.88** Karosserieauslegung nach den globalen Eigenformen

## 3.4.10 Akustik und Schwingungen beim Elektrischen Fahren

Im Zuge der Hybridisierung und Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe ergeben sich über die in den einzelnen Kapiteln beschriebenen Effekte und Maßnahmen hinausgehend neue Phänomene und Auf-

gaben. Neue Komponenten verändern das Fahrzeugverhalten. Mit dem elektrischen Antriebsmotor und der Leistungselektronik kommen neue Körper- und Luftschallquellen im Fahrzeug hinzu. Auch die Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen mit Range-Extender sind deutlich komplexer als die des Verbrennungsmotors. Bei Fahrzeugen die im niedrigen Geschwindigkeitsbereich rein-elektrisch fahren ergeben sich neue Herausforderungen bezüglich der Wahrnehmbarkeit der Fahrzeuge für andere Verkehrsteilnehmer, allen voran Fußgänger.

Bei der Entwicklung eines elektrischen Antriebsstrangs ist es erforderlich, die magnetischen Kräfte im Luftspalt und die Strukturdynamik des Statorgehäuses in Kombination mit dem Getriebegehäuse und Rotor mittels Simulation auszulegen. Relevante Größen sind dabei zum Beispiel die Polpaarzahl, die Zahngestaltung, das Wicklungsschema und der Luftspalt. Für die Leistungselektronik spielen vor allem die Ansteuerfrequenz, die Abstrahlung des Gehäuses, die Art der Lagerung und die Position im Fahrzeug eine Rolle.

Die Kombination eines elektrischen Antriebsmotors mit einem Verbrennungsmotor, im direkten Antrieb oder als Range Extender, führt zu deutlich mehr verschiedenen Betriebszuständen als bei Fahrzeugen mit konventionellen Antriebskonzepten. Nicht nur die einzelnen Betriebszustände selber, sondern auch die Übergänge zwischen den verschiedenen Betriebszuständen müssen bei der Entwicklung eines stimmigen Akustikkonzepts berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist auch die Betriebsstrategie von großer Bedeutung. Aus der Zunahme der möglichen Freiheitsgrade ergeben sich einerseits Chancen, wie kritische Betriebspunkte geschickt vermieden werden können. Andererseits ist es wesentlich, eine für den Kunden nachvollziehbare und reproduzierbare Betriebsstrategie zu entwickeln.

Aufgrund der relativ geringen Geräuschabstrahlung des E-Antriebs kommt es im Geschwindigkeitsbereich bis ca. 30 km/h aufgrund des dort ebenfalls schwach ausgeprägten Reifen-Fahrbahngeräusches zu einer deutlich geringeren Wahrnehmbarkeit der sogenannten „Quiet Cars“ [101]. Zur Kompensation des erhöhten Fußgängersicherheitsrisikos werden daher in verschiedenen Ländern gesetzliche Regelungen zu Minimalanforderungen an den Geräuschpegel erlassen, deren Erfüllung in der Regel durch einen im Vorderwagen verbauten Geräuschgenerator erreicht wird. Neben den bei der geometrischen Integration von Komponenten im Motorraum üblichen Aspekten wie Betriebsfestigkeit, Verschmutzung, Witterungseinflüsse, Crash-Verhalten etc. muss insbesondere die Schallführung nach außen optimiert werden. Beim Sounddesign stehen psychoakustische Kriterien wie Maskierung durch das Hintergrundgeräusch, Lokalisierbarkeit und Identifizierbarkeit im Vordergrund. Letzterer Aspekt betrifft die Mustererkennung in Bezug auf den Soundcharakter und umfasst das „Erkennen als Fahrzeug“ und als spezielle Anforderung die differenzierte Wahrnehmung der Geräuschquelle als Elektrofahrzeug. Neben der Außenwirkung sind aufgrund der Transmission des Lautsprechersignals in den Fahrzeuginnenraum ferner auch der Komfort bzw. die Vermeidung von Lästigkeit zu berücksichtigen.

### 3.4.11 Prozess Akustikentwicklung

Zu Beginn einer Entwicklung ist es notwendig, die Positionierung des Fahrzeugs im Markt und damit auch die akustische und schwingungstechnische Zielpositionierung exakt festzulegen. Hier sind Vorgaben für alle kundenwertigen akustischen und schwingungstechnischen Phänomene zu machen. Aus diesen Vorgaben muss ein schlüssiges akustisches und schwingungstechnisches Konzept entwickelt werden. Dieses ist wiederum die Basis für die Ableitung von Subzielen für die wesentlichen eigenschaftsprägenden Subsysteme und Komponenten. Der Zielkatalog für akustische und schwingungstechnische Eigenschaften ist damit grundsätzlich hierarchisch strukturiert. Ausgehend von den Gesamtfahrzeugzielwerten der Ebene 0 werden zuerst die akustischen Kenndaten für die drei wesentlichen Subsysteme der ersten Ebene (Karosserie, Antrieb und Antriebsstrang, Fahrwerk) festgelegt. In den nachfolgenden Ebenen 2, 3, … werden dann – bei ständig zunehmender Anzahl – die Eigenschaften von deren Subkomponenten mit fortschreitender Detaillierung beschrieben [93].

Die Erarbeitung eines akustischen Konzeptes ist gleichbedeutend mit der Ableitung von Komponenteneigenschaften aus Gesamtfahrzeugzielen. Trotz großer Fortschritte, Eigenschaftsaussagen auf der Basis von virtuellen Produktdaten zu machen, ist gerade bei Akustik und Schwingungen auch heute noch der Einsatz von Prototypen zur Konzeptabsicherung und Detailoptimierung unverzichtbar. Wichtig ist dabei, dass nur Prototypen oder Teilsysteme mit ausreichendem Reifegrad die erforderliche Aussagefähigkeit besitzen. Zielführend ist in der Praxis meist eine hybride Vorgehensweise aus Berechnung und Versuch.

Neu als Aufgabe ist auch die Auflösung des Zielkonfliktes zwischen der Wirksamkeit von Akustik- und Schwingungsmaßnahmen und Leichtbau. Hier sind neue Ansätze zu wählen, um Karosserien aus Leichtmetall oder Faserverbundwerkstoffen bzgl. Komfort und Wertigkeit zu ertüchtigen.

Nicht unerwähnt bleiben darf jedoch, dass das Spezifizieren der Akustikzielwerte wegen der Vielzahl von Zielkonflikten zwischen den verschiedenen Eigenschaften nicht losgelöst von konkurrierenden Anforderungen erfolgen kann. Wichtig ist in diesem Zusammenhang ein ausgewogenes Optimum über alle Fahrzeug-Eigenschaften hinweg anzustreben, denn im Endeffekt wird nur ein in allen Disziplinen stimmiges Fahrzeug hohe Kundenakzeptanz finden.

## Literatur

**Literatur zu Abschn. 3.1**

1. Braess, H.-H.: Die Karosserie – Typisches Beispiel für Zielkonflikte und Zielkonfliktlösungen für Automobile. Entwicklungen im Karosseriebau. VDI-Bericht, Bd. 968., Düsseldorf (1992)
2. Braess, H.-H.: nicht veröffentliche Unterlage
3. Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 27. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2012)
4. Seiffert, U.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Heidelberg (2001)
5. Braess, H.-H., Stricker, R.: Eigenlenkverhalten, Kurvenwiderstand, Kraftstoffverbrauch – Ein weiterer Aspekt des Fahrzeugkonzeptes und der Fahrwerksabstimmung. VDI-Ber. „50 Jahre Frontantrieb im Serienautomobilbau", Bd. 418, S. 275–280 (1981)
6. ISO 8855 Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary, Dezember 1991
7. DIN 70000 Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe, Januar 1994

**Literatur zu Abschn. 3.2**

8. Hucho, W.H.: Aerodynamik des Automobils. Vieweg, Wiesbaden (2005)
9. Wäschle, A.: Numerische und experimentelle Untersuchung des Einflusses von drehenden Rädern auf die Fahrzeugaerodynamik. Dissertation, TU Stuttgart (2006)
10. Huber, L.: Die Fahrtrichtungsstabilität des schnellfahrenden Kraftwagens. Dissertation, TH Stuttgart (1940)
11. Hucho, W.H.: Design und Aerodynamik – Wechselspiel zwischen Kunst und Physik. In: Kieselbach, R.J.F. (Hrsg.) The drive to design – Geschichte, Ausbildung und Perspektiven im Autodesign. avedion, Stuttgart (1998)
12. Wagner, A.: Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind. Dissertation, TU Stuttgart (2003)
13. Riederer, S.: Strömungsphänomene im Bereich der vorderen Radhäuser von Personenfahrzeugen. Dissertation, TU München (2004)
14. Zivkov, V.: Experimentelle und numerische Untersuchungen der aerodynamischen Kraftfahrzeugeigenverschmutzung. Dissertation, TU Karlsruhe (2004)
15. Kuthada, T.: Die Optimierung von Pkw-Kühlluftführungssystemen unter dem Einfluss moderner Bodensimulationstechniken. Dissertation, TU Stuttgart (2006)
16. Hucho, W.-H.: Grenzwert-Strategie. Halbierung des Cw-Wertes scheint möglich. ATZ **111**, 16–23 (2009)
17. Fischer, A.: Integration von Aerodynamik-Simulation in die Konzeptphase des Entwicklungsprozesses. 4. Braunschweiger Symp., März 2009. In: GZVB Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig (Hrsg.) Faszination Karosserie. S. 51–64. Braunschweig (2009)
18. Alexander, H., Wiedemann, J., et al.: Optimierung der Laufbandtechnologie im 1:1-Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal. ATZ **01**, 80–85 (2012)
19. Schrefl, M.: Instationäre Aerodynamik von Kraftfahrzeugen: Aerodynamik bei Überholvorgängen und böigem Seitenwind. Dissertation, TU Darmstadt (2008)
20. Schröck, D.: Eine Methode zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs unter böigem Seitenwind. Dissertation, Universität Stuttgart (2011)
21. Sterken, L.: Analysis of the Unsteady Flow Field of a Passenger Vehicle. Dissertation, Chalmers Universität Göteborg (2015)

**Literatur zu Abschn. 3.3**

22. Lutz, R., Kern, J.: Ein Wärmeübertrager für gekühlte Abgasrückführung. 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 1997
23. Eichelseder, W., Marzy, R., Hager, J., Raup, M.: Optimierung des Wärmemanagements von Kraftfahrzeugen mithilfe von Simulationswerkzeugen, Tagung

Wärmemanagement. Haus der Technik Essen, September 1998
24. Kern, J.: Neue Konstruktion gelöteter Ganzaluminiumkühler für Kfz. ATZ **100**(9), (1998)
25. Löhle, M., Kampf, H., Kern, J.: Integrierte Systeme und Produkte zur Motorkühlung und Innenraumklimatisierung. ATZ (Sonderausgabe Systempartner) (1998)
26. Martin, M.: Elektronisch geregelte elektromagnetische Visco-Lüfterkupplungen für Nutzfahrzeuge. ATZ **95** (1993)
27. Ambros, P.: Beitrag der Motorkühlung zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Tagung Wärmemanagement. Haus der Technik Essen, September 1998
28. Kampf, H.: Konditionssicherheit des Fahrers – die Klimaanlage als Instrument der aktiven Sicherheit, Vortrag. VDA Technischer Kongress, Stuttgart, 2002
29. Richtlinie EWG 79/317 oder US Sicherheitsnorm FMVSS 103
30. Flik, M., Löhle, M., Wilken, H., Humburg, M., Vilser, L.: Beheizung von Fahrzeugen mit verbrauchsoptimierten Motoren, Vortrag. Wiener Motorenkolloquium, 1996
31. Kampf, H., Kunberger, O., Weinbrenner, M.: Klimatisierung von Fahrzeugen mit kraftstoffsparenden Motoren. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung II. Expert Verlag, Renningen (2002)
32. Haubner, F., Koch, F.: Zuheizerkonzepte zur Verbesserung der Heizleistung in verbrauchsoptimierten Fahrzeugen. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung II. Expert Verlag, Renningen (2002)
33. Nothen, M.: Brennerheizungen als Zu- und Standheizungen im Pkw. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung. Expert Verlag, Renningen (2000)
34. Beetz, K.: Elektrische Zuheizsysteme – Innovative Lösungen. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung II. Expert Verlag, Renningen (2002)
35. Condensers of automotive air conditioning systems with a 3-D cell model. VTMS Tagung, Indianapolis, 1997
36. Heckenberger, T.: Simulationsverfahren im Thermomanagement von Fahrzeugen. Automotive Engineering Partners **6** (2003)
37. Reichelt, J.: Leistungsgeregelte Verdichter zur Pkw-Klimatisierung. Karlsruhe (1987)
38. Cullen, P.: Variable stroke compressor developments for improved air conditioning performance, fuel economy and drive ability. VTMS4, London, 1999
39. Brotz, F., Mersch, T., Morgenstern, S., Taxis-Reischl, B.: Progress in the optimized application of simulation tools in vehicle air conditioning. VTMS5, Nashville, 2001
40. Austin, K., Botte, V.: An integrated air conditioning (AC) circuit and cooling circuit simulation model. VTMS5, Nashville, 2001
41. Ellinger, M., Schröder, K., Wagner, S.: Simulation von Klimaanlage und Fahrgastzelle. Automobiltechnische Zeitschrift **2** (2002)
42. Hirate, T., Fujiwara, K., Györög, T.: Verbesserung von Fahrzeug-Klimaanlagen. KI Luft- und Kältetechnik **12** (1999)
43. Feuerecker, G., Kampf, H., Krauß, H.-J., Parsch, W., Rinne, F., Walter, C.: $CO_2$ als alternatives Kältemittel. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung II. Expert Verlag, Renningen (2002)
44. Graz, M., Kuhn, P., Obrist, F., Parsch, W., Rinne, F.: Kohlendioxid-R744 als Kältemittel in Fahrzeug-Klimaanlagen. Automobiltechnische Zeitschrift **12** (2001)
45. Cucuz, S., Fröhling, J., Heyl, P., Wieschollek, F.: Kühlen und Heizen mit natürlichem Kältemittel $CO_2$, System Partners ATZ/MTZ, Mai 2002
46. Adiprasito, B.: COP comparison R134a vs. $CO_2$. SAE Alternate Refrigerant Symposium, Phoenix, 2000
47. Fröhling, J., Heyl, P.: Heizen und Kühlen mit $CO_2$-Pkw-Klimaanlagen. In: Schlenz, D. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung II. Expert Verlag, Renningen (2002)
48. Dohmen, J., et al.: Virtuelle Kühlsystementwicklung. MTZ **12**, 966–973 (2006)
49. Edwards, S., et al.: $CO_2$-Minderung bei einem Turbo-DI-Ottomotor durch optimiertes Thermomanagement. MTZ **2**(01) (2008)
50. Kramer, W.: Indirekte Ladeluftkühlung bei Diesel- und Ottomotoren. MTZ **02** (2006)
51. Borrmann, D. et al.: Zylinderkopf mit integriertem Abgaskrümmer als Beitrag zu ottomotorischen Downsizing Konzepten. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008
52. Dietz, S., Korfmann, S., Kammler, T.: Requirements on vehicle cooling systems due to alternative drive train concepts and $CO_2$ reduction measures. Stuttgarter Symposium, 2009
53. Szengel, R., et al.: Der TSI Motor mit 90 kW. MTZ **07** (2007)
54. Hummel, K., et al.: Ansaugmodul mit indirektem und integriertem Ladeluftkühler. MTZ **11** (2010)
55. Metzner, F. et al.: Innovatives Thermomanagement am Beispiel des neuen Volkswagen Touareg. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2010
56. Flik, M., Edwards, S., Pantow, E.: Emissionssenkung bei Nutzfahrzeugen durch Thermomanagement. Wiener Motoren Symposium, 2009
57. Kemle, A., Manski, R., Weinbrenner, M.: Klimaanlagen mit erhöhter Energieeffizienz. Automobiltechn. Zeitschrift **9** (2009)
58. Bohr, B.: Antriebsstrangvielfalt und Elektrifizierung: Herausforderungen und Chancen für die Automobilindustrie. Vortrag, Wiener Motorensymposium, 2010
59. Molt, K.: PTC Heizung. ATZ **08** (1998)
60. Bloch, A.: Eiszapfen. Auto Motor Sport **1**, 142 (2011)
61. Liebl, J.: Fahrzeugenergiemanagement – der Schlüssel zur $CO_2$-Reduzierung. VDA Technischer Kongress, 2007
62. Manski, R., Weinbrenner, M., Kerler, B., Heinle, D.: Speicher-Klimatisierung für Hybridfahrzeuge mit Start-Stopp-Funktion. ATZ **12** (2006)
63. Neumeister, D., Wiebelt, A., Heckenberger, T.: Systemeinbindung einer Li-Ion-Batterie in Hybrid- und Elektroautos. ATZ **04** (2010)

64. Wiebelt, A., Isermeyer, T., Siebrecht, T., Heckenberger, T.: Thermomanagement von Li-Ion-Batterien. ATZ **08** (2009)
65. Brotz, F., Isermeyer, T., Pfender, C., Heckenberger, T.: Kühlung von Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge. ATZ **12** (2007)
66. Herrmann, H.-G., Neumeister, D., Wiebelt, A.: Li-Ion Batterien richtig gekühlt, Automobilindustrie Sonderheft Insight (Dezember 2010)
67. Schmiederer, K.: Thermomanagement als Zukunftsaufgabe im Automobilbau. ATZextra **04**, 66–70 (2011)
68. Stehlig, J., Dingelstadt, R., Ehrmanntraut, J., Müller, R., Taylor, J.: Air intake modules with integrated cascaded charge air coolers. 21. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik, 2012
69. Zuck, B.: Downsizing: Auswirkungen auf das Wärmemanagement. In: Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VIII. Haus der Technik, Berlin (2012)
70. Stripf, M., Wehowski, M., Schmid, C., Wiebelt, A.: Thermomanagement von Hochleistungs-Li-Ionen-Batterien. ATZ **01** (2012)
71. Hofmann H., Walter, C., Wawzyniak, M.: Kühlmittelgekühlter Kondensator – Auswirkungen auf die Klimaanlage. ATZ **114**(11) (2012)
72. Pantow, E., Kleber, A, Lutz, R.: Vorteile indirekter Kühlsysteme für schwere Nutzfahrzeuge. ATZ **116**(09) (2014)

**Literatur zu Abschn. 3.4**

73. Adam, T.: Untersuchung von Steifigkeitseinflüssen auf das Geräuschübertragungsverhalten von Pkw-Karosserien. Dissertation, Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen (2000)
74. Zwicker, E., Fastl, H.: Psychoacoustics, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1999)
75. FVV Forschungsvorhaben „Störgeräusch", Beurteilung und Katalogisierung von Störgeräuschen bei Verbrennungsmotoren, Heft 746. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main (2001)
76. FVV Forschungsvorhaben „Motorgeräuschgestaltung II" Gestaltung des Geräusches von Verbrennungsmotoren zur Beeinflussung des Höreindrucks unter Berücksichtigung der Luft- und Körperschallübertragung, Heft 746. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt am Main (2002)
77. Möser, M., Kropp, W.: Körperschall. Springer, Berlin (2010)
78. Laschet, A.: Systemanalyse in der Kfz-Antr.-Techn. II. Expert-Verlag, Renningen (2003)
79. Tonhauser, J.: Außengeräuschemission von Pkw – bisherige Fortschritte und zukünftige Reduzierungspotentiale. VDA/WdK Informationsveranstaltung Straßenverkehrsgeräusche, Aschheim, 1999
80. Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 4. Aufl. Springer, Berlin (2004)
81. Freymann, R.: Strukturdynamische Auslegung von Fahrzeug-Karosserien. VDI-Berichte, Bd. 968, S. 143–158 (1992)
82. Holzweißig, F.: Maschinendynamik – Schwingungslehre, 5. Aufl. Springer, Berlin (2004)
83. Sarradj, E.: Energy-based vibroacoustics: SEA and beyond. CFA/DAGA, Strasbourg, 2004
84. Hucho, W.H.: Aerodynamik der stumpfen Körper, 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden (2011)
85. Zeller, P.: Psychoacoustic-based sound design in vehicle engineering. JSAE Congress, Yokohama, Mai 2005
86. Henn, H., Sinambari, G.R., Fallen, M.: Ingenieurakustik, 3. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2001)
87. Martens, T.: Matrix inversion technology for vibro-acoustic modeling application. ISMA **23** (1998)
88. ATZ, MTZ: Pkw Neuerscheinungen
89. VDI-Richtlinien 2057: Einwirkungen mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1 und 2. Beuth, Berlin (2002)
90. Birch, S.: Good vibrations. AEI, 46–50 (September 2006)
91. Sell, H.: Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von elastischen Bauteilen im Einbauzustand. Dissertation, Arbeitsbereich Mechanik I der TU Hamburg-Harburg (2004)
92. Lennert, S.: Zur Objektivierung von Schwingungskomfort in Personenkraftwagen – Untersuchung der Wahrnehmungsdimensionen. Dissertation, Lehrstuhl für Maschinendynamik der TU Darmstadt (2008)
93. Geib, W.: Akustik und Schwingungstechnik im Spannungsfeld zwischen Komponenten- und Gesamtfahrzeugeigenschaften. VDI-Berichte, Bd. 791, S. 1–37 (1990)
94. Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Vieweg+Teubner – Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden (2012)
95. Moosmayr, T.: Objektivierung von transienten Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum. Dissertation, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der TU München (2009)
96. Kreppold, E.: A Modern development process to bring silence into interior components. SAE World Congress & Exhibition, 2007
97. Keller, W., Wastl, W.: Neue Methoden und Konzepte zur Drehungleichförmigkeits-Reduzierung. VDI-Tagung Getriebe in Fahrzeugen, 2008
98. Kroll, J., Kooy, A., Seebacher, R.: Land in Sicht? – Torsionsschwingungsdämpfung für zukünftige Motoren. 9. Schaeffler Kolloquium, S. 28–39, 2010
99. Zink, M., Hausner, M.: Das Fliehkraftpendel – Anwendung, Leistung und Grenzen drehzahladaptiver Tilger. ATZ **07-08**, 546–553 (2009)
100. Sellerbeck, P.: Enhancing noise and vibration comfort of hybrid/electric vehicles using transfer path models. Aachener Akustik Kolloquium, 2010; Fidlin, A., Seebacher, R.: Simulationstechnik am Beispiel des ZMS – Die Stecknadel im Heuhaufen finden. LUK-Kolloquium, 2006
101. Zeitler, A., Kerber, S., Kaltenhauser, A., Evert, F.: Psychoacoustic requirements for warning sounds of quiet cars. SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst. **5**(2), 572–578 (2012)

102. BMW Group: Efficient Dynamics, Medieninformation. Innovationstag, 2012

# Formen und neue Konzepte

*Dipl.-Ing. Dipl. Wirtsch. Ing. August Achleitner, Dipl.-Ing. (FH) Peter Antony, Dr. Edgar Berger, Dipl.-Ing. Christiaan Burgers, Dr.-Ing. Gernot Döllner, Norbert Ebner, Dipl.-Ing. (FH), Hans Dieter Futschik, Dipl.-Des., Manfred Gruber, Dipl.-Ing. (TU), Dr.-Ing. Gerrit Kiesgen, Dr. Robert B. Inderka, Dr.-Ing. Sicong von Malottki, Prof. Dr. Christian H. Mohrdieck, Prof. Dipl.-Ing. Karl E. Noreikat, Manuel Urstöger, Dipl.-Ing., Christoph Schildhauer, M. Sc., Herbert Schulze, Markus Wagner, Klaus Wolff und Dr. Martin Wöhr*

4.1 **Design** – **132**

4.2 **Fahrzeugkonzept und Package** – **140**

4.3 **Neuartige Antriebe** – **173**

**Literatur** – **246**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_4

## 4.1 Design



Im Automobilbereich hat das Design in den letzten Jahrzenten sehr an Bedeutung gewonnen. Einer Studie zufolge liegen heute die Kaufkriterien „Design", „Anschaffungspreis" und „Qualität" weit an der Spitze [1].

Das Design nimmt eine Schlüsselfunktion in der Wahrnehmung des Fahrzeuges ein. Es stellt im Idealfall eine Verbindung zwischen dem Fahrzeug und Kunden über positive Emotionen und Empathie her.

Auch bei der Markendifferenzierung spielt die Formgebung eine wesentliche Rolle. Die technologische Differenzierung hat sich in den letzten 20 Jahren verringert. Die Gründe für die immer geringer werdenden technischen Unterschiede sind:

- Ein hohes Niveau des Grundkonzepts Auto, welches weltweit viele Fahrzeughersteller erreicht haben.
- Die Verlagerung vieler Schlüsseltechnologien vom Fahrzeughersteller zu Entwicklungslieferanten.

Umso mehr ist das Design ein Wahrnehmungsfeld, welches von den umworbenen Kunden einem konkreten Hersteller zugeordnet werden kann.

Durch das Design wird die Wahrnehmung der Marke und des Produktes geprägt.

Die Anforderungen an die Gestaltung des Fahrzeuges umfassen:

- die Visualisierung von Wert, Einsatzzweck und Dynamik,
- die Realisierung von Erkennbarkeit, Eindeutigkeit und positive Ausstrahlung,
- die Berücksichtigung aller technischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Aspekte.

In diesem Kapitel werden wichtige Aspekte des Designs beleuchtet. Angefangen beim Design Prozess, der die interdisziplinäre Arbeitsmethode beschreibt, über „Advanced Design", bei dem die Experten die Design-Richtung und Ideen für die Zukunft entwickeln, bis hin zum Beitrag des Designs zum Markenimage.

### 4.1.1 Der Design Prozess

Die Entwicklung eines Fahrzeuges ist ein hoch interdisziplinärer Prozess, bei dem unterschiedliche Bereiche wie Marketing, Vertrieb, Design, technische Entwicklung und Produktion zusammen arbeiten. Die Prozesse aller Bereiche sind auf einander abgestimmt. Der Designprozess eines Fahrzeuges beginnt mit der gemeinsamen Formulierung der Produktziele und Spezifikationen und gliedert sich in vier Phasen: Kreative Konzeptphase/3D Entwicklung/Physische Design Modelle/Color und Trim.

#### 4.1.1.1 Kreative Konzeptphase

Nach der gemeinsamen Festlegung der Produktziele und Spezifikationen (car briefing), die z. B. Fahrzeugsegment, Dimensionen, Fahrzeugkonzept, Designcharakter, Kundenzielgruppe, Zielmärkte, Wettbewerber, technische Highlights, etc. betreffen, startet die kreative Designphase.

Der Designcharakter kann beispielsweise wie folgt beschrieben werden: „maskulin mit stark sportlichen Formen" oder „weiblich mit sinnlichen und grazilen Formen". Andere typische beschreibende Adjektive sind seriös, technisch, kalt, präzise, freundlich, frisch, sympathisch etc.

Der BMW Mini und Fiat 500 gelten als gelungene Designbeispiele für „freundlich, sympathisch, frisch". Wohingegen die in ◘ Abb. 4.1 dargestellten Fahrzeuge sehr gut die Beschreibungen „maskulin" (Maserati) und „technisch, seriös, präzise" (Audi A6) verkörpern.

Die Wahl solcher beschreibenden Eigenschaften bzw. Merkmale orientieren sich üblicherweise am Firmenimage bzw. der Firmen-DNA.

Die Gestaltungsparameter sind vielfältig, zum Beispiel können die gewünschten Attribute mit entsprechenden Proportionen wie Höhe der Gürtellinie (siehe ◘ Abb. 4.2a) erreicht werden. Einige Proportionen sind stark abhängig vom Fahrzeugkonzept, beispielsweise ist die Länge einer Motorhaube davon abhängig, ob eine Front-Quer-Antriebsarchitektur oder eine Front-Längs-Architektur mit Hinterradantrieb verwendet wird. Weitere Gestaltungsparameter sind in ◘ Abb. 4.2 rechts dargestellt [2].




**Abb. 4.1** Maserati (**a**) [4] und Audi A6 (**b**) [5]

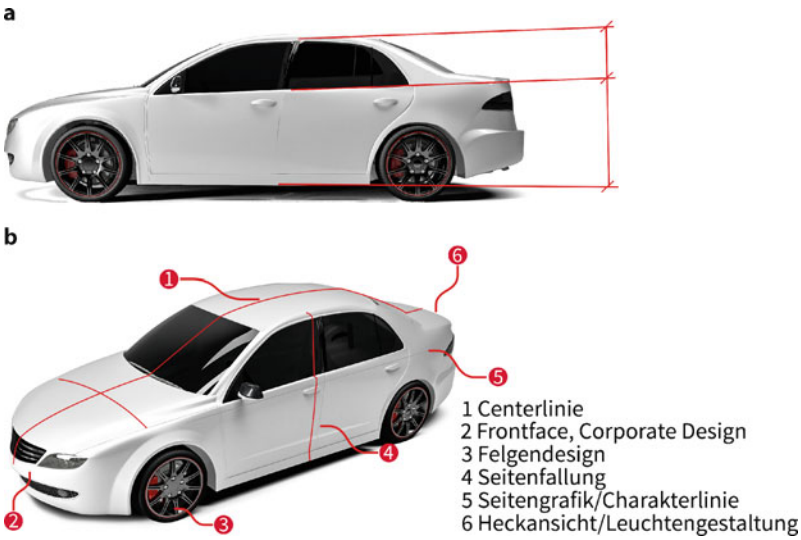



**Abb. 4.2** Gestaltungsparameter [6]

Basierend auf den Produktzielen und Spezifikationen startet das Design Team die Suche nach externen, branchenfremden Informationen und Inspirationen, die für ein erstes Brainstorming nützlich sind. Zur Erarbeitung neuer Lösungen werden dabei gerne Anleihen aus der Mode, der Architektur, der Grafik und der Unterhaltungselektronik genommen. In Abb. 4.3 ist eine solche Anleihe aus der Natur in Form einer Blume als Inspiration für die Formgebung verwendet worden.

Jeder Designer erarbeitet abhängig von seinem persönlichen Hintergrund und Offenheit unterschiedliche Designinnovationen.

Als nächster Schritt erfolgt die kreative Umsetzung aller gesammelten Informationen und Randbedingungen in Form von Handskizzen ohne Zuhilfenahme von Computern oder anderer Werkzeuge (Abb. 4.4a). Das Talent, das Gefühl für Proportionen und die Fähigkeit Ideen in Skizzen umzusetzen, kann in faszinierenden Designlösungen münden. Der Designer muss die Fähigkeit besitzen, abstrakte Informationen in ein ansprechendes Design umzusetzen.

Um unterschiedliche Designvorschläge zu kreieren, arbeiten mehrere Designer an einer Aufgabenstellung. Ausgehend von verschiedenen Designentwürfen wird in einem Prozess von drei bis vier Schritten ein Design ausgewählt, welches anschließend weiter entwickelt wird (siehe 3D-Entwicklung). Im ersten Design-Review werden ca. fünf unterschiedliche Designvorschläge als 3D-Ansichten (Rendering-Ansichten) diskutiert und




**Abb. 4.3** Inspiration von der Natur [7]

bewertet. Hiervon werden üblicherweise drei ausgewählt und entsprechend der Diskussionsergebnisse für das zweite Design-Review überarbeitet. In dem finalen Design-Review werden dann ein bis zwei Vorschläge ein weiteres Mal überabeitet. Der daraus hervorgehende, finale Vorschlag wird in verschiedenen Ansichten weiter detailliert und „foto-realistisch" dargestellt. Der aufgezeigte Selektionsprozess dient lediglich als Beispiel und unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller.

Die bisherigen Beschreibungen konzentrierten sich auf das Exterieur-Design, sind aber in ähnlicher Weise auf das Interieur-Design übertragbar. Auch hier arbeitet ein Team entsprechende Entwürfe bis zur finalen Entscheidung aus. Ein Beispiel einer 3D-Interieur-Rendering-Ansicht zeigt Abb. 4.4b.

Neben den Handskizzen werden zur Erstellung der Rendering-Bilder sogenannte Wacom-Boards verwendet, siehe Abb. 4.5.

### 4.1.1.2 3D Entwicklung

In dieser Phase werden 3D CAS (Computer Aided Styling) Modelle z. B. mit der Software „Alias" erstellt. Im Vergleich zur kreativen Konzeptphase muss der Designer an dieser Stelle die dreidimen-

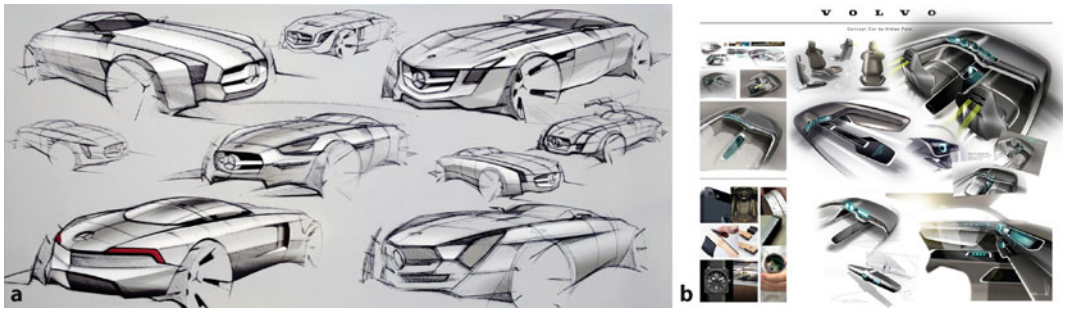



**Abb. 4.4** **a** Exterieur Handskizze [8] und **b** Interieur 2D Photoshop Bild [9]



**Abb. 4.5** Rendering mit Hilfe eines Wacom-Boards und Photoshop Software [10]

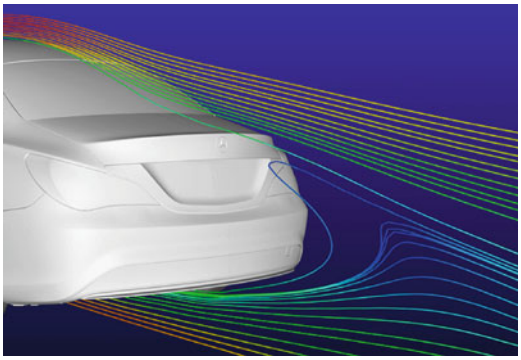


**Abb. 4.6** Aerodynamische Heckgestaltung [11]

sionale Form des Fahrzeuges für das Exterieur und Interieur unter Berücksichtigung aller technischen Randbedingungen wie Package, Gesetzgebung und weiterer Themen erstellen. Es ist wichtig ein 3D-Model zu kreieren, dass das positive Gefühl des 2D Entwurfes nicht verliert. Dieser Prozess ist durchaus anspruchsvoll, da die „Handskizzen" nicht ganz genau den wahren dreidimensionalen Ansichten entsprechen.

Häufig verlieren die 3D-Modelle einen Teil ihrer Faszination und Frische im Vergleich mit den 2D-Skizzen. Durch die Fähigkeit mit dreidimensionalen Konturen „zu spielen", ist es jedoch möglich, den ursprünglichen Reiz beizubehalten.

Das Ergebnis dieser Arbeiten sind 3D CAS-Modelle von Exterieur und Interieur unter Berücksichtigung aller technischen Randbedingungen wie Package, Ergonomie, Aerodynamik, Gesetzgebung, Produktion und Übernahmeteile. Ein gutes Beispiel für die enge Zusammenarbeit zwischen Designern und anderen Fachbereichen ist die Zusammenarbeit im Bereich Aerodynamik. Stellvertretend für viele interdisziplinäre Lösungsfindungen sei an dieser Stelle die Integration eines Heckspoilers in die Gesamtkontur genannt. Heckspoiler werden zur Verringerung des aerodynamischen Widerstandes und/oder zur Verringerung des Auftriebsbeiwertes an der Hinterachse verwendet. Eine gelungene Integration einer solchen aerodynamischen Maßnahme in die Gesamtformgebung des Heckbereichs zeigt das Beispiel Mercedes CLA (Abb. 4.6). Durch die stilistisch und technisch gelungene Gestaltung der Abrisskanten am Heckdeckel und der Heckleuchten konnte die Strömung hinter dem Fahrzeug optimal gebündelt werden [3]. Das Fahrzeug erreicht in der „Blue Efficiency Edition" einen sehr guten $C_w$-Wert von 0,22.

Zwei Beispiele solcher CAS-Modelle sind in Abb. 4.7 dargestellt. Auf der linken Seite ist eine technische Oberflächendarstellung eines Fiats 500 und auf der rechten Seite eine fotorealistische Abbildung eines Ferraris zu erkennen.

Seit vielen Jahren werden zur besseren visuellen Beurteilung der Designentwürfe 3D Projektionsräume verwendet, bei denen eine realitätsnahe Darstellung des Exterieurs und Interieurs möglich ist. Die neuesten Systeme erlauben ein Wechsel der Farben und Materialstrukturen in Echtzeit, was den Selektionsprozess beschleunigt und qualitativ verbessert.

Trotz dieser sehr realitätsnahen, virtuellen Beurteilungsmöglichkeiten sind physische 3D-Modelle für Exterieur und Interieur auch heute unverzichtbar.

#### 4.1.1.3 Physische Design Modelle

Basierend auf dem 3D CAS Modell werden mit Hilfe einer Fräsmaschine physische Modelle erstellt. Üblicherweise werden zunächst Modelle im Format 1 : 4 und abschließend in Originalgröße aufgebaut. Hierfür können unterschiedliche Materialien verwendet werden. Das wohl bekannteste Material ist Ton, es kann sehr gut manuell nachbearbeitet werden, um Formänderungen einzubringen. Bei den harten Polymermaterialien wie „Epowood" sind größere Änderungen nachträglich nur noch

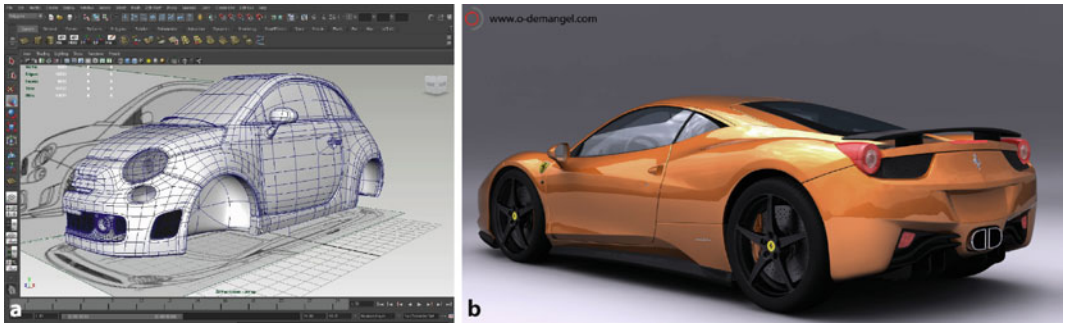



**Abb. 4.7** **a** 3D CAS Oberflächen Fiat 500 [12]; **b** 3D CAS Modell, fotorealistische Darstellung Ferrari [13]




**Abb. 4.8** **a** Ton-Modell [14]; **b** Polystyren-Modell [15]; **c** Ton-Modell mit Dynoc [16]

schwer möglich. Aus diesem Grund ist bei den harten Materialien besondere Sorgfalt auf die Qualität der CAS Modelle zu legen. Die Verwendung der Materialien ist von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Abschließend wird das Modell mit einer Silberfolie mit dem Markennamen „DINOC", als Ersatz für eine Farbe, überzogen um Fehler in den Oberflächen bei Lichtreflektionen zu erkennen. In Abb. 4.8 sind entsprechende Modelle dargestellt.

Nach der Fertigstellung wird das Modell vom Design-Team von allen Seiten betrachtet und bewertet: Wie wirkt es auf den Betrachter? Wie sind die Proportionen und Symmetrien? Sind die Übergänge der Oberflächen gelungen? Kann die Sickengestaltung noch verbessert werden? Gibt es „Reflektionsfehler" an der Oberfläche?

In dem Optimierungsprozess am Modell arbeiten Designer und Modellbauer Hand in Hand. Nach der Freigabe des Modells werden die Oberflächen „gescannt" und für die Anpassung des CAS Modells verwendet. Ist dieser Prozess abgeschlossen wird basierend auf den überarbeiteten CAS-Daten ein Modell erstellt, welches für die finale Freigabe-Präsentation lackiert wird.

Für das Interieur werden in ähnlicher Weise Modelle erstellt, jedoch sind hier die Beurteilungskriterien vielfältiger, da auch die Materialstruktur hinsichtlich der Optik und Haptik beurteilt werden.

#### 4.1.1.4 Color und Trim

In der letzten Phase vor der finalen Festlegung des Designs (Design Freeze) werden die geeigneten Farben und Materialien für das Exterieur und Interieur ausgewählt (Abb. 4.9).

Der Entwicklungsprozess des Interieur Designs bzgl. der Formgebung ist üblicherweise ähnlich dem des Exterieur Designs, jedoch bewertet der Kunde das Interieur nicht nur mit dem Sinnesorgan „Auge", sondern auch mit den Händen (Haptik) und der Nase (Geruch). Die Bedeutung des Interieurs hat in den letzten Jahren zugenommen. Insbesondere wegen der vielfältigen Wahrnehmungssinne ist in diesem Bereich der Entwicklungsaufwand erheblich gestiegen.

Aber auch die enorme Zunahme an Informationen und Auswahlmöglichkeiten im Infotainment-Bereich und bei den Fahrerassistenzsystemen führen zu höherem Entwicklungsaufwand. Bei der

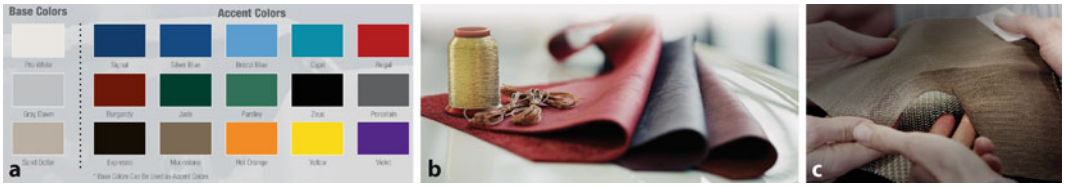



**Abb. 4.9** Farben und Materialbeispiele [17] (**a** und **b**), [18] (**c**)

Auslegung des Cockpits muss die Anordnung aller Schalter bzgl. Bedienbarkeit und Erreichbarkeit als auch die Darstellung aller Informationen überlegt sein, um die Aufmerksamkeit des Fahrers im Straßenverkehr nicht abzulenken.

#### 4.1.1.5 Design Freeze

Der letzte Schritt der Designentwicklung ist die Vorstands-Präsentation der 1 : 1 Modelle für Exterieur und Interieur, vervollständigt mit den Farben und Material-Proben zur finalen Bewertung und Freigabe.

Häufig werden auch sogenannte „Customer Clinics" durchgeführt, dabei beurteilen ausgewählte Kunden das finale Design-Modell. Diese Aktivität dient ebenfalls der finalen Bestätigung des Designs bzw. der Detailoptimierung.

### 4.1.2 Design und Markenimage

Das Markenimage einer Firma wird geprägt durch die interne und externe Kommunikation, d. h. durch das äußere Erscheinungsbild. Das Erscheinungsbild einer Automobilfirma wird wiederum wesentlich beeinflusst durch ihr Produktdesign, aber auch durch das Design der Firmengebäude und ihrem Logo.

Das Produktdesign hat demnach einen hohen Stellenwert für das Markenimage und dies insbesondere für die Automobilindustrie, da sie eine etablierte Industrie ist, bei der der Kunde sich in vielen Fällen mit seiner Marke identifiziert. Daher sollte das Design den Kern der Marke reflektieren, um die Markenbindung zu verstärken.

Etablierte Automobilfirmen haben eine lange Tradition und unterliegen daher anderen Design-




**Abb. 4.10** Smart [19]

Maßstäben als neu gegründete Automobilfirmen. Im Folgenden werden beide Fälle betrachtet.

#### 4.1.2.1 Neue Automobilfirma

Das Design einer neu gegründeten Firma oder einer, die neu positioniert wird, muss das Image des Unternehmens wiederspiegeln und sich gleichzeitig von dem Image der „traditionellen" Firmen abheben. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Marke „Smart", die bei null begann und heute ein eigenes unverwechselbares Image hat. Die Fahrzeuge sind auf der Straße gut erkennbar und können einfach der Marke Smart zugeordnet werden (Abb. 4.10).

Es kann aber auch vorkommen, dass eine existierende Automobilmarke auf dem Markt neu positioniert wird. Die Gründe dafür können vielfältig sein, z. B. wegen einer Übernahme durch eine andere Firma oder ein Strategiewechsel. Bekannte Beispiele hierfür sind: Skoda und Seat (Übernahme durch den VW-Konzern) sowie Mazda und Renault




**Abb. 4.11** Design-Evolution am Beispiel VW Golf [20]

(Entwicklung eines stärkeren und besser erkennbareren Markenimages).

#### 4.1.2.2 Etablierte Automobilfirma

In den meisten Fällen geht es jedoch um die Weiterentwicklung eines Designs etablierter Automobilfirmen für eine bestehende oder eine neue Produktlinie. Gerade Premiummarken erreichen eine große Kundenbindung, die für jede Firma erstrebenswert ist. In solchen Fällen muss das Design den Markenkern und das Markenimage wiederspiegeln und sollte behutsam entsprechend der Firmenstrategie weiterentwickelt werden bei gleichzeitiger Vermeidung eines Stillstandes im Design. Dies ist von großer Bedeutung und wird entsprechend mit großer Sorgfalt erarbeitet. Abb. 4.11 zeigt ein populäres Beispiel einer Design-Evolution.

Als weiteres Beispiel für die Bedeutung des Markenstils ist eine Beschreibung angefügt, die aus einer Veröffentlichung des Designbereichs (90er Jahre) der Marke Mercedes-Benz stammt:

» Ein paar bescheidene Anmerkungen dazu, was für uns Designer die Marke „Mercedes-Benz" bedeutet. Sie ist für uns eine der Grundsubstanzen unserer Arbeit und wir setzen sie gezielt ein. Eine unserer wichtigsten Anforderungen zu Beginn jeden Projektes lautet: ein Mercedes muss immer wie ein Mercedes aussehen.

Mit unverkennbaren Hinweisen auf die Zugehörigkeit zur Marke Mercedes-Benz, sind wir in der Lage den umfangreichen Erinnerungsspeicher bei unseren Kunden zu aktivieren, der mit dem Namen Mercedes-Benz verbunden ist. (Beispiel siehe Abb. 4.12)

Die Marke Mercedes scheint seit vielen Jahrzehnten bereits verbunden zu sein mit vielen positiven Eigenschaften, die man den

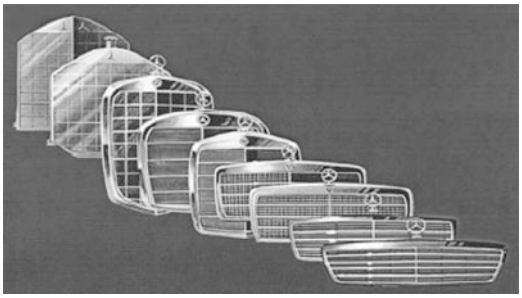


**Abb. 4.12** Entwicklung des Mercedes-Benz-Designs [21]

Produkten und dem Unternehmen zuschreibt. Es ist sicher nicht übertrieben zu behaupten, dass es so etwas wie ein Urvertrauen in diese Marke und in seine Produkte gibt. Man muss dies als ein Ergebnis einer in den Anfängen unseres Jahrhunderts bereits beginnenden Bildung einer öffentlichen Meinung betrachten.

Grundlage war und ist natürlich die hervorragende Qualität der Produkte unseres Hauses aber auch des Umfeldes, in dem diese Produkte in Erscheinung treten. Ich möchte nicht erklären was ein Pawlowscher Reflex ist, aber es scheint zwischen einer Marke wie Mercedes und der öffentlichen Meinung Wechselbeziehungen zu geben, die diesem Phänomen sehr ähnlich sind.

Eine Marke weckt aber nicht nur positive Gefühle, sondern erzeugt auch Erwartungen. Wenn die öffentliche Aufmerksamkeit sich möglicherweise bestehenden Produktschwächen zuwendet, die durchaus vorgekommen sind, so mag dieses bei anderen Marken als Randnotiz vermerkt werden, in Verbindung mit dem Namen Mercedes-Benz ist so etwas immer für eine Sensation gut, der in einer sensationsgierigen Öffentlichkeit ein hoher Marktwert zukommt. Wir wissen das sehr gut und nicht nur deswegen ist uns unsere Marke auch Verpflichtung. Wenn bereits durch den bloßen Anblick eines neuen Fahrzeuges viele positive Empfindungen und Meinungen ausgelöst werden können, so nützt uns das, denn wir müssen diese Empfindungen nicht mehr aufwendig erzeugen. In der Vergangenheit haben wir sehr strikt nach diesem Muster gehandelt. In den Zeiten, in denen wir noch im Wesentlichen drei Limousinen-Baureihen produzierten, sah ein Mercedes vor allem immer wie ein Mercedes aus. Die Markenaussage hatte Vorrang vor allem anderen. Die Fahrzeuge waren zuerst Mercedes und erst dann ein Fahrzeug einer bestimmten Klasse. Das haben wir, wie Sie unschwer erkennen können, etwas geändert. Zwar ist ein Mercedes auch heute noch auf den ersten Blick als Mercedes zu erkennen, dennoch sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen größer geworden. Die Charaktere der Modelle sind deutlicher herausgearbeitet. Der Grund dafür ist natürlich die Entscheidung zu unserer Modelloffensive, die Anfang der 90er Jahre getroffen wurde. Wir wollen Kunden erreichen, die bisher nicht im Mittelpunkt unseres Interesses standen, und dazu brauchen wir ein breitgefächertes Angebot. Für die Marke Mercedes wiederum bedeutet diese Erweiterung der Erscheinungsformen eindeutig eine Bereicherung. Über lange Zeit tradierte Werte sind zwar ein Segen, aber sie bergen auch in sich die Gefahr der Verkrustung und genau diese Gefahr galt es zu bannen. Erweiterung der Ausdrucksformen heißt aber nicht Aufweichung oder Überdehnung des Markenbildes. Wir sind uns bewusst, dass es hier Grenzen gibt, die auszuloten uns natürlich reizt. In einem Umfeld in dem die rein technischen Qualitäten von Fahrzeugen immer schwieriger zu kommunizieren sind und daher an Kommunikationsbedeutung verlieren, kommt dem Design als Differenzierungsmerkmal eine immer größere Bedeutung zu. Es kommt also besonders darauf an, durch das Design die Eigenarten der Marken noch deutlicher hervorzuheben und zueinander zu profilieren.

### 4.1.3 Designstudien und Advanced Design

Innovation ist wichtig für die Weiterentwicklung einer Marke, das gilt nicht nur für neue Technologien, sondern auch für das Design von Fahrzeugen. Häufig ermöglichen neue Technologien ganz neue Fahrzeug- und Designkonzepte. Ein gutes Beispiel hierfür ist der technologische Fortschritt hinsicht-



**Abb. 4.13** Mercedes Benz Konzeptfahrzeug F015 [22]

lich des autonomen Fahrens, welches von Mercedes in dem Konzeptfahrzeug F015 (siehe Abb. 4.13) in ein neues Innenraumkonzept umgesetzt wurde. Eine solche „Advanced-Design-Studie" arbeitet ein Thema aus, dessen vollständige Realisierung weit in der Zukunft stattfinden wird.

Andere Designstudien dienen der Vorpositionierung neuer Fahrzeuge. Hier geht es darum ein neues Fahrzeug einem breiten Publikum lange vor dem avisierten Markteintritt vorzustellen und die Reaktionen darauf vielleicht noch mit in die Serienentwicklung einfließen zu lassen. Es soll auch schon vorgekommen sein, dass der Erfolg einer Studie erst zum Beschluss einer Serienentwicklung geführt hat.

## 4.2 Fahrzeugkonzept und Package

### 4.2.1 Einführung und Definition

Wesentliche Aufgabe der Konzepterstellung und Packageerarbeitung für ein Fahrzeug ist die konstruktive Zusammenführung, Verdichtung und Bewertung unterschiedlicher Anforderungen und Ziele, vgl. Abb. 4.14.

Die Fahrzeugkonzept- und die Packageerstellung sind im Fahrzeugentwicklungsprozess untrennbar miteinander verknüpfte Aktivitäten. Die Begriffe werden in der Automobilindustrie daher auch nicht einheitlich verwendet. Eine sinnvolle Abgrenzung gelingt über die zeitliche Abfolge der Aktivitäten und über die behandelten Schwerpunkte. Von der zeitlichen Abfolge her wird im Entwicklungsprozess mit der Fahrzeuggrundkonzeption begonnen. Das Grundkonzept wird dann durch ein ständig detaillierter werdendes Package untermauert. Aus diesem Package ergeben sich unter Umständen Aspekte, die auch das Fahrzeuggrundkonzept beeinflussen und ggf. einer zunächst favorisierten Lösung entgegenstehen.

#### 4.2.1.1 Definition Fahrzeugkonzept

Das Fahrzeugkonzept ist der konstruktive Entwurf einer Produktidee mit dem die grundsätzliche Realisierbarkeit abgesichert wird. Der Entwurf umfasst die „Komposition" bzw. Zusammenstellung der wesentlichen, die Fahrzeugeigenschaften und die Fahrzeugcharakteristik beeinflussenden Parameter, Hauptmodule und Komponenten. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Festlegung und Gestaltung von:

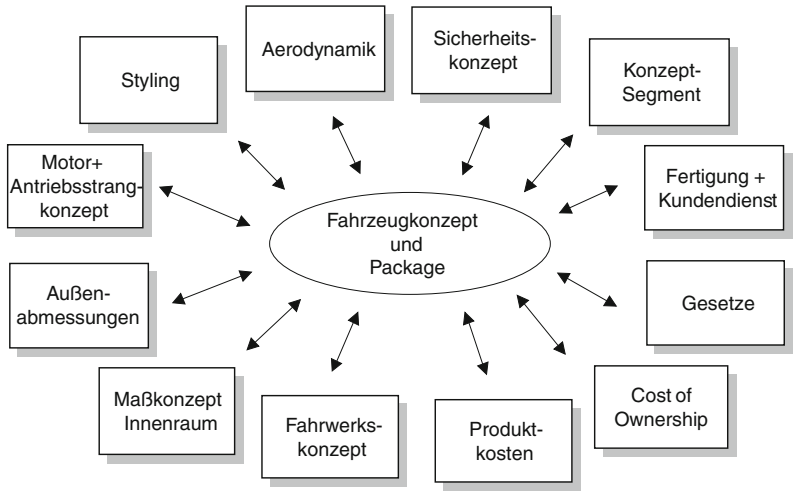



**Abb. 4.14** Beispiel für bei Fahrzeugkonzeption und Package zu berücksichtigende Anforderungen

- Aufbauausprägung, Fahrzeuggrundform und zukünftige Varianten,
- Anzahl Sitzplätze, Raumbedarf Insassen,
- Stauraum und Volumina (z. B. Tank),
- Hauptabmessungen sowie
- Motor- und Antriebskonzept.

Die wesentlichen Gestaltungsmöglichkeiten werden in ▶ Abschn. 4.2.2 aufgezeigt.

#### 4.2.1.2 Definition Package

Das Package ist die während der Entwicklung des Fahrzeugs schrittweise verfeinerte Ausarbeitung des Entwurfs mit dem Ziel, ständig die technische Machbarkeit des geplanten Produkts und das maßliche Zusammenspiel aller Baugruppen und Komponenten zu überprüfen.

Es werden dabei alle Anforderungen aus

- kundenrelevanten und gesetzlichen,
- umwelt- und sicherheitstechnischen,
- stylistischen,
- wirtschaftlichen,
- technisch funktionellen,
- produktions- und wartungstechnischen und
- qualitätssichernden

Gesichtspunkten mit dem Ziel vereint, eine konstruktiv bestmögliche Gesamtfahrzeuglösung zu erreichen [23].

D. h., die verschiedenen Zielkonflikte, Bauraumansprüche und funktionalen Abhängigkeiten werden derart aufgelöst, dass eine geometrisch und physikalisch kompatible Anordnung aller Komponenten, das sog. Package, entsteht.

### 4.2.2 Gestaltung von Fahrzeugkonzepten

Für eine erste Fahrzeuggrundkonzeption ist die gleichzeitige Berücksichtigung aller Anforderungen weder zielführend noch erforderlich. Allerdings sind die Hauptparameter so zu wählen, dass in späteren Phasen der Entwicklung Gestaltungsspielräume verbleiben. Einen großen Einfluss auf das Fahrzeugkonzept haben die folgenden Anforderungen:

- wesentliche Wettbewerber (heute und Prognose Zukunft) inkl. relativer Positionierung zu diesen Wettbewerbern,
- Einsatzbereich (Freizeit-, Nutz-, Stadtfahrzeug, Reiselimousine, Geländefahrzeug, Sportfahrzeug),
- Karosserievarianten,
- grobes Sicherheitskonzept mit Crashstrukturen,
- Anzahl der Sitzplätze, Gepäckraumvolumina, Variabilität,

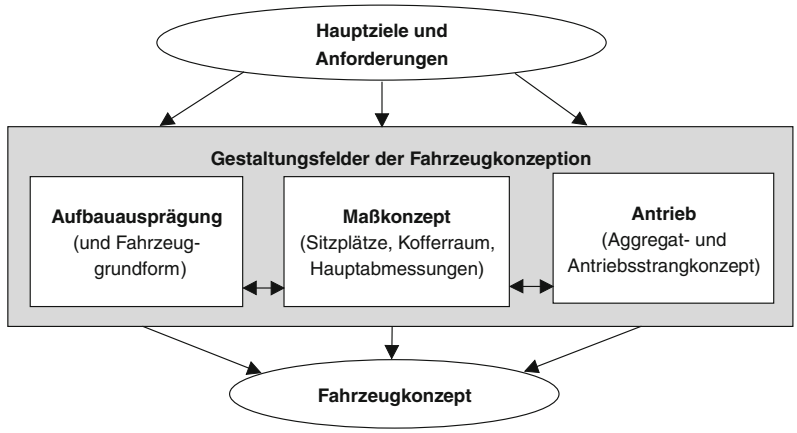



**Abb. 4.15** Gestaltungsfelder der Fahrzeugkonzeption

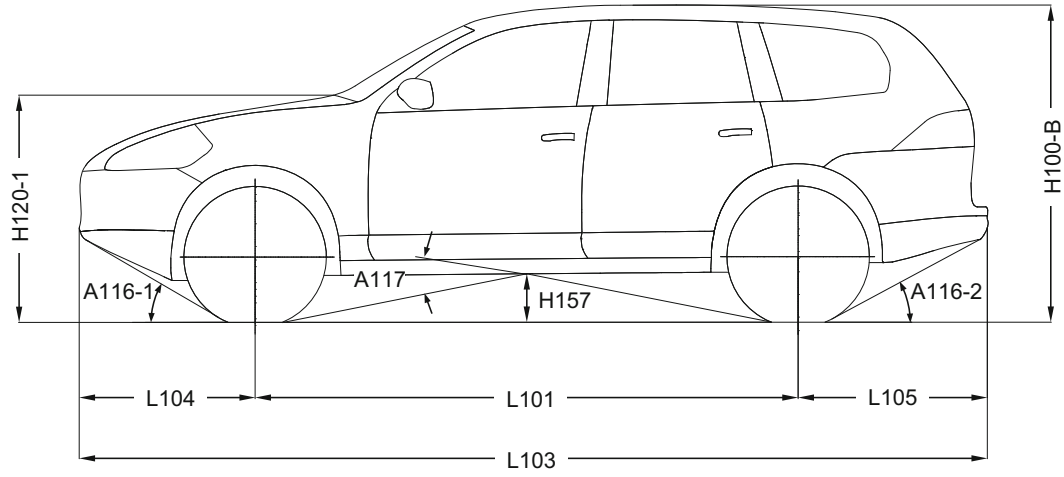



**Abb. 4.16** Außenabmessungen in $x$-/$z$-Richtung, Benennungen gemäß [25]

- ergonomische Anforderungen an die Sitzplätze (Komfortanforderungen),
- Aggregatfamilien und Antriebsstrangkonzepte.

Auf die einzelnen in Abb. 4.15 dargestellten Gestaltungsfelder wird in den folgenden Abschnitten detaillierter eingegangen.

### 4.2.2.1 Außenabmessungen und Fahrzeugklassen

Um die Vergleichbarkeit der wesentlichen Maße innen und außen sicherzustellen, sind die wesentlichen, ein Fahrzeug beschreibenden Maßdefinitionen und -bezeichnungen vereinheitlicht [24, 25] (Abb. 4.16, Abb. 4.17).

Anhand dieser Außenabmessungen erfolgt innerhalb der Automobilindustrie und in der Fachpresse die Einteilungen nach *Fahrzeugklassen*. Eine solche Klasseneinteilung nach Außenabmessungen mit Beispielfahrzeugen ist in Tab. 4.1 dargestellt.

Die Modellvielfalt und die zunehmende Anzahl von Nischenfahrzeugen zeigen jedoch die Grenzen dieser Einteilung auf. Daher wird die Einteilung in Klassen anhand der Größe um eine Einteilung in die Fahrzeugnutzung bzw. die Fahrzeugausprägung ergänzt. Beispiele für solche Einteilungen sind:

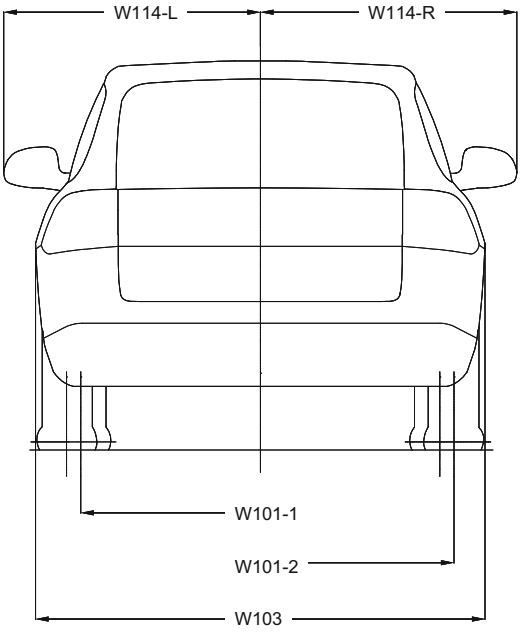



**Abb. 4.17** Außenabmessungen in $y$-Richtung, Benennung gemäß [25]

- Cabrios (inkl. Roadster),
- Sportwagen (inkl. Sportcoupé),
- Geländefahrzeuge (inkl. Sport Utility Vehicles),
- Vans.

Diese Aufteilung nach Größe einerseits und Einsatzbereich andererseits ist aus technischer und fahrzeugkonzeptioneller Sicht nicht zufriedenstellend, da nicht alle realisierbaren Fahrzeugkonzepte abgedeckt werden. Eine Ausweitung der Klasseneinteilung um die Nutzungsform (Aufbauvariante) wird im folgenden Abschnitt aufgezeigt. Es ist auch zu beachten, dass die Klassengrenzen keine festen Werte für bestimmte Abmessungen haben, sondern einer zeitlichen Anpassung unterliegen.

#### 4.2.2.2 Aufbauausprägungen und Konzeptsegmente

Die zu differenzierenden *Aufbauausprägungen* mit ihren Charakteristika sind in den ersten beiden Spalten der Tab. 4.2 dargestellt.

Durch Kombination der Aufbauausprägungen mit den definierten Größenklassen ergeben sich vielfältige Konzeptsegmente. Die derzeit am Markt belegten Segmente sind in Tab. 4.2 gekennzeichnet.

Die Zuordnung der *Aufbauformen* zu den Konzeptsegmenten stellt den aktuellen Stand der am Markt befindlichen Fahrzeuge dar. Konzeptstudien deuten darauf hin, dass eine Ausweitung verschiedener Aufbauausführungen in neue Klassen, sowie auch eine Vermischung der Aufbauformen verstärkt am Markt aufzufinden sein wird, vgl. auch Ausblick, ► Abschn. 4.2.6.

#### 4.2.2.3 Fahrzeuggrundformen

Neben den Aufbauausprägungen wird zunehmend die *Fahrzeuggrundform* als Differenzierungsmerkmal genutzt. Hierbei kann zwischen 1-, 2- und 3-Box-Ausführungen unterschieden werden, Tab. 4.3.

Die *3-Box-Ausführung* stellt die klassische Unterteilung in Motorraum, Raum für Insassen und Kofferraum dar.

Fahrzeuge in 2-Box-Anmutung sind im Bereich der Kombis und der Coupés mit variabler Rückbank anzutreffen. Hier wird die Trennung zwischen Insassen und Gepäck aufgehoben oder variabel gestaltet.

Bei der 1-Box-Anmutung muss zwischen zwei Ausrichtungen unterschieden werden. Zum einen eine konventionelle 2-Box-Architektur, die stylistisch als 1-Box ausgeführt ist, zum anderen eine wirkliche 1-Box-Ausführung, bei der für den Motorraum ein Sandwichboden genutzt wird und somit die klassischen Trennungen zwischen den Bauräumen in $x$-Richtung aufgehoben werden (Unterflurkonzepte).

Insbesondere spät in bestimmte Segmente eintretende Wettbewerber suchen nach Differenzierungspotential über die Fahrzeuggrundform. Der momentane Trend in der Weltautomobilindustrie geht eindeutig von der klassischen 3-Box-Aufteilung hin zu variableren 1- und 2-Box-Konzepten.

Fahrzeuge mit *1-Box-Design* und Sandwichboden sind zudem konzeptionell gut geeignet, alternative Energieträger wie beispielsweise Batterien oder Brennstoffzellen zu integrieren, siehe ► Abschn. 4.3.

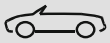
**Tabelle 4.1** Einteilung in Fahrzeugklassen, Beispiele, konkrete Exterieurmaße einzelner Fahrzeuge, Daten teilweise Vorgängermodelle aktueller Fahrzeuge

| Fahrzeugklassen | Minicar | Kleinwagen | Kompaktklasse | Mittelklasse | Obere Mittelklasse | Oberklasse | Vans | SUVs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beispielfahrzeuge, unterstes Fahrzeug dient im weitern Verlauf jeweils als Beispiel *(kursiv gedruckt)* | Fiat Seicento<br>MCC Smart<br>Seat Arosa<br>*VW Lupo* | Toyota Yaris<br>Fiat Punto<br>Opel Corsa<br>Ford Fiesta<br>*VW Polo* | Mercedes A-Kl.<br>VW Golf<br>Opel Astra<br>Audi A3<br>*Ford Focus* | Ford Mondeo<br>Mercedes C-Kl.<br>Audi A4<br>Opel Vectra<br>*BMW 3er* | Opel Omega<br>BMW 5er<br>Mercedes E-Kl.<br>Peugeot 607<br>*Audi A6* | Jaguar XJ<br>BMW 7er<br>Audi A8<br>VW Phaeton<br>*Mercedes S-Kl.* | Fiat Ulysse<br>Merc. V-Kl.<br>Renault Espace<br>*VW Sharan* | BMW X5<br>Mercedes M-Kl.<br>Chrysler Cherokee<br>*Porsche Cayenne* |
| Sitzplätze | | | | | | | | |
| Normalzustand/mit umgekl. (bzw. ausgebauter) Rückbank | 4/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 7/2 | 5/2 |
| Exterieurmaße | | | | | | | | |
| Länge (L103) (1) in mm | 2500–3600<br>*3527* | 3600–3900<br>*3897* | 3900–4400<br>*4152* | 4300–4600<br>*4471* | 4500–4900<br>*4795* | 4800–5200<br>*5038* | 4600–5000<br>*4620* | 4400–4900<br>*4782* |
| Breite (W103) in mm | 1500–1650<br>*1639* | 1550–1670<br>*1650* | 1670–1740<br>*1699* | 1670–1770<br>*1739* | 1770–1850<br>*1810* | 1800–1900<br>*1855* | 1800–1950<br>*1810* | 1800–1950<br>*1928* |
| Höhe (H100) in mm | 1330–1550<br>*1460* | 1350–1480<br>*1465* | 1330–1440<br>*1430* | 1360–1430<br>*1387* | 1360–1450<br>*1423* | 1400–1500<br>*1444* | 1500–2000<br>*1730* | 1650–1950<br>*1699* |
| Radstand (L101) in mm | 1800–2400<br>*2323* | 2350–2500<br>*2460* | 2400–2700<br>*2615* | 2500–2800<br>*2725* | 2600–2900<br>*2760* | 2700–3200<br>*2965* | 2700–3200<br>*2846* | 2700–3000<br>*2859* |
| Bodenfreiheit (H156) in mm | 100–150<br>*125* | 100–150<br>*113* | 100–150<br>*146* | 100–150<br>*110* | 110–150<br>*123* | 110–150<br>*150* | 120–170<br>*155* | 170–250<br>*183* |
| Überhang vorne (L103–L105–L101) in mm | 350–800<br>*729* | 500–850<br>*803* | 550–850<br>*842* | 700–900<br>*758* | 700–1000<br>*968* | 700–1000<br>*867* | 700–1000<br>*864* | 850–1050<br>*924* |

**Tabelle 4.1** (Fortsetzung)

| Fahrzeugklassen | Minicar | Kleinwagen | Kompaktklasse | Mittelklasse | Obere Mittelklasse | Oberklasse | Vans | SUVs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beispielfahrzeuge, unterstes Fahrzeug dient im weitern Verlauf jeweils als Beispiel *(kursiv gedruckt)* | Fiat Seicento<br>MCC Smart<br>Seat Arosa<br>*VW Lupo* | Toyota Yaris<br>Fiat Punto<br>Opel Corsa<br>Ford Fiesta<br>*VW Polo* | Mercedes A-Kl.<br>VW Golf<br>Opel Astra<br>Audi A3<br>*Ford Focus* | Ford Mondeo<br>Mercedes C-Kl.<br>Audi A4<br>Opel Vectra<br>*BMW 3er* | Opel Omega<br>BMW 5er<br>Mercedes E-Kl.<br>Peugeot 607<br>*Audi A6* | Jaguar XJ<br>BMW 7er<br>Audi A8<br>VW Phaeton<br>*Mercedes S-Kl.* | Fiat Ulysse<br>Merc. V-Kl.<br>Renault Espace<br>*VW Sharan* | BMW X5<br>Mercedes M-Kl.<br>Chrysler Cherokee<br>*Porsche Cayenne* |
| Exterieurmaße | | | | | | | | |
| Überhang hinten (L105) in mm | 300–500<br>*475* | 400–650<br>*634* | 500–750<br>*695* | 700–1000<br>*988* | 800–1200<br>*1067* | 900–1300<br>*1206* | 800–1200<br>*910* | 850–1050<br>*999* |
| Böschungswinkel vorne (H106) in ° | 12–50<br>*14* | 15–20<br>*16* | 12–20<br>*13* | 12–20<br>*17* | 12–20<br>*15* | 12–20<br>*17* | 12–20<br>*13* | 24–35<br>*29* |
| Böschungswinkel hinten (H107) in ° | 15–50<br>*39* | 15–20<br>*19* | 15–20<br>*18* | 12–20<br>*15* | 12–20<br>*16* | 12–20<br>*15* | 12–20<br>*20* | 14–35<br>*25* |

**Tabelle 4.2** Aufbauausprägungen und Anwendungen der Aufbaukonzepte in unterschiedlichen Größenklassen (● = verbreitet, ○ = Einzelanwendung)

| Aufbauausprägung | Bemerkung | MC | KW | KK | MK | O MK | OK |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  Offen | Als Roadster (2-sitzig) oder Cabriolet (meist 4-sitzig): Cabriolets häufig von Stufenheck oder Steilheckfahrzeugen abgeleitet | ● | ● | ● | ● | ○ | ○ |
|  Fließheck | „Klassisches Coupé" oder Differenzierung von Stufenheck- oder Steilheckkonzepten | | | | ● | ● | |
|  Stufenheck | Die klassische Ausprägung der Limousine (u. Klappdachcabrios) | | | ○ | ● | ● | ● |
|  Steilheck | In den unteren Fahrzeugsegmenten als „Hatchback" in den oberen Segmenten als Kombifahrzeug | ● | ● | ● | ● | ● | |
|  Großraum | Auch als MPV bezeichnete Fahrzeuge mit mehr als 5 Sitzplätzen oder vergrößertem Raumangebot, große Fahrzeughöhe | | | ● | ● | ● | ○ |
|  „SUV" | Geländefahrzeuge, Hauptdifferenzierung über Bodenfreiheit und Böschungswinkel. Basis: höhergelegte Steilheckfahrzeuge oder eigenständige Konzepte | | | ● | ● | ● | |
|  „Pickup" | Vor allem in den USA verbreitete Aufbauform, meist von SUVs oder Trucks abgeleitet | | | ○ | ● | ● | |

### 4.2.2.4 Sitzigkeit, Gepäckraum und Innenraumvariabilität

Innenräume gewinnen heute zunehmend an Variabilität. Die wesentlichen Grundvarianten stellen die 2-Sitzigkeit bei Kompaktwagen und Roadstern, eine 2+2- bzw. 4-Sitzigkeit bei Kleinwagen und Coupés und eine 5-Sitzigkeit in den anderen Klassen dar. Im Van-Segment sind 6- bis 8-sitzige Ausprägungen vorzufinden.

Im Bereich der 4- und 5-Sitzigkeit wird eine Variabilität zumeist durch die Umklappbarkeit der 2. Sitzreihe (1/1, 1/3–2/3, oder 1/2–1/2) realisiert, wodurch eine deutliche Vergrößerung des Kofferraumes ermöglicht wird (vgl. Tab. 4.4).

Bei Vans mit sechs und mehr Sitzplätzen sind zwei unterschiedliche Konzepte zur Ermöglichung der Variabilität zu unterscheiden. Zum einen durch Demontage der jeweiligen Sitzplätze (Problem der Lagerung und der geringen Flexibilität während einer Reise). Auf der anderen Seite durch besonders flexible und raumökonomische Sitzkonzepte, die ein Wegklappen der nicht benötigten Sitzplätze ermöglichen.

### 4.2.2.5 Wesentliche Innenraumabmessungen

Wie die Fahrzeugaußenabmessungen sind auch die *Interieurabmessungen* hinsichtlich der Bezugspunkte und Bezeichnungen international vereinheitlicht [24, 25] (Abb. 4.18 und Abb. 4.19).

Für die Gestaltung des Fahrzeugpackages und die Detailkonzeption wesentliche Maße sind dabei H30-1/-2, H61-1/-2, L50-2 sowie der Abstand zwischen Fußballenpunkt (BoF: Ball of Foot) und Mitte Vorderrad (L113). Für das Maß L50-2 ist der Aufbau der Sitzlehne des Vordersitzes zu beachten. Auf die Zusammenhänge zwischen diesen Größen sowie die Einordnung dieser Größen in wesentliche Maßketten des Fahrzeugpackages und somit die Abhängigkeiten zu Motorraum- und

**Tabelle 4.3** Fahrzeuggrundformen und Anwendungsgebiete

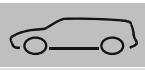
| Grundform | 1 Box  | 2 Box  | 3 Box  |
|---|---|---|---|
| Beschreibung | Das gesamte Fahrzeug wird als ein Volumen wahrgenommen (one Box).<br>Tatsächlich findet jedoch eine Trennung zwischen Insassen und Gepäck auf der einen Seite, sowie Technik (Antriebsstrang, Motor, Getriebe, Tank) auf der anderen Seite statt. Häufig wird diese Trennung über einen Sandwichboden und/oder einen tief liegenden Motorraum vollzogen | Aufteilung des Fahrzeuggrundkörpers in zwei Bereiche/Volumina. Ein Bereich (zumeist der vordere) ist als Motorraum ausgeprägt, das zweite Volumen wird als Insassen- bzw. Gepäckraum ausgestaltet | „Klassische" Aufteilung der Volumina des Fahrzeugs. Trennung zwischen Technik (Motorraum), Insassen und Gepäckraum. Zunehmend ist auch bei 3-Box-Ausführungen variable Trennung zwischen Insassen und Gepäck vorzufinden |
| Anwendung | – Vans<br>– Kleinwagenkonzepte (z. B. Smart) | – Kombifahrzeuge<br>– SUVs<br>– Kompaktklasse („Golf-Klasse") | – Limousinen<br>– klassische Coupés<br>– Cabrios<br>– Roadster |
| Vorteile | – Geringe Verkehrsfläche<br>– sehr gute Raumausnutzung<br>– hohe Sitzposition | – Große Variabilität zwischen Gepäck- und Insassenraum möglich | – Trennung der Nutzräume für Innengeräusch, positiv<br>– günstig für passive Sicherheit (Gepäckraum getrennt)<br>– hohe Steifigkeit der Karosserie |
| Nachteile | – Große Fahrzeughöhe, dadurch große Stirnfläche<br>– hoher Schwerpunkt fahrdynamisch nachteilig | – Großer Innenraum akustisch negativ<br>– $c_w$-Wert (Abrisskante) stark vom Winkel des Hecks abhängig | – geringe Variabilität<br>– Abrisskante an Dach oder Heckdeckel muss klar definiert werden (Einfluss Aerodynamik auf Formgebung) |

**Tabelle 4.4** Wesentliche Interieurmaße in den Fahrzeugklassen, Beispielfahrzeuge, teilw. Vorgängermodelle

| Fahrzeugklassen | Minicar | Kleinwagen | Kompaktklasse | Mittelklasse | Obere Mittelkl. | Oberklasse | Vans | SUVs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beispielfahrzeuge, unterstes Fahrzeug dient im weiteren Verlauf jeweils als Beispiel *(kursiv gedruckt)* | Fiat Seicento<br>MCC Smart<br>Seat Arosa<br>*VW Lupo* | Toyota Yaris<br>Fiat Puncto<br>Opel Corsa<br>Ford Fiesta<br>*VW Polo* | Mercedes A-Kl.<br>VW Golf<br>Opel Astra<br>Audi A3<br>*Ford Focus* | Ford Mondeo<br>Mercedes C-Kl.<br>Audi A4<br>Opel Vectra<br>*BMW 3er* | Opel Omega<br>BMW 5er<br>Mercedes E-Kl.<br>Peugeot 607<br>*Audi A6* | Jaguar XJ<br>BMW 7er<br>Audi A8<br>VW Phaeton<br>*Mercedes S-Kl.* | Fiat Ulysse<br>Mercedes V-Kl.<br>Renault Espace<br>*VW Sharan* | BMW X5<br>Mercedes M-Kl.<br>Chrysler Cherokee<br>*Porsche Cayenne* |
| Sitzplätze | | | | | | | | |
| Normalzustand/mit umgekl. (bzw. ausgebauter) Rückbank | 4/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 5/2 | 7/2 | 5/2 |
| Interieurmaße | | | | | | | | |
| Fußraum vorne (L34) in mm | 960–1080<br>*995* | 960–1080<br>*1040* | 970–1100<br>*1095* | 1000–1100<br>*1051* | 1000–1100<br>*1049* | 1000–1100<br>*1050* | 900–1050<br>*960* | 900–1050<br>*1032* |
| Fußraum hinten (L51) in mm | 650–850<br>*805* | 730–920<br>*854* | 760–920<br>*882* | 750–920<br>*879* | 750–950<br>*948* | 900–1000<br>*923* | 800–1000<br>*849* | 850–1000<br>*914* |
| Kopfraum vorne (H61) in mm | 920–1100<br>*930* | 920–1000<br>*986* | 940–1010<br>*997* | 950–1010<br>*975* | 950–1010<br>*980* | 980–1020<br>*1000* | 980–1100<br>*1023* | 980–1050<br>*1001* |
| Kopfraum hinten (H63) in mm | 900–950<br>*946* | 900–970<br>*958* | 900–990<br>*982* | 910–980<br>*952* | 910–980<br>*963* | 950–990<br>*986* | 900–1100<br>*943* | 900–1050<br>*979* |
| Schulterbreite (W3) in mm | 1150–1350<br>*1305* | 1200–1400<br>*1351* | 1250–1450<br>*1364* | 1300–1450<br>*1382* | 1350–1550<br>*1427* | 1400–1550<br>*1503* | 1400–1600<br>*1552* | 1400–1500<br>*1458* |
| Sitzabstand (L50) in mm | 650–850<br>*725* | 650–850<br>*745* | 700–900<br>*745* | 700–900<br>*786* | 750–900<br>*860* | 800–1000<br>*860* | 750–1000<br>*862* | 750–950<br>*845* |

**Tabelle 4.4** (Fortsetzung)

| Fahrzeugklassen | Minicar | Kleinwagen | Kompaktklasse | Mittelklasse | Obere Mittelkl. | Oberklasse | Vans | SUVs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Beispielfahrzeuge, unterstes Fahrzeug dient im weiteren Verlauf jeweils als Beispiel *(kursiv gedruckt)* | Fiat Seicento<br>MCC Smart<br>Seat Arosa<br>*VW Lupo* | Toyota Yaris<br>Fiat Puncto<br>Opel Corsa<br>Ford Fiesta<br>*VW Polo* | Mercedes A-Kl.<br>VW Golf<br>Opel Astra<br>Audi A3<br>*Ford Focus* | Ford Mondeo<br>Mercedes C-Kl.<br>Audi A4<br>Opel Vectra<br>*BMW 3er* | Opel Omega<br>BMW 5er<br>Mercedes E-Kl.<br>Peugeot 607<br>*Audi A6* | Jaguar XJ<br>BMW 7er<br>Audi A8<br>VW Phaeton<br>*Mercedes S-Kl.* | Fiat Ulysse<br>Mercedes V-Kl.<br>Renault Espace<br>*VW Sharan* | BMW X5<br>Mercedes M-Kl.<br>Chrysler Cherokee<br>*Porsche Cayenne* |
| Interieurmaße | | | | | | | | |
| Mitte Vorderrad bis RPkt. vorn (L114) in mm | 1100–1300<br>*1222* | 1150–1350<br>*1281* | 1200–1450<br>*1340* | 1300–1550<br>*1526* | 1300–1550<br>*1329* | 1450–1650<br>*1596* | 1200–1500<br>*1255* | 1400-1600<br>*1535* |
| R-Pkt. bis Fersenpkt. Vorn (L53) in mm | 700–850<br>*751* | 700–850<br>*817* | 750–850<br>*804* | 750–850<br>*841* | 800–850<br>*833* | 800–850<br>*842* | 650–800<br>*667* | 750–850<br>*802* |
| L114-L53 | 300–600<br>*471* | 400–600<br>*464* | 400–550<br>*536* | 450–700<br>*685* | 450–750<br>*496* | 500–800<br>*754* | 450–750<br>*588* | 500–800<br>*733* |
| R-Pkt. bis Standebene vorn (H5) in mm | 500–650<br>*515* | 500–650<br>*507* | 450–650<br>*519* | 450–550<br>*476* | 450–550<br>*459* | 450–550<br>*518* | 550–750<br>*677* | 700–800<br>*726* |
| R-Pkt. bis Fersenebene vorn (H30) in mm | 250–350<br>*303* | 250–350<br>*288* | 250–350<br>*298* | 250–300<br>*258* | 250–300<br>*267* | 250–300<br>*272* | 300–400<br>*371* | 250–350<br>*298* |
| Kofferraumvolumen | | | | | | | | |
| mit maxim. Sitzplatzanzahl | 100–200 | 200–460 | 240–550 | 330–550 | 330–550 | 500–600 | 200–500 | 350–550 |
| mit minim. Sitzplatzanzahl | 500–800 | 600–1200 | 800–1400 | 1000–1400 | 1000–1600 | 1000–1600 | 1800–3000 | 1500–2500 |
| Beispielfahrzeug min/max | *180/830* | *250/1030* | *350/1205* | *440/–* | *550/–* | *500/–* | *250/2610* | *430/1770* |

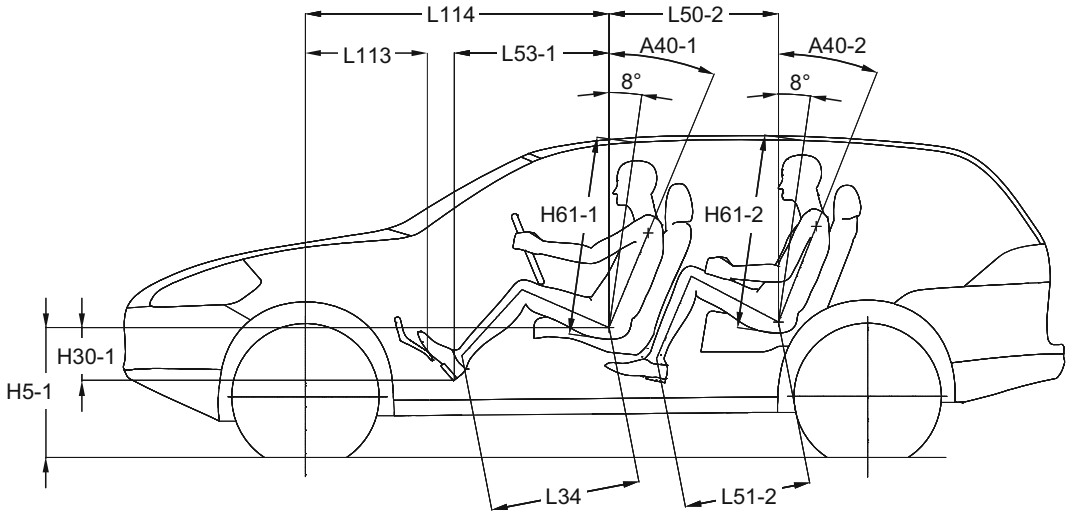



**Abb. 4.18** Innenraummaßdefinition in $xz$-Richtung, Bezeichnung nach [25]

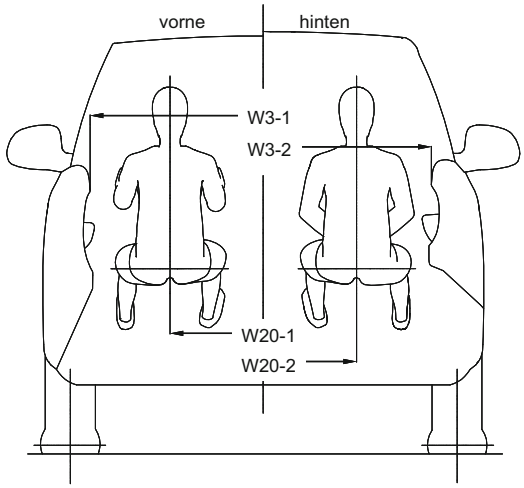



**Abb. 4.19** Innenraummaßdefinitionen $y$-Richtung, Bezeichnung gemäß [25]

Antriebskonzepten, Sicherheitskonzept und Rohbaustruktur wird in ► Abschn. 4.2.3 näher eingegangen.

Ein wesentlicher Punkt ist bei der Interpretation der Interieurdaten zu beachten. Diverse Maße (z. B. H30-1/-2, H61-1/-2, L50-2) beziehen sich auf den Sitzreferenzpunkt, der als R-Punkt oder auch SgRP (Seating Reference Point) bezeichnet wird. Der R-Punkt bildet die Hüftgelenkmitte der Passagiere ab. Dieser Sitzreferenzpunkt wird von den Fahrzeugherstellern im Rahmen bestimmter Randbedingungen als Basis für die Typisierung und die Überprüfung von konstruktiven Vorschriften (z. B. Sicht- und Gurtfelder) festgelegt. In der Praxis liegt dieser Punkt in der Regel im hinteren Drittel des Sitzverstellfeldes, ist jedoch nicht einheitlich definiert.

Zudem ist die Vergleichbarkeit von Referenzmaßen durch die mittlerweile fast durchgängig gegebene Höhenverstellbarkeit der Sitze und die Lenkradverstellbarkeit immer schwerer möglich (Details in ► Abschn. 4.2.3.2).

#### 4.2.2.6 Aggregate- und Antriebsstrangkonzepte

Die zu verbauenden Aggregate und die Antriebsstrangkonzepte ermöglichen einen wesentlichen Gestaltungsspielraum, stellen aber häufig auch eine maßgebliche Restriktion bzw. Vorgabe dar [26]. Für das Fahrzeugkonzept sind dabei vor allem folgende Punkte von Bedeutung:

- die Bauart des Motors (V-, Reihen-, Boxer-Motor),
- die Aggregateanordnung (Längs- oder Quereinbau; Front-, Heck- oder Mittelmotor; jeweils konventionell oder unterflur),

- das Antriebskonzept (Front-, Heck- oder Allradantrieb),
- das Antriebsstrangkonzept (Anordnung Getriebe, Zwischengetriebe, Achsgetriebe und Gelenkwellen).

Die Anzahl der hier aufgezeigten Alternativen verdeutlicht die theoretisch große Anzahl möglicher Ausprägungen. Verschiedene zusätzliche Anforderungen und Restriktionen schränken diese jedoch für den praktischen Einsatz ein.

#### 4.2.2.6.1 Bauart des Motors

Für die Fahrzeugkonzeption sind die folgenden Punkte des Motorkonzeptes (vgl. ► Kap. 5 – Motor) von maßgeblicher Bedeutung:

- die Hauptabmessungen des Grundmotors,
- die Lage der Kurbelwelle (in Abhängigkeit von Kupplungs- und Wandlerdurchmesser),
- die Abmessungen von Ölwanne, Sauganlage, Nebenaggregaten, Abgasanlage und (sofern vorhanden) Abgasturboladern oder Kompressoren.
- Die Schwingungseigenschaften des Motors sind für das Konzept der Aggregatelagerung, die Ausführung der Motorlager und damit auch für die Notwendigkeit und Ausführung von Fahrschemeln maßgeblich, vgl. ► Abschn. 3.4.

Die Hauptabmessungen des Grundmotors sind relativ leicht aus der Grundkonfiguration (Hub, Bohrung, Anzahl und Lage Zylinder, Lage und Ausführung des Steuertriebs und des Nebenaggregatetriebes) ableitbar.

Die Abmessungen der weiteren Komponenten geschieht sehr häufig fahrzeugspezifisch, d. h. ein Grundmotor wird fahrzeugspezifisch angepasst. Für die Gestaltung der „Schnittstelle" Antrieb/Fahrzeug ist daher eine intensive Abstimmung zwischen Gesamtfahrzeugkonzeption und Motorkonzeption erforderlich.

Eine Besonderheit in Bezug auf die Kompaktheit stellen die VR- und V-VR- (W-) Motoren dar. Die V6- und V8-Motoren zeichnen sich durch eine kurze Bauweise aus. Die Boxer-Motoren zeichnen sich durch eine geringe Bauhöhe, den damit konkurrenzlos tiefen Schwerpunkt und die ausgewogenen Schwingungseigenschaften aus. Details zu den Bauformen und deren Spezifika finden sich in [27].

#### 4.2.2.6.2 Aggregateanordnung

Die *Aggregateanordnung* kann in folgenden Parametern variiert werden:

- Längs- oder Quereinbau des Motors,
- Front-, Heck- oder Mittelmotor,
- Konventionelle Anordnung oder Unterfluranordnung.

Wegen der besonderen Anforderungen (in der Regel eine geringe Fahrzeuglänge) haben sich für die *Unterfluranordnung* bisher nur quereingebaute Motoren durchsetzen können. Die *Mittelmotorausführung* ist bei Unterflurkonzepten bisher ebenfalls kaum in der Serie eingesetzt worden.

Die einzelnen Ausführungen weisen spezifische Restriktionen bezüglich der zu verwendenden Motoren auf. Die aus fahrzeugkonzeptioneller Sicht wesentlichen Restriktionen unterscheiden sich je nach Einbauort und -lage des Aggregats. ◘ Tab. 4.5 gibt einen Überblick über mögliche Aggregatanordnungen, die jeweiligen Restriktionen und verwendbaren Aggregate.

Für die Frontmotoranordnung ist noch ein genereller Vorteil herauszuheben. Bei vielen Frontmotoranordnungen stützt sich der Motor beim Frontalcrash frühzeitig ab und muss nicht mit verzögert werden.

Ein genereller Vorteil von Heck- und Mittelmotorkonzepten ist hingegen, dass die freie Crashlänge im Vorderwagen nicht durch den Motor eingeschränkt ist. Bei Unterbringung des Tankes im Vorderwagen entstehen hier ggf. andere Restriktionen.

#### 4.2.2.6.3 Antriebskonzept und Triebstrang

Für die Kombinationen von Antriebsachsen und Aggregateanordnung sind unterschiedliche *Triebstrangkonzepte* realisierbar, ◘ Tab. 4.6 (Details in ► Abschn. 5.4 für den Triebstrang und ► Abschn. 5.5 für Allradkonzepte).

Ohne den detaillierten Darstellungen vorzugreifen, sollen am Beispiel der Frontmotoranordnungen mögliche *Antriebsstrangkonzepte* näher angesprochen werden, da sie auf die Gesamtfahrzeuggestaltung einen starken Einfluss haben.

**Tabelle 4.5** Vorteile und Restriktionen unterschiedlicher Aggregatanordnungen

| Aggregate-anordnung | Konventio-nell/Unter-flur | Vorteile | Restriktionen/Nachteile | Geeignete Motorbauarten | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | R3 | R4 | R5 | R6 | VR6 | V6 | V8 | V10 | V12 | W12 | B4 | B6 |
|  | Front quer konv. | – geringe Vorderwagenlänge<br>– kompakte Abmessungen<br>– kurze Leitungen<br>– Abbau Crashenergie | – Breite zwischen Längsträgern<br>– Motorbreite (Blockbildung Crash)<br>– kleine Lagerbasis | ● | ● | ○ | ○ | ● | ● | ○ | | | | | |
| | Front quer Unterflur | – geringe Vorderwagenlänge<br>– Aggregat kann bei Frontcrash unter Insassen abtauchen | – Breite zwischen Längsträgern<br>– Motorhöhe/Neigungsfähigkeit | ● | ● | ○ | | | | | | | | | |
|  | Front längs konv. | – Lange Motoren möglich<br>– für fast alle Motoren realisierbar | – Vorderwagenlänge<br>– Breite des Tunnels für Getriebe | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ |
|  | Mitte quer konv. | – geringe Länge des Motor-raumes möglich, kompakte Abmessungen<br>– sehr gute Achslastverteilung<br>– geringes Trägheitsmoment um die Hochachse (dadurch gute Reaktion auf Lenkwinkelsprünge) | – Breite zwischen den Trägern hinten<br>– kein Allradantrieb möglich<br>– nur für 2-Sitzer sinnvoll<br>– Aufwand Leitungsverlegung | ● | ● | ● | ○ | ○ | ○ | | | | | | |
|  | Mitte längs konv. | – Ausgewogene Achslast-verteilung möglich<br>– geringes Trägheitsmoment um die Hochachse (dadurch gute Reaktion auf Lenkwinkelsprünge)<br>– Rennsporttauglichkeit | – Blocklänge Motor und Getriebe bei Heckcrash<br>– Breite zwischen den Trägern<br>– Allradantrieb nur mit R und V-Motoren mit sehr großem Aufwand realisierbar<br>– nur für 2-Sitzer (Roadster) sinnvoll<br>– Aufwand Leitungsverlegung | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

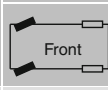
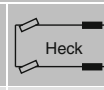
geeignet = gefüllter Kreis; in Ausnahmen geeignet = ungefüllter Kreis; nicht geeignet = leer (kein Symbol)

**Tabelle 4.5** (Fortsetzung)

| Aggregate-anordnung | Konventio-nell/Unter-flur | Vorteile | Restriktionen/Nachteile | Geeignete Motorbauarten | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | R3 | R4 | R5 | R6 | VR6 | V6 | V8 | V10 | V12 | W12 | B4 | B6 |
|  | Heck quer konv. | – gute Traktion<br>– Traktion weitgehend unabhängig von Zuladung | – Breite zwischen Trägern hinten<br>– Motorbreite Heckcrash<br>– Zugänglichkeit Stauraum/ Innenraum<br>– Aufwand Leitungsverlegung | ● | ● | ○ | ○ | ● | ● | | | | | | |
| | Heck quer Unterflur | – Kompakter Vorderwagen<br>– Aggregat kann bei Heckcrash unter Insassen abtauchen<br>– Kompaktes Gesamtfahrzeug | – Breite zwischen Längsträgern<br>– Motorhöhe/Neigungsfähigkeit<br>– Gepäckraum/Innenraumhöhe<br>– Aufwand Leitungsverlegung | ● | ● | ○ | ○ | | | | | | | | |
|  | Heck längs konv. | – sehr gute Traktion<br>– optimale Gewichtsverteilung beim Bremsen<br>– sehr flach bauende Konzepte möglich<br>– auch in konventioneller Anordnung ist Raum über dem Motor nutzbar (Ablage Verdeck, Gepäckraum)<br>– Crashlänge Vorderwagen | – Baulänge Motor- und Getriebe<br>– Länge Überhang Hinten<br>– Radstandslänge<br>– Aufwand Leitungsverlegung<br>– Achslastverteilung | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ○ | | | ○ | ● | ● |

geeignet = gefüllter Kreis; in Ausnahmen geeignet = ungefüllter Kreis; nicht geeignet = leer (kein Symbol)

**Tabelle 4.6** Antriebsachsen und übliche Aggregateanordnungen

| Aggregateanordnung | Antriebsachse | | |
|---|---|---|---|
| |  |  |  |
| Front-Quer  | üblich | keine Anwendung | bei großer Motorleistung |
| Front-Längs  | üblich | Standard | bei großer Motorleistung |
| Mitte-Quer  | keine Anwendung | üblich | keine Anwendung |
| Mitte-Längs  | keine Anwendung | üblich | mit sehr großem Aufwand möglich |
| Heck-Quer  | keine Anwendung | üblich | keine Anwendung |
| Heck-Längs  | keine Anwendung | üblich | bei hohen Performance- und Leistungsanforderungen |

#### 4.2.2.6.4 Antriebsstrangkonzepte

Tab. 4.7 zeigt sämtliche gängigen Antriebsstrangkonzepte für Frontmotoranordnungen. Die wesentlichen, für das Gesamtfahrzeug relevanten Gestaltungsmöglichkeiten liegen in der Anordnung des Motors und der unterschiedlichen Lagen von Getriebe, Differential und Gelenkwellen.

**Frontlängsmotor mit Frontantrieb** Der längs eingebaute Motor in Kombination mit Frontantrieb hat als wesentliche Restriktionen den Abstand zwischen Getriebeabtrieb und Motor-/Getriebeflansch sowie die Beugewinkel der Gelenkwellen, wodurch ein langer Übergang vorne entsteht.

**Frontquermotor** Der Hauptvorteil der Frontquermotor-Antriebsstrangkonzepte liegt im Potential zur Realisierung eines sehr kurzen Vorderwagens und somit insgesamt sehr kompakter Fahrzeugabmessungen [28]. Daher kommt dieses Konzept in den unteren Fahrzeugklassen fast ausschließlich zum Einsatz.

**Standardantrieb** Der Standardantrieb bietet die Möglichkeit, die Vorderachse weit vorne anzuordnen. Zudem ist dieses Antriebsstrangkonzept geeignet, eine sog. „Frontmittelmotoranordnung" zu realisieren, indem der Antrieb weit in den Tunnel ragt. Die große Tunnelbreite ist dabei durch einen weiter außen liegenden R-Punkt, also ein größeres W20-1 Maß zu kompensieren. Erfolgt diese Kompensation nicht, entstehen Nachteile einer nicht zur Körpermitte symmetrischen Anordnung der Pedale.

**Transaxle** Der Transaxle-Antriebsstrang ist geeignet, kurze Vorderwagenlängen und eine ausgewogene Achslastverteilung mit guter Traktion zu realisieren. Dieses Konzept ist jedoch nicht sinnvoll mit einem Allradantrieb kombinierbar. Der Transaxle-Antriebsstrang hat darüber hinaus starken Einfluss auf das Hinterwagenkonzept, insbesondere in Bezug auf die Anordnung des Kraftstofftanks.

**Allradantrieb** Bei den *Allradkonzepten* besteht der Unterschied vor allem darin, dass beim aus dem

**Tabelle 4.7** Antriebsstrangkonzepte am Beispiel Frontmotor

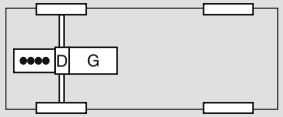
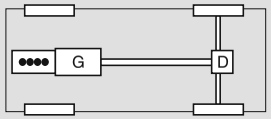
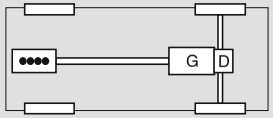
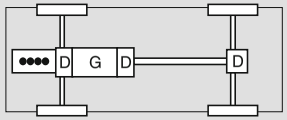
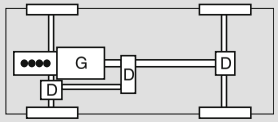
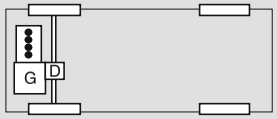
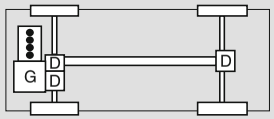
| Antriebsart | Prinzipdarstellung | Vorteile | Nachteile |
|---|---|---|---|
| Längsmotor + Frontantrieb | Getriebeintegriertes Vorderachsengetriebe   | – viele Motorvarianten realisierbar<br>– Allradantrieb leicht ableitbar | – langer Vorderwagen<br>– Achslast auf Vorderachse sehr hoch<br>– tendenziell großer Überhang vorn<br>– breiter Tunnel vorn |
| Längsmotor + Heckantrieb | Standardantrieb   | – bessere Achslastverteilung und Traktion als beim Frontantrieb<br>– kurzer Vorderwagen<br>– Sehr viele Motorvarianten realisierbar | – höheres Gewicht als Frontantrieb<br>– höherer Tunnel erforderlich<br>– Bauraumanspruch Differential/Reserverad führt zu Zielkonflikt in der Unterbringung |
| | Transaxle – Anordnung   | – sehr kurzer und flacher Vorderwagen möglich<br>– leichte Kardanwelle<br>– günstige Achslastverteilung und gute Traktion | – höherer Boden hinten mit Einschränkung Kofferraum- bzw. Sitzplatzangebot<br>– lange Schaltbetätigung<br>– keine Allradtauglichkeit |

**Tabelle 4.7** (Fortsetzung)

| Antriebsart | Prinzipdarstellung | Vorteile | Nachteile |
|---|---|---|---|
| Längsmotor + Allradantrieb | Getriebeintegriertes Vorderachsendifferential   | – Zentraldifferential und Vorderachsdifferential können mit dem Getriebe in einen Block zusammengefasst werden<br>– kostengünstig<br>– gute Achslastverteilung<br>– gute Traktion<br>– tiefe Motorlage möglich | – langer Vorderwagen<br>– großer Überhang |
| | Aus Standardantrieb abgeleitetes Konzept   | – Nachträglich aus bestehendem Standardantrieb ableitbar<br>– kurzer Vorderwagen<br>– sehr günstige Achslastverteilung<br>– gute Traktion | – relativ aufwendig<br>– Bauraumproblematik im Vorderwagen<br>– sehr breiter Tunnel erforderlich<br>– hohe Motorlage wegen Abtrieb erforderlich |
| Quermotor + Frontantrieb | Motor in Reihe mit Getriebe, Differential seitlich   | – kompakter Vorderwagen<br>– gute Platzverhältnisse im Fahrgastraum vorne (Kein Tunnel für Getriebe)<br>– relativ günstige Herstellung<br>– sehr gute Vormontagemöglichkeiten | – Achslast auf Vorderachse sehr hoch<br>– wegen eingeschränktem Bauraum nur relativ kurze Motoren möglich<br>– Leistungs-/Drehmomentgrenze |
| Quermotor + Allradantrieb | Motor in Reihe mit Getriebe, Differentiale seitlich   | – gute Auchslastverteilung<br>– gute Traktion | – wegen eingeschränktem Bauraum nur relativ kurze Motoren möglich |

Standardantrieb abgeleiteten Konzept die Bauraumrestriktionen im Vorderwagen in Bezug auf Verteilergetriebe, Achsgetriebe und Gelenkwellen (unterhalb bzw. „durch" den Motor zu führen) größer sind.

Beim aus dem Frontmotor abgeleiteten Konzept verbleibt der Vorderwagen unverändert (mit allen Vor- und Nachteilen), im Hinterwagen sind hingegen im Bereich Tank, Kofferraum hinten sowie Hinterachse zusätzliche Bauraumansprüche für Kardanwelle, Differential und Gelenkwellen zu berücksichtigen.

Der aus dem Frontquermotor abgeleitete Allradantrieb ist vor allem bei sehr hohen Motorisierungen aus Traktionsgründen erforderlich. Ein Frontquermotor mit Heckantrieb ist nicht sinnvoll.

#### 4.2.2.7 Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Aufgrund wachsender Anforderungen hinsichtlich der Reduzierung von Schadstoffemissionen, insbesondere in Ballungszentren, ist eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs zu beobachten. Ohne den Ausführungen in ► Abschn. 4.3 (Neuartige Antriebe) vorgreifen zu wollen, wird im Folgenden der packageseitige Einfluss von Hybridkonzepten und Elektrofahrzeugen auf das Fahrzeugkonzept aufgezeigt.

##### 4.2.2.7.1 Hybridkonzepte

Neben den konventionellen Antriebsstrangkonzepten stellen Hybridkonzepte neue Herausforderungen an die Fahrzeugkonzeption. Die Hybridisierung wird dabei in allen Fahrzeugklassen eine Rolle spielen und ist zusätzlich zu konventionellen Antrieben im Konzept zu berücksichtigen. Unter Hybridfahrzeugen wird die Kombination eines E-Antriebs mit einer konventionellen Verbrennungskraftmaschine verstanden. Grundsätzlich sind vier Stufen von Hybridkonzepten zu unterscheiden:

- Micro-Hybrid-Konzepte (Start-Stopp-Systeme, Startergenerator-Konzepte),
- Mildhybrid (nur Rekuperation und Boost-Funktionen, kein elektrisches Fahren möglich),
- Full-Hybrid (rein elektrisches Fahren mit kurzen Reichweiten möglich),
- Plug-In Hybride (rein elektrisches Fahren mit nennenswerten Reichweiten ab ca. 10 km bis zu 60 km möglich, externe Ladeschnittstelle für den Speicher fahrzeugseitig vorhanden).

Diese Systeme unterscheiden sich hinsichtlich ihres Einflusses auf das Fahrzeugkonzept grundlegend. Micro-Hybird-Konzepte sind in der Regel in das bestehende Package zu integrieren. Als Energiespeicher dient in der Regel die vorhandene 12 V-Batterie. Die größte Herausforderung stellt die Integration von Full-Hybriden und Plug-in Hybriden dar. Für ein Fullhybrid-Konzept sind folgende Komponenten im Konzept zu berücksichtigen:

- E-Maschine (eine oder mehrere),
- Energiespeicher (in der Regel Batterien),
- Leistungselekronik, diverse Steuergeräte,
- Hochvoltleitungen,
- Kupplungen, Kupplungsaktuatorik,
- Kühlsysteme für die Hybrid-Komponenten inkl. zusätzlicher Kühlmittelleitungen.

Für den Plug-In ist ein nochmals deutlich größerer Energiespeicher und zusätzlich eine Ladesteckdose und ein Ladegerät für das Nachladen am Stromnetz in das Fahrzeug zu integrieren. Zudem ist bei den Full-Hybriden und bei den Plug-In Hybridfahrzeugen die Elektrifizierung aller Nebenaggregate (Lenkung, Klimatisierung etc.) erforderlich, um diese auch bei rein elektrischer Fahrt verfügbar zu haben. ◘ Abb. 4.20 zeigt die Integration der Hybridkomponenten im Porsche Cayenne S hybrid.

Bei der Anordnung der E-Maschine und deren Einbindung in den Triebstrang unterscheidet man zwischen leistungsverzweigten (die E-Maschine ist immer in den Kraftfluss eingebunden) und parallelen Hybridkonzepten. Bei den Parallelkonzepten wird die E-Maschine parallel zum Verbrennungsmotor geschaltet und durch Momentenaddition wirksam.

Hinsichtlich der Fahrzeugkonzepte ist zu unterscheiden, ob das Fahrzeugkonzept um den Hybridantrieb herum entwickelt wurde (z. B. Toyota Prius) [32], oder eine nachtägliche Integration in ein bestehendes Konzept erfolgt ist (z. B. Lexus RX 400h) [33]. Komponentenseitig ist die zunehmende Integration der Hybridkomponenten in konventio-

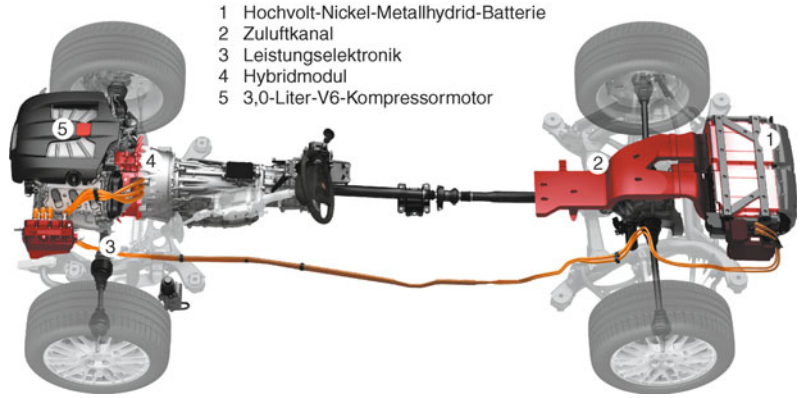



**Abb. 4.20** Hybridkomponenten des Porsche Cayenne S hybrid [35]

nelle Module zu erwarten (beispielsweise der E-Maschine in das Hauptgetriebe).

Die Hybridtechnologie erlebt derzeit noch schnelle Innovationssprünge, insbesondere im Bereich Energiespeicher. In den kommenden Jahren werden diese Fortschritte zusätzliche Freiheitsgrade im Fahrzeugkonzept ermöglichen.

#### 4.2.2.7.2 Elektrofahrzeuge

Unter Elektrofahrzeugen werden hier Fahrzeuge verstanden, die ihre Antriebsenergie alleine aus einer mitgeführten Traktionsbatterie beziehen und über Elektromotoren angetrieben werden. Aus dem Wegfall der konventionellen Antriebskomponenten ergibt sich ein enormes Potenzial für völlig neue Packagekonzepte und Architekturen. Zwar gilt die Unterbringung der aufgrund im Vergleich zu fossilen Energieträgern deutlich geringeren Energiedichte relativ großen und schweren Traktionsbatterie als wesentliche Herausforderung. Jedoch ist eine im Rahmen gewisser Randbedingungen flexible Gestaltung des Batteriepacks möglich. Darüber hinaus sind die elektrischen Antriebsmotoren deutlich kleiner als Verbrennungsmotoren und erfordern aufgrund der bedarfsgerechten Ansteuerung in der Regel nur einfache und kleine Getriebe. Daraus ergibt sich eine höhere Flexibilität bezüglich der Innenraummaßkonzeption und der Aggregateanordnung. Im Gegensatz zu einem zentralen Verbrennungsmotor lassen sich Elektromotoren radnah unterbringen oder sogar in die Radnabe integrieren. Radnabenmotoren sind packageseitig sehr interessant, jedoch technisch noch nicht ausgereift, teuer und vergrößern die ungefederten Massen. Im Wesentlichen wird eine breitere Marktdurchdringung reiner Elektrofahrzeuge durch die geringe Reichweite die hohen Batteriekosten und die noch unzureichenden Ladeinfrastruktur gebremst.

#### 4.2.2.8 Fahrzeuggewicht

Das Fahrzeuggewicht ist bei der Gestaltung von Fahrzeugkonzepten eine der wesentlichen Zielgrößen. Das Fahrzeuggewicht wird wesentlich durch die folgenden Parameter beeinflusst:

- Fahrzeugklasse und Hauptabmessungen,
- Aufbauausprägung und das Konzeptsegment,
- Grundarchitektur des Fahrzeugs,
- Aggregate- und Antriebsstrangkonzept (inkl. Hybridisierung),
- Werkstoffkonzept.

Während die ersten beiden Parameter durch die Fahrzeugpositionierung weitgehend vorgegeben sind, beeinflussen die anderen das Fahrzeuggewicht, dessen Zielgröße schon zu Beginn der Produktdefinition festgelegt wird. Im Zielbildungsprozess zum Gewicht werden in der frühen Definitionsphase alternative Konzeptansätze bewertet und gegenübergestellt [51]. Mit der Konzeptfestlegung wird das Zielgewicht unter Berücksichtigung der zukünftigen Produktsubstanz definiert. Während des gesamten Entwicklungsprozesses treten häufig nach Detailentscheidungen

Gewichtssteigerungen auf, die durch gezielte Maßnahmen zu korrigieren oder zu akzeptieren sind.

### 4.2.3 Einflussfaktoren und Gestaltungsfelder des Package

Hauptzielkonflikte und Gestaltungsfelder des Fahrzeugpackages sind:

- Berücksichtigung gesetzlicher Anforderungen,
- Anforderungen der Fahrzeugsicherheit: Crashlängen, Fußgängerschutz, Seitenaufprall, Überrollschutz (insbesondere bei offenen Fahrzeugen),
- Ergonomie und „Bauraumanspruch" der Insassen,
- Bauraumansprüche von Motor und Antriebsstrang und Berücksichtigung des Wärmemanagements,
- Berücksichtigung von Radhüllkurven und gesetzlichen Anforderungen an die Radabdeckung,
- Volumina, Variabilität und Zugänglichkeit von Stauräumen,
- Anordnung von Beleuchtungseinrichtungen,
- Anforderungen der Fahrzeugaerodynamik: Grundkörper und Zusatzmaßnahmen wie beispielsweise Spoiler oder Verkleidungen,
- Anforderungen des Designs an die Fahrzeuggrundform,
- Bauraumanspruch von Systemen, Modulen und Komponenten.

Zudem können durch ein Package die Unterhaltskosten positiv beeinflusst werden, beispielsweise durch die Vermeidung der Anordnung von Bauteilen in Bereichen, die bei Einstufungstests der Versicherungswirtschaft und bei Unfällen mit geringen Geschwindigkeiten („Parkplatzrempler") belastet werden.

#### 4.2.3.1 Gesetze und Vorschriften

Einen detaillierten Überblick relevanter Vorschriften und Gesetze gibt ► Abschn. 2.2. Viele dieser Vorschriften stellen für die Packageerarbeitung wesentliche Anforderungen dar.

Problematisch ist die Tatsache, dass die zu berücksichtigen Gesetze, Standards und Regelungen nicht international vereinheitlicht sind. Wesentliches Ziel der Auslegung ist ein Package, das länderspezifische Lösungen vermeidet.

Bei den packagerelevanten Gesetzen sind zweierlei Arten zu unterscheiden. Zum einen Gesetze, die bestimmte Maße direkt vorgeben. Zum anderen Gesetze, die indirekt (Funktionsvorschriften) berücksichtigt werden müssen.

Detaillierte gesetzliche Anforderungen werden insbesondere gestellt zu:

- Stoßfängerlage, Anbau und Lage der Leuchten,
- Wischfelder, Sichtwinkel,
- Innenraummaße, z. B. Pedalerie, Gurtfelder in Abhängigkeit vom R-Punkt,
- Kennzeichenlage.

Den weitaus größten Teil der gesetzlich bedingten Anforderungen beeinflussen das Package indirekt, indem entsprechende Vorschriften (z. B. zur Fahrzeugsicherheit) zu berücksichtigen sind.

#### 4.2.3.2 Innenraummaßkonzeption

Die Auslegung eines neuen Fahrzeugs beginnt in der Regel von innen nach außen. Ausnahmen entstehen dann, wenn auf Basis eines bestehenden Fahrzeugs Anpassungen oder Derivatentwicklungen vorgenommen werden.

Der „Bauraumanspruch" der Insassen stellt die zentrale Anforderung an das Fahrzeug dar. So stark sich Fahrzeugkonzepte auch unterscheiden, so sind diese doch für die gleichen Menschen (*5 % Frau, 95 % Mann* als gängige Mindestanforderung) auszulegen, vgl. ► Abschn. 6.4.1. Dies wird auch bei der Analyse wesentlicher Innenraumabmessungen deutlich.

Die Auswirkung der Angabe wesentlicher Interieurmaße in Bezug auf den Sitzreferenzpunkt soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Die Datenbasis für alle folgenden Aussagen besteht aus 34 repräsentativen Fahrzeugen aus den in ► Abschn. 4.2.2.1 definierten Klassen.

Trägt man den Kopfraum vorne (H61-1) über dem Radstand (L101) als Bezugsgröße für die Fahrzeugklasse auf, so wird deutlich, dass anhand dieser Daten kaum Differenzierungspotential zu finden ist, ◘ Abb. 4.21.

Es wird deutlich, dass anhand der auf den R-Punkt bezogenen Daten keine Abhängigkeit zwi-

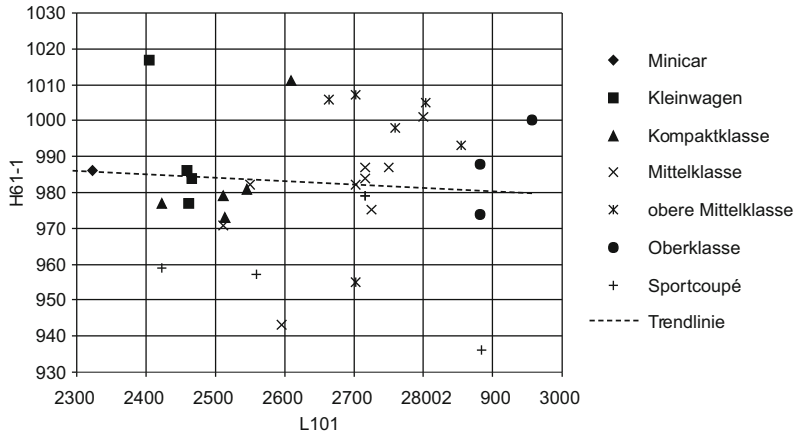



**Abb. 4.21** Kopfraum vorne in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse

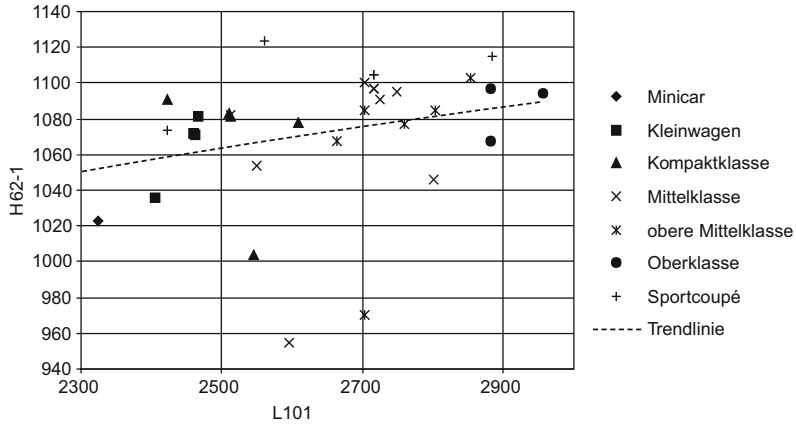



**Abb. 4.22** Kopfraum vorne für Sitzposition „hinten unten" in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse

schen Radstand und Kopfraum festgestellt werden kann. Das Streuband hat eine Breite von ca. 50 mm, das beste Fahrzeug dieser Darstellung ist ein Minicar. Die Fahrzeuge der Oberklasse haben durchschnittliche Werte.

Die gleiche Darstellung mit auf die Sitzposition „hinten unten" normierten Daten zeigt Abb. 4.22. Erst mit dieser Normierung auf einen real messbaren Punkt wird die erwartete Abhängigkeit zwischen Kopfraum und Fahrzeugklasse deutlich.

Dieses einfache Beispiel verdeutlicht, dass der fahrzeugspezifische, unter gewissen Restriktionen flexibel definierte R-Punkt für einen Konzeptvergleich eher ungeeignet ist.

Für konstruktive Vergleichsuntersuchungen ist es daher in der Regel sinnvoll, sich auf den Bezugspunkt „hinten unten" zu beziehen, was für alle folgenden Diagramme durch den Zusatz „hu" verdeutlicht wird.

Die Gestaltung des *Fahrerplatzes* geschieht im Wesentlichen durch eine Variation der folgenden Parameter:

- L53-1: R-Punkt bis Fersenpunkt (horizontal),
- H30-1: R-Punkt bis Fersenebene (vertikal).

Wie Abb. 4.23 verdeutlicht, kann durch eine um 10 mm höhere Sitzposition eine Verkürzung des Bauraumbedarfs für den Fahrer um ca. 40 mm erreicht werden. Die Verkürzung kann direkt in eine

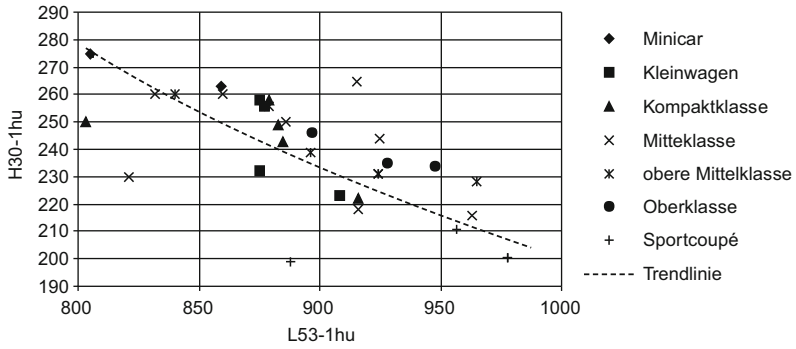



**Abb. 4.23** Abhängigkeit zwischen L53-1hu und H30-1hu

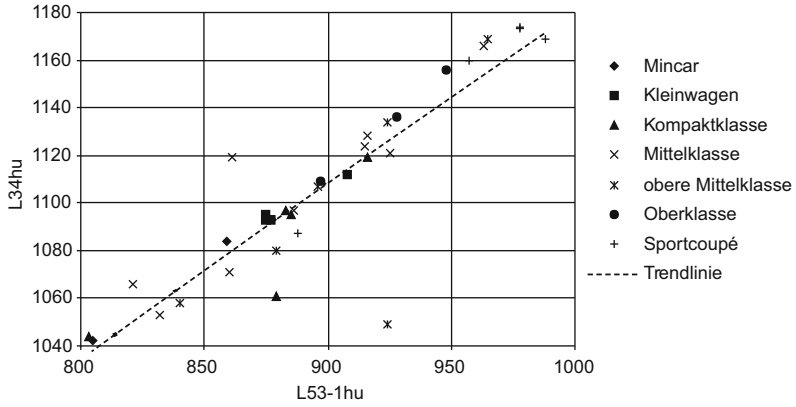



**Abb. 4.24** Abhängigkeit von L53-1hu und L34-1hu

Verkürzung des Fahrzeugs umgesetzt werden, vgl. hierzu auch [30]. Diese Abhängigkeit wird bei verschiedenen Mini- und Kompaktfahrzeugen und bei Vans genutzt, um durch eine hohe Sitzposition in Verbindung mit einer großen Fahrzeughöhe eine relativ geringe Fahrzeuglänge zu erzielen. Im Umkehrschluss bedeutet diese Abhängigkeit, dass sehr tiefe Sitzpositionen mit einer großen Innenraumlänge „erkauft" werden.

Die Darstellung der Abhängigkeit zwischen L53-1hu und L34-1hu (Beinraum) verdeutlicht, dass eine Verkürzung des L53-1hu Maßes um 10 mm zu einer Reduzierung des Beinraumes in gleicher Höhe führt, Abb. 4.24.

Eine hohe Sitzposition führt somit zu einem reduzierten Beinraum und einer Sitzposition mit stärker angewinkelten Beinen.

Die Abhängigkeiten für die hintere Sitzreihe sind für die Maße H61-2, L50-2, L51-2 und das korrespondierende Höhenmaß (H30-2) ähnlich.

#### 4.2.3.3 Konzeptbeeinflussende Maßketten

In Abhängigkeit vom gewählten Grundkonzept stellen sich bei der Erarbeitung der *Maßkonzeption* unterschiedliche Maßketten als wesentlich heraus. Es ist im Rahmen dieses Kapitels nicht möglich, für alle Grundkonzepte (Antriebsanordnung, Aufbauform, Grundform) die konzeptbeeinflussenden Maßketten aufzuzeigen, für Details vgl. z. B. [29]. Anhand ausgewählter Beispiele sollen aber wesentliche Maßketten in Fahrzeuglängsrichtung ($x$-Richtung), Fahrzeughöhe ($z$-Richtung) und Fahrzeugbreite ($y$-Richtung) aufgezeigt werden.

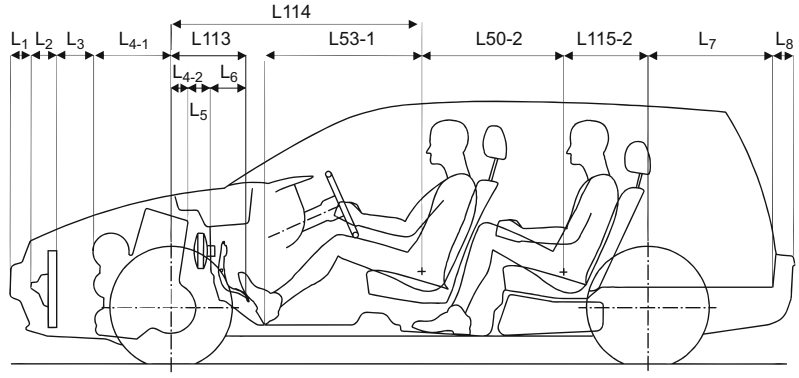



**Abb. 4.25** Maßkette in $x$-Richtung

#### 4.2.3.3.1 Die Fahrzeuglänge definierende Maßketten

Die *Fahrzeuglänge* wird für die wesentlichen Einzellängen am Beispiel eines konventionellen Frontquermotorkonzeptes mit zwei Sitzreihen aufgezeigt, Abb. 4.25.

Der Bereich $L_1$ besteht aus Bugteil, Querträger und ggf. Pralltöpfen und ist funktional zum einen so auszulegen, dass für Unfälle mit sehr geringen Geschwindigkeiten (bis 6 km/h) Deformationen reversibel sind und bis ca. 15 km/h eine lokale Deformation entsteht, die insbesondere eine Beschädigung der Längsträger und der Einbauten im Bereich $L_2$ verhindert. Im Bereich $L_2$ befinden sich Komponenten wie Kühler, Scheinwerfer, Scheinwerferreinigungsanlage. Die Länge $L_3$ wird als *freie Crashlänge* bezeichnet. Je nach Vorderwagenkonzept und Herstellerstandards sind hier zwischen 500–700 mm vorzuhalten. Die freie Crashlänge befindet sich in der Praxis sowohl vor als auch hinter dem Aggregat. $L_3$ ist jedoch nicht als freie Länge sichtbar, wie immer dichter gepackte Motorräume verdeutlichen. Vielmehr ist bei Verschiebung aller dreidimensionaler Komponenten in $x$-Richtung „auf Block" ein der „freien Crashlänge" entsprechender Verschiebeweg zu erzielen. Damit ist der zweite wesentliche Begriff definiert, die sogenannte „*Blockbildung*". Am Beispiel des Frontquermotors ist das wesentliche Blockmaß der Antrieb mit Nebentrieb und allen Anbauten (Länge $L_4$).

Wesentlicher Gestaltungsspielraum ist über den Abstand zwischen Mitte Vorderrad und Fußballenpunkt (L113) gegeben.

Das Maß L113 wird zum einen bestimmt durch die Ausdehnung des Radhauses und die konstruktive Anbindung des Längsträgers an den Schweller zur Realisierung eines Kraftflusses in Schweller und Fahrzeugboden. Eine weitere, zu berücksichtigende Maßkette ist L4-2 (Blockbildung) und L5 (Kombination aus Einbauten, z. B. Bremskraftverstärker und freier Crashlänge) vor der Spritzwand und L6, dem für das Fußhebelwerk erforderlichen Maß. Ziel einer jeden Vorderwagenauslegung muss sein, keinerlei Fußraumintrusion zuzulassen, d. h. eine Verkürzung des Maßes L6 im Crash zu vermeiden.

Die Darstellung der Abhängigkeiten am L113-Maß verdeutlicht, dass hier der Hauptgestaltungsspielraum zwischen $x$- und $z$-Ausdehnung liegt, Abb. 4.26.

Es wird deutlich, dass durch einen in $z$-Richtung um 10 mm stärker ausgeführten Boden der Fußballenpunkt um 10 mm weiter nach vorne verlegt werden kann. Die Anhebung des Bodens wirkt dabei auf beide kritischen Maßketten in Längsrichtung gleichermaßen.

Im Heckbereich wird das Maß L115-2 wesentlich durch das Radhaus hinten sowie durch Tank- und Hinterachsauslegung beeinflusst.

Das Maß L7 wird bestimmt durch Einbauten wie Hinterachse, Reserverad sowie freie Crashlänge für den Heckcrash.

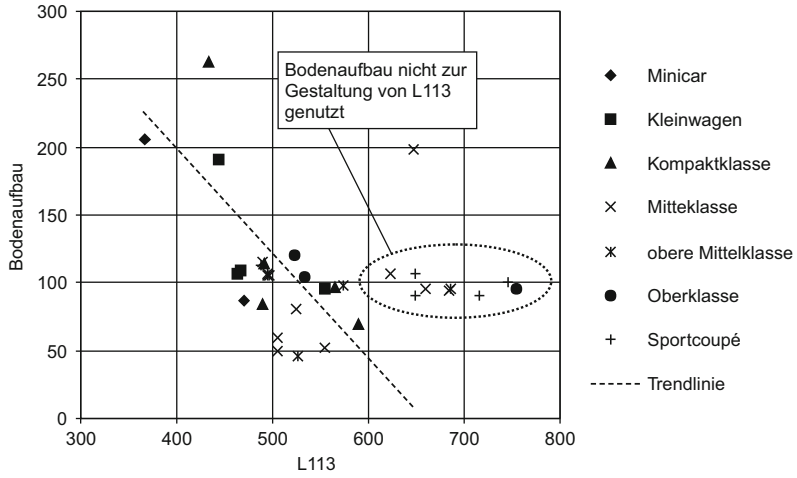



**Abb. 4.26** Abhängigkeit zwischen Abstand Fußballenpunkt zu Mitte Vorderrad und Bodendicke

L8 im Heck wird durch gleiche Inhalte wie L1 im Vorderwagen bestimmt.

#### 4.2.3.3.2 Die Fahrzeughöhe definierende Maßketten

Mit Abb. 4.23 und Abb. 4.26 sind die wesentlichen Abhängigkeiten zwischen Maßkonzeption in $x$- und $z$-Richtung aufgezeigt. Die *Fahrzeughöhe* ergibt sich damit aus der Summe der Maße Bodenfreiheit (H157), Bodenaufbau (H5-1–H30-1–H157), der Höhe R-Punkt über Fersenpunkt (H30-1), dem Kopfraum vorne (H61-1) und dem Dachaufbau. Diese Summe ist um 102 mm zu reduzieren, die sich aus der Definition des Maßes H61-1 ergeben (laut Messvorschrift der durchschnittliche Abstand R-Punkt zu tiefstem Punkt des Gesäßes). Das H61-1 Maß ist entsprechend der Messvorschrift in einem Winkel von 8° ermittelt und daher entsprechend auf die reine $z$-Komponente umzurechnen.

Für den Aufbau in $z$-Richtung ist das Trägerkonzept von maßgeblicher Bedeutung. Hier sind ab einer Bodenstärke von ca. 80 mm Konzepte möglich, bei denen die Passagiere „auf" den Längsträgern und auf dem Schweller sitzen (ebener Boden vorne). Dieses Konzept führt jedoch auf den hinteren Sitzreihen häufig zu sehr starken Beugewinkeln der Beine.

Bei dünnem Bodenaufbau erfolgt der Kraftfluss über die Schweller, ggf. den Tunnel und den Boden. Die Passagiere sitzen bei diesen Konzepten zwischen den Schwellern.

#### 4.2.3.3.3 Die Fahrzeugbreite definierende Maßketten

Die *Fahrzeugbreite* wird in vier wesentlichen $yz$-Ebenen definiert:

- Mitte Vorderachse: Die Breite wird durch die Radhüllkurven, die Radhäuser, die Längsträgerbreite, die Aggregatbreite und durch Montagebedingungen definiert. Bei Frontantrieb bestimmt zudem häufig der Beugewinkel der Gelenkwellen die Breite.
- Fußballenpunkt vorne: Die Breite in dieser Ebene wird durch Radhaus mit Trägerstruktur, Fußstütze Kupplungsfuß, Breite Pedalerie und Tunnelbreite (insbesondere bei Fahrzeugen mit Längsmotor) festgelegt.
- R-Punkt vorne: Das $y$-Maß wird durch die Breite der Tür (Seitencrashstrukturen und Airbags), die Schulterbreite der Insassen, und die Abstände zwischen den Insassen und zu den Türen (Komfortziele, Breite Getriebe und somit Breite Mittelkonsole) definiert.
- R-Punkt hinten: Die Breite wird durch die Lage des Radhauses hinten, den Türaufbau und die Komfortansprüche für zwei bzw. drei Sitzplätze bestimmt.

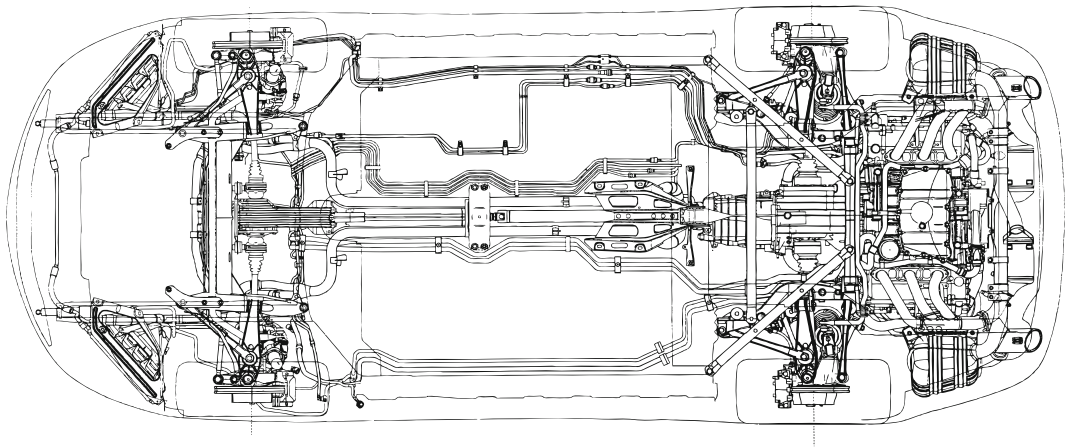


**Abb. 4.27** Porsche 911 Carrera 4 – Unterbodenpackage

### 4.2.3.4 Ausgewählte Aspekte des Packages

#### 4.2.3.4.1 Karosseriestruktur

Die mögliche Anordnung der Fahrzeugkomponenten, der Innenraumbereich sowie die Gesamtfahrzeugabmessungen werden durch den Raumbedarf der Karosserieträgerstruktur wesentlich beeinflusst.

Die aus den Auslegungen für Struktursteifigkeiten (Torsion, Biegung) und Crashverhalten resultierenden Trägerquerschnitte, -verläufe und Knotenausbildungen stellen beim Package aufgrund ihrer hohen Bedeutung einen wesentlichen „Eckpfeiler" dar.

Karosserieleichtbau (vgl. ▶ Kap. 6) stellt eine wesentliche Stellschraube zur Reduzierung des Gesamtfahrzeuggewichtes dar [29, 31]. Leichtbaustrukturen mit ihren tendenziell größeren Querschnitten sind daher ebenfalls konzeptbeeinflussend.

#### 4.2.3.4.2 Motorraum

Härter werdende Forderungen zur Reduzierung der Fahrzeugemissionen zum einen sowie die Effizienz und Wartungsarmut der Verbrennungsmotoren zum anderen führen zu immer komplexer aufgebauten Motorräumen [26]. Erhöhte Produktinhalte wie ABS-Systeme, Scheinwerferreinigungssysteme usw. erschweren die Verhältnisse zusätzlich.

Durch diese anspruchsvollen Packageverhältnisse sowie die vor allem bei Dieselmotoren vorhandenen Motorkapselungen zur Geräuschdämmung stellen sich wärmetechnische Aufgaben, bei denen system- und bauteilbedingte Grenztemperaturen zu beachten sind. Es ist daher die gezielte Belüftung und Durchströmung des Motorraums zu beachten.

#### 4.2.3.4.3 Unterboden

Antriebsstrang, Abgasanlage, Leitungen, Tank und Achsen bestimmen die Gestaltung des Unterbodens ◘ Abb. 4.27.

Das Abgasnachbehandlungssystem stellt einen wichtigen Teil der Abgasanlage dar, vgl. ▶ Abschn. 5.6. Es muss zur schnellstmöglichen Erreichung seiner Funktionstemperatur nach dem Kaltstart zumindest zu einem Teil möglichst motornah angeordnet werden. Eine in den Drosselverlusten minimierte Abgasrohrführung (bei V- und Boxermotoren in der Regel zweiflutig [43, 44]) und ein ausreichendes Schalldämpfervolumen ist zur Erreichung eines niedrigen Abgasgegendrucks und somit hoher Motoreffizienz und -leistung erforderlich. Den größten Raumbedarf im Tunnel- und Heckbereich haben die Schalldämpfer.

Zur Reduzierung des Luftwiderstands werden bei Fahrzeugen der höheren Preis- und Geschwindigkeitsklasse *Unterbodenverkleidungen* eingesetzt, die einen relativ glatten Unterboden rea-

lisieren. Nebeneffekte dieser Verkleidungen sind ein besserer Schutz der Leitungen, aber in der Regel etwas schlechtere thermische Verhältnisse.

#### 4.2.3.4.4 Tank, Leitungen und Reserverad

Die Anordnung des Kraftstofftanks wird durch erforderliche Crashschutzmaßnahmen geprägt. Charakteristisch ist die Platzierung im crashgeschützten Bereich vor und im Bereich der Hinterachse bei Frontmotorfahrzeugen, vgl. ► Abschn. 5.10.

Produktions- und sicherheitsrelevante Kriterien prägen das *Leitungspackage* der Benzin-, Hydraulik- und Elektrikleitungen. Eine crashsichere, kreuzungsfreie Verlegung muss durch sichere und verwechslungsfreie Schnellverbindungen eine hohe Produktionsqualität gewährleisten. Eine Minimierung der Verbindungsstellen kraftstoffführender Leitungen in Verbindung mit Werkstoffen, die eine geringstmögliche Kraftstoffdiffusion ermöglichen, ist zur Minimierung der Kohlenwasserstoffemissionen erforderlich. Aus gleichem Grund werden Aktivkohlebehälter (Volumen 1,5 l bis ca. 5 l je nach Tankvolumen und Betankungsentlüftungssystem) zur Zwischenspeicherung der im Fahrzeugbetrieb (z. B. Tankerwärmung, USA auch Betankungsvorgang) freiwerdenden Benzindämpfe eingesetzt.

Ein voluminöses Bauteil ist das Reserve- oder Notrad, das – bei Frontmotorfahrzeugen im Heckbereich angeordnet – einen Bruttoraumbedarf von ca. 50 l (schmales Hochdrucknotrad) bis etwa 80 l (vollwertiges Reserverad) hat. Aus diesem Grund wird es zunehmend durch platzsparende Reifenreparatur- und füllsysteme oder Reifen mit Notlaufeigenschaften (vgl. ► Abschn. 7.3) ersetzt.

### 4.2.3.5 Anforderungen aus Produktion und Kundendienst

#### 4.2.3.5.1 Produktion und Modularisierung

Eine durch ein rationelles Fertigungskonzept mit dem Ziel höchster Produktqualität und niedrigster Fertigungszeiten vorgegebene Montagereihenfolge beeinflusst den Fahrzeugentwurf, da z. B. Einbaurichtungen (Beispiel: Motoreinbau von oben, vorne oder unten) berücksichtigt werden müssen. Gleichbedeutend mit räumlich großen Komponenten wie die Antriebseinheit sind Einbaumodule, deren Montagemöglichkeit in das Fahrzeug erst über ihre Realisierbarkeit entscheidet.

Der Trend zu einer stärkeren *Modularisierung* des Fahrzeugs, d. h. Bildung größerer Vormontagebaugruppen, hat folgende Ursachen:

- Entlastung des Fahrzeugmontagebandes von arbeitsintensiven Umfängen,
- Vereinfachung von Montagevorgängen am Band,
- Variantenbildung und deren Vorprüfung außerhalb des Fahrzeugmontagebandes,
- Reduzierung von Taktverlustzeiten,
- Möglichkeit zum Out-Sourcing größerer Umfänge.

Beispiele großer Module sind Frontendmodul, Cockpitmodul, Vorder- und Hinterachse, Antriebsstrang (teilweise inkl. Achse(n)) und bei Cabriolets das Verdeckmodul.

#### 4.2.3.5.2 Kundendienst

Fahrzeugkonzeptbeeinflussende Forderungen sind in erster Linie maximal zulässige Zeitwerte zum Austausch von Fahrzeugkomponenten sowie eine Minimierung etwaiger Reparaturkosten. Diese Forderungen bedeuten während der Packageabsicherung Ein- und Ausbauuntersuchungen von Komponenten oder Baugruppen und die theoretische Ermittlung der Zeitbedarfe.

Zweck dieser Optimierung ist eine Reduzierung der Wartungs-, Reparatur- und Versicherungskosten für den Kunden und damit eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Produkts, vgl. ► Abschn. 11.6.

### 4.2.3.6 Einfluss von Plattform und Baukästen

Durch die Definition von *Plattformen* und *Baukästen* wird das Ziel verfolgt, viele unterschiedliche *Fahrzeugvarianten* (z. B. Limousine 2-, 4-türig, Kombi, Cabriolet) mit möglichst wenig variantenspezifischen Bauteilen zu entwickeln.

Unter einer Plattform wird dabei ein großer Teil der Bodengruppe (Trägerstrukturen einschließlich Stirnwand, im Hinterwagenbereich meist längen-, oft auch packagevariabel), der Antriebsstrang inkl.

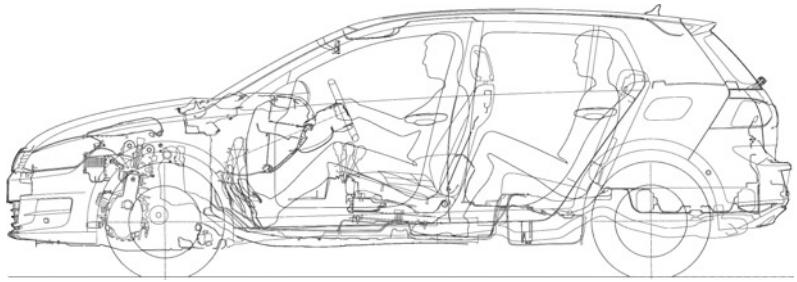


**Abb. 4.28** Volkswagen Golf (Frontmotor, Quereinbau, Frontantrieb)

Kühlermodul, die Achsen mit Lenkstrang, der Cockpitaufbau ohne Verkleidung und aus diesen Merkmalen zumeist ebenfalls die Sitzposition mindestens vorne verstanden.

Da auf einer gemeinsamen Plattform unterschiedliche Fahrzeugtypen dargestellt werden, ist der gesamte „Hut" und somit die für den Kunden sichtbare Form (sowohl Interieur wie Exterieur) *nicht* Inhalt einer Plattform.

Unter einem Baukasten versteht man im Fahrzeugbau Komponenten oder Baugruppen, die in verschiedenen Baureihen und Typen zur Verwendung kommen, wie beispielsweise Aggregate (Motoren, Getriebe), Achsteile oder ganze Achsen, Kühler, Nebenaggregate (Lichtmaschine, Klimaanlagenkompressoren) sowie Heizungs- und Klimaanlage.

Ziel von Plattformdefinition und Baukästen ist, mit einem (gesamtheitlich gesehen) Minimum an Entwicklungs- und Investitionskosten ein Maximum an verschiedenen Typen und Varianten darzustellen. Zusätzlich verbessern sich Einkaufsbedingungen und Produktionskosten für die mit hoher Stückzahl produzierten Plattform- und Baukastenteile. Gängig ist diese Strategie vor allem bei Automobilkonzernen, die verschiedene Marken unter sich vereinigen, aber auch bei kleineren Herstellern, um niedrigere Fahrzeugstückzahlen einzelner Typen in der Gesamtheit wirtschaftlich darstellen zu können [26, 50].

## 4.2.4 Beispiele ausgewählter Fahrzeugkonzepte in unterschiedlichen Klassen

### 4.2.4.1 Beispiele nach Fahrzeuggrößenklasse

Anhand von ausgewählten Fahrzeugen sollen wesentliche der in ▶ Abschn. 4.2.2 dargestellten Konzeptparameter und der in ▶ Abschn. 4.2.3 aufgezeigten maßkonzeptionellen Zusammenhänge verdeutlicht werden.

#### 4.2.4.1.1 Kompaktklasse

Abb. 4.28 zeigt den VW Golf als prägenden Vertreter dieser Klasse.

Typisch für diese Fahrzeugkonfiguration sind der kompakte Vorderwagen und der flache Bodenaufbau. Der Fersenpunkt der hinteren Sitzreihe liegt in $z$-Richtung unterhalb des Fersenpunktes der ersten Sitzreihe.

#### 4.2.4.1.2 Minicar

Ein Vertreter dieser Klasse mit ausgeprägter Konzeptinnovation stellt der Smart dar, Abb. 4.29.

Mit einer Gesamtlänge von 2690 mm nutzt dieses Konzept ebenfalls den 1-Box-Aufbau. Der Verzicht auf eine hintere Sitzreihe und die damit gegebene ausschließliche Zweisitzigkeit ermöglicht trotz einer extremen Fahrzeugkürze ein akzeptables Innenraumangebot für zwei Personen. Auch hier

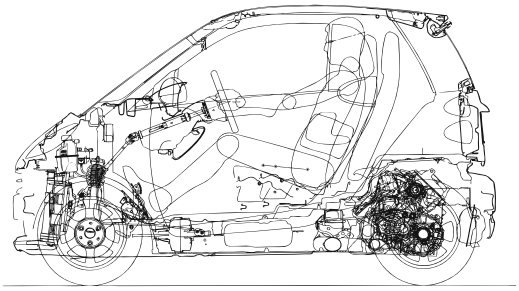


**Abb. 4.29** Smart (Heckmotor, Quereinbau, Heckantrieb)

konnte die kurze Fahrzeuglänge teilweise nur durch ein Ausweichen „nach oben" erzielt werden, was eine größere Fahrzeughöhe zur Folge hat.

Der querliegende Motor mit Getriebe ist beim Smart mit der Hinterachse zu einer sehr kompakten Montageeinheit verblockt.

#### 4.2.4.1.3 Mittelklasse

Der BMW 3er stellt ein maßkonzeptionell typisches Fahrzeug der Mittelklasse dar, Abb. 4.30 [36].

Das Fahrzeug hat einen *Frontmittelmotor* und Heckantrieb. Typisch hierfür ist die sehr weit vorne liegende Vorderachse (kurzer Überhang vorne) und das weit mit der Fahrgastzelle in $x$-Richtung „überlappende" Getriebe.

#### 4.2.4.1.4 Obere Mittelklasse

Die konzeptionellen Unterschiede zwischen Mittelklasse und Oberer Mittelklasse innerhalb einer Fahrzeugmarke sind zu vernachlässigen. Die Unterschiede liegen hauptsächlich im großzügigeren Maßkonzept. Für die obere Mittelklasse zeigt Abb. 4.31 den Audi A6 [37].

Charakteristisch für die vorliegende Antriebskonfiguration mit getriebeintegriertem Vorderachsdifferential ist die Lage des Motors vor der Vorderachse und der dadurch bedingte relativ große Überhang vorne.

#### 4.2.4.1.5 Oberklasse

Die Oberklasse wird wesentlich von Fahrzeugen der Marken Audi, BMW und Mercedes geprägt [38, 40,

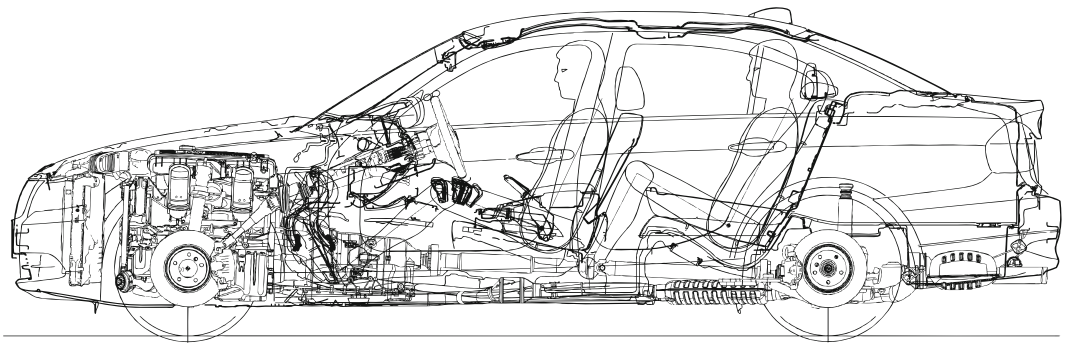


**Abb. 4.30** BMW 3er-Serie (Frontmotor, Längseinbau, Standardantrieb)

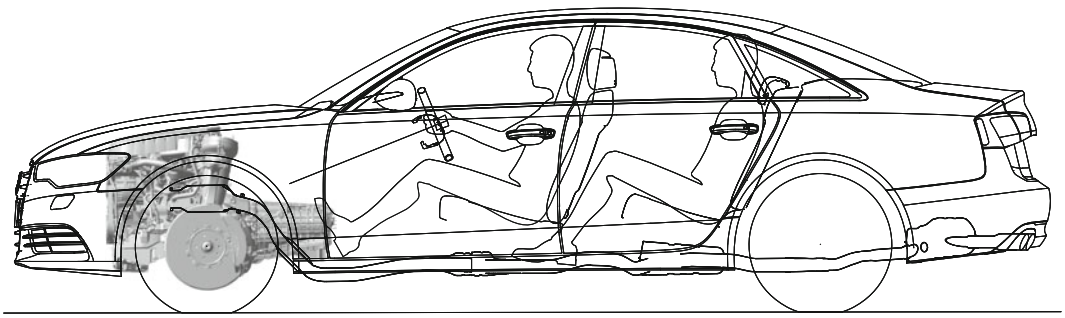


**Abb. 4.31** Audi A6 (Frontmotor Längseinbau, Vorderradantrieb)

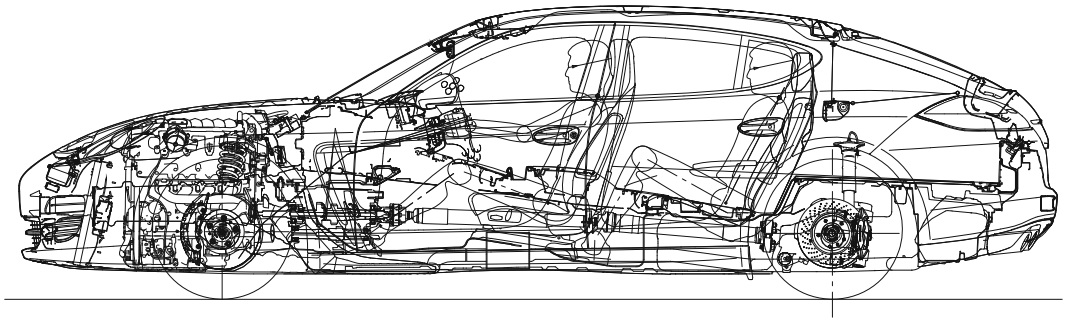


**Abb. 4.32** Porsche Panamera (Frontmotor, Längseinbau, Standardantrieb/Allradantrieb)

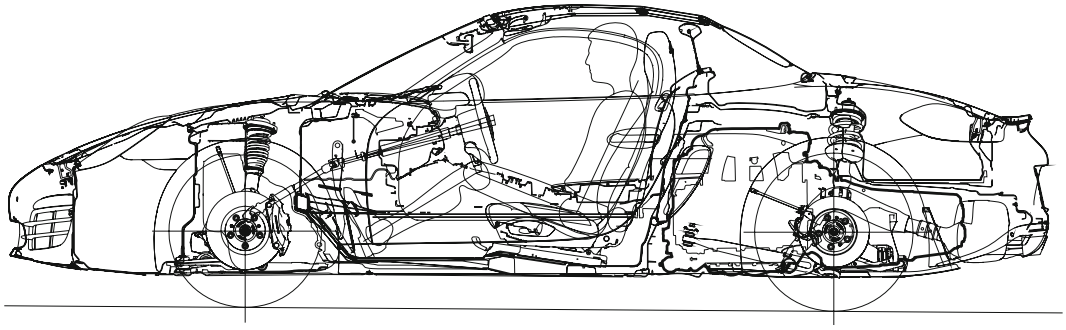


**Abb. 4.33** Porsche Boxster (Mittelmotor, Längseinbau, Heckantrieb)

46]. Als neuen und sportlich positionierten Vertreter in der Oberklasse zeigt Abb. 4.32 den Porsche Panamera [49].

#### 4.2.4.1.6 Luxusklasse

Die Luxusklasse besitzt eine insgesamt sehr geringe Marktdurchdringung und ist mit wenigen tausend Fahrzeugen ein kleines Segment. Die Fahrzeuge unterscheiden sich von der Oberklasse im Wesentlichen durch ein sehr großes L50-2 Maß das bei einigen Fahrzeugen sogar eine Liegeposition ermöglicht [39].

### 4.2.4.2 Beispiele nach Fahrzeugausprägung

Für verschiedene Fahrzeugkonzepte ist eine Einordnung nach Größe nicht geeignet. Das gezeigte Grundkonzept kann natürlich mit unterschiedlichen Maßkonzepten und somit auch verschieden groß ausgeführt sein.

#### 4.2.4.2.1 Roadster

Das Roadster-Segment beinhaltet Fahrzeuge mit Standardantrieb ebenso wie Mittelmotorfahrzeuge. Abb. 4.33 zeigt den Porsche Boxster als Fahrzeug mit *Mittelmotoranordnung* [42].

#### 4.2.4.2.2 Coupé und Sportcoupé

Die Coupés reichen konzeptionell von aus der Mittelklasse abgeleiteten Fahrzeugen mit Standardantrieb und 4 Sitzen über Transaxle- oder Heckmotorkonzepte mit 2+2 Sitzen, bis zu Mittelmotorfahrzeugen mit reiner Zweisitzigkeit. Abb. 4.34 zeigt den Porsche Carrera als Beispiel für ein Fahrzeug mit *Heckmotoranordnung* [43].

#### 4.2.4.2.3 Sport Utility Vehicles (SUV)

Ein relativ neues und stark gewachsenes Marktsegment stellen die SUVs dar. Diese Fahrzeugkategorie reicht von aus Mittelklassekombis abgeleiteten und

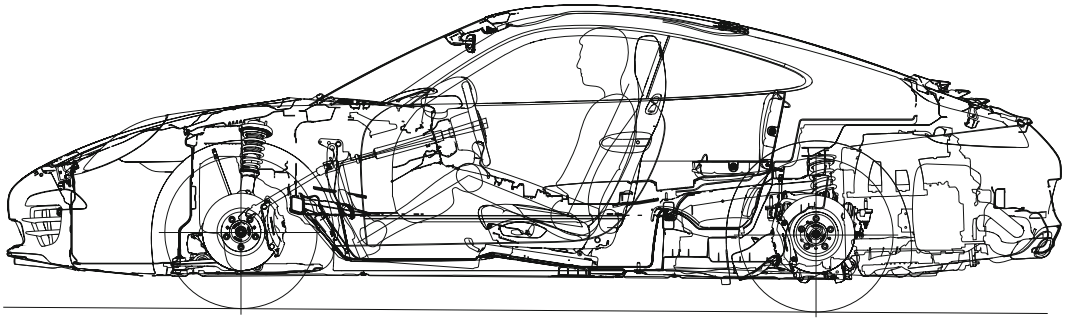


**Abb. 4.34** Porsche Carrera (Heckmotor, Längseinbau, Heckantrieb)

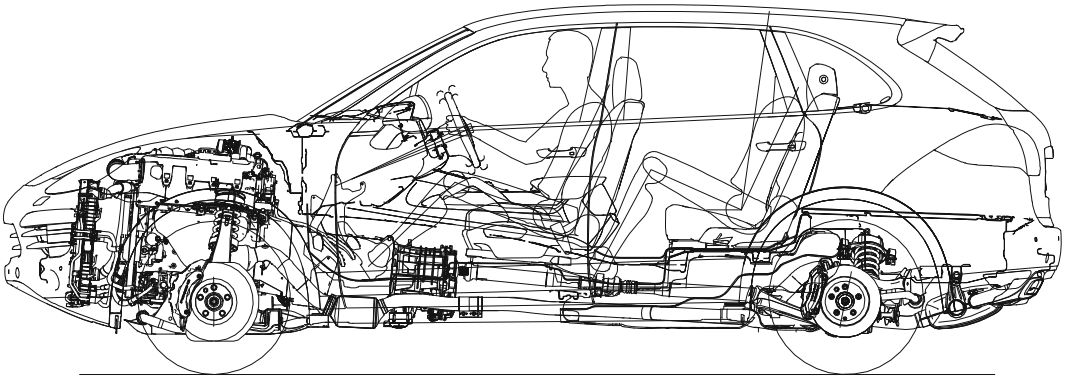


**Abb. 4.35** Porsche Cayenne Turbo (Frontmotor, Längseinbau, Allradantrieb)

höhergelegten Fahrzeugen bis hin zu reinen Geländefahrzeugen mit Leiterrahmen.

Die Konzeptausprägungen sind dabei äußerst unterschiedlich. Typisch ist der Allradantrieb, die große Bodenfreiheit, kurze Überhänge für große Böschungswinkel und eine hohe Sitzposition der Insassen.

Abb. 4.35 zeigt den Porsche Cayenne als SUV mit selbsttragender Karosserie [44].

#### 4.2.4.2.4 Van

Eine eigenständige Fahrzeugkategorie stellen die Vans dar. Entweder aus der Kompaktklasse abgeleitet oder mit eigenständiger Plattform zeichnen Sie sich durch das große und zumeist sehr variable Innenraumkonzept mit bis zu 8 Sitzplätzen oder bei ausgebauten Sitzen bis zu 2900 l Kofferraumvolumen aus. Das große Sitzplatzangebot wird durch eine hohe Sitzposition und somit eine große Fahrzeughöhe erreicht. Problematisch ist bei diesen Fahrzeugen, dass bei Nutzung durch 8 Personen nur ein Kofferraumvolumen auf Kompaktwagenniveau zur Verfügung steht. Abb. 4.36 zeigt den VW Sharan als Beispiel für ein realisiertes Van-Konzept.

### 4.2.5 Konzeption und Packageprozess in der industriellen Praxis

Die Konzeption und der Packageprozess verläuft in der industriellen Praxis ähnlich, wie in diesem ▶ Abschn. 4.2 dargestellt.

Zu Beginn einer Entwicklung erfolgt die Positionierung des Fahrzeugs im Wettbewerberumfeld und die Herleitung wesentlicher Ziele. Auf Basis der Vorstellungen und Ziele für Gesamtfahrzeug, Komponenten und Module wird ein erstes Maßkonzept als initiale geometrische Beschreibung des Fahrzeugs erstellt. Die erarbeiteten Inhalte werden anschließend in einem *Rahmenheft* bzw. Zielkatalog

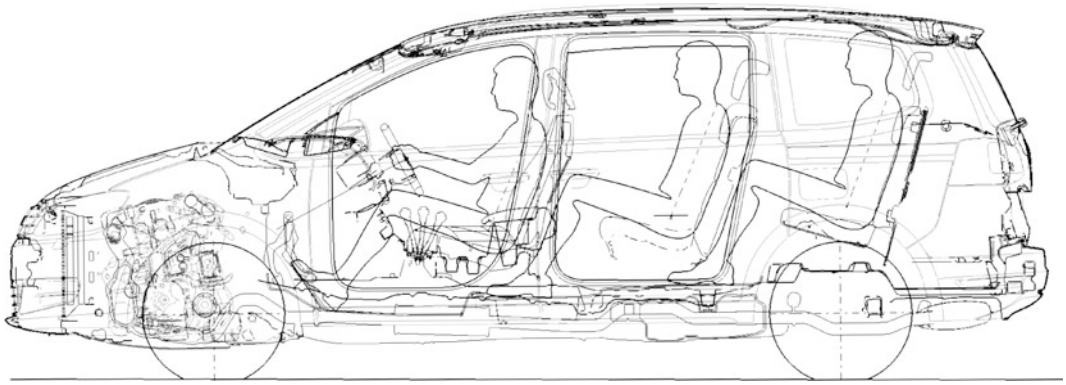


**Abb. 4.36** VW Sharan (Frontmotor, Quereinbau, Vorderradantrieb)

zusammengeführt. Auf Basis des Maßkonzepts werden erste zwingend einzuhaltende Begrenzungen *(Hardpoints)* abgeleitet und vorgegeben. Die schrittweise Konkretisierung des Bauraumbedarfs der Fachbereiche und das konkreter werdende Maßkonzept führt zur Definition von *Package-Grenzflächen*. Diese Package-Grenzflächen sind dreidimensionale CAD-Flächen, die den Bauraumbedarf einzelner Komponenten, Greifräume der Insassen oder gesetzliche Vorgaben, wie z. B. Sichtstrahlen, darstellen.

In den frühen Phasen der Entwicklung stellen diese Package-Grenzflächen Vorgaben für die Fachbereiche dar. Mit weiterer Konkretisierung der Konstruktionen werden Modul- und Bauteilentwürfe der Fachbereiche gegen diese Grenzflächen geprüft.

In der Serienentwicklung werden mittels geeigneter Systeme zur Berechnung von Bauteilkollisionen durch die Packageabteilung einzelne Bauteile per *DMU* (Digital Mock-up – Digitale Attrappe) gegeneinander geprüft. Geeignete PDM-Werkzeuge ermöglichen hierbei die teilweise Automatisierung der Fahrzeugkonfiguration und Kollisionsprüfungen. Solche Werkzeuge erfordern die durchgängige datentechnische Verknüpfung von Fahrzeugstruktur und CAD-Datenwelt.

Die konsequente Fortsetzung dieser Vorgehensweise ist die Integration von Systemen zur Erstauslegung von Strukturen und Komponenten in die CAx-Landschaft.

### 4.2.6 Entwicklung der Fahrzeugkonzepte

Die derzeitige Konzeptlandschaft ist geprägt durch eine Vielzahl von Fahrzeugvarianten, die alle erdenklichen Nischen ausfüllen. Diese Varianten sind auch für Großserienhersteller wirtschaftlich darstellbar, weil dabei in der Regel auf identischen Fahrzeugplattformen aufgesetzt wird, vgl. ► Abschn. 4.2.3.6.

In näherer Zukunft sind folgende Trends zu erwarten:

- Zunehmend *Crossover*-Konzepte, wie beispielweise die Kombination aus Van und Coupé oder eine Konzeptmischung zwischen Limousine und Van.
- Weitere Abkehr von klassischen Fahrzeugkonzepten (z. B. Limousine).
- Größere Variabilität der Fahrzeuge (Interieur und Exterieur).
- Die Gestaltung markenspezifischer Innenraumkonzepte, Bedienlogiken und *Mensch-Maschine-Schnittstellen* [41, 47].
- Fahrzeugklassenspezifische Leistungsgrenzen verschwimmen und überlappen zunehmend.
- Vordefinierte Plattformen werden zunehmend durch flexibel definierte Baukästen ersetzt.
- Hybridkonzepte werden in verschiedenen Ausprägungen in nahezu alle Fahrzeugklassen Einzug nehmen.



# Aus besten Händen: Der e-Antrieb von AVL

Entwicklung und Integration von elektrifizierten Antriebssträngen. Für Fahrzeuge mit herausragender Leistung und höchster Qualität. Kundenspezifische, innovative und serienreife Lösungen für alle Varianten der Elektrifizierung: Micro/Mild Hybrid, PHEV, BEV, Range Extender und Brennstoffzelle.

- Schneller am Markt: Kurze Produkteinführungszeit dank effizienter, simulationsbasierter Konstruktionsprozesse
- Best-in-class: Objektive und umfassende Benchmarks mit viel Wettbwerbs-Know-how, um das Produkt ideal am Markt zu positionieren
- Schnell & global: Das weltweit größte Netzwerk an Test- und Engineering-Centern. Für größte Flexibilität
- First-time-right: Simulationsbasierte Validierung mit modernsten Methoden und Tools

www.avl.com, info@avl.com

Beispiele für Crossoverfahrzeuge sind der Mercedes CLS [47] als Mischung aus Limousine und Coupé, der Golf Plus [48], der sich zwischen Golf und Touran ansiedelt sowie der Audi A5 Sportback, der sich zwischen Coupé und Kombi einordnet.

Technologische Innovationen werden bereits heute sehr schnell nach der Ersteinführung in allen Fahrzeugklassen angeboten. Die Differenzierung über das Fahrzeugkonzept wird daher als Alleinstellungsmerkmal immer stärker an Bedeutung gewinnen, die Konzeptinnovation wird zu einem der Hauptdifferenzierungskriterien gegenüber den Wettbewerbern. Dieser Trend ist bereits heute, insbesondere bei spät in ein Segment einsteigenden Wettbewerbern, zu beobachten.

Zudem wird auch die notwendige $CO_2$-Reduzierung zunehmend Einfluss auf die Ausgestaltung von Konzepten (z. B. durch Downsizing und Downweighting) nehmen. Die Integration von Hybridkonzepten und auch das zunehmende Angebot voll elektrifizierter Fahrzeuge wird Rückwirkungen auf die Fahrzeugkonzeption haben und lässt die Komplexität und den Anspruch an die Konzept- und Packagearbeit weiter steigen.

## 4.3 Neuartige Antriebe

Die weltweit verschärften Emissionsgesetzgebungen für Kraftfahrzeuge im Straßenverkehr treiben eine Revolution in der automobilen Fortbewegung: die Elektrifizierung der Antriebsstränge.

Die Elektrifizierung wird durch die elektrischen Antriebselemente Elektromotor und Leistungselektronik erreicht. Diese sorgen innerhalb des Triebstrangs für Vortrieb. Einhergehend können mit dem steigenden Anteil von elektrischer zu verbrennungsmotorischer Leistung verschiedene Funktionalitäten und Emissionsreduktionen realisiert werden. Wie in Abb. 4.37 dargestellt ist, beginnt der geringste Grad der Elektrifizierung mit Start-Stopp-Systemen auf kleinster Spannungslage von 12 V und endet bei emissionsfreiem Fahren mit vollelektrischen Antriebssystemen auf Spannungslagen von über 300 V.

Mittlerweile werden all diese Arten der Elektrifizierung von den verschiedenen Automobilherstellern angeboten. Je nach öffentlicher Bezuschussung

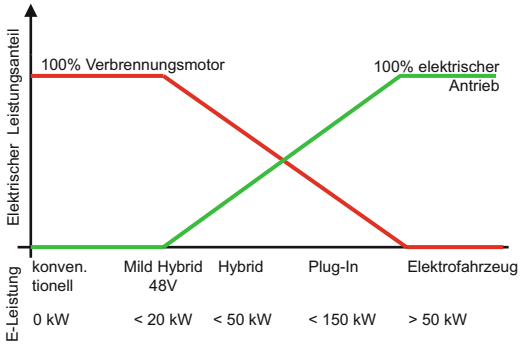



**Abb. 4.37** Grad der Elektrifizierung im Automobil

sind die Marktanteile und der Grad der elektrifizierten Triebstränge regional stark unterschiedlich.

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem Elektroantrieb, der als alleiniges Antriebselement im Kraftfahrzeug dient. Diese Antriebsart ermöglicht ein vollständig emissionsfreies Fahren.

### 4.3.1 Elektroantriebe im Kfz

Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles EVs) bieten den Vorteil, dass sie keine Schadstoffe am Einsatzort freisetzen. Weiterhin werden weder Abgase noch Kraftstoffdämpfe bei der Betankung und Speicherung freigesetzt. Die Energie für EVs wird vorwiegend elektrochemisch in Traktionsbatterien gespeichert oder in Form von Wasserstoff bei dem Einsatz in elektrischen Fahrzeugen mit einem Brennstoffzellensystem. Der elektrische Triebstrang weist einen hohen Wirkungsgrad auf und bietet zusätzlich die Möglichkeit der Energierückgewinnung bei Bremsvorgängen.

Hinzu kommt bei Elektrofahrzeugen, dass sie insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr leise sind. Die geringe Schallabstrahlung des Triebstrangs hat soweit geführt, dass in einigen Ländern Elektrofahrzeuge mit einem Soundgenerator ausgerüstet werden müssen, um Passanten auf ein herannahendes Auto aufmerksam zu machen. Für den Fahrer vorteilhaft spürbar ist eine hohe Agilität durch ein hohes Drehmoment aus dem Stand und Laufruhe des Triebstrangs.



**Abb. 4.38** 1888 Flocken Elektrokarren mit 0,9 kW [54]

**Historie der alleine durch Elektromotoren bewegten Fahrzeuge** Der Elektromotor war nach der Dampfmaschine die zweite maschinelle Antriebsart für Fahrzeuge. Erst später kam noch als dritte Antriebsart der Verbrennungsmotor hinzu. Folglich sind Elektrofahrzeuge bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts, noch vor den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, im Einsatz.

Als erstes vierrädriges Elektrofahrzeug gilt der Flocken Elektrowagen, der 1888 in Coburg entwickelt wurde. Dieses, in Abb. 4.38 abgebildete, vermutlich erste „echte" Elektroauto entstand durch Integration eines Elektroantriebs in einen Kutschwagen. Bei dem Fahrzeug von 1888 handelte es sich ursprünglich, ähnlich der Daimler Motorkutsche von 1886, um einen hochrädrigen Kutschwagen, der aber mit einem Elektromotor versehen wurde und dessen Leistung von zirka 0,9 kW per Lederriemen auf die Hinterachse übertragen wurde [53].

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Elektroantriebe durch Verbrennungsmotoren ersetzt, weil der Energiespeicher (Tank) wesentlich kleiner und leichter als die Bleibatterie war und der große Energieinhalt den niedrigen Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors mehr als kompensierte. Mitte des 20. Jahrhunderts verschwand die Anwendung im Nischendasein. In den 1970er Jahren setzten dann verschiedene Wellen der Aktivitäten zum Elektrofahrzeug ein. Erste Impulse für die Entwicklung moderner Elektrofahrzeuge gingen von der ersten Erdölkrise in den siebziger Jahren und dem Wunsch der Lärmreduktion in den Städten aus. Forschungsfahrzeuge wie der VW-Citystromer (siehe Abb. 4.39) sind Ergebnisse dieser ersten Welle. Die ersten Versionen des Citystromers wurden von einer Gleichstrommaschine angetrieben, welche durch eine 18,5 kW Synchronmaschine ersetzt wurde. Die Energie von zirka 11 kWh wurde in einem 96 V Blei-Gel-Akkumodul gespeichert.

Aufgrund der stark beschränkten Reichweite der Fahrzeuge durch die eingesetzte Batterietechnologie auf Basis etablierter Blei-Chemie kam es bald wieder zu einer Reduktion der Aktivitäten. Die ersten Grundsteine waren jedoch gelegt und die veröffentlichten Forschungsartikel nehmen seit dem ständig zu.

Die zweite Welle führte dann zur nachhaltigen Verankerung der Entwicklungsaktivitäten in der automobilen Industrie. Ausgelöst wurde diese Welle im Wesentlichen durch das von der Kalifornischen Regierung eingesetzte California Air Resources Board CARB. Die CARB erließ 1990 eine erste Version des Zero-Emission-Vehicle ZEV-Gesetzes, welches zur Luftreinhaltung mindestens 2 % emissionsfreie Fahrzeuge für Kalifornien ab dem Modelljahr 1998 forderte. Als Folge davon starteten alle größeren Automobilhersteller intensiv die Entwicklung von Elektrofahrzeugen. Als das populärste Produkt dieser Welle gilt der EV1 von General Motors. Aus Abb. 4.40 ist ersichtlich, dass das Auto als reines Batteriefahrzeug konzeptioniert wurde.

Der zweisitzige EV1 mit seiner charakteristischen Tropfenform konnte erstmals Reichweiten über 200 km darstellen. Für diese zweite, in der Reichweite gesteigerten, Version wurde ein Nickel-Metall-Hydrid Akku eingesetzt. Die erste Version hatte noch einen Blei-Akku mit 16,3 kWh die eine entsprechende Ernüchterung mit realen Reichweiten um die 100 km mit sich brachte.

Eine Lösung des Reichweitenproblems wurde mit der Verfolgung der Wasserstofftechnologie gesucht. Als Produktantwort demonstrierte Mercedes ein Forschungsauto mit dem Namen NECAR. Dieses in Abb. 4.41 dargestellte Auto basiert auf einem konventionellen Fahrzeugkonzept, das bereits einen höheren Boden – auch als Sandwichboden bezeichnet – hat, um Triebstrangkomponenten

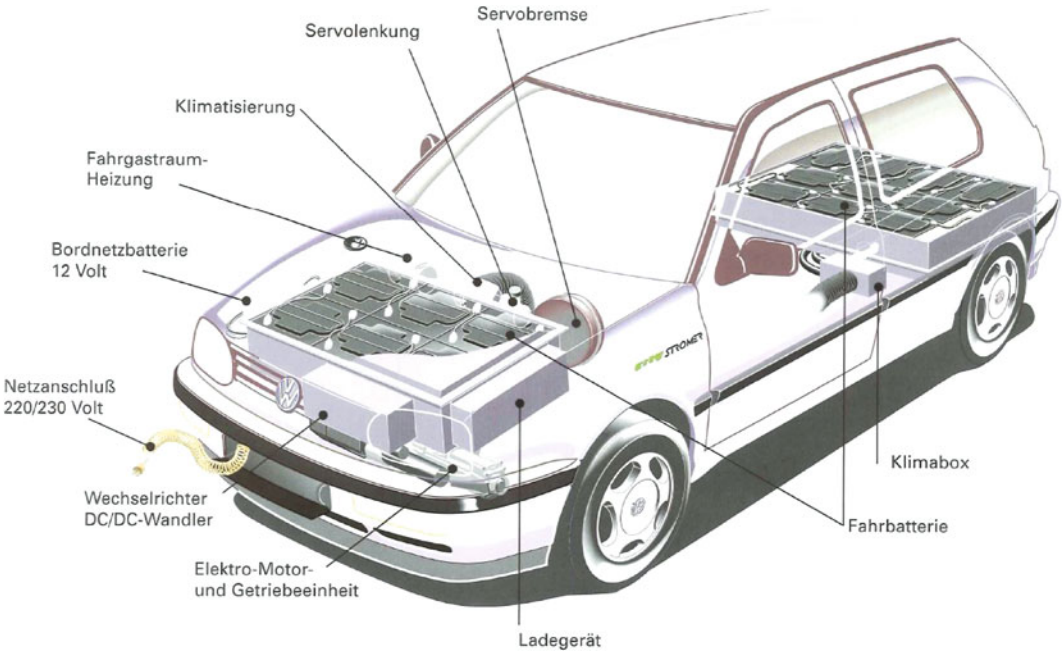



**Abb. 4.39** 1976 VW Citystromer [55]

und Energiespeicher unterzubringen. Das Fahrzeug auf Basis einer A-Klasse bot Platz für 5 Passagiere. Die Reichweite betrug bis zu 450 km. Die eingesetzte Technologie zur Wasserstoffspeicherung und Wandlung war jedoch um ein vielfaches teurer als die Akkutechnologie der batterieelektrischen Fahrzeuge.

Ebenso dieser zweiten Welle der Aktivität der Elektroautos zuzuordnen war das Rügen-Projekt. Von 1992–1996 galt es Elektrofahrzeuge der neuesten Generation auf der Insel Rügen auf deren Alltagstauglichkeit hin zu überprüfen. Das wesentliche Ergebnis war mal wieder die unzureichende Reichweite der Akkumulatoren.

Die dritte Welle der Elektroautos wurde durch gesteigertes Umweltbewusstsein, verschärfte $CO_2$-Gesetzgebungen und vor allem durch eine deutlich verbessere Batterietechnologie auf Basis von Lithium-Ionen Chemie am Anfang des 21. Jahrhunderts ausgelöst. Regionale gesetzliche Anreize führen z. B. in Norwegen zu einem Anteil von 20 % Elektroautos am gesamten Automarkt. Als Incentivierung werden die Nutzung von Busspuren, das kostenfreie Laden der Batterien, steuerliche Vorteile sowie weitere Maßnahmen eingeführt. Diese Wellen des Elektroautos sind in Abb. 4.42 skizziert.

Ab 2009 bringen die Automobilhersteller verschiedenste Elektroautos auf den Markt. Exemplarische Eckpfeiler sind der Mitsubishi i-Miev, Nissan Leaf, smart fortwo electric drive oder das Model S von Tesla Motors. Mit dem Model S (siehe Abb. 4.43) gelingt Tesla 2012 ein einschneidender Durchbruch für das Produkt der Elektroautos. Das Auto erreicht Reichweiten von bis zu 500 km. Das Model S schaffte es in einigen Verkaufsregionen bis zum ersten Platz in den Verkaufsranglisten.

Mit einer umfassenden Ladeinfrastruktur und den Tesla-Schnellladestationen wird das Auto in ein Gesamtkonzept der Elektromobilität eingebettet. Es werden Ladezeiten von 40 Minuten für eine 80 % Ladung erreicht. Die auf den Elektroantrieb angepasste Bauweise als Elektroauto (Purpose Design) mit der Integration der Batterie im Unterboden führt zu einer notwendigen Einsparung an Gewicht und zu einem großräumigen Fahrgast- und Gepäckraum durch den Wegfall diverser Baugruppen im Powertrain und in der Karosserie. Aufgrund der großen Batterie mit bis zu 90 kWh erreicht das Auto jedoch ein Gewicht von über 2 Tonnen.

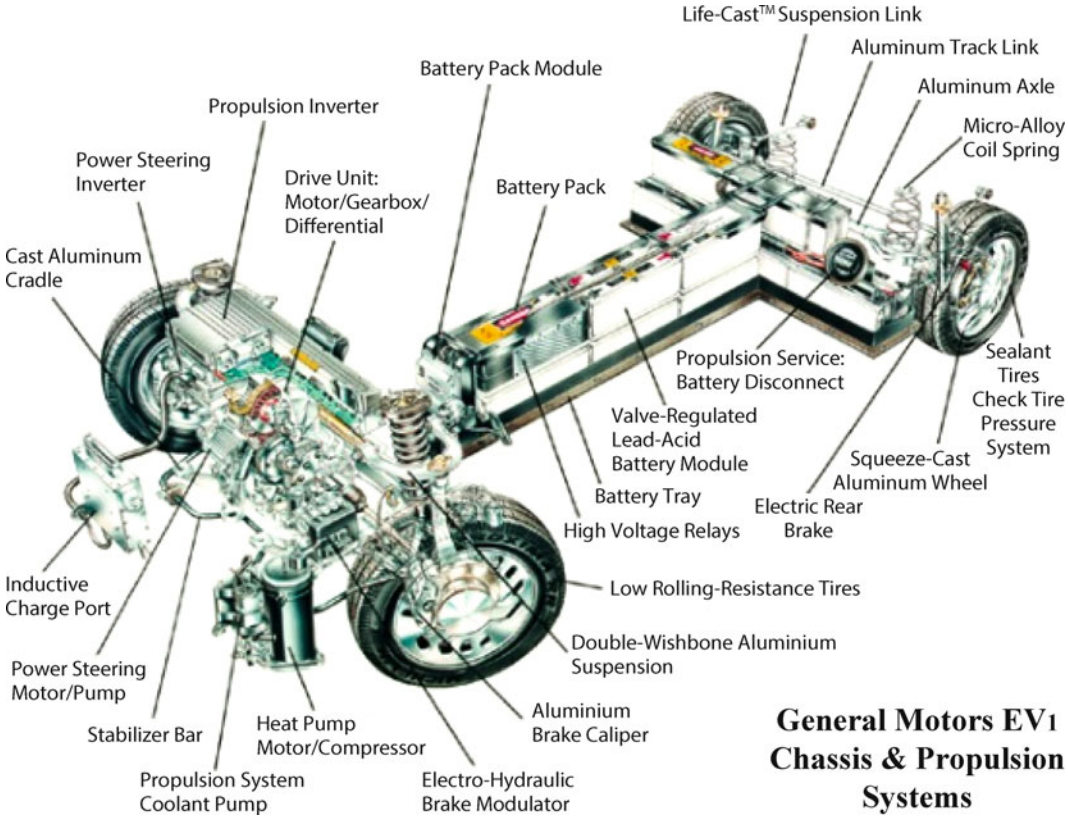



**Abb. 4.40** 1996 GM EV1 [56]



**Abb. 4.41** 1997 stellt Mercedes mit dem NECAR 3 eins der ersten Brennstoffzellen Autos dar [57]

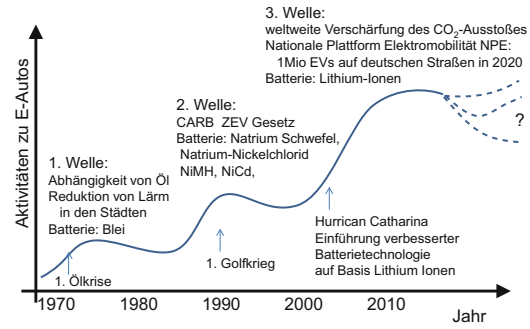



**Abb. 4.42** Wellen der Aktivitäten zu Elektrofahrzeugen Ende des 20ten Anfang des 21ten Jahrhunderts

In dieser dritten Welle beginnen einige Automobilhersteller die Entwicklung von Elektrosportwagen, um die Möglichkeiten der Technologie zu demonstrieren. Abb. 4.44 zeigt den Mercedes SLS electric drive, der in Kleinserie verkauft wurde. Er ist ein Musterbeispiel dieser Aktivitäten. Durch seinen elektrischen Allradantrieb, der mit 4 radnahen

# BOMATEC

*driven by passion*

**Als international tätiges Unternehmen in den Bereichen Magnettechnik, Sensorik und Antriebstechnik bieten wir individuelle Lösungen vom Konzept bis zur Serienfertigung.**



Bomatec weltweit:
- Schweiz
- Kanada
- China
- Malaysia (Produktion)

Leistungsspektrum:
- Design- und Engineering
- F/E Berechnungen
- Magnetkreisauslegungen und Simulationen
- Prototypen- und Musterbau
- Lieferung von Serienteilen wie Magnete, Resolver, Antriebskomponenten, Baugruppen

Bomatec | Hofstrasse 1 | CH-8181 Hoeri
Tel. +41 44 872 10 00 | Fax +41 44 872 10 01
contact@bomatec.ch | www.bomatec.ch

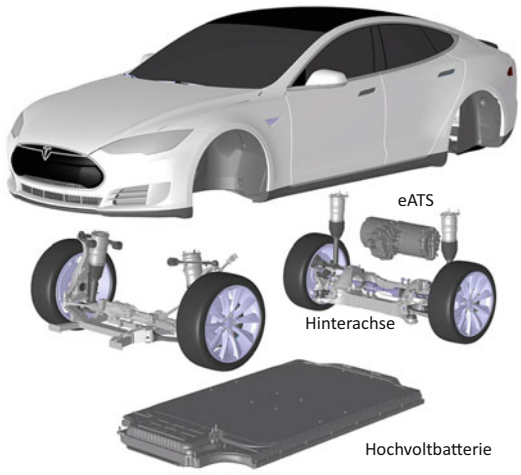



**Abb. 4.43** 2012 Tesla Model S [58]

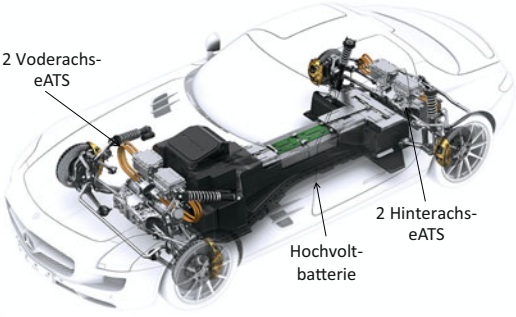



**Abb. 4.44** 2013 Mercedes AMG SLS electric drive [59]

Permanentmagnetmotoren realisiert wird, werden neue Dimensionen im querdynamischen Fahrverhalten von Automobilen erzielt. Durch das sogenannte aktive Torque Vectoring lassen sich Drehmoment und Drehzahlen individuell den Rädern zuteilen und damit eine optimale Straßenhaftung erreichen.

Im SLS electric drive ist eine Summenleistung von 552 kW sowie ein Summendrehmoment der E-Motoren von 1000 N m installiert. Damit ist eine Beschleunigung von 0–100 km/h in 3,9 Sekunden möglich. Die abgeregelte Höchstgeschwindigkeit liegt bei 250 km/h. Mit einer installierten Energie von 48 kWh erzielt man eine verbrauchsreale Reichweite von 150 km.

Nach wie vor stellt die limitierte Reichweite und die damit fehlende Flexibilität der meisten aktuellen Elektrofahrzeuge, spontan längere Strecken in vergleichbaren Zeiten wie Verbrennungsmotorfahrzeuge zurückzulegen, ein Hemmnis in ihrer Marktakzeptanz dar. Durch die rasante Entwicklung der Elektrofahrzeuge und Elektromobilitätskonzepte ist es allerdings nun nur noch eine Frage der Zeit wann sich Elektrofahrzeuge in der Breite etablieren. Die notwendigen Technologien bei Batterien und Ladekonzepten sind auf dem Weg zum Markteintritt.

#### 4.3.1.1 Elektrischer Antriebsstrang eATS

Im Folgenden wird der elektrische Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs ohne Berücksichtigung der Energiequelle beschrieben.

Der gesamte AnTriebStrang ATS besteht aus einer Energiequelle, die die Energie in elektrischer Form zur Verfügung stellt. In der Regel werden hierzu Traktionsbatterien oder Brennstoffzellen eingesetzt, die elektrische Energie durch die Oxidation von Wasserstoff mit Luftsauerstoff (auch „kalte Verbrennung“) erzeugen. Die Energiequellen stellen entsprechend dem internen Aufbau und der Zellenverschaltung ein Gleichspannungsniveau ein. In Abhängigkeit von der Belastung des Energiespeichers ändert sich das Spannungsniveau. Man spricht auch von der Steifigkeit der Energiequelle. Insbesondere stellt eine sogenannte weiche Energiequelle, die eine hohe Spannungssteilheit und damit einen stark von der Belastung abhängigen Spannungseinbruch zeigt, eine große Herausforderung für das elektrische Antriebssystem dar. Die Spannung ist die auslegungsrelevante Größe, da durch das Produkt von Spannung und Strom direkt die Leistung und damit die Fahrdynamik des Autos eingestellt wird. Abb. 4.45 zeigt exemplarisch die Abhängigkeiten der Spannung unterschiedlicher charakteristischer Energiequellen von der Last.

An der Gleichspannung der Batterie arbeitet die Leistungselektronik. Die heute übliche Leistungselektronik wandelt die Gleichspannung in eine Wechselspannung mit variabler Amplitude und variabler Frequenz um, so dass hiermit kommutatorlose Drehfeldmaschinen betrieben werden können. Durch die in der Leistungselektronik umge-

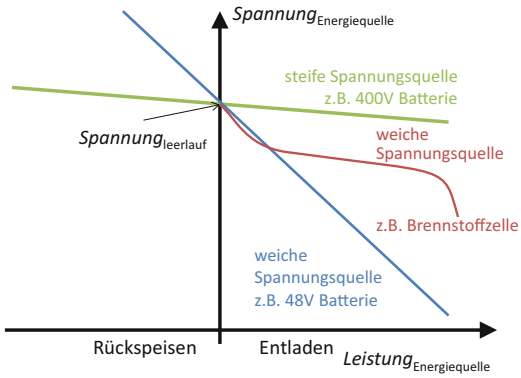



**Abb. 4.45** Abhängigkeit der Spannung von der Last

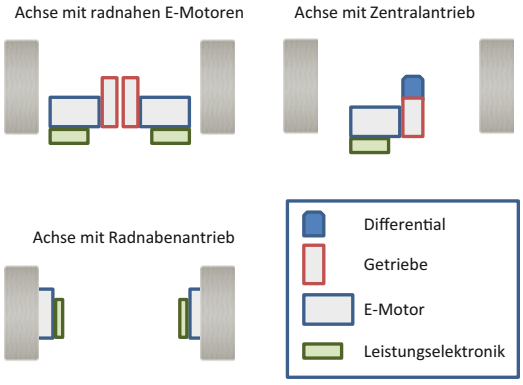



**Abb. 4.46** Antriebsstrang-Konfigurationen für Elektrofahrzeuge

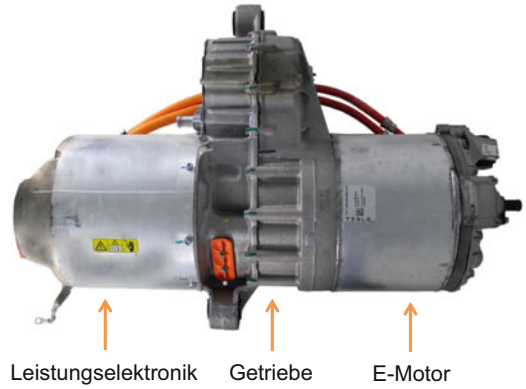



**Abb. 4.47** eATS des Tesla Model S als Zentralantrieb mit mechanischem Differential

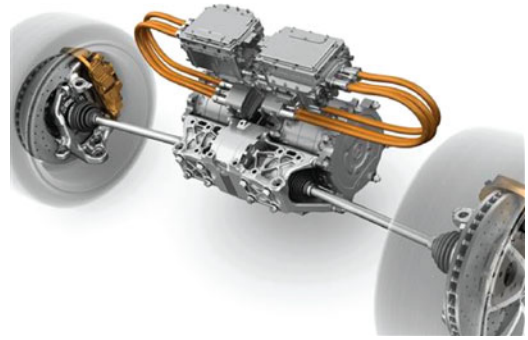


**Abb. 4.48** Elektrische Achse des SLS electric drive mit zwei radnahen eATS ohne Differential [60]

setzte Topologie kann die Spannungsabhängigkeit eingestellt werden, wie es in ▶ Abschn. 4.3.1.3 beschrieben wird.

Die Wandlungskette des elektrischen Antriebsstrangs eATS von Leistungselektronik und E-Motor wird in der Regel durch ein eingängiges Getriebe zur Untersetzung der Maschinengeschwindigkeit auf Radgeschwindigkeit komplettiert. Die Antriebsstränge können je nach Anforderung in unterschiedlichen Konfigurationen im Auto eingesetzt werden, wie es Abb. 4.46 zeigt.

Die meist umgesetzte Konfiguration des elektrischen Antriebsstrangs ist ein Achsantrieb mit einem E-Motor als zentrales Herzstück für die Energieumwandlung von elektrischer in mechanische Energie. Ein Differential sorgt für eine gleichmäßige Kraftaufteilung auf die beiden Räder. Eine solche Konfiguration findet man auch im Tesla Model S mit einer Leistung von über 300 kW und einem Summendrehmoment von zirka 6000 N m an der Achse, siehe Abb. 4.47.

Eine weitere Konfiguration wird mit 2 hochdrehenden E-Motoren dargestellt, die mittels zwei unabhängigen Untersetzungsgetrieben die E-Motor Drehzahlen auf die Raddrehzahlen reduziert. Eine solche Anordnung wird vorwiegend bei sportlicheren Autos eingesetzt, da mit der Entkopplung ein aktives Torque Vectoring umgesetzt werden kann. Abb. 4.48 zeigt die eine solche elektrische Achse wie sie im Mercedes SLS electric drive mit zwei radnahen eATS verbaut ist.

Der Nachteil einer solchen Achse sind die erhöhten Kosten, da 2 E-Motor-Systeme (E-Motor, Leistungselektronik und die Regelung des E-Motor-



**Abb. 4.49** Radnabenantrieb der Firma Protean [61]



**Abb. 4.50** Hochintegriertes eATS Konzept von Mercedes

Systems) eingesetzt werden müssen. Eine weitere entkoppelte Sonderbauform des eATS sind Radnabenantriebe. Diese sind im PKW Sektor bislang nur als Forschungs- und Demonstratorfahrzeug zu finden. Der Charme dieser Antriebe ist, dass durch den Entfall der zentralen Bauform und des Getriebes Bauraum entsteht, der im Fahrgastraum genutzt werden kann. Aus diesem Grund werden solche Motoren im Busbereich eingesetzt. Ein solches Radnabenmodul ist in Abb. 4.49 dargestellt.

Der begrenzte Bauraum im Rad begrenzt Drehmoment und Leistung eines solchen Moduls. Die direkte Kopplung mit der geringen Raddrehzahl erfordert hohes Drehmoment und damit einen hohen Materialeinsatz.

Aktuelle Trends der eATS Bauformen zeigen hochintegrierte Zentralantriebe mit E-Motoren, die maximale Drehzahlen von über 20.000 U/min aufweisen. Ein solcher Antrieb, wie er in Abb. 4.50 dargestellt ist, benötigt nur noch einen DC-Anschluss und den Kühlanschluss. Die elektrische AC-Kontaktierung zwischen E-Motor und Inverter findet innerhalb des Aggregats statt genauso wie das intern verschaltete Kühlkonzept.

Ein eATS kann durch die vorteilhafte Drehmoment- und Leistungscharakteristik des Elektromotors ein Auto mit einer maximalen Längsdynamik bewegen. Das Drehmoment ist ab Stillstand voll verfügbar und durch eine feste Übersetzung zum Rad entfallen konventionelle Schaltvorgänge. Die Dynamik, mit der das Drehmoment geändert werden kann, ist in der Regel so hoch, dass eine Dämpfung in der Betriebsstrategie vorgeschaltet wird, damit es nicht zu einer Beschädigung der mechanischen Komponenten wie Wellen, Achsen etc. kommt. Weiterhin treten weniger Vibrationen als bei Verbrennungskraftmaschinen auf. Der Vorteil der komfortablen Beschleunigung eines eATS im Vergleich zu einem konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor und Mehrganggetriebe ist in Abb. 4.51 skizziert.

Im Vergleich zu konventionellen Antriebssträngen mit Verbrenner und Mehrganggetriebe bauen eATS relativ kompakt und weisen Kurzzeitleistungsdichten zwischen 0,5 kW/kg und 2,5 kW/kg auf. Im Vergleich hierzu erreichen konventionelle Antriebe zwischen 0,3 kW/kg und 1 kW/kg je nach Triebstrang Position (Front, Heck), Verbrennerart (Otto, Diesel), und Getriebeart (Manuell, Automatik). Ebenso ist die Leistungsdichte eines eATS abhängig von der Art des E-Motors (Induktions- oder Permanentmagnetmotor), der Leistungsklasse und weiteren Faktoren wie der Batteriespannung. Abb. 4.52 stellt die Kurzzeitleistungen und Gewichte verschiedener eATS dar. Die Aufteilung der Massen eines eATS liegen je nach Ausführung bei 20–30 % für das Getriebe, 60–70 % für den E-Motor und zirka 10 % für die Leistungselektronik.

Die höchsten eATS Leistungsgewichte von zirka 2,5 kW/kg können mit Permanentmagnetmotoren bei hohen installierten Spitzenleistungen $> 150$ kW erzielt werden. Für einen vollständigen und annähernd fairen Vergleich von konventio-

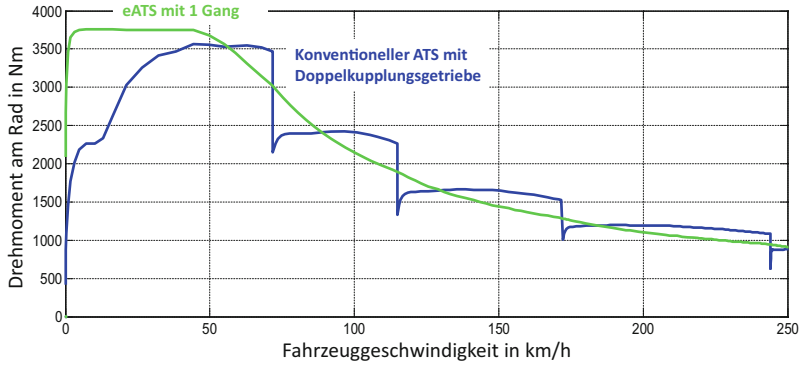



**Abb. 4.51** Drehmoment eines eATS im Vergleich zum konventionellen Triebstrang

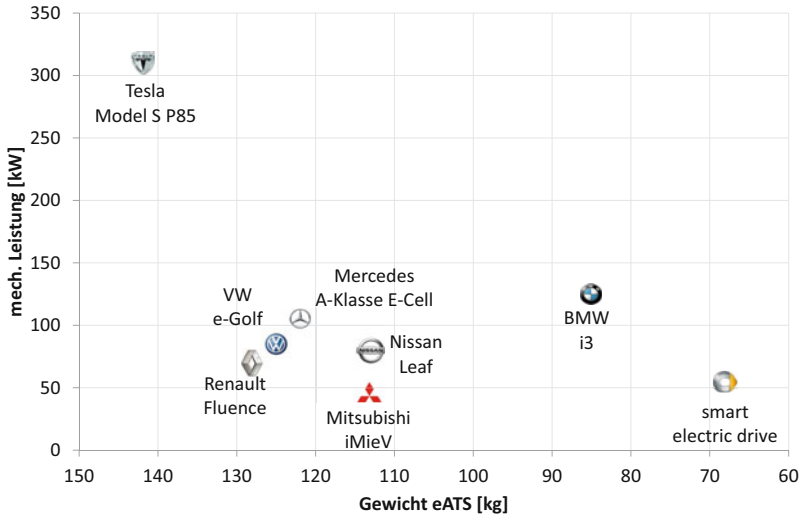



**Abb. 4.52** Leistungsgewichte verschiedener eATS

nellem Antrieb zum Antrieb für Elektrofahrzeuge muss das Gewicht der Batterie (> 100 kg) und des Tanks (< 100 kg) berücksichtigt werden. Aufgrund der geringen Energiedichte der elektrochemischen Speicherung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen ist die Leistungsdichte eines kompletten elektrischen Antriebsstrang ATS mit Batterie deutlich geringer.

Ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium von elektrischen Antriebssträngen ist der Wirkungsgrad. Je nach Fahrzeuggewicht und Zyklus kann ein eATS unterschiedliche Zykluswirkungsgrade erreichen. Exemplarisch stellt Abb. 4.53 die Leistungen und erzielten mittleren Wirkungsgrade im WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) dar.

Ähnlich wie beim Leistungsgewicht erzielen eATS mit Permanentmagnetmotor die besten Wirkungsgrade. Im Verbrauchszyklus des WLTP erreichen diese eATS bis fast 90 % Wirkungsgrad. Hierbei sind die Verluste vom elektrischen DC-Anschluss bis zur Abtriebswelle enthalten. Der größte Verlustanteil tritt in der Regel dabei im zentralen Energiewandlungselement – dem E-Motor – auf. Der Funktion der Drehmomenterzeugung des Elektromotors kommt daher besondere Bedeutung zu, wie es im nächsten Abschnitt erläutert wird.

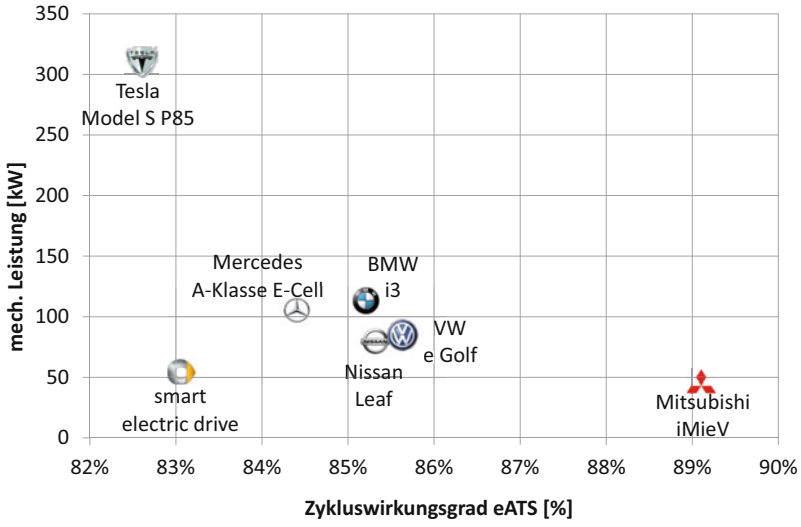



**Abb. 4.53** Leistungsgewichte verschiedener eATS

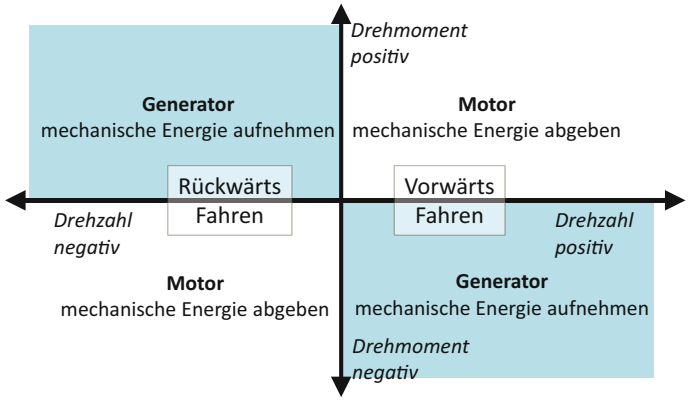



**Abb. 4.54** Betriebsarten der elektrischen Maschine im Auto

### 4.3.1.2 Elektrische Maschinen

Die elektrische Maschine ist das Energiewandlungsglied eines eATS. Arbeitet die elektrische Maschine als Motor, wird mithilfe eines intern erzeugten magnetischen Feldes die elektrische Energie in mechanische umgewandelt. Findet die Energiewandlung in umgekehrter Reihenfolge statt, arbeitet die elektrische Maschine als Generator. In Abb. 4.54 sind die 4 Betriebsarten in denen eine elektrische Maschine betrieben werden kann dargestellt.

Im Vergleich hierzu arbeitet ein Verbrennungsmotor nur in dem Quadranten mit positivem Drehmoment und Drehzahl. Zum Rückwärtsfahren erfolgt die Richtungsumkehr der Abtriebswelle im Getriebe. Beim eATS kann der E-Motor vorwärts wie rückwärts drehen. Dadurch wird keine mechanische Richtungsumkehr im Getriebe benötigt.

Da in Autos im Wesentlichen mechanische Energie erzeugt wird, spricht man vereinfacht auch von Elektromotoren oder E-Motoren entsprechend zu den konventionellen Verbrennungsmotoren.

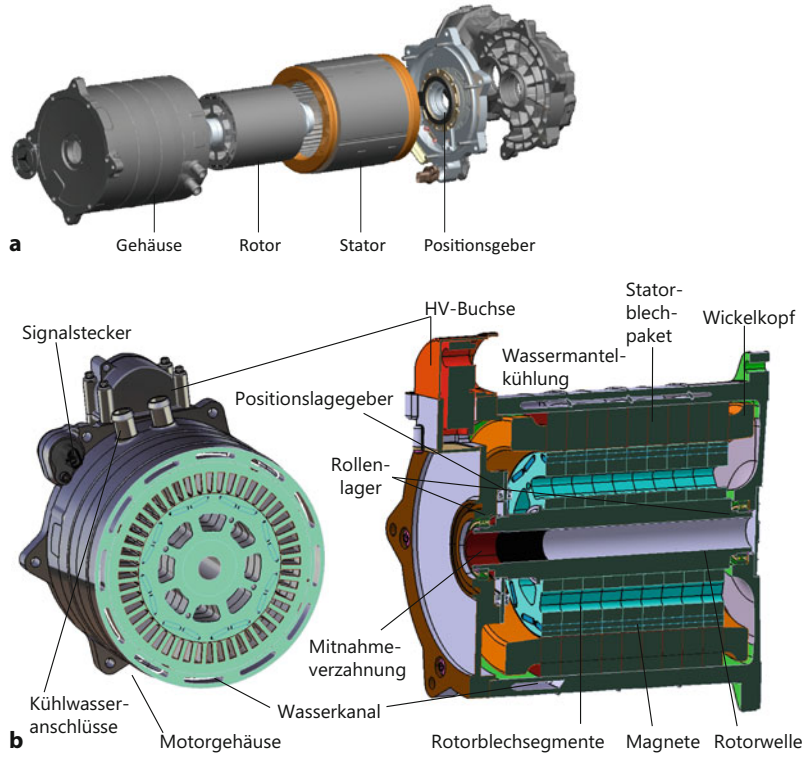



**Abb. 4.55** **a** Aufbau eines E-Motors, **b** Subkomponenten eines E-Motors

Ein E-Motor ist im Vergleich zum Verbrennungsmotor auf den ersten Blick einfach aufgebaut, wie es auch in Abb. 4.55 zu sehen ist.

Der E-Motor besteht aus einem Stator, der in der Regel mit stromleitenden Wicklungen ausgeführt ist und einem Rotor. Stator und Rotor werden im Betrieb von magnetischen Feldern durchflossen. Durch die Kopplung der im Rotor und Stator erzeugten Felder zu einem resultierenden Gesamtfeld entsteht eine Kraft, die den Rotor im Normalbetrieb in Drehung versetzt.

Es gibt unterschiedliche E-Motortypen, die nach der Art und Weise wie die Motoren erregt werden (elektrisch, permanent, reaktiv mit einem Reluktanzmoment) oder wie sich der Rotor zum Statorfeld bewegt (Synchron/Asynchron) benannt werden.

Die in Abb. 4.56 aufgeführten Maschinentypen stellen die vornehmlich verwendeten Konfigurationen dar. Darüber hinaus gibt es noch weitere

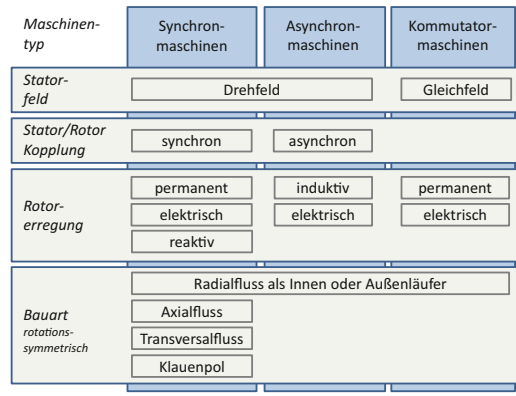



**Abb. 4.56** Klassifizierung von Maschinentypen

Sonderbauformen, die jedoch nicht in Traktionsantrieben eingesetzt werden. Ebenso werden heutzutage auch fast keine Gleichstrommaschinen mehr als Traktions-E-Motoren in Automobilen verbaut.

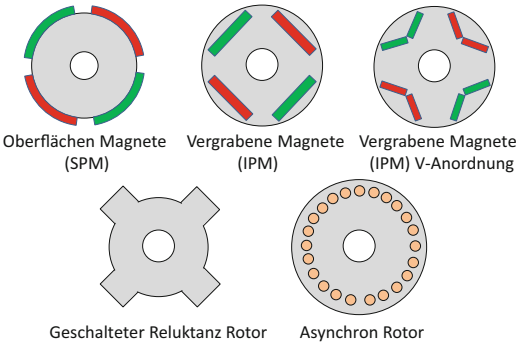



**Abb. 4.57** Typische Magnetanordnungen einer Permanentmagnet-Maschine in der oberen Reihe und weiter Rotorbauformen in der unteren Reihe

Der Grund hierfür liegt zum einen in der Rotorerregung über Bürsten, was die maximale Drehzahl beschränkt sowie eine Wartung voraussetzt. Zum anderen sind Leistungs- und Drehmomentdichte durch den mechanischen Aufbau im Vergleich zu Drehfeldmaschinen eher gering. Für Traktionsanwendungen findet man heutzutage fast alle Arten der Drehfeldmaschine. Je nach Anforderungen bietet der eine oder der andere Maschinentyp Vorteile. Überwiegend werden jedoch Permanentmagnetmaschinen oder Maschinen mit induktiver Erregung also Induktions- beziehungsweise Asynchronmaschinen eingesetzt.

Am häufigsten werden in der Traktion E-Motoren mit permanenter Magneterregung aufgrund der hohen Leistungs- und Drehmomentdichte bei exzellentem Wirkungsgrad eingesetzt. Es gibt verschiedene Weisen die Magnete dieser Motorenart im Rotor anzuordnen.

Zusätzlich sind in Abb. 4.57 noch klassische Aufbauten von Rotoren für Reluktanz- und Asynchronmaschinen dargestellt.

Je nach Einsatzanforderungen und Randbedingungen wie Bauraum, Kosten, Drehmoment, Leistung, Effizienz, Festigkeit, Geräuschabstrahlung, Fertigung etc. bieten die jeweiligen Konfigurationen Vor- und Nachteile. Heutzutage werden aus Robustheitsgründen oft nur Anordnungen mit vergrabenen Magneten (engl.: Interior Permanent Magnet IPM) verfolgt. Wie die Anordnung der Magnete die Form der Betriebsgrenzen bei Permanentmagnet-E-Motoren beeinflusst, ist in Abb. 4.58 zu sehen.

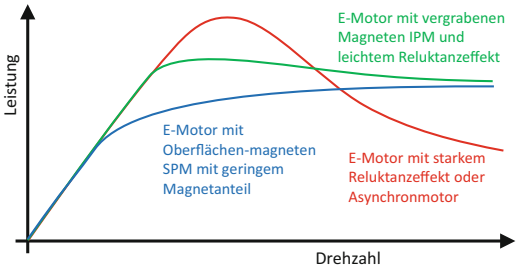



**Abb. 4.58** Betriebsgrenzen verschiedener E-Motortypen

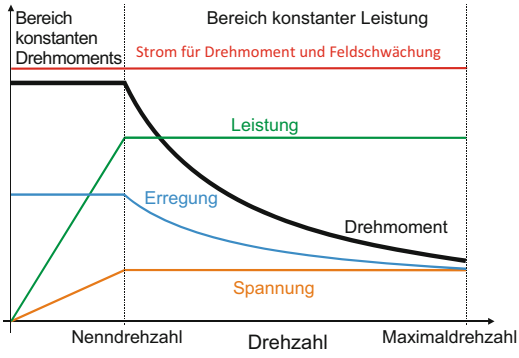



**Abb. 4.59** Typische Betriebsgrenzen eines Elektromotors

Die Betriebsgrenzen der elektrischen Maschinen teilen sich dabei grundsätzlich in zwei Bereiche auf: Den Bereich bei kleinen Drehzahlen in dem ein quasi konstantes Drehmoment und damit ein linearer Leistungszuwachs mit der Drehzahl erfolgt. Und in den Bereich quasi konstanter Leistung bei höheren Drehzahlen. Abb. 4.59 zeigt idealisierte Betriebsgrenzen und damit die Betriebsbereiche aller Maschinentypen.

Aufgrund des mit der Drehzahl linear zunehmenden magnetischen Flusses durch die Rotorerregung ergibt sich die Unterteilung in den Grunddrehzahlbereich und den Feldschwächbereich. Im Feldschwächbereich, bei höheren Drehzahlen, muss das Statorfeld aktiv dem Rotorfeld entgegenwirken, damit weiterhin die richtige Energiewandlungsrichtung eingestellt werden kann. Diese aktive Schwächung des Rotorfeldes bei PM-Maschinen führt dazu, dass der Strom, der im Grunddrehzahlbereich für die Erzeugung des Drehmoments benutzt wird, proportional steigend mit der Drehzahl für die Reduktion des Rotorfeldes eingestellt

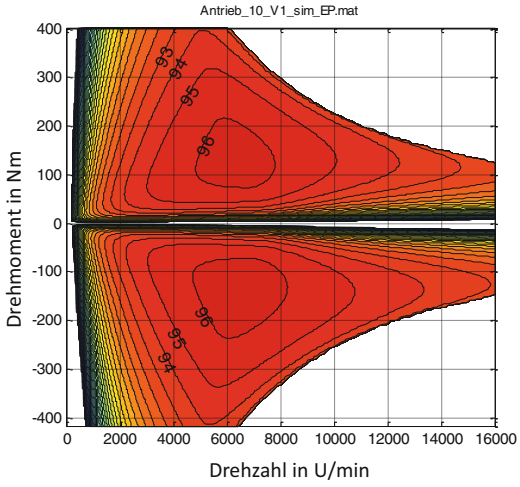



**Abb. 4.60** Typisches Wirkungsgradkennfeld eines E-Motors

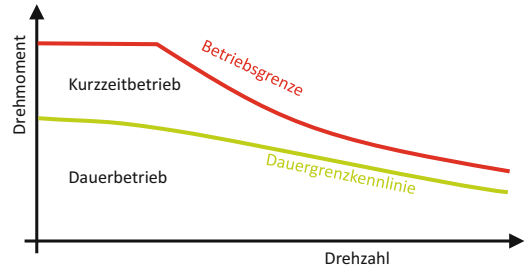



**Abb. 4.61** Dauergrenzkennlinie und Betriebsgrenze

wird. Als Folge daraus ergibt sich im Idealfall ein Drehzahlbereich mit konstanter Leistung.

Abhängig von dem jeweiligen Betriebspunkt innerhalb der Betriebsgrenzen werden bei der Energiewandlung im E-Motor Verluste erzeugt. Abb. 4.60 zeigt ein charakteristisches Wirkungsgradkennfeld eines Drehstrommotors. Je nach E-Motorart und Auslegung verändert sich die Wirkungsgradcharakteristik bei insgesamt exzellentem Wirkungsgrad.

Die wesentlichen Verlustmechanismen im E-Motor sind die Stromwärmeverluste, die in den Leitern des Stators und bei elektrisch/induktiv erregten Rotoren im Rotor auftreten. Diese auch als Kupferverluste bezeichneten Verluste sind in der Regel bei niedrigen Drehzahlen dominant. Bei hohen Drehzahlen nehmen die Eisenverluste in den Elektroblechen sowie die Wirbelstromverluste der Permanentmagnete aufgrund der höheren Wechselfrequenzen zu. Ebenso nehmen die mechanischen Verluste der Lager und aerodynamischen Verluste durch die Rotorbewegung bei hohen Drehzahlen zu.

Der Eintrag der Verluste im E-Motor erzeugt unterschiedliche Temperaturen in ihren Bauteilen. Zum Schutz vor Überhitzung wird eine Abregelung des gewünschten Drehmoments durchgeführt. Folglich haben die meisten E-Motoren neben ihrer durch Strom und Spannung gegebenen Betriebsgrenze eine Dauergrenzkennlinie. Betriebspunkte zwischen Dauergrenzkennlinie und Betriebsgrenze werden in der Regel nur im Kurzzeitbetrieb gefahren. Sobald ein Bauteil seine thermische Grenze erreicht, wird auf diesem Temperaturniveau abgeregelt, bis die Dauergrenze erreicht ist. Abb. 4.61 stellt die beiden für einen E-Motor charakteristischen Betriebsgrenzen für Kurzzeit und Dauerbetrieb dar.

Durch eine möglichst effektive Kühlung lässt sich die Dauergrenzkennlinie anheben und damit gleichzeitig die Maschinendimensionen verringern. Im Gegensatz zu Industriemotoren, die oft durch Luft gekühlt werden, kommen bei modernen Fahrmotoren oft Wassermantelkühlungen zum Einsatz. Eine der effektivsten Kühlungsmethoden bietet sich bei E-Motoren die direkt im Getriebe integriert sind. Die Bauteile werden aktiv durch direkte Benetzung mit Getriebeöl auf niedrigem Temperaturniveau gehalten.

Die Entwicklung der Traktions-E-Motoren führt zu immer besseren Leistungsgewichten bei gleichem Wirkungsgradniveau. Gründe dafür sind zum einen die betriebsrelevanten Randbedingungen wie Phasenstrom und Spannung, die immer weiter steigen. Zum anderen sind es aber auch die Materialentwicklungen von Blechen und Magneten sowie die Anhebung der Drehzahl und die Verbesserung der Kühlung. Als Vergleichskriterium werden oft Größen wie Leistungs- und Drehmomentdichte beziehungsweise Leistungsgewicht herangezogen. Solche Vergleiche zu E-Motoren unterschlagen jedoch die Tatsache, dass diese Größen unmittelbar von den externen Schnittstellengrößen,

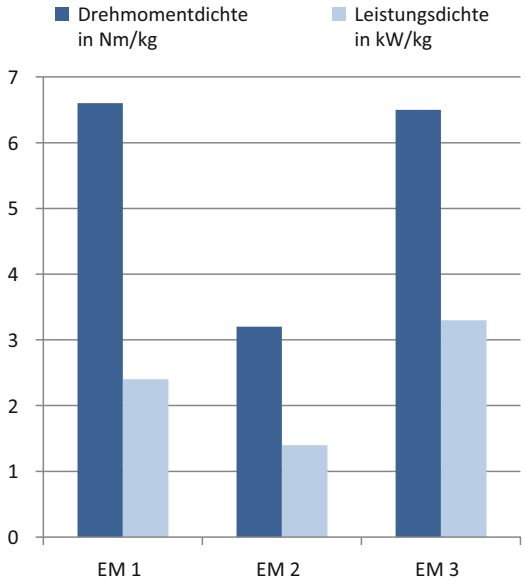



**Abb. 4.62** Drehmomentgewicht und Leistungsgewicht eines E-Motors bei unterschiedlichen Schnittstellengrößen von Phasenstrom und Batteriespannung

Spannung, Strom sowie Drehzahl, abhängen. Bei Industriemotoren, bei denen die Schnittstellengrößen oft gleich sind, ist die Verwendung der Größen wie Leistungsdichte adäquat. Bei applikationsabhängig stark variierenden Schnittstellengrößen wie bei Elektrofahrzeugen führt diese Größe jedoch zu einer verzerrten Aussage. Abb. 4.62 macht deutlich, dass ein E-Motor, der mit unterschiedlichen Schnittstellengrößen betrieben wird, unterschiedliche Leistungs- und Drehmomentgewichte erzielt.

Alleine durch die Variation der Batteriespannung kann das Leistungsgewicht verdoppelt werden.

Eine aussagekräftigere Darstellungsform zur Bewertung der Ausnutzung von E-Motoren ist der Vergleich über den Performance Index. Performance wird als Leistungsfähigkeit oder Output eines E-Motors in mechanischer Form definiert. Die Performance kann durch zwei charakteristische Punkte im Drehmoment/Drehzahl-Kennfeld beschrieben werden. Zum einen handelt es sich um den Betriebspunkt, bei dem das maximale Drehmoment bei der Eckdrehzahl erreicht wird (Gl. 4.1). Zum

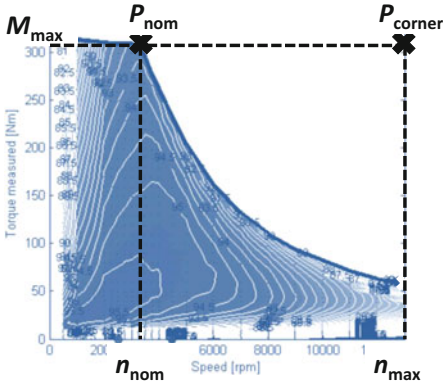



**Abb. 4.63** Charakteristische Punkte zur Performance Beschreibung eines Drehmoment/Drehzahl-Kennfelds

anderen ist die maximale Drehzahl ein wichtiges Merkmal im Kennfeld für die Performance. Der Begriff „Corner Power" wird in diesem Zusammenhang definiert, der sich aus dem maximalen Drehmoment und der maximalen Drehzahl berechnen lässt (Gl. 4.2). Beide charakteristischen Punkte im Kennfeld sind in Abb. 4.63 gekennzeichnet.

$$P_{\text{nom}} = M_{\text{max}} \cdot n_{\text{nom}} \cdot 2\pi \tag{4.1}$$

$$P_{\text{corner}} = M_{\text{max}} \cdot n_{\text{max}} \cdot 2\pi \tag{4.2}$$

Die Betriebsgrenze und damit die Performance eines E-Motors sind in der Regel direkt durch die von der Leistungselektronik verfügbaren Schnittstellengrößen gegeben: die maximalen Phasenströme und die Zwischenkreisspannung. Diese sind als elektrische Eingangsgrößen, oder auch im Folgenden als Input bezeichnet, für die erreichbare Performance zu betrachten. Die Ausnutzung des E-Motors lässt sich als Quotient aus der Performance – mechanische Outputs- und seinen Eingangsgrößen – elektrische Inputs- bestimmen. Unter Berücksichtigung der Bezugsgröße des Gewichts der Aktivteile vom E-Motor wird der Performance Index wie folgt berechnet:

$$\text{Performance Index} = \frac{P_{\text{nom}} \cdot P_{\text{corner}}}{G_{\text{EM}} \cdot \left(i_{\text{ph,rms,max}}\right)^2 \cdot U_{\text{DC,nom}}}$$

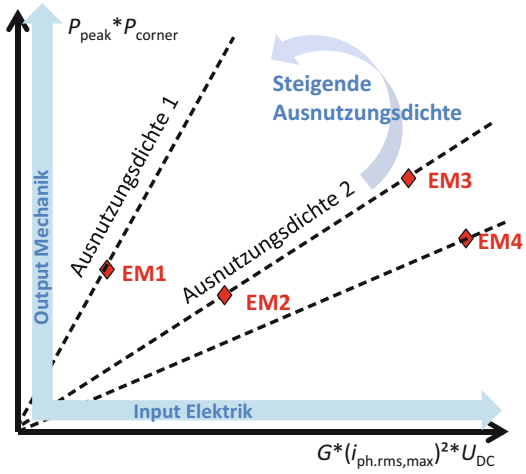



**Abb. 4.64** Visualisierung der Darstellungsform mit Performance Index zum Vergleich der Ausnutzungsdichte von E-Motoren

Der Performance Index gibt somit die Ausnutzungsdichte eines E-Motors unabhängig von den variablen Schnittstellengrößen an.

Zur Visualisierung (Abb. 4.64) des Performance Index werden die mechanischen Outputs in Abhängigkeit von den elektrischen Inputs eines E-Motors aufgetragen. Die Steigung der Ursprungsgerade durch die E-Motor Kenngröße entspricht dem errechneten Performance Index. Auf diese Art sind einerseits die In- und Outputs zur erreichten Performance unmittelbar ersichtlich, andererseits lässt sich der Vergleich der Ausnutzungsdichte durchführen.

Wird der Vergleich aus Abb. 4.62 erneut durchgeführt, zeigt Abb. 4.65 die Ergebnisse in der Darstellungsform des Performance Index. Obwohl die E-Motoren aufgrund der verschiedenen Phasenströme und Batteriespannung unterschiedliche Performance abliefern, befinden sich alle drei E-Motoren auf derselben Gerade der Ausnutzungsdichte. Diesem Ergebnis ist zu entnehmen, dass es sich, der Wahrheit entsprechend, um die gleiche Ausnutzungsdichte bzw. denselben E-Motor handelt.

Im Allgemeinen sind alle zur Bestimmung des Performance Index notwendigen Parameter eines E-Motors bekannt und zugänglich. Dies ist ein essentieller Vorteil dieser Darstellungsform für die Praxisanwendungen.

Die Betrachtung der Performance verdeutlicht wie elementar das Zusammenspiel von Leistungselektronik und E-Motor ist. Als verbindendes Glied und die Intelligenz von E-Motor und Leistungselektronik wird eine komplexe Regelung benötigt (siehe ▶ Abschn. 4.3.1.4). Die Regelung benötigt zum Einstellen der korrekten Spannungen und Ströme vom Motor die Information über Drehgeschwindigkeit und von Synchronmaschinen die exakte Rotorposition. Zusätzlich wird zum Schutz die Temperatur mittels eines Sensors erfasst oder über die elektrischen Größen Strom und Spannung mittels Modell geschätzt. Durch diesen Informations- und Leistungsaustausch kann ein E-Motor erst betrieben werden und bildet im Zusammenspiel mit Regelung und Leistungselektronik ein E-Motor-System wie es in Abb. 4.66 schematisch dargestellt ist.

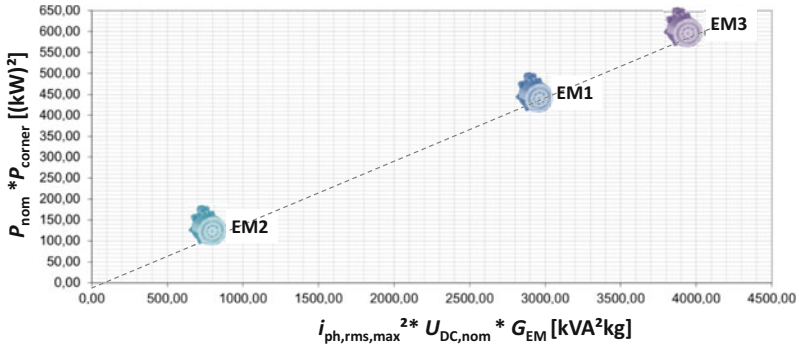



**Abb. 4.65** Vergleich der Ausnutzung eines E-Motors bei unterschiedlichen Schnittstellengrößen von Phasenstrom und Batteriespannung mithilfe von Performance Index

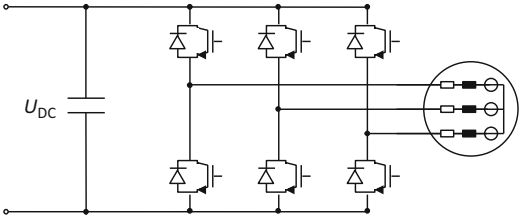



**Abb. 4.66** Schemabild eines Elektromotors mit den entsprechenden Schnittstellen zur Leistungselektronik und zur Regelung des gesamten E-Motor-Systems

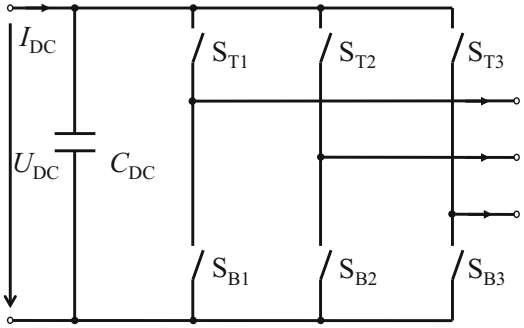



**Abb. 4.67** Grundstruktur eines dreiphasigen Wechselrichters mit Spannungszwischenkreis

Nur durch die Interaktion von der Regelung des E-Motor-Systems mit Leistungselektronik und E-Motor kann ein Antrieb optimal ausgelegt und betrieben werden.

#### 4.3.1.3 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik dient als Stelleinrichtung zur Steuerung des Leistungsflusses zwischen dem Energiespeicher und des E-Motors. Während der Energiespeicher die Leistung in Form von Gleichspannung und -strom bereitstellt, ist ein Drehspannungssystem notwendig, um den E-Motor zu betreiben. Die Umwandlungsart einer elektrischen Gleichgröße in eine Wechselgröße wird als Wechselrichten bezeichnet. Grundsätzlich existieren zwei Architekturen von Wechselrichterstrukturen, die sich durch den Zwischenkreisspeicher unterscheiden. Während der Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis das Einsatzgebiet in der elektrischen Antriebstechnik dominiert, findet der Wechselrichter mit Stromzwischenkreis nach dem heutigen Stand der Technik thyristoren-basiert Anwendung im Höchstleistungsbereich (> 10 MW). Untersuchung für den Einsatz in Elektrofahrzeugen mit einem Wechselrichter mit Stromzwischenkreis kann [62] entnommen werden.

In allen heute auf dem Markt existierenden Elektrofahrzeugen werden Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis serienmäßig eingesetzt. Abb. 4.67 verdeutlicht die Grundstruktur eines dreiphasigen Wechselrichters. Eingangsseitig wird der Wechselrichter aus dem Gleichspannungszwischenkreis gespeist und wandelt daraus ausgangsseitig eine Wechselspannung variabler Frequenz und Amplitude. Dabei bildet der steuerbare Leistungsschalter das wesentliche Element des Wechselrichters. Als Leistungsschalter werden für Automobilanwendung nach dem heutigen Stand der Technik MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) und IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) eingesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil von Wechselrichtern mit Spannungszwischenkreis besteht in der bidirektionalen Leistungsführung. Bei einer stets positiven Spannung der Energiequelle kann der Zwischenkreisstrom sowohl positive als auch negative Werte aufweisen. Bei induktiven Lasten muss der negative Stromfreilauf in allen Schalterzweigen gewährleistet werden. Die Leistungsschalter müssen somit den Stromfluss in Rückwärtsrichtung führen. Während diese Eigenschaften bei MOSFETs gegeben sind, werden IGBTs in Kombination mit jeweils einer antiparallelen Freilaufdiode verwendet.

Aufgrund der höheren Spannungsfestigkeit werden im Elektrofahrzeug IGBTs mit einer maximalen Sperrspannung von 650 V für Hochvoltanwendung verwendet. MOSFETs hingegen finden aufgrund der geringeren Schaltverluste Einsatz als Leistungsschalter im DC/DC-Wandler bei niedrigeren Spannungen bis zu 48 V, wo hohe Schaltfrequenz erforderlich ist.

Nach dem heutigen Stand der Technik werden vor allem Leistungsschalter im Elektrofahrzeug eingesetzt, die auf Basis des monokristallinen Siliziums arbeiten. Die maximale Sperrschichttemperatur erreicht zirka 175 °C. Die Kühlwassertemperatur beträgt dabei maximal 80 °C. Um höhere Chiptemperatur zu erzielen, fokussiert sich die Weiterentwicklung im Gebiet der Materialien und Bauelemente

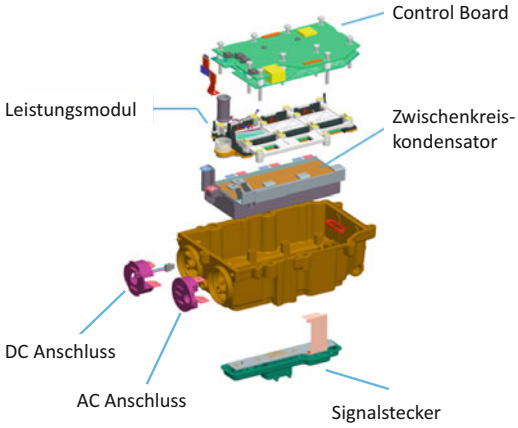



**Abb. 4.68** Aufbau eines Wechselrichters mit seinen wesentlichen Bestandteilen

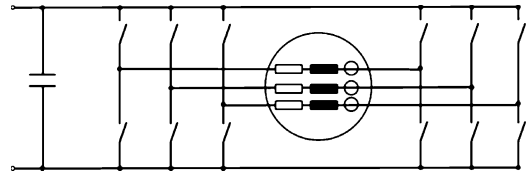


**Abb. 4.69** H-Brücke zur Verschaltung des E-Motors und der Leistungselektronik für die Leistungsklasse > 200 kW

auf den Einsatz von Siliziumkarbid (SiC) als Halbleitermaterial. SiC-Halbleiter zeichnen sich durch die höhere Sperrspannung und Sperrschichttemperatur sowie einen geringeren spezifischen Durchlasswiderstand aus, womit sich sowohl die Leistungsdichte als auch die Zuverlässigkeit der Halbleiterelemente steigern lassen.

Der Kondensator im Zwischenkreis stellt den Stromkommutierungspfad bereit und glättet damit die Zwischenkreisspannung. Für Hochvoltanwendung werden in der Regel Folienkondensatoren verwendet. Während die Kapazität durch die Anforderung der Spannungswelligkeit im Zwischenkreis festgelegt wird, bestimmt das Spannungsniveau maßgeblich das Volumen des Kondensators. In Abb. 4.68 wird der Aufbau eines Wechselrichters mit Kennzeichnung seiner wesentlichen Bestandteile dargestellt.

Der Trend zur Leistungssteigerung von Elektrofahrzeugen führen zu Forschungsaktivitäten für den Einsatz von Leistungsschaltern höherer Sperrfähigkeit (> 900 V). Die erhöhte Spannungslage erfordert jedoch eine neue Dimensionierung aller Systemkomponenten. Vor- und Nachteile vom Einsatz solcher Leistungsschalter müssen aus Systemsicht und damit speziell für die jeweilige Anwendung bewertet werden.

Bis zum Einsatz von den Leistungsschaltern höherer Sperrfähigkeit, bleibt das auslegungsrelevante Spannungsniveau von Elektrofahrzeugen weiterhin bei maximal 650 V. Wie bereits im ▶ Abschn. 4.3.1.2 erläutert, ist die Performance eines E-Motors unmittelbar abhängig von den maximal von der Leistungselektronik darstellbaren Phasenströmen und Zwischenkreisspannung. Im Fall der Leistungssteigerung ist beim gleich bleibenden Spannungsniveau die notwendige Konsequenz die Erhöhung der Stromtragfähigkeit der Leistungsschalter. Für die Leistungsklasse vom Tesla Model S erreichen die maximalen Phasenströme beispielsweise zirka 1200 A. Während Tesla solche stromtragbaren Leistungsmodule aus der Eigenfertigung beziehen, können die heute serienmäßig auf dem Markt existierenden Leistungsmodule kurzzeitig lediglich den maximalen Phasenstrom von zirka 500 A erreichen. Diese Tatsache stellt Automobilhersteller mit dem Wunsch auf höhere Leistungsklasse (> 200 kW) vor große Herausforderung.

Vor diesem Hintergrund werden neben der klassisch dreiphasigen Topologie mehrphasige Konzepte eingesetzt. In Abb. 4.69 und Abb. 4.70 werden zwei diesbezüglich am häufigsten betrachtete mehrphasige Topologien zur Verschaltung vom E-Motor mit der Leistungselektronik dargestellt.

In Abb. 4.69 ist die sogenannte H-Brücke-Schaltung dargestellt. Die Leistungserhöhung wird hier durch eine bessere Ausnutzung der Zwischenkreisspannung ermöglicht. Ein 3-strangiger E-Motor mit 6-phasigen Anschlüssen kommt in diesem Fall zum Einsatz. Die in Abb. 4.70 dargestellte Schaltung hingegen profitiert von der doppelten Nutzung der Phasenströme der Leistungsschalter. Der Betrieb des E-Motors kann sowohl 3-strangig als auch 6-strangig erfolgen. Detaillierte Betrachtungen auf System- und Komponentenebene sind in beiden Verschaltungsfällen notwendig,

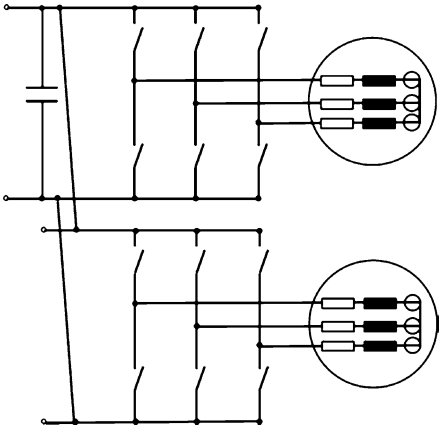


**Abb. 4.70** 6-phasige Topologie zur Verschaltung des E-Motors und der Leistungselektronik für die Leistungsklasse > 200 kW

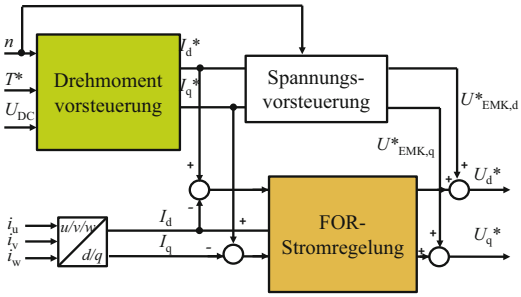



**Abb. 4.71** Regelungsstruktur des E-Motor-Systems mit Drehmomentvorsteuerung und unterlagerter FOR-Stromregelung

um die Auslegung eines eATS zur Erreichung der Leistungsanforderung durchzuführen.

#### 4.3.1.4 Regelung des E-Motor-Systems

Die gezielte Bereitstellung der geforderten Leistung am Ausgang des E-Motors erfolgt durch die Regelung. Der E-Motor eines Elektrofahrzeugs wird üblicherweise drehmomentgeregelt betrieben. Regelungskonzepte für Drehfeldmaschinen lassen sich grob in die feldorientierte Regelung (FOR) und in die direkte Drehmomentregelung (DTC) unterscheiden.

Durch die Drehmomentvorsteuerung werden die erforderlichen Ströme als Sollwerte der Stromregelung vorgegeben. Basierend auf einem rotororientierten Koordinatensystem werden die sinusförmigen Wechselgrößen in Gleichgrößen transformiert. Die Stromregelung entnimmt die Sollwertvorgaben und stellt die Ausgangsgrößen gewöhnlich mittels eines PI-Reglers. Die direkte Drehmomentregelung hingegen stellt die Regelgrößen mit Hilfe von hysteresebehafteten Zweipunktreglern innerhalb eines Toleranzbands auf die Sollwerte ein. Aufgrund der besseren Möglichkeit zur Wirkungsgradoptimierung und Drehmomentausnutzung wird das feldorientierte Regelungskonzept standardmäßig für eine höhere Regelgüte von drehmoment- und drehzahlregelbaren Antrieben verwendet. Ein weiterer Grund vom verbreiteten Einsatz der feldorientierten Regelung für automobile Anwendungen liegt darin, dass eine höhere Spannungsreserve für die gleiche Regeldynamik bei der direkten Drehmomentregelung benötigt wird [63].

Wie bereits erwähnt, kann die gesamte Regelungsstruktur in Drehmomentvorsteuerung und unterlagerte Stromregelung unterteilt werden (Abb. 4.71). Eine Arbeitspunktauswahl in Form von Betriebsströmen zur Erreichung des gewünschten Drehmoments wird durch die Drehmomentvorsteuerung getroffen. Dies muss sowohl für den Grunddrehzahl- als auch für den Feldschwächbereich gelten. Abhängig von der Spannungs- und Stromgrenze wird entschieden, ob das Aufbringen des gewünschten Drehmoments möglich ist. Ist die jeweilige Grenze erreicht, muss die Drehmomentvorsteuerung in der Lage sein, die Arbeitspunktauswahl so zu treffen, dass dieses Drehmoment bei der geforderten Drehzahl möglichst effizient und stabil eingestellt werden kann.

Die Stromregelung sorgt dafür, dass aus der Differenz der vorgegebenen und gemessenen Strangströme die Statorspannungen des E-Motors gestellt werden. Ausgehend von den Statorspannungen werden abhängig von der Zwischenkreisspannung die Ein- und Ausschaltzeit der Leistungsschalter berechnet. Dabei können Verfahren wie Pulsweitenmodulation oder Space-Vektor-Modulation verwendet werden. Bei beiden Ansätzen ist die maximale Spannungsausnutzung anzustreben.

### 4.3.1.5 Getriebe

Im eATS kommt dem Getriebe die Aufgabe zu, die (relativ) hohe Elektromotordrehzahl (Antriebsdrehzahl) zur niedrigeren Raddrehzahl (Abtriebsdrehzahl) zu wandeln. Dabei wird das (relativ) niedrige Drehmoment des Elektromotors zu einem hohen Abtriebsdrehmoment gewandelt.

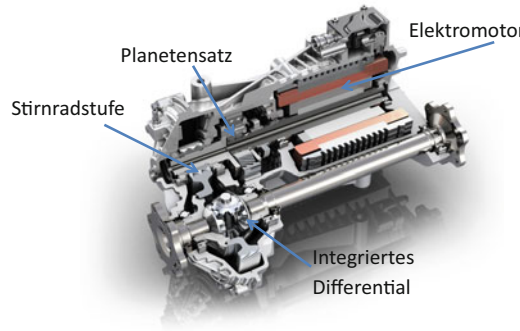
Die Verwendung eines Getriebes bietet sich trotz des breiten nutzbaren Drehzahlbandes von Elektromotoren und trotz des ab Drehzahl 0 voll zur Verfügung stehenden Drehmoments an. Hochdrehende Elektromotoren mit niedrigem Drehmoment sind günstiger und kompakter als Elektromotoren mit sehr hohem Drehmoment, wie sie bei Radnabenantrieben ohne Getriebe zum Einsatz kommen.

Dem Getriebe kommt vor Allem bei einem hochintegrierten eATS eine entscheidende Bedeutung zu, da es die mechanische Integration des Antriebs übernehmen kann. Außerdem hat das Getriebe einen hohen Einfluss auf die akustische Qualität des eATS im Fahrzeug und ist durch die steife Gehäusestruktur prädestiniert für die Anbindung des eATS an das Fahrzeug.

Zur Darstellung der notwendigen Getriebeübersetzung kommen je nach Bauweise Stirnrad oder Planetengetriebe sowie Mischformen mit Stirnrad- und Planetenstufe zum Einsatz.

In ◘ Abb. 4.72 ist eine solche Getriebemischform am Beispiel des ZF EVD1 dargestellt. Die feste 1-Gangübersetzung ist zweistufig dargestellt. Die erste Stufe ist über einen Planetensatz umgesetzt. Die zweite Stufe wird durch eine Stirnradstufe auf das Tellerrad des integrierten Differentials dargestellt. Insbesondere Bauraumanforderungen beeinflussen die Entscheidung zugunsten von Stirnrädern oder Planetensätzen.

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Position der Abtriebswelle relativ zur Rotorwelle. In ◘ Abb. 4.72 ist ein achsparalleler Antrieb dargestellt. D. h., dass die Abtriebswellen (bzw. die Gelenk-/Seitenwellen) parallel aber seitlich versetzt zueinander verlaufen. Durch den Aufbau mit einem Planetensatz und einer Stirnradstufe verlaufen die Abtriebswellen mit geringem Achsabstand am Elektromotor vorbei. Bei der Verwendung von zwei Stirnradstufen ist der Achsabstand größer, der Antrieb fällt aber zumindest lokal weniger breit aus, da auf der Antriebswelle, die mit dem Elektromotor




◘ **Abb. 4.72** eATS EVD1 von ZF

die Baubreite bestimmt, nur eine Zahnradebene mit Lagerung notwendig ist.

In ◘ Abb. 4.73 ist ein sogenannter koaxialer elektrischer Achsantrieb des Honda FCX Clarity Brennstoffzellenfahrzeugs dargestellt. Beim koaxialen Antrieb liegt die Abtriebswelle in der Rotorwelle des Elektromotors. Da das Differential dadurch genau wie die beiden Stirnradstufen in einer Achse mit dem Elektromotor liegt, baut der koaxiale Antrieb sehr breit aber gleichzeitig sehr flach. Eine große E-Motor Hohlwelle ist erforderlich, um die Abtriebswelle durch diese zu führen. Hierdurch wird zum einen die verwendbare E-Motortechnologie eingeschränkt, zum anderen werden sehr große Lager der Rotorwelle notwendig, die die maximale E-Motordrehzahl limitieren können.

Eine weitere denkbare Lage der Antriebswelle zur Abtriebswelle ist die winklige Ausrichtung der Wellen zueinander, der sogenannte Winkelantrieb. Ein Sonderfall ist dann die senkrechte Anordnung von Antrieb zu Abtrieb. Die Kraftübertragung erfolgt dabei durch Kegelräder. Besitzen die Wellen keinen gemeinsamen Schnittpunkt, d. h. es besteht ein Achsversatz, kommt die Sonderbauform der Hypoidgetriebe zum Einsatz. Winkelantriebe eignen sich für spezielle, fahrzeugspezifische Einbaulagen, haben aber Wirkungsgradnachteile im Getriebe durch die verwendeten Kegelradgetriebe.

Die Wahl eines koaxialen oder achsparallelen Aufbaus des eATS oder eines eATS mit Winkelgetriebe hat große Auswirkungen auf die geometrische Integration des Antriebs im Fahrzeug und wird daher passend zum Fahrzeugkonzept gewählt.

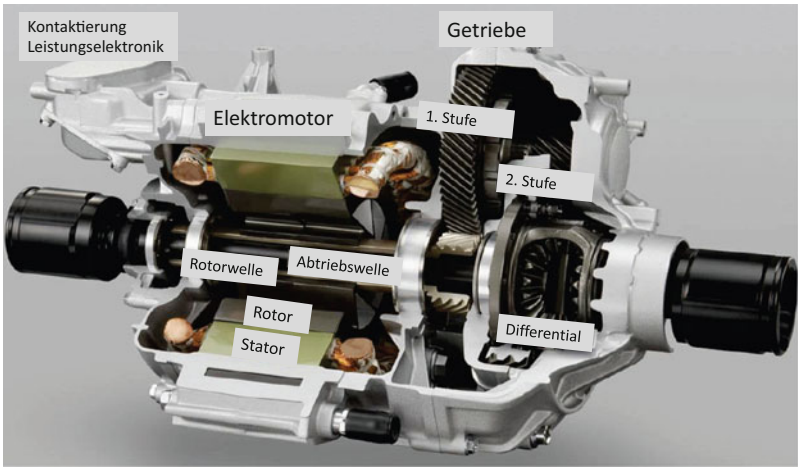



**Abb. 4.73** Koaxialer Antrieb des Honda FCX Clarity Brennstoffzellenfahrzeugs

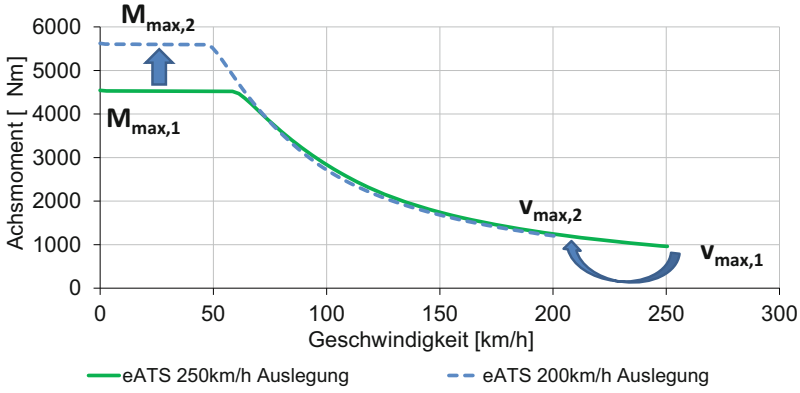



**Abb. 4.74** Vergleich zweier virtueller Auslegungen eines leistungsstarken 1-Gang eATS mit permanenterregter Synchronmaschine mit Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 200 km/h und 250 km/h

Auf dem Markt sind heute fast ausschließlich eATS Varianten mit Getrieben mit einer festen Übersetzung vertreten. Hiermit unterscheidet sich der eATS sehr stark vom verbrennungsmotorischen Antriebsstrang.

Durch die Verwendung von Untersetzungsgetrieben mit nur einer festen Übersetzung muss ein Kompromiss zwischen Anfahrsteigfähigkeit und Anfahrbeschleunigung sowie der erreichbaren Höchstgeschwindigkeit, die dann durch die Maximaldrehzahl des Elektromotors limitiert ist, gefunden werden.

Dieser Kompromiss ist in Abb. 4.74 dargestellt. Bei Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges kann, bei gleicher Maximaldrehzahl der Elektromaschine, ein deutlich höheres Anfahrdrehmoment durch eine kürzere (d. h. numerisch höhere) Übersetzung erzielt werden. Dies führt zu einer größeren Anfahragilität und einer größeren Anfahrsteigfähigkeit des Fahrzeugs.

Eine Auflösung dieses Konfliktes ist durch die Verwendung von Mehrganggetrieben möglich. Bzgl. der erreichbaren Fahrzeugperformance bieten Mehrganggetriebe insbesondere bei Verwendung von Elektromaschinen mit starkem Reluktanzeffekt oder Asynchronmaschinen (siehe Abb. 4.58 Betriebsgrenzen verschiedener E-Motortypen) deutliche Vorteile. Bei einer durch nur eine Über-

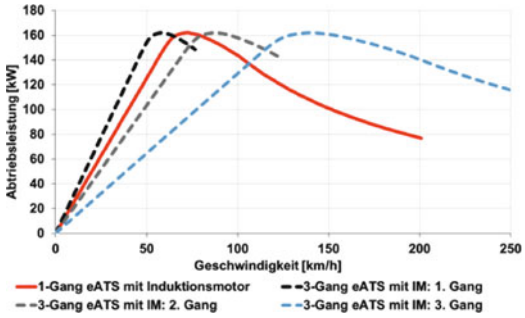



**Abb. 4.75** Vergleich zweier virtueller Auslegungen: eATS mit 1-Ganggetriebe und Asynchronmotor und eATS mit 3-Ganggetriebe und (identischem) Asynchronmotor

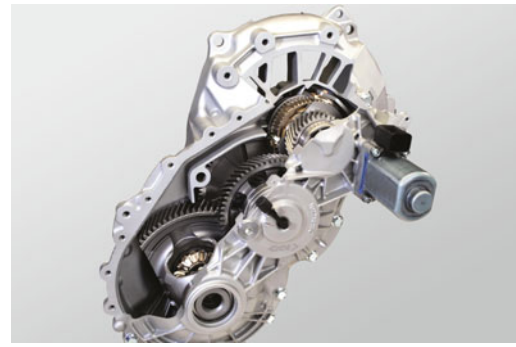


**Abb. 4.76** 2-Gang Synchroshiftgetriebe im BMW i8 von GKN mit 96 kW Eingangsleistung und 250 N m Eingangsdrehmoment

setzungsstufe fest mit der Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelten E-Maschinendrehzahl bedeutet eine zu höheren Drehzahlen hin sinkende Leistung, dass mit einer abfallenden Abtriebsleistung gegen quadratisch wachsende Fahrwiderstände beschleunigt werden muss. Durch ein Mehrganggetriebe kann der Elektromotor in einem Betriebsbereich mit höherer zur Verfügung stehender Peakleistung betrieben werden (Abb. 4.75).

Da die Größe des Elektromotors oft durch die benötigte Dauerleistung bestimmt ist, ergeben sich bei der Baugröße des Elektromotors und der damit verbundenen Kosten allerdings nur geringe Einsparpotenziale durch die Verwendung von mehrgängigen Getrieben. Wenn das Elektromotorsystem bestehend aus Elektromotor und Leistungselektronik nicht deutlich verkleinert werden kann, ergeben sich durch Mehrganggetriebe dann auch Bauraumnachteile und damit erhöhte Aufwände bei der Fahrzeugintegration des eATS. Dies ist insbesondere in Verbindung mit dem hohen Bauraumbedarf von Batterien in batterieelektrischen Fahrzeugen oder aber der Wasserstofftanks in Brennstoffzellenfahrzeugen je nach Grundfahrzeug und Verbauort des eATS besonders nachteilig.

Mehrgängige Getriebe erhöhen auch den mechanischen und elektrischen Aufwand im eATS durch den Bedarf von Aktoren/Schaltelementen zum Gangwechsel. Dadurch entstehen zusätzliche Kosten und die Robustheit des eATS wird durch zusätzliche Fehlerquellen reduziert.

Bzgl. Wirkungsgrad und damit Reichweite ergeben sich bei elektromotorischen Antrieben geringere Vorteile im Vergleich zu Verbrennungsmotoren.

Dies ist insbesondere auf die flachen Kennfelder von Elektromotorsystemen (siehe Abb. 4.60) und dem fast parallelen Verlauf der Linien konstanten Wirkungsgrades und der Leistungshyperbeln im Elektromotorkennfeld zurückzuführen. Hierdurch können die Betriebspunkte bei gleicher geforderter Antriebsleistung nur geringfügig in einen Bereich höheren Wirkungsgrades verschoben werden. Werden Lastschaltelemente zum zugkraftunterbrechungsfreien Gangwechsel verwendet, wirken sich die Verluste dieser Maschinenelemente nachteilig auf die Effizienz des Antriebs aus. Im schlimmsten Fall können die Verluste die Vorteile durch den günstigeren Betriebspunkt komplett aufheben oder gar übersteigen.

Außerdem ergeben sich bei der Verwendung von Mehrganggetrieben ein deutlich höherer Applikationsaufwand (Kupplungswechsel oder Synchronisierung) zur Erzielung eines optimalen Fahrkomforts und eine aufwendigere Betriebsstrategie zur Umsetzung der Potenziale des Mehrganggetriebes.

Ein Beispiel für ein am Markt vertretenes Mehrganggetriebe ist das GKN Synchroshiftgetriebe, das im BMW i8 an der rein elektrischen Vorderachse zum Einsatz kommt (Abb. 4.76). Wie der Name schon vermuten lässt, wird das Getriebe beim Gangwechsel synchron geschaltet. Dadurch ist kein Zugkraft-unterbrechungsfreies Schalten möglich.

Durch die Verwendung in Kombination mit einem verbrennungsmotorischen Antrieb auf der Hinterachse (Hybridantrieb) kann die Zugkraftunterbrechung durch Verbrennungsmotorleistung überdeckt werden.

Schaltungen im eATS finden nur bei Geschwindigkeiten statt, bei denen der Verbrennungsmotor zwingend in Betrieb ist.

Der BMW i8 kommt bei hohem elektrischen Anfahrmoment mit einem Zweiganggetriebe auf eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h.

Dass Geschwindigkeiten von bis zu 250 km/h sich mit sehr hohen Anfahrmomenten auch beim 1-Gang eATS verbinden lassen, zeigt der TESLA Model S P85D. Hierzu ist allerdings ein sehr hoher elektrischer Aufwand notwendig (großer Elektromotor, hoher AC-Strom der Leistungselektronik). Zur weiteren Erhöhung der elektrischen Leistung sowie des Anfahrdrehmoments und nicht zuletzt zur Darstellung der Allradfunktionalität kommt beim TESLA Model S D (Dual Drive) ein zweiter eATS an der Vorderachse zum Einsatz.

## 4.3.2 Brennstoffzellenantriebssysteme

Derzeit werden Fahrzeuge nahezu ausschließlich durch Otto- oder Dieselmotoren angetrieben. Sie stellen zurzeit das kompakteste Fahrzeug-Antriebssystem mit einem sehr hohen Entwicklungsstand dar. Nachteilig sind die heute fast vollständige Abhängigkeit von nur einer Primärenergiequelle, dem Erdöl, der relativ geringe Gesamtwirkungsgrad über einen typischen Fahrzyklus, die toxischen Emissionen $NO_x$, HC, CO, PM) sowie der Ausstoß des Treibhausgases $CO_2$. Forderungen nach Minderung dieser Nachteile führten zur Entwicklung von neuen Antriebskonzepten.

Elektromotoren wären unter diesen Kriterien optimale Energiewandler, vorausgesetzt die Bereitstellung von Strom im Fahrzeug wäre zufrieden stellend gelöst [66]. Batterien haben heute aber noch spezifische Nachteile, die zu teils erheblichen Nutzungseinschränkungen bei Elektrofahrzeugen führen (▶ Abschn. 4.3.1).

Hier bietet sich die mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle in Kombination mit einem Elektroantrieb als Lösung an:

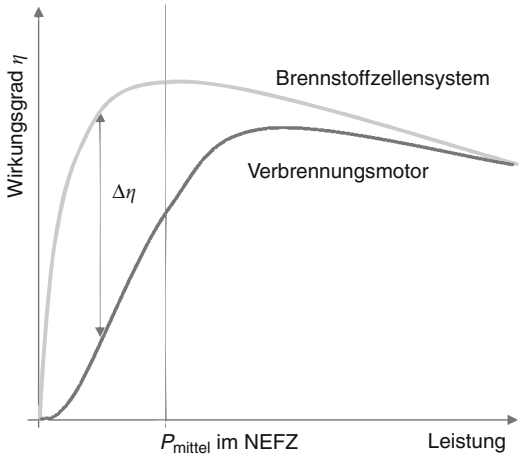



**Abb. 4.77** Qualitativer Verlauf des Wirkungsgrads von Brennstoffzellenantrieben und Verbrennungsmotoren

- Derartige Antriebssysteme besitzen einen bis zu 2fach höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsantriebe (Abb. 4.77).
- Selbst in einer Well-to-Wheel Betrachtung ergeben sich bei vielen Energiepfaden energetische Vorteile [68].
- Sie emittieren beim Betrieb der Fahrzeuge keine Schadstoffe und kein $CO_2$, sofern man nicht Methanol oder andere Kraftstoffe an Bord reformiert.
- Bei einigen regenerativen Wasserstoff-Herstellungspfaden treten auch in der Gesamtkette keine Schadstoff- und $CO_2$-Emissionen auf.
- Wasserstoff kann besser als elektrische Energie gespeichert werden, so dass sich höhere Fahrzeugreichweiten ergeben.
- Die abgegebene Leistung ist im Vergleich zu batterieelektrischen Antrieben unabhängig vom Füllgrad des Energiespeichers.
- Die Betankungszeiten sind vergleichbar mit denen bei heutigen Flüssigkraftstoffen.
- Wasserstoff kann aus allen anderen Energierohstoffen und -quellen hergestellt werden, was zur Diversifizierung der Energieversorgung des Verkehrs beiträgt (▶ Abschn. 5.9).

Wegen dieser Eigenschaften haben nahezu alle Fahrzeughersteller begonnen, solche Antriebe zu entwickeln. Daimler z. B. hat erste Prototypen be-

**Tabelle 4.8** Anforderungen an Brennstoffzellen-Antriebe

| Parameter | Größe |
|---|---|
| Systemleistung | 60–120 kW |
| Systemwirkungsgrad BZ (NEFZ) | > 45 % |
| Leistungsgewicht | < 3 kg/kW |
| Lebensdauer | > 5000 h über 10 Jahre |
| Kaltstartfähigkeit bei −20 °C | < 15 s |
| Dynamik (Leerlauf bis 90 %) | < 1 s |
| Kosten | < 50 €/kW |
| Reichweite/Betankungsdauer | > 500 km/< 5 min |

reits Anfang der 90er Jahre aufgebaut und führt heute mit ca. 200 neuentwickelten Brennstoffzellenfahrzeugen eine weltweite Flottenerprobung in Kundenhand durch. Toyota und Hyundai verkaufen BZ-Fahrzeuge seit 2014.

Brennstoffzellen-Antriebssysteme für Straßenfahrzeuge müssen hohen technischen und ökonomischen Anforderungen genügen, um gegen zukünftige verbrennungsmotorische Antriebe konkurrieren zu können. Die Grundanforderung an Brennstoffzellen-Antriebe zeigt Tab. 4.8. Darüber hinaus ergeben sich weitere Spezifikationen aus den gewohnten Eigenschaften herkömmlicher Fahrzeuge hinsichtlich Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit, Steigfähigkeit, Reichweite mit einer Tankfüllung und Zuladung. Daneben sind auch noch Komfortanforderungen, Kaltstartfähigkeit im Winter und ausreichende Fahrleistungen bei hohen Umgebungstemperaturen wichtig. Die Kunden werden nicht bereit sein, Einschränkungen gegenüber dem heute Gewohnten hinzunehmen, es sei denn die ausreichende Verfügbarkeit konventioneller Kraftstoffe ist nicht mehr gewährleistet.

Von den verschiedenen Brennstoffzellentypen (Tab. 4.9) sind Brennstoffzellen mit Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) für den Einsatz in mobilen Systemen am besten geeignet. An weiteren Typen mit modifizierten bzw. anderen Membranen wird gearbeitet. Vorrangiges Ziel ist die Anhebung der Betriebstemperatur über 100 °C.

#### 4.3.2.1 Antriebsarchitektur mit PEM-Brennstoffzellen

PEM BZ-Systeme mit reinem Wasserstoffbetrieb haben sich für den PKW-Antrieb gegen Systeme mit Reformerbetrieb klar durchgesetzt. Hintergründe liegen hauptsächlich in besserer Dynamik, niedrigeren Emissionen und geringerer technologischer Komplexität.

Eine Übersicht über die Komponenten eines Brennstoffzellen-Antriebssystems zeigt Abb. 4.78. Das Brennstoffzellensystem an sich kann aufgeteilt werden in die Module Stack, Luftversorgung, Befeuchtung, Anodenversorgung (Wasserstoff) sowie die entsprechenden Zu- und Abführungen. Ein Leistungsmanagement-System stellt die elektrische Verbindung zwischen Brennstoffzellensystem und Fahrzeug dar. Es versorgt über entsprechende Wandler die Hochvolt(HV)-Komponenten wie den elektrischen Fahrantrieb, ggf. eine Pufferbatterie sowie elektrisch angetriebene Hilfsaggregate. Weitere Systemkomponenten bilden die Wasserstoffspeicher sowie die Wärmetauscher zur Abführung der Abwärme an die Umgebung. Eine elektronische Überwachungseinheit übernimmt das Sicherheitsmanagement für das gesamte System.

##### 4.3.2.1.1 Brennstoffzellen-Stack

Die Kernkomponente des Brennstoffzellensystems bildet der Stack, der aus bis zu einigen hundert elektrisch in Serie geschalteten Elektrolyt-Elektroden-Anordnungen aufgebaut ist. Im Falle der PEM-Brennstoffzelle wird als Elektrolyt eine sehr dünne Polymer-Membran (Dicke zwischen etwa 20 und 50 µm) verwendet. Abb. 4.79 zeigt den Aufbau und die Funktionsweise einer solchen Membran-Elektroden-Anordnung (MEA). Die Anode wird mit Wasserstoff, die Kathode mit Luft beaufschlagt. Die Membran hält beide Gase voneinander getrennt und steuert die chemische Reaktion. Eine dünne Platinbelegung auf beiden Elektroden wirkt als Katalysator und beschleunigt die Reaktionsgeschwindigkeit, mit der Wasserstoffatome in Elektronen

**Tabelle 4.9** Brennstoffzellentypen mit charakteristischen Daten

| Typ | Elektrolyt | Arbeitstemperatur | Brennstoff | Anwendung |
|---|---|---|---|---|
| Alkalische Brennstoffzelle | Kalilauge (KOH) | ≈ 60 °C | $H_2$ (kein $CO_2$) | Raumfahrt |
| Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle | Protonen leitender Polymerelektrolyt | ≈ 80 °C (max. 95 °C) | $H_2$, Methanol | Raumfahrt, Fahrzeuge, Stationäranwendungen |
| Phosphorsäure-Brennstoffzelle | Phosphorsäure ($H_3PO_4$) | ≈ 190 °C | $H_2$ | Stationäranwendungen |
| Karbonatschmelze-Brennstoffzelle | Kalium-/Lithium-Karbonat ($K/LiCO_3$) | ≈ 600 °C–700 °C | $H_2$, CO | Stationäranwendungen (Kraft-Wärme-Kopplung) |
| Festkörperoxid-Brennstoffzelle | $Y_2O_3/ZrO_2$ | > 800 °C | $H_2$, CO | Stationäranwendungen (+ Turbine) |

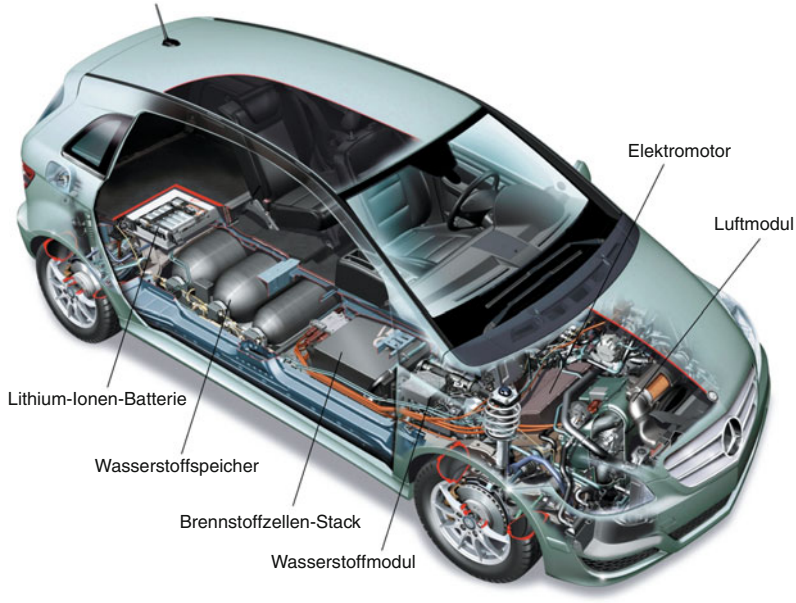



**Abb. 4.78** Komponenten eines Brennstoffzellen-Antriebs

und Protonen zerlegt werden.

$$H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2\,e^-$$

Die Protonen passieren die Membran und gelangen zur Kathode. Die Elektronen sammeln sich an der Anode an. Dadurch entsteht eine Potenzialdifferenz. Werden beide Elektroden außerhalb der Zelle elektrisch verbunden fließt ein Strom. Die Elektronen reagieren an der Kathode mit den Protonen und dem Luftsauerstoff zu Wasser.

$$O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \rightarrow 2\,H_2O$$

Bei der Reaktion entsteht Wärme, die abgeführt werden muss.

Die Polymer-Elektrolyt-Membran reagiert sehr empfindlich auf Schwankungen einiger Betriebsparameter. Insbesondere muss ihre Feuchtigkeit in wohl definierten Grenzen gehalten werden.

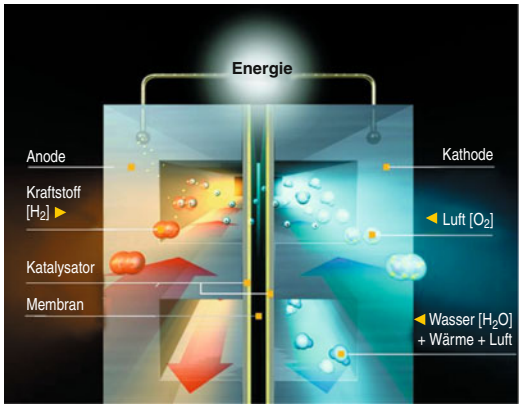



**Abb. 4.79** Prinzipdarstellung einer Brennstoffzelle

Tab. 4.10 zeigt die für einen optimalen Betrieb einzuhaltenden Betriebsparameter und Anforderungen.

In den letzten Jahren sind große Fortschritte bei der Brennstoffzellentechnologie erzielt worden. Vor einer Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen sind jedoch noch vielfältige Aufgaben zu lösen. Tab. 4.11 zeigt diese Herausforderungen im Überblick.

Standen bisher technologische Ziele, wie z. B. Lebensdauer, Robustheit sowie sicherer, zuverlässiger und schneller Froststart im Fokus der Entwicklungsaktivitäten, so wird in den nächsten Schritten die Kostenreduktion eine dominierende Rolle spielen [72]. Im Folgenden werden beispielhaft die von Daimler und anderen erreichten Fortschritte hinsichtlich Lebensdauer, Kaltstartfähigkeit und Kosten beschrieben.

**Lebensdauer** Eine so genannte Membranausdünnung ist der für die Lebensdauer eines Stacks beschränkende Faktor. Um eine ausreichende Lebensdauer zu garantieren, müssen die Mechanismen dieser Membranausdünnungen verstanden und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Ein möglicher Mechanismus für die Membranausdünnung ist im Handbook of Fuel Cells [64] beschrieben. Sie beginnt an der Anode, wo durch Sauerstoffionen, die durch die Membran diffundieren, Wasserstoffperoxid gebildet wird. Falls gleichzeitig metallische Ionen, z. B. $Fe^{2+}$-Ionen vorhanden sind, werden freie Wasserstoffperoxid-Radikale gebildet, die die Membran schädigen. Abb. 4.80 zeigt eine solche Membrandegradation.

Ein ähnlicher Mechanismus wurde für die Kathode in Verbindung mit der Diffusion von Wasserstoff beschrieben. Hohe Temperaturen und geringere Befeuchtung in der Membran beschleunigen den Schädigungsprozess.

Ein gemäß diesen Erkenntnissen modifizierter Stack zeigt erst nach 4facher Zyklenzahl die typische Membranlochbildung, obwohl gleichzeitig dünnere Membranen – 25 µm an Stelle von 50 µm – verwendet wurden. Alterungsmechanismen und ihre Auswirkungen auf den Fahrzeugbetrieb sind Gegenstand detaillierter Untersuchungen [73, 74].

**Froststartfähigkeit** Ein sicherer, zuverlässig reproduzierbarer und schneller Froststart ist eine weitere Herausforderung, die gelöst werden muss, damit Brennstoffzellen im Alltagsgebrauch in Fahrzeugen uneingeschränkt genutzt werden können. Die Haupteinflussgröße ist die Wasserverteilung im Stack vor dem Einfrieren und die Balance zwischen dem Aufwärmen des Stacks und der Wasserbildung unterhalb des Gefrierpunktes während der Startphase. Beides muss genau kontrolliert und gesteuert werden (Abb. 4.81). Dies kann durch eine spezielle Zellenbauweise erreicht werden, die sowohl haltbarkeits- als auch kaltstartkompatible Betriebsbedingungen im Normalbetrieb und bei Kaltstart gewährleistet.

**Kosten** Bis zur Marktreife der Brennstoffzellen-Technologie müssen die Kosten auf ein akzeptables Niveau gesenkt und die Robustheit sowie die Lebensdauer des Stacks auf die für die Anwendung im automobilen Bereich notwendige Werte gebracht werden [75]. Studien, z. B. von Arthur D. Little [65], gehen davon aus, dass etwa 75 % der Stack-Kosten allein durch die Membran-Elektroden-Anordnung (MEA) verursacht werden. In dieser wiederum ist die Membran der teuerste Anteil, gefolgt vom Platinkatalysator. Daher konzentrieren sich die Anstrengungen zur Kostenreduktion hauptsächlich auf diese beiden Komponenten. Bei einer perfluorierten Membran ist die Feuchte eine sehr kritische Größe für die Leitfähigkeit. Sie schränkt das Betriebsfenster ein. Insbesondere darf die Membran

**Tabelle 4.10** Betriebsparameter und Anforderungen an Brennstoffzellen-Stacks

| Betriebsparameter und Anforderungen | | Wert |
|---|---|---|
| Gasdruck | | 1,1 bis 2,5 bara abhängig von elektrischer Leistung |
| Feuchtigkeit | Kathode | > 30 % rel. Feuchte |
| | Anode | < 35 % rel. Feuchte |
| Betriebstemperatur | | 60 °C bis 95 °C |
| Kaltstarttemperatur | | −25 °C und darunter |
| Zellleistungsdichte | | 1 W/cm$^2$ bei > 650 mV |
| Spannungsdegradation | | < 10 µV/h |
| Lebensdauer | | > 5000 h |
| Volumetrische Leistungsdichte des Stacks | | > 1700 W/l |
| Gravimetrische Leistungsdichte des Stacks | | > 1200 W/kg |

**Tabelle 4.11** Schlüsselthemen von Brennstoffzellen-Systemen

| Problem | Angestrebte Eigenschaften | Technologische Lösung |
|---|---|---|
| Lebensdauer | Homogene Wasserverteilung in der Membran-Elektroden-Anordnung | Materialien, Produktionsprozesse, Stack-Aufbau, Hybridisierung des Antriebstrangs |
| Robustheit | Qualitativ hochwertige Elektronik, Sensoren, Ventile | Komponentenbestellung mit Fahrzeug-Produktionsprozessen |
| Verbrauch/elektrischer Wirkungsgrad | Hoher Wirkungsgrad bei Teillast, optimierter Betriebsdruck | Luftversorgung mit Radialverdichter und Expander (Turbolader) |
| Thermomanagement | Vermeidung von Wasserkondensat, Betriebstemperatur > 90 °C | Materialien, effizientes Systemkonzept, fortgeschrittene Kühlsysteme |
| Kalt-/Froststart | Vermeidung von Wasserkondensat in der Gasdiffusionsschicht und den Gaskanälen | Materialien, Stack-Aufbau, Hybridisierung des Antriebstrangs |
| Geräuschemission (Noise, Vibration, Harshness) | Niedriger Geräuschpegel von Kompressor und Antriebsmotor | Luftversorgung mit Radialverdichter |
| Kosten | Hohe Leistungs- und Stromdichte, kostengünstige Materialien, geringe Nebenverbrauchsleistung | Materialien, Stack-Aufbau, einfacher Systemaufbau mit hoher Effizienz |

nicht deutlich über 100 °C betrieben werden, da sonst das Wasser in der Membran verdampft. Forschungsanstrengungen konzentrieren sich deshalb auch auf nicht wässrig ionisch leitende Hochtemperaturmembranen, mit denen man Betriebstemperaturen bis zu 120 °C erreichen möchte.

Ein weiterer Schritt zur Kostenreduktion ist die Verminderung der Platinbelegung. Eine immer weiter gehende Senkung des Platingehaltes allein führt aber nicht zum Kostenminimum. Das Optimum stellt sich vielmehr bei einem bestimmten Platingehalt und der mit ihm erreichbaren Leistungsdichte ein. Heute wird ein Platingehalt von 0,3 g/kW für möglich gehalten. Damit wäre für die Membran-Elektroden-Einheit ein Zielkostenbereich von ca. 5 €/kW erreichbar. Die Department of Energy

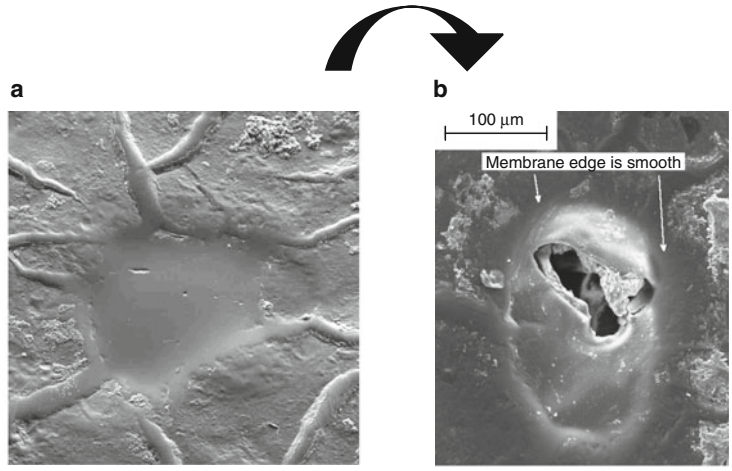



**Abb. 4.80** Membrandegradation (Quelle: Ballard) **a** Lokale Verringerung der Dicke der Membran; **b** Verringerte Reißfestigkeit führt zu Membranbrüchen

**Die Gefrierstart-Prozedur**

Die Polarisation der Brennstoffzelle (BZ) hängt von der Temperatur ab (Polarisationskurven durch gerade Gefällelinien vereinfacht dargestellt).
0 → 1: BZ mit Wasserstoff und Luft versorgen;
1 → 2: Stromstärkesteigerung bis Minimalspannung, $v = 0$ km/h;
2 → 3: Stromstärkesteigerung so weit wie möglich, während die BZ-Temperatur steigt, $v = 0$, km/h;
3 → 4: Weitere Erwärmung bei konstanter Leistungsabgabe ($P = U \cdot I$), $v = 0$ km/h;
4 → 5: Stabiler Arbeitspunkt wird erreicht, BZ-Fahrzeug kann losfahren und beschleunigen ($v > 0$ km/h);
5 → 6: Beim Fahren erreichen Brennstoffzelle und Kühlkreislauf den Temperatur-Arbeitspunkt.

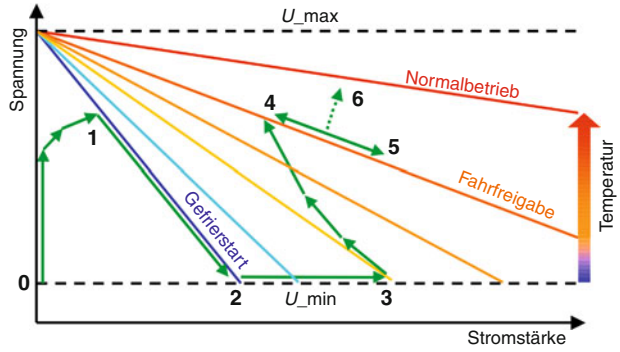



**Abb. 4.81** Gefrierstart-Prozedur

(DOE)-Zielwerte 2020 für Stack und Antriebssystem liegen bei US$ 40/kW.

Zusammenfassend können somit die Entwicklungsziele auf drei Punkte reduziert werden: Vergrößerung der Leistungsfähigkeit bei Einhaltung der Kostenlimits, Steigerung von Robustheit und Zuverlässigkeit sowie Verlängerung der Lebensdauer und Dauerhaltbarkeit. Diese Ziele können nur in engem Verbund zwischen akademischer (grundlagenorientierter) und industrieller (anwendungsorientierter) Forschung angegangen werden. Entsprechende Förderprogramme werden in der Bundesrepublik Deutschland (CEP), aber auch auf EU-Ebene (HyFLEET CUTE) und in den Vereinigten Staaten (DOE-Freedom Car) sowie Japan (JHFC) durchgeführt. Es zeigt sich inzwischen, dass die ursprüng-

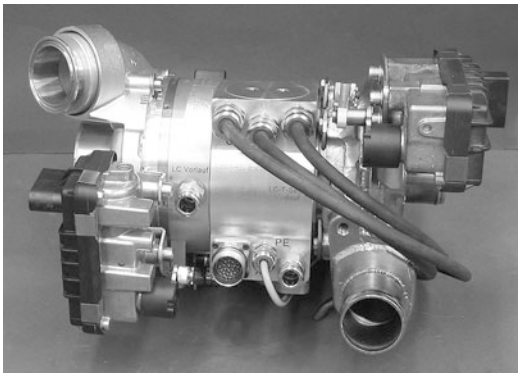


**Abb. 4.82** Elektrischer Turbolader

lich gemachten Annahmen über die Markteinführung der Brennstoffzellen-Antriebstechnologie Anfang des Jahrtausends zu optimistisch waren. Wegen der Komplexität der Technologie muss dieser Zeitpunkt deutlich nach hinten verschoben werden.

#### 4.3.2.1.2 Stack-Peripherie

**Luftversorgung** Die Versorgung der Kathode mit Luftsauerstoff erfolgt über ein Luftmodul. Es umfasst Luftfilter, Schalldämpfung und einen elektrisch angetriebenen Turbolader, der die Luft auf etwa 1,1 bara (Teillast) bis zu 2,5 bara bei Volllast verdichtet [69]. Durch Einsatz einer Expandereinrichtung (Turbine) kann ein Teil der Verdichterenergie zurück gewonnen werden. Dies kommt dem Systemwirkungsgrad zu Gute und erlaubt es, den Stack kleiner auszuführen (−10 bis 15 %). Das Modul enthält auch die Druckregelung für den Stack. Heute werden hauptsächlich Schraubenlader verwendet, die in dem erforderlichen Druck- und Förderbereich die besten Wirkungsgrade aller Maschinen mit innerer Verdichtung aufweisen [67]. Werden in Zukunft ölfrei gelagerte Strömungsmaschinen (Abb. 4.82) eingesetzt, kann eine deutliche Effizienzsteigerung der Verdichtung im Teillastbereich erreicht werden. Dies führt zu einer weiteren Verringerung des Energieverbrauchs der Fahrzeuge im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Bei gleicher Wasserstoff-Speicherkapazität kann so auch die Fahrzeugreichweite vergrößert werden.

**Luftbefeuchtung** Zur Befeuchtung der angesaugten Luft wird meist ein komplexes Wassermanagementsystem genutzt. Das Wasser wird aus dem Abgas kondensiert und der Ansaugluft in geeigneter Weise zugeführt. Eleganter lässt sich dies mit einem Modul auf Basis von Hohlfaserbündeln bewerkstelligen, wie es Daimler in der B-Klasse F-CELL nachgewiesen hat (Abb. 4.83a, b). Damit wird die Abluft ent- und die Zuluft gleichzeitig befeuchtet. So kann nicht nur die Anzahl Komponenten und das Gewicht verringert sondern auch das Bauvolumen auf ein Drittel gesenkt werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, dass Flüssigwasser vermieden wird, was das System vor dem Einfrie-

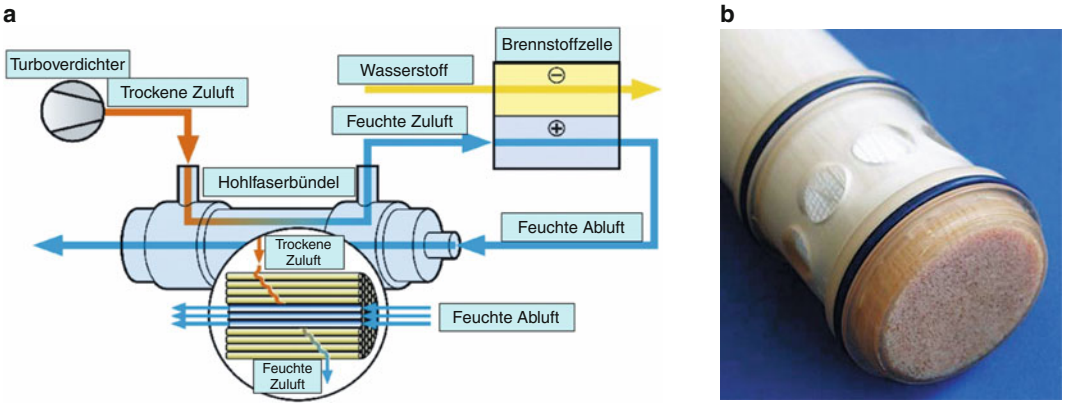



**Abb. 4.83** **a** Schema Luftbefeuchtung; **b** Hohlfaserbündel

ren schützt. Es gibt auch Membranen, bei denen eine ausreichende Hydration ohne Zuluftbefeuchtung ausschließlich über eine Anodenrezirkulation erreicht werden kann. Am Ende wird die Frage sein, was kostengünstiger ist: Zuluftbefeuchtung oder Rezirkulation.

**Anodenkreislauf** Auf der Anodenseite des Stacks befindet sich ein Anodenmodul, das aus einem geschlossenen Kreislauf mit Rezirkulationsgebläse und einer Wasserstoff-Dosiereinheit besteht. Es hat folgende Funktionen:

- Dosierung des Kraftstoffmassenstroms,
- Befeuchtung des Kraftstoffmassenstroms durch Rückführung von feuchtem Wasserstoff,
- Rezirkulation von Wasserstoff zur Vermeidung von Verarmungszonen auf der Anode.

Durch den geschlossenen Kreislauf werden Wasserstoffverluste minimiert, was den Systemwirkungsgrad verbessert. Nur soviel Wasserstoff wird zudosiert wie elektrochemisch umgesetzt wird. Allerdings tritt eine Aufkonzentration von Stickstoff durch Diffusion von der Kathode auf die Anode auf. Dadurch ist abhängig von der Betriebsstrategie von Zeit zu Zeit ein kurzzeitiges Abblasen erforderlich, das am einfachsten aus dem Anodenkreis in die Kathodenzuluft erfolgt.

Zukünftig ist zur Steigerung der Leistungsdichte und zur weiteren Kostensenkung von Brennstoffzellenantrieben auch ein Entfall des geschlossenen Anodenkreislaufs denkbar [70]. Die offene Anode wird an ihrem Eintritt mit Wasserstoff beschickt, welcher nahezu vollständig umgesetzt wird. Die sehr kleine Menge an Wasserstoff, welche die Anode wieder verlässt, kann zum Beispiel in einem Abgaskatalysator umgesetzt werden [71].

**Kühlung** Das maximale Betriebstemperaturniveau der PEM-Brennstoffzelle von heute etwa 95 °C ist im Vergleich zu den 110 bis 120 °C bei Verbrennungsmotoren niedrig. Verbrennungsmotoren geben außerdem etwa 30 % der gesamten Verlustwärme über das heiße Abgas direkt an die Umgebung ab. Bei der Brennstoffzelle muss die gesamte Abwärme über einen Wärmetauscher an die Umgebung abgeführt werden. Durch die niedrigere Temperaturdifferenz des Kühlmittels zur Umgebung und der trotz besserem Wirkungsgrad etwa doppelt so hohen Abwärmemenge stellt die Kühlung bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen eine große Herausforderung dar. Insgesamt müssen die Kühleinrichtungen bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen auf heutigem Stand eine über doppelt so hohe Effektivität aufweisen. Obwohl die heute verwendeten Membranen potentiell Betriebstemperaturen bis 95 °C erreichen können, arbeiten OEMs, Zulieferer und Institute intensiv an neuen Membranen für den Temperaturbereich von 110 °C bis 120 °C. Auf diesem Temperaturniveau kann die Abwärme besser abgeführt werden.

Eine Vereinfachung des Gesamtsystems wäre ein wichtiger Schritt in Richtung Markteinführung. Dazu gehören neben der Temperaturanhebung die Reduzierung des Befeuchtungsaufwandes sowie die Vereinfachung oder gar der Wegfall des Anodenkreislaufes.

#### 4.3.2.1.3 Mobile Wasserstoffspeicher

Um die vom Kunden gewohnten und geforderten Fahrzeugreichweiten mit einer Tankfüllung realisieren zu können, sind weitere Fortschritte bei der Entwicklung mobiler Wasserstoffspeicher notwendig. Neben hohen spezifischen Energiedichten werden noch weitere fahrzeugspezifischen Anforderungen an solche Speicher gestellt: Sicherheitsaspekte, einfaches Betankungshandling, minimales Gewicht und optimale Einbaumaße, robust gegen mechanische Beschleunigungskräfte, ausreichende Lade-/Entladezyklen, hohe Lebensdauer und natürlich akzeptable Kosten [76]. Weitere Beurteilungskriterien sind die Energiebilanzen und ggf. die Regenerationsfähigkeit von Speichermaterialien, die in einem externen Prozess regeneriert werden müssen (z. B. Natriumborhydrid).

Eine Übersicht über aktuelle Daten der heute bekannten Wasserstoffspeichermethoden enthält ◘ Tab. 4.12. Unter Abwägung aller Kriterien scheint die Wasserstoff-Druckspeicherung eine viel versprechende Methode für mobile Anwendungen zu sein. Derzeit werden in Faserverbunddruckspeichern Drücke bis zu 700 bar realisiert (◘ Abb. 4.84). Mittel- und langfristig kommt es darauf an, Wasserstoffspeichersysteme mit verbesserten Speichereigenschaften und vertretbaren Kosten zur Verfügung zu stellen. Die vom DOE für das Jahr 2015

**Tabelle 4.12** Charakteristische Daten von mobilen Wasserstoff-Speichern

| Typ | Spezifischer Energieinhalt des Speichers*) | | | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|
| | kWh/kg | Gew. % $H_2$ | kWh/l | |
| Druckwasserstoff 350 bar Compositebehälter | 1,2–1,5 | 4,0–5,0 | 0,6 | Spezifische Energie (kWh/l) nimmt mit steigendem Druck zu. Gravimetrische Dichte durchläuft Maximum |
| Druckwasserstoff 700 bar Compositebehälter | 1,3–1,6 | 4,3–5,3 | 1,0 | |
| Flüssigwasserstoff (−253 °C) | 1,4–2,7 | 4,6–9,0 | 0,8–1,5 | Angestrebte Abdampfrate 1–2 % pro Tag. Verflüssigungsenergie sehr hoch: 1 kWh PE/kWh $H_2$ |
| Tieftemperatur-metallhydride | 0,4 | 1,2 | 0,7–1,3 | Hohe Wasserstoffreinheit notwendig; Systemdruck ca. 50 bar |
| Chemische Hydride, Alanate, Amide/Hydride | 0,3–1,4 | 3,0–5,0 | 1,0–1,6 | Weitgehend noch im Forschungsstadium; Systemdrücke ca. 50 bis 100 bar |

*) Speicher ohne Peripherie; Stand 2005; Ziele DOE 2015: 3 kWh/kg (9 %), 2,7 kWh/l

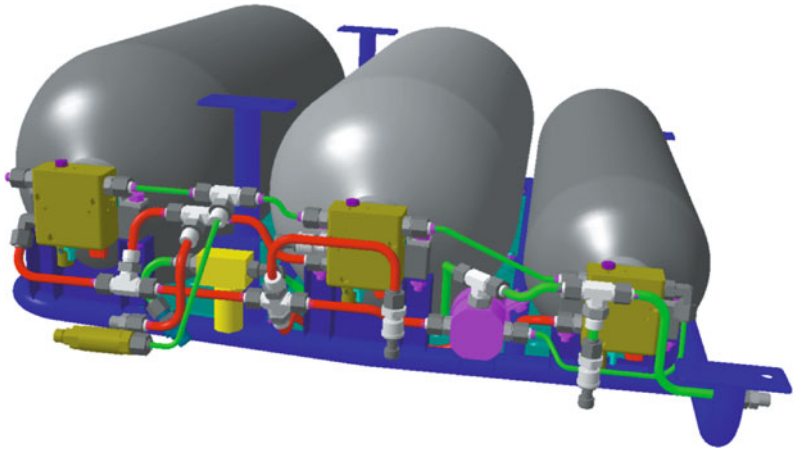


**Abb. 4.84** CAD-Darstellung eines 700 bar Druckspeichersystems

herausgegebenen Zielwerte für die spezifischen Energieinhalte liegen bei 3 kWh/kg bzw. 9 Gew.-%, sowie 2,7 kWh/l. Bisher werden sie noch von keiner Speichermethode erreicht.

#### 4.3.2.1.4 Hybridisierter Brennstoffzellenantrieb

Zum kompletten Antriebstrang gehören neben dem Brennstoffzellensystem der Elektroantrieb und gegebenenfalls noch Batterien. Wird der Elektroantrieb außer von einer Brennstoffzelle noch von einer Hochspannungsbatterie gespeist, spricht man von einem hybridisierten Brennstoffzellenantrieb.

Heute stehen Elektromotoren in verschiedenen Ausführungsarten für Fahrzeugantriebe zur Verfügung (► Abschn. 4.3.1). Elektromotoren weisen eine für den Einsatz in Straßenfahrzeugen ideale Drehzahl-Drehmoment Charakteristik auf. Das maximale Drehmoment ist schon bei geringen Drehzahlen verfügbar. Auch die kurzzeitige Überlastbarkeit

bringt Vorteile. Außerdem arbeiten sie mit hohen Wirkungsgraden und geringer Geräuschemission und in der Regel kann auf ein mehrstufiges Getriebe verzichtet werden.

Heute werden zur Unterstützung von Brennstoffzellenantrieben Batterien mit wenigen kWh Energieinhalt und einigen zehn kW Leistung verwendet. Hauptsächlich werden dafür Lithiumionen-Batterien mit Zellen hoher Leistungsdichte und geringem Energieinhalt eingesetzt (► Abschn. 4.3.1.4).

Eine zusätzliche Batterie im Antriebsstrang macht das Gesamtsystem zwar komplizierter, sie bietet aber auch einige Vorteile. Zum Beispiel liegen die Dynamikanforderungen an Elektroantriebe bei etwa 800 A/s. Diese Rampe kann das Brennstoffzellensystem aufgrund der Trägheit der Luftverdichtung alleine nicht liefern. Mit Unterstützung durch Batterien sind solche Stromrampen aber problemlos realisierbar. Die Batterie erlaubt zusätzlich die Rückgewinnung von Bremsenergie und ermöglicht einen einfacheren Kaltstart unter 5 °C. Außerdem kann die Batterie zusätzliche Peakleistung für Beschleunigungsvorgänge zur Verfügung stellen. Länger andauernde Leistung hingegen muss über die Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt werden, da sie einen größeren Kostenvorteil bringt als der Einsatz energiereicher Batteriezellen.

#### 4.3.2.2 Sicherheit

Wasserstoff erfordert wie jeder andere Kraftstoff spezifische Sicherheitsvorkehrungen. Mit entsprechenden Maßnahmen kann das Sicherheitsrisiko bei Wasserstofffahrzeugen auf ein mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbares Niveau gebracht werden. Wasserstoff-Luftgemische sind in einem weiten Konzentrationsbereich (4 % bis 77 % Wasserstoff in Luft) entflammbar. Dazu sind außerdem sehr geringe Zündenergien notwendig. Deshalb müssen Wasserstoffansammlungen im normalen Betrieb verhindert werden. Wasserstoff führende Komponenten sind so auszulegen, dass sie unter normalen Betriebsbedingungen dicht sind. Der Fahrgastraum muss gegenüber den Wasserstoff führenden Teilen abgedichtet sein.

Vor einer Betriebserlaubnis müssen mobile Wasserstoffspeicher umfangreiche sicherheitstechnische Typprüfungen durchlaufen. Nach dem Einbau in Fahrzeuge sind regelmäßig wiederkehrende Sicherheitsüberprüfungen vorgeschrieben. Selbstverständlich ist eine möglichst crashsichere Unterbringung der Speicher im Fahrzeug vorzusehen.

Wasserstoffkonzentrationen, die sich bei Störfällen bilden können, werden in aktuellen Flottenfahrzeugen mit entsprechenden Gassensoren erfasst. Je nach Wasserstoffkonzentration wird ein abgestuftes zuverlässiges Sicherheitssystem aktiviert: von der Warnmeldung, wenn z. B. die Konzentration weit unterhalb der unteren Entflammungsgrenze liegt, über passive und aktive Belüftungsmaßnahmen, bis zum sofortigen Stillsetzen des Fahrzeuges.

Bei Fahrzeugbränden wird durch entsprechende Schmelzsicherungen dafür gesorgt, dass der Wasserstoffspeicherinhalt gezielt abgeführt und kontrolliert abgefackelt wird.

#### 4.3.2.3 Rechtsvorschriften und Standards

Für die sich in der Hochlaufphase befindende Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen wurde bereits eine Reihe von Vorschriften und Standards, bspw. unter dem Dach der ISO, SAE und CSA erarbeitet. Ziel ist weiterhin die Schaffung einheitlicher Standards, um die Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie zu beschleunigen, dem Hersteller Orientierung in Bezug auf die Produkthaftung zu geben, das Produkt dem Verbraucher zu attraktiven Konditionen anbieten zu können und das Vertrauen des Anwenders in die Sicherheit der neuen Technologie zu gewinnen.

Die Gesetzgebung der Europäischen Union bildet schon heute einen gesetzlichen Rahmen für die Nutzung von Wasserstoff im Straßenverkehr (79/2009/EG). Die EG-Typgenehmigung für mit Wasserstoff betriebende Fahrzeuge ist seit Juni 2015 außerdem auf Basis der Vorschrift ECE-R134 möglich.

Wasserstoff wird wie Benzin oder Diesel als gefährlicher Stoff eingestuft und bezüglich der Herstellung rechtlich gleich behandelt. Die geringeren Mengenschwellen bei der Lagerung von Wasserstoff z. B. an Wasserstofftankstellen, zeigen aber, dass Wasserstoff noch als Chemikalie gesehen wird. Die Selbstverständlichkeit, mit der heute mit Benzin und Diesel umgegangen wird, muss sich für Wasserstoff erst noch ausbilden. Die für die anderen

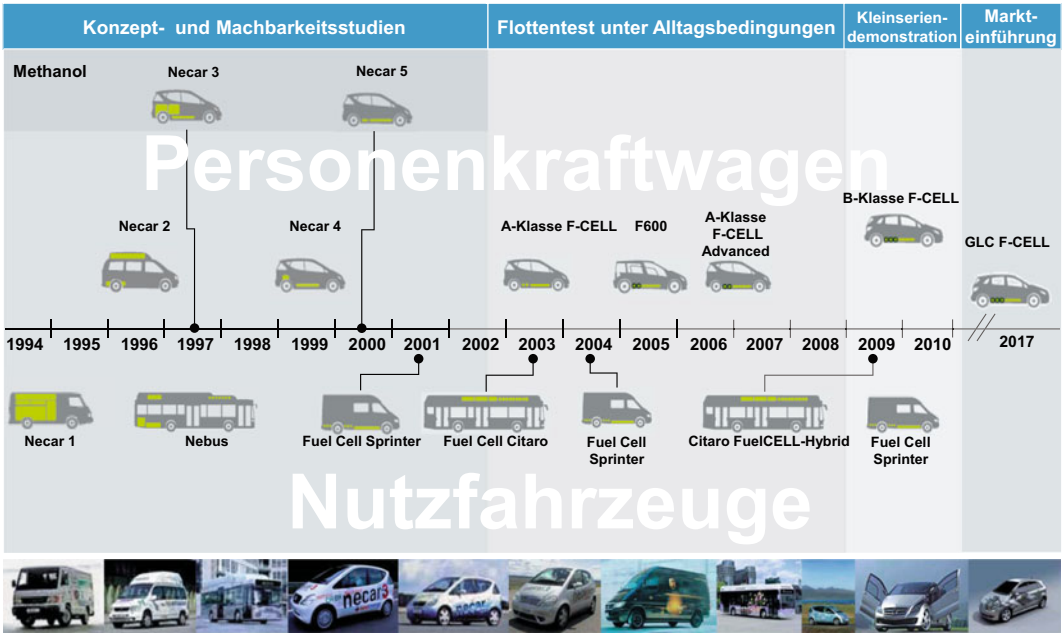



**Abb. 4.85** Historie der Daimler Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Kraftstoffe geltenden Vorschriften müssen auch für Wasserstoff als Vergleichsmaßstab gelten dürfen. Um vorhandene Einführungsbarrieren zu verringern, sollten gerade die Vorschriften für die Errichtung von Wasserstofftankstellen adäquat aufgestellt werden und die Wasserstoff-Kostenproblematik in der Startphase der Kommerzialisierung nicht durch Steuern und Abgaben unnötig verschärft werden.

### 4.3.2.4 Brennstoffzellen-Fahrzeuge

1994 hat Daimler mit NECAR 1 das erste einer Reihe von Brennstoffzellen-Prototypfahrzeugen vorgestellt. Zunächst wollte man nur die Machbarkeit solcher Fahrzeugantriebe demonstrieren. Von Fahrzeug zu Fahrzeug konnten erhebliche Fortschritte bezüglich Gewichts- und Volumenreduktion des Brennstoffzellensystems erzielt werden. So stieg allein die spezifische Leistung des Brennstoffzellenstacks von 48 W/kg (NECAR 1) bis heute auf 880 W/kg (F-CELL) an (Abb. 4.85). Gleichzeitig wurden verschiedene Wasserstoffspeichermethoden und auch der Einsatz anderer Kraftstoffe, wie z. B. Methanol untersucht. Es zeigten sich deutliche Vorteile für einen reinen Wasserstoffbetrieb mit Druckspeicherung, so dass man bei Daimler für die Nachfolgefahrzeuge ausschließlich dieses Antriebskonzept weiter verfolgt hat. Andere Hersteller setzen auch auf andere Speicherarten, wie z. B. die Flüssigwasserstoffspeicherung, mit der man zwar mehr Energie im gleichen Volumen unterbringen kann, sich aber Nachteile vorwiegend bei der Handhabung und vor allem bei der Energiebilanz einhandelt.

#### 4.3.2.4.1 Brennstoffzellen – Pkw und Transporter

Im Zuge der weiteren Entwicklung wurden die Komponenten so klein, dass sie in A- und B-Klasse im Zwischenboden untergebracht werden können (Abb. 4.78). Diese Fahrzeuge werden unter dem Namen F-CELL derzeit in vielen Flottenversuchen betrieben. Die charakteristischen Daten enthält Abb. 4.86 und Abb. 4.88. Insbesondere die im Neuen Europäischen Stadt-Fahrzyklus (NEFZ) gemessenen Äquivalentverbräuche von unter 3,3 l Diesel/100 km bestätigen die Erwartungen der hohen Wirkungsgrade solcher Antriebe. Damit können die im Vergleich zur Benzin- oder Dieselherstellung höheren Energieverluste bei der Wasserstoffherstellung überkompensiert werden. Bei

| Charakteristische Daten F-CELL: | |
|---|---|
| Fahrzeugtyp | Mercedes-Benz A-Klasse |
| Brennstoffzellen-System | PEM – 72 kW |
| Antrieb | Asynchronmaschine<br>Leistung (Dauer/Spitze): 45 kW/65 kW<br>Maximales Drehmoment: 210 Nm |
| Kraftstoff | Druckwasserstoff (350 bar) |
| Reichweite | 177 km |
| Maximalgeschwindigkeit | 140 km/h |
| Batterie | NiMH; Luftkühlung;<br>Leistung (Dauer/Spitze): 15 kW/20 kW<br>Kapazität: 6,0 Ah, 1,2 kWh |

**Abb. 4.86** Charakteristische Daten F-CELL-Fahrzeuge

**a**



**b**

| Technische Daten Mercedes-Benz F 015 Luxury mit F-CELL | |
|---|---|
| Peakleistung Heckmotoren (kW/PS) | je rund 100/136 |
| Drehmoment Heckmotoren (Nm) | je rund 200 |
| Gesamtleistung Dauer (kW/PS) | 120/163 |
| Gesamtleistung Maximal (kW/PS) | 200/272 |
| Dauerleistung Brennstoffzelle (kW) | 120 |
| Maximalleistung Batterie (kW) | 80 |
| Beschleunigung 0-100 km/h in s | 6,7* |
| Beschleunigung 60-120 km/h in s | 6,2* |
| Höchstgeschwindigkeit (km/h) | 200* |
| Wasserstoff-Verbrauch (kg/100 km) | 0,60** |
| C02 ges. (g/km min./max.) | 0 |
| Reichweite gesamt gemäß NEFZ (km) | 1100 |
| Inhalt $H_2$-Druckspeicher (kg) | ca. 5,4 |
| Energieinhalt Hochvoltbatterie (kWh) | 29 |
| | |
| *Zielwerte | |
| **entspricht 2,0 l Dieseläquivalent | |

**Abb. 4.87** **a** Forschungsfahrzeug F015 Luxury mit F-CELL; **b** Charakteristische Daten F015

vielen Wasserstoffherstellungspfaden ergeben sich somit auch in der Gesamtkette (Well-to-Wheel) energetische Vorteile [68].

Das im Pkw verwendete Antriebssystem wurde in entsprechend modifizierter Form auch in Mercedes-Benz-Sprinter eingebaut, die derzeit in Deutschland und USA hauptsächlich im Paketdienst eingesetzt werden. Die Brennstoffzellenantriebe sind für die spezifischen Fahrprofile solcher Versanddienste im urbanen Verkehr mit vielen kurzen Unterbrechungen bestens geeignet. Auch kann für Fuhrparkgestützte Fahrzeuge in der Anfangsphase einer Wasserstoffwirtschaft die Infrastruktur einfacher realisiert werden.

Die zum Einsatz kommenden Antriebsinnovationen werden häufig vorher zuerst in Forschungsfahrzeugen eingesetzt und erprobt. Mit dem F015 Luxury hat die Daimler AG gezeigt, dass die Brennstoffzelle zukünftig im Standardvorbau unter gebracht werden kann. Der kompakte Elektromotor sitzt im Bereich der Hinterachse; somit ist der F015 Luxury auch eines der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge mit Heckantrieb (Abb. 4.87). In ihm wird eine weiterentwickelte 700 bar Druckspeichertechnik erstmals eingesetzt, die diesem Fahrzeug Reichweiten von über 1000 km verleiht. Es konnte inzwischen auch gezeigt werden, dass durch Einsatz einer neuen Befeuchtertechnologie (Hohlfaserbündel) auf einen aktiven Wasserkreislauf im Stack verzichtet werden kann und das Fahrzeug dadurch auch bei Minusgraden kaltstartfähig wird. Viele Technologien sind in der B-Klasse F-CELL Abb. 4.88), deren Produktion 2009 begonnen wurde, erfolgreich eingesetzt [77].

Toyota, Honda, Hyundai, Nissan, GM, Ford und VW haben ebenfalls kontinuierlich Brennstoffzellenfahrzeuge entwickelt. Die neuesten Fahrzeuge von Toyota, Hyundai und Honda werden auch zum Kauf angeboten. Daimler wird 2017 seine dritte Generation von Brennstoffzellenfahrzeugen auf Basis des Mercedes-Benz GLC vorstellen (Abb. 4.89) [78–85].

#### 4.3.2.4.2 Brennstoffzellen-Busse

Der öffentliche Personennahverkehr stellt einen Anwendungsbereich dar, in dem Brennstoffzellenantriebe vorteilhaft eingesetzt werden können. Der schadstoffemissionsfreie Betrieb ist im innerstädtischen Bereich besonders wichtig. Auch braucht die notwendige Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur nur in den Fuhrparks installiert werden.

Auf Basis des Mercedes-Benz Citaro Stadtbusses wird die zweite Generation Brennstoffzellen-Busse aufgebaut, die in mehreren europäischen Städten im täglichen Personenverkehr eingesetzt werden. Abb. 4.90 zeigt die Integration des Antriebssystems im Bus, mit den wichtigsten charakteristischen Daten [86].

**a**




**b**

| Charakteristische Daten B-Klasse F-CELL | |
|---|---|
| Fahrzeugtyp | Mercedes-Benz B-Klasse |
| Brennstoffzellen-System | PEM – 80 kW (90 kW) |
| Antrieb | Integrierter Fahrantrieb mit permanent erregter Synchronmaschine<br>Leistung (Dauer/Spitze):<br>70 kW/100 kW (136 PS)<br>Maximales Drehmoment: 290 Nm |
| Kraftstoff | Druckwasserstoff (70 Mpa/700 bar) |
| Reichweite | ca. 400 km |
| Maximalgeschwindigkeit | 170 km/h |
| Batterie | Li-Ionen (Mn); Leistung (Dauer/Spitze):<br>24 kW/30 kW; Kapazität: 6,8 Ah, 1,4 kWh |

**Abb. 4.88** **a** Schnittbild B-Klasse F-CELL; **b** Charakteristische Daten B-Klasse F-CELL

#### 4.3.2.4.3 Demonstrationen und Flottenversuche

Auf dem Weg zur Marktreife stellen Flottenversuche ein wichtiges Instrument dar, weil sie aus dem Alltagsbetrieb wichtige Messdaten und Hinweise zur Technologieweiterentwicklung liefern. Dazu werden die Fahrzeuge zusätzlich zur ohnehin vorhandenen Fahrzeugelektronik mit weiterer Sensorik und Datenloggern ausgestattet. Einerseits ermöglichen sie präventive Maßnahmen für einen ungestörten Fahrzeugbetrieb, andererseits liefern sie dem Entwicklungsingenieur das Datenmaterial für die Weiterentwicklung der Technologie. In den Daimler-Brennstoffzellenfahrzeugen werden z. B. 60 relevante Parameter mehrmals pro Sekunde in einem Datenspeicher protokolliert [73]. Tritt ein besonderes, vorher nicht definiertes Ereignis auf, wie z. B. ein ungewöhnlicher Temperaturanstieg in einer Komponente, kann die Anzahl der erfassten Parameter um den Faktor 10 gesteigert werden. Kehrt das Fahrzeug zum Stützpunkt des Betreibers zurück, werden die Daten über Funkübertragung ausgelesen und per Internet zu einem Zentralen Server weitergeleitet. Die Entwickler setzen dann ein spezielles Data-Mining-Verfahren ein, mit dem der Rechner selbstständig Zusammenhänge erkennt und ihre Bedeutung für eine bestimmte Fragestellung bewertet. So können die riesigen Datenmengen schnell analysiert und auch die komplexesten Fehlerquellen und Zusammenhänge herausgefiltert werden [87] (Abb. 4.91).

Weltweit sind derzeit einige hundert Brennstoffzellen-Fahrzeuge in Erprobung. Allein Daimler hat ca. 200 Fahrzeuge im Einsatz. Insgesamt haben sie mehr als 10 Mio. km zurückgelegt (Stand Februar 2015). Sie werden im Rahmen von öffentlich geförderten Kooperationsprojekten in Flotten eingesetzt (Abb. 4.92). Ziele sind die Demonstration und Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik, Demonstration der Machbarkeit einer Wasserstoffinfrastruktur, Identifikation von Markteinführungsbarrieren und Erhöhung der öffentlichen Wahrnehmung dieser Technologien.

Im kalifornischen Sacramento haben sich 1998 Automobilhersteller, Energiefirmen, Brennstoffzellenentwickler und Regierungsorganisatoren zur California Fuel Cell Partnership (CaFCP) zusammengeschlossen. Die deutsche Bundesregierung unterstützt ein ähnliches Demonstrationsprojekt, die Clean Energy Partnership (CEP), und im europäischen Projekt CHIC werden 23 Brennstoffzellenbusse eingesetzt, davon 13 Citaro FuelCell Hybrid. Im deutschen Projekt NaBuZ werden 4 Citaro FuelCell Hybrid in Hamburg eingesetzt. Allein Daimler hat 23 BZ-Busse in Betrieb. Im Rahmen der europäischen Busprojekte CUTE und ECTOS wurden in 10 europäischen Städten 30 Brennstoffzellenbusse betrieben.

### 4.3.2.5 Kraftstoffversorgung und Infrastruktur

Neben seiner Kohlenstoff-Freiheit ist ein weiterer großer Vorteil von Wasserstoff, dass er aus einer Vielzahl von Primärenergiequellen hergestellt werden kann. Damit hat er das Potenzial signifikant zur energetischen Diversifizierung des Verkehrsbereiches beizutragen. In Langfristszenarien wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen (Fotovoltaik, Wind, Geother-

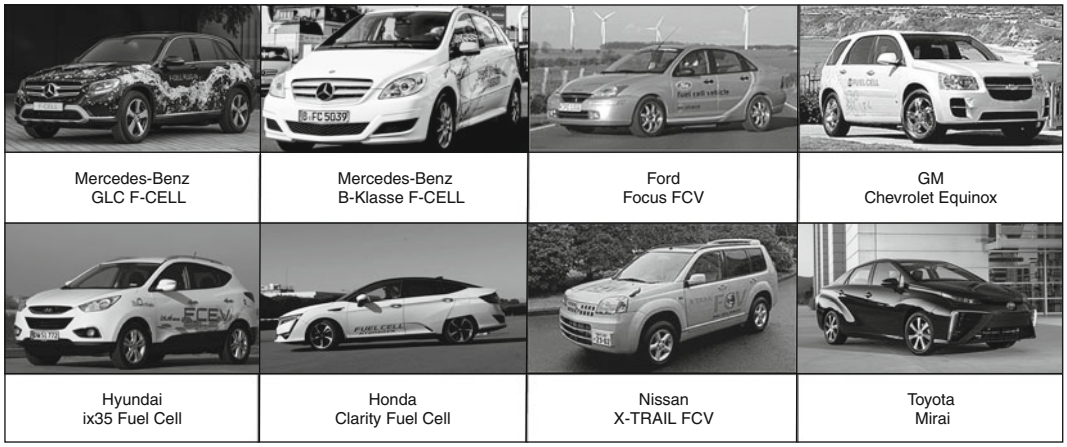
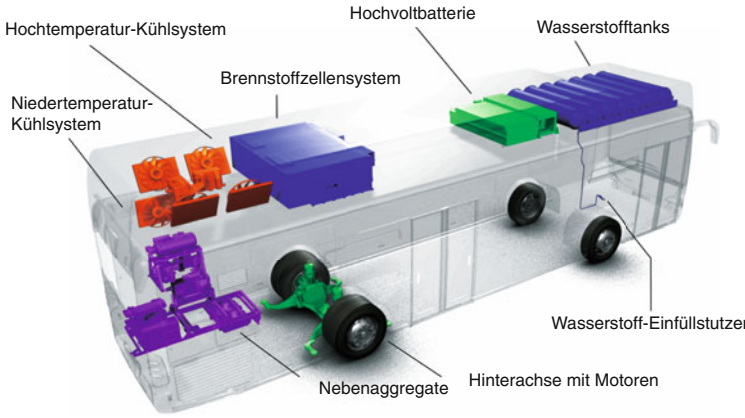



**Abb. 4.89** Brennstoffzellen-Fahrzeuge verschiedener Hersteller




| Technische Daten | |
|---|---|
| Leistung BZ-System | 120 kW (konst.)/140 kW (max.) |
| Antriebsleistung | 2 x 80 kW, Spitzenleistung: 120 kW je Motor für 15–20 s |
| Wasserstofftank | 35 kg Wasserstoff (350 bar) |
| Reichweite | ca. 250 km |
| HV-Batterie | 26,9 kWh, Leistung 250 kW |
| Effizienz BZ-System | 58–51 % |
| H2-Verbrauch | 10–14 kg/100 km |

**Abb. 4.90** Antriebssystem des CITARO-Busses

mie, Wasserkraft und Biomasse) hergestellt wird. Damit ist seine Nutzung von der Quelle bis zum Rad $CO_2$ frei, mindestens aber $CO_2$ neutral. In einer Überbrückungsphase wird der Wasserstoff zunächst aus Erdgas über Dampfreformierungsprozesse gewonnen werden. Wenn dieser Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt wird, sind bei vielen Energiepfaden die gesamte Energieeffizienz sowie die Treibhausgasemissionen trotz der durch die Produktion des Wasserstoffs verursachten Verluste besser als bei Benzin- und Dieselfahrzeugen. Auch gegenüber der direkten Nutzung von Erdgas in Verbrennungsmotoren entstehen sowohl hinsichtlich Gesamtenergieverbrauch

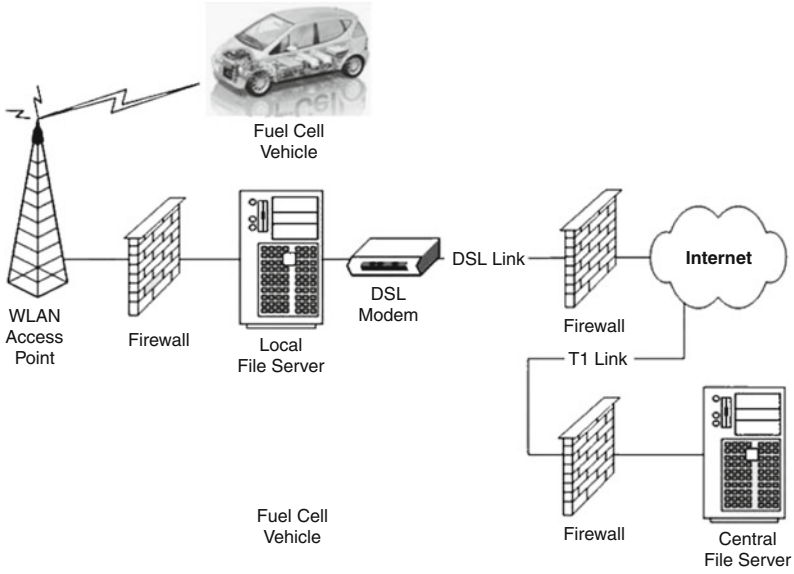



**Abb. 4.91** FDA-Schema

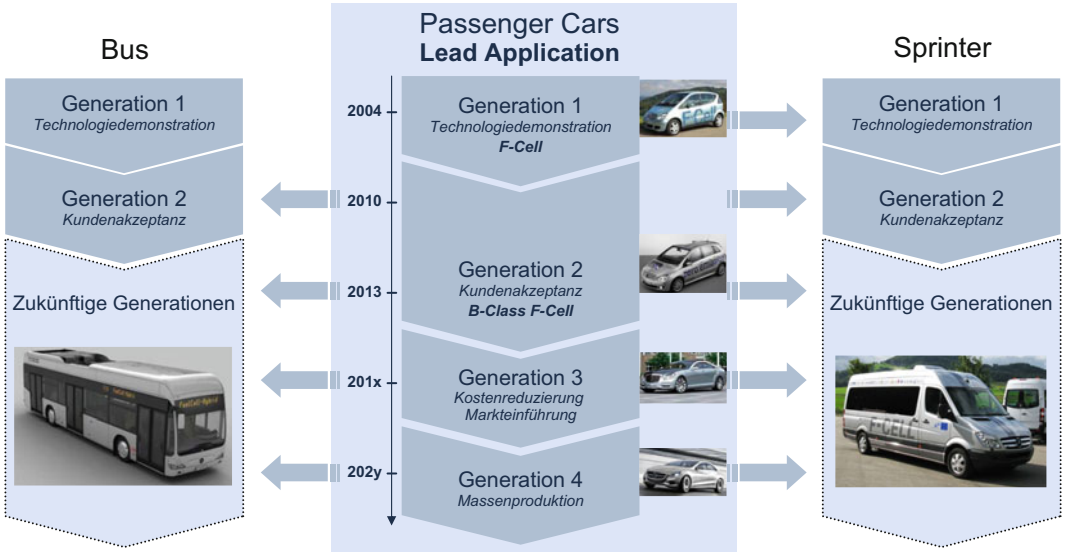



**Abb. 4.92** CEP-Fahrzeugflotte

und Treibhausgasemissionen Vorteile. Weitere Informationen hierzu enthält ▶ Abschn. 5.9.

Damit Wasserstoff effizient im Verkehrsbereich genutzt werden kann, muss die Brennstoffzellentechnologie weiter in Richtung Marktreife getrieben werden. Andererseits bedarf es aber auch noch eines flächendeckenden, gut funktionierenden und kundenfreundlichen Tankstellennetzes für Wasserstoff.

Bei fuhrparkgestützten Fahrzeugen (z. B. Stadtbusflotten) kann der Bedarf durch wenige Tankstellen am Fuhrpark kundengerecht erfüllt werden. Die Infrastruktur für den breiten Massenmarkt muss sukzessive wachsen. In der Anfangsphase mit loka-




Quelle: Daimler AG

**Abb. 4.93** Entwicklungsphasen bis zur Kommerzialisierung

len Ansammlungen einiger Tankstellen im Rahmen von Demonstrationsversuchen. Diese Einzelcluster werden dann schrittweise über Korridore entlang der Fernstraßen miteinander verbunden. Schließlich bildet sich ein flächendeckendes Netz an Tankstellen. Seit 2010 sind weltweit deutlich verstärkte Aktivitäten zum Aufbau von Wasserstofftankstellen, insbesondere in USA, Japan und einigen europäischen Ländern zu beobachten. Deutschland ist hierbei mit der $H_2$Mobility Deutschland einer der Vorreiter. Ziel dieser Kooperation von sechs großen Industriefirmen ist der Aufbau von insgesamt 400 Wasserstofftankstellen in Deutschland bis zum Jahr 2023. Ein entsprechendes Joint Venture wurde 2015 gegründet.

#### 4.3.2.6 Ausblick

Einschlägige europäische Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen haben unter Leitung der Europäischen Kommission in der so genannten „Hydrogen and Fuel Cell Platform (HFP)" Wasserstoffeinführungsszenarien für Europa entwickelt. Diese deuten darauf hin, dass bis etwa Ende des Jahrzehnts 2010–2020 Brennstoffzellenfahrzeuge und die notwendige Wasserstoffinfrastruktur Marktreife haben könnten, was die Voraussetzung für die beginnende Markteinführung darstellt. In der „EU Coalition Study", einer tiefgreifenden Studie mit weitreichender Beteiligung der Automobil-, Gas-, Energie und Ölindustrie, konnte eine zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Brennstoffzellenmobilität unter Kostenaspekten und Berücksichtigung verschiedener Zukunftsszenarien aufgezeigt werden [88]. Bis zur flächendeckenden Markteinführung sind noch erhebliche finanzielle Anstrengungen zur Technologie-Weiterentwicklung und zum Infrastrukturaufbau notwendig. Der Ausbau der bisher nur punktuell vorhandenen Betankungseinrichtungen und Wasserstoffproduktionskapazitäten kann nur sukzessive und im Einklang mit steigender Nachfrage nach Wasserstoff als Kraftstoff für Pkw erfolgen. Infolge steigender Fahrzeug-Stückzahlen, sinkender Kosten und technologischer Weiterentwicklung der aufeinanderfolgenden Fahrzeuggenerationen kann so nach einer koordinierten Startphase ein rentabler, sich selbst steuernder Markt für Brennstoffzellenmobilität entstehen (Abb. 4.93). Die hierfür notwendigen hohen Aufwendungen können nur im nationalen oder europäischen Rahmen durch langfristige Partnerschaften von öffentlichen und privaten Partnern aufgebracht werden.

Das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), welches 2007 von der Deutschen Bundesregierung initiiert wurde, definiert Ziele, terminiert Meilensteine und bietet einen Förderrahmen zur Weiterentwicklung und Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen und Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland. Im Rahmen der Industrieinitiative $H_2$-Mobility haben sich 2009 Unternehmen der Automobil-, Kraftstoff- und Industriegasindustrie auf eine koordinierte Vorgehensweise zur Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen verständigt. Unter Anderem soll innerhalb dieser Initiative ein detaillierter Business Plan für das Geschäft mit Brennstoffzellenmobilität, aufbauend auf den Ergebnissen der EU Coalition Study, erarbeitet werden.

## 4.3.3 Hybridantrieb

### 4.3.3.1 Szenario

Für Hybridfahrzeuge hat sich eine Definition etabliert, wonach diese mindestens zwei verschiedene Energiewandler und zwei verschiedene Energiespeicher zu Traktionszwecken beinhalten. (IEC/TC69, EU-Richtlinie 2007/46/EG., ECE R101)

Bis auf wenige Ausnahmen handelt es sich dabei heute in der praktischen Umsetzung bei den Wandlern um Verbrennungs- und Elektromotoren und bei den Energiespeichern um Kraftstoffe und Batterien.

Durch den Verbrennungsmotor eröffnen sich dem Hybridfahrzeug die Fahrleistungen heutiger verbrennungsmotorisch getriebener Fahrzeuge mit der Kraftstoffverfügbarkeit der etablierten Infrastruktur. Der elektrische Antriebsteil ermöglicht einen geräuscharmen und lokal emissionsfreien Antrieb. Aus einem geschickten Zusammenspiel aller Antriebskomponenten eröffnen sich weitere Potenziale, so dass der Hybridantrieb folgende Vorteilsmerkmale aufweist:

- Verbrauchsreduzierung,
- Niedrigstemissionen bis hin zu lokal emissionsfreiem Fahren,
- Erhöhung der Fahrleistungen,
- Geräuscharmes rein elektrisches Fahren,
- Steigerung des Funktionskomforts,
- Fahrstabilisierung.

**Marktentwicklung** Bereits 1902, als Elektro- und Verbrennungsfahrzeuge noch um die Vorherrschaft im Fahrzeugmarkt rangen, stellte Ferdinand Porsche, getrieben durch die Grenzen der Batterietechnik, seinen „Mixte"-Wagen vor: Ein Daimler-Vierzylinder-Motor erzeugte über einen Generator den Strom für Radnabenelektromotoren.

Diesel-elektrische Antriebe kommen seither immer wieder in Bahnantrieben und bei Schiffsantrieben zur Anwendung. In den 70er und 80er Jahren gab es verstärkt Anwendungen bei Omnibussen, die teils dieselmotorisch, teils elektromotorisch betrieben werden konnten.

Die Entwicklung eines Marktes für Hybrid-PKW begann mit der Serieneinführung des Toyota Prius 1997 in Japan. Toyota konnte mit allen folgenden Hybridmodellen bis im Juli 2015 insgesamt 8 Millionen Hybridfahrzeuge verkaufen.

Mittlerweile fand die Hybridisierung Einsatz in allen Fahrzeugsegmenten. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor dieser Entwicklung war der technologische Fortschritt der Energiespeicher. Dieser erlaubte es, durch eine gesteigerte Energie- und Leistungsdichte mehr Funktonalität unter den Randbedingungen der Fahrzeugintegration umzusetzen. Inzwischen sind Plug-In Hybride mit 50 km elektrischer Reichweite am Markt verfügbar, und ihre Reichweite wird mit der Batterieentwicklung und durch gesetzliche Vorgaben in Zukunft weiter steigen. Sowohl eine erwartbare Kostendegression als auch marktspezifische Incentivierungen werden zu einer weiteren Marktdurchdringung führen.

### 4.3.3.2 Elektrifizierungsklassen

Grundsätzlich lassen sich Hybridfahrzeuge neben den Triebstrangkonzepten auch über den Grad der Elektrifizierung einordnen (siehe Abb. 4.94). Die Klassengrenzen rühren hier vor allem vom Erfüllungsgrad bestimmter Features her (siehe Abb. 4.95).

- Die geringste Hybridisierung stellen meist 48 V-Mild-Hybridsysteme dar. Hierbei werden Leistungen von ca. 15 kW erreicht, die ausreichen mittels intelligenter Booststrategien eine

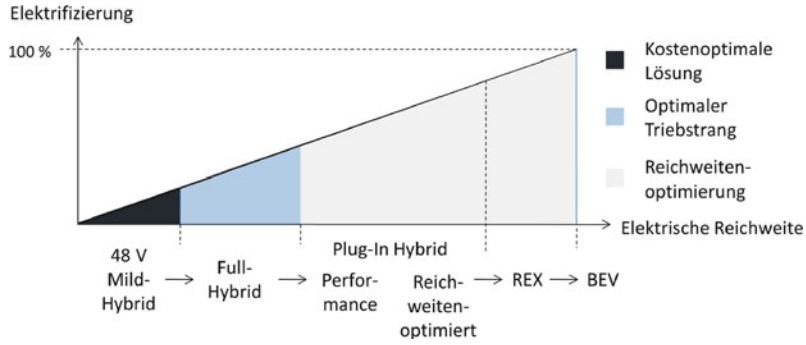



**Abb. 4.94** Grad der Elektrifizierung von Hybridklassen

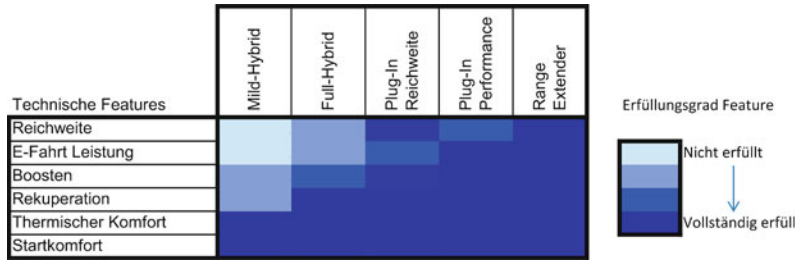



**Abb. 4.95** Features von Hybridklassen

Kennfeldoptimierung des Verbrennungsmotors zu realisieren, und die größten Anteile an Bremsenergie in den Zertifizierungszyklen zu rekuperieren. Auch wenn keine nennenswerte E-Fahrt darstellbar ist, können mittels Hochleistungsverbrauchern wie elektrischem Kältemittelverdichter oder auch elektrischer Heizer kundenrelevante Komfortfeatures angeboten werden. Zudem sind aufgrund des geringeren Spannungsniveaus die Aufwände für die HV-Sicherheit geringer, weshalb diese Systeme die kostengünstigste Hybridoption darstellen.

- Die nächste Klasse wird häufig Full-Hybrid genannt. Bei ihr liegt der Fokus in der Optimierung aller Potenziale, die ohne eine Netznachladung der Batterie möglich sind. Die hierfür eingestellte, um den Faktor 2–3 gegenüber den 48 V Systemen erhöhte Systemleistung wird in den meisten Fällen durch eine Erhöhung der Systemspannung erreicht. Neben einer kundenwahrnehmbaren E-Fahrt-Performance erlaubt das System in allen relevanten Kundenszenarien fast die gesamte Bremsenergie rekuperieren zu können. Von noch höheren Leistungen profitiert das Fahrzeug daher nur noch sehr eingeschränkt, da die Situationen, in denen zusätzlich elektrische Bremsenergie gewonnen werden kann, selten sind.
- Dadurch, dass bei Plug-In Hybriden die elektrische Energie wie Treibstoff jederzeit „nachgetankt" werden kann, muss hier sinnvollerweise keine Leistungsgrenze mehr eingehalten werden. Je nach Fahrzeugkonzept existieren nun aber zwei verschiedene Ausprägungen. Bei den meisten Plug-Ins steht die Erweiterung der elektrische Reichweite und Fahranteile im Vordergrund, was primär durch die $CO_2$-Gesetzgebung getrieben ist. Selbst zur Erreichung von Fahranteilen von > 90 % sind hier Leistungen von 100 kW ausreichend.
- Im Gegensatz dazu steht bei einem Performance-Hybrid vor allem die unmittelbare Leistungsentfaltung aus beliebigen Drehzahlen im Vordergrund. Die realisierba-

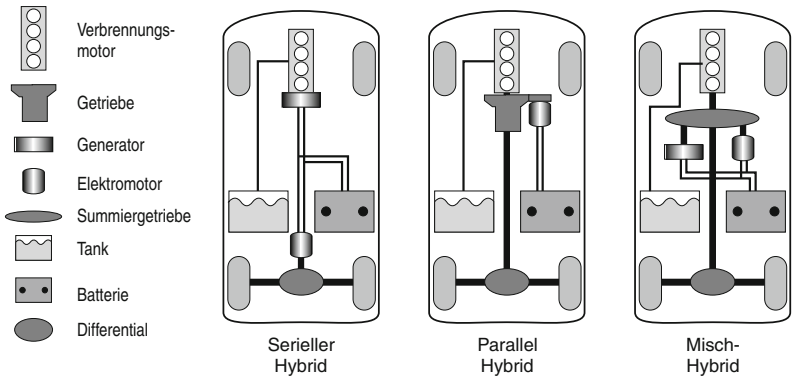



**Abb. 4.96** Grundkonzepte von Hybridantrieben

ren Grenzen der maximalen Leistung sind bei diesen Fahrzeugen dann vergleichbar wie bei jedem konventionellen Triebstrang nur durch Kosten- und Packaging-Restriktionen limitiert. Für die auf Performance ausgelegten Hybride bieten sich mehr auf leistungsdichte optimierte Batteriezellen an.

Durch die hohe E-Fahrt-Leistung bei den Plug-In Hybriden ist bei der Auslegung zu beachten, dass bei einer leeren Batterie kein negativer Fahreindruck beim Kunden entsteht.

- Bei allen Range-Extender-Konzepten konzentriert man sich noch weiter auf den elektrischen Zweig im Triebstrang, und benötigt den Verbrennungsmotor nur noch zur Sicherstellung der durchschnittlichen Leistung bei leerer Batterie im Fahrbetrieb. Damit ist die Auslegung vergleichbar der eines reinen EV (siehe ▶ Abschn. 4.3.1.1 (Antriebssystem Elektrofahrzeuge), bei der auch die gesamte Bandbreite an Leistungsklassen abgedeckt wird.

### 4.3.3.3 Konzepte und Betriebsstrategien

Über die Struktur des Antriebs lassen sich Hybridantriebe in drei Gruppen einteilen: Parallelhybride, serielle Hybride und Mischhybride (◘ Abb. 4.96).

**Parallelhybride** Bei Parallelhybriden können ein Verbrennungs- und ein Elektromotor parallel die Räder antreiben. So bietet sich konzeptabhängig die Möglichkeit, rein verbrennungsmotorisch, rein elektrisch oder kombiniert zu fahren. Je nach Anordnung des Verbrennungsmotors haben sich die Bezeichnungen Px etabliert, wobei das P für Parallelhybrid steht und das x die Lage des Verbrennungsmotors im Triebstrang gemäß folgender Tabelle beschreibt (◘ Abb. 4.97). Vereinfachend sind dabei verschiedene Getriebevarianten und Konzepte mit mehreren E-Maschinen weggelassen.

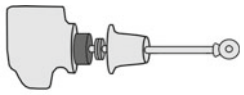
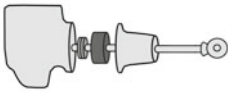
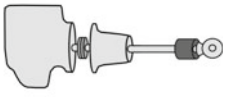
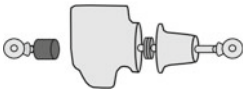
| | | |
|---|---|---|
| P1 |  | E-Motor drehfest mit Verbrennungsmotor verbunden |
| P2 |  | E-Motor am Getriebeeingang, durch Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt |
| P3 |  | E-Motor hinter dem Getriebe |
| P4 |  | E-Motor an der nicht verbrennungsmotorisch angetriebenen Achse |

**Abb. 4.97** Basiskonzepte und Nomenklatur von Parallelhybriden

**P1 Konzept** Für Parallelhybride mit geringer elektrischer Leistung bis ca. 15 kW hat sich die Bezeichnung „Mild Hybrid" verbreitet. Hierbei sind die E-Maschinen i. d. R. Weiterentwicklungen aus Riemen-Starter/Generatoren oder am hinteren Kurbelwellenende integrierten Starter/Generatoren. We-



**Abb. 4.98** Honda Insight Modell 2009, Parallelhybrid [89]

gen der geringen Leistung und der drehfesten Ankopplung an die Kurbelwelle bieten „Mild Hybrids" nur eingeschränktes elektrisches Fahren, ggf. sogar nur mit ungefeuert mitgeschlepptem Verbrennungsmotor, Stopp/Start des Verbrennungsmotors, Bremsenergierückgewinnung und Beschleunigungsunterstützung.

Ein Beispiel für eine Mild Hybrid-Lösung mit E-Maschine im Riementrieb war der Toyota Crown Hybrid mit 36 V Bleibatterie.

Ein anderes Konzept mit der E-Maschine am hinteren Kurbelwellenende (P1) wurde 1999 mit dem Honda Insight eingeführt und für den Honda Civic und Accord weiterentwickelt. Der 4-Zylinder Ottomotor des aktuellen Insight (Abb. 4.98) wurde auf 65 kW bei 1,3 l Hubraum ausgelegt. Beim Beschleunigen wird er von einem 10 kW Elektromotor aus einer 0,58 kWh/100 V NiMH-Batterie unterstützt. Die Kraftübertragung übernimmt ein CVT Getriebe.

Er verfügt über eine variable Ventilsteuerung, mit der durch Abschaltung aller Zylinder beim Rekuperieren und bei rein elektrischer Fahrt die Schleppleistung und damit die Verluste durch den Verbrennungsmotor reduziert werden. In der Summe aller Maßnahmen wird ein NEFZ Verbrauch von 4,4 l/100 km erreicht.

Das P1-Hybridkonzept kam auch beim ersten Hybridfahrzeug von Mercedes-Benz, dem S 400 HYBRID, zum Einsatz. Der 3,5 l 6-Zylinder Ottomotor ist für den Hybrideinsatz mit einem Atkinson-Cycle ausgestattet, bei dem das Einlassventil über den unteren Totpunkt des Zylinders hinweg offen gehalten wird (Spätes Schließen des Einlassventils) um Drosselverluste zu reduzieren. (Vergleich ▶ Abschn. 5.1.5.1.3 Variable Ventilsteuerung) Am hinteren Kurbelwellenende ist eine 15 kW permanent-erregte Synchronmaschine integriert. Erstmalig kam in einem Hybridserienfahrzeug eine Lithium-Ionen Batterie zum Einsatz. Die 0,8 kWh/120 V Batterie konnte in der Batterienormgröße H8 gebaut und damit im Batteriefach des Motorraumes untergebracht werden. Diese wird direkt über den Kältemittelkreislauf der Klimaanlage gekühlt, was auch bei hohen Außentemperaturen eine uneingeschränkte Funktion im warmen Motorraum gewährleistet.

Durch die zielgerichtete Hybridisierung des Fahrzeugs konnte der Kraftstoffverbrauch (NEFZ) auf 7,9 l/100 km reduziert werden. Verglichen mit dem S 350 mit einem Verbrauch von 10,0 l/100 km entspricht dies einer Verbrauchsreduktion mehr als 20 %. Gleichzeitig konnte die Beschleunigung leicht verbessert werden.

**P2-Konzept** Durch eine Erweiterung des P1- Konzeptes mit der E-Maschine an der Kurbelwelle um eine Kupplung zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine (P2) wird die rein elektrische Fahrt und volle Rekuperation ohne Motorschleppverluste möglich. Soweit eine weitere Kupplung zwischen E-Maschine und Getriebe vorgesehen wird, hat sie die folgenden Aufgaben:

- Entkopplung des Verbrennungsmotorstarts vom Getriebeeingang,
- Laden der Batterie bei stehendem Fahrzeug,
- Anfahren mit dem Verbrennungsmotor.

Die P2 Topologie lässt sich als Front- und Heckantrieb realisieren, wobei die E-Maschine am Eingang des Getriebes integriert wird. Eine solche Anordnung finden wir im VW Touareg Hybrid (Abb. 4.99), in dem die E-Maschine mit einem 8-Gang-Wandler-Automatgetriebe TR-82SD der Fa. AISIN gekoppelt ist (Abb. 4.100). Die Kombination aus Wandler und Überbrückungskupplung als Anfahrelement ermöglicht eine gegenüber dem konven-



**Abb. 4.99** P2 Hybrid im VW Touareg Hybrid [90]

tionellen Fahrzeug uneingeschränkt hohe Anhängelast von 3,5 t. Der Allradantrieb wird mittels Torsen-Differenzial realisiert.

Die hybridische Betriebsstrategie ermöglicht im VW Touareg Hybrid einen Normverbrauch von 8,2 l/100 km bzw. $CO_2$ Emissionen von 193 g/km bei einer Systemleistung von 279 kW. Das vergleichbare konventionelle Fahrzeug mit V6-Benzinmotor hat einen Normverbrauch von 9,9 l/100 km bzw. $CO_2$ Emissionen von 236 g/km und eine deutlich niedrigere Leistung von 206 kW.

Das P2 Hybridkonzept hat in der Verbindung mit angepassten automatisierten Getrieben ähnlich zum VW Touareg eine breite Anwendung gefunden, beispielsweise im Porsche Panamera und Cayenne. BMW (ActiveHybrid 3, -5, -7) und AUDI (Q5, A6, A8) rüsten ihre Fahrzeuge mit dem 8-Gang Automatgetriebe 8P70H von ZF aus, in dem eine verstärkte Schaltkupplung im Getriebe als integrierte Anfahrkupplung statt eines Wandlers die Anfahrfunktion übernimmt. Daimler hat das P2-Konzept mit 7-Gang Automatgetriebe und nasser Anfahrkupplung statt Wandler in Verbindung mit einem 150 kW 4-Zylinder Dieselmotor im E 300 BlueTEC HYBRID für den europäischen Markt in Serie gebracht und mit 4,2 l/100 km oder 109 g $CO_2$/km im NEFZ zertifiziert.

Ein Beispiel für einen P2-Hybrid mit Frontantrieb ist der Honda Fit Hybrid (in Europa Honda Jazz), bei dem ein 7-Gang-Doppelkupplungsgetriebe in Verbindung mit einem 1,5 l Verbrennungsmotor eingesetzt wird. (Abb. 4.101 und Abb. 4.102). Der Verbrennungsmotor ist mit einem variablen Ventilhub auf der Ein- und Auslassseite (DOHC) ausgestattet, mit dem sowohl ein verbrauchsoptimierter Atkinson-Betrieb als auch ein leistungsoptimierter Betriebsmodus dargestellt werden kann.

**P3-Konzept** Eine weitere Anordnungsmöglichkeit der E-Maschinen bei Parallelhybriden ergibt sich

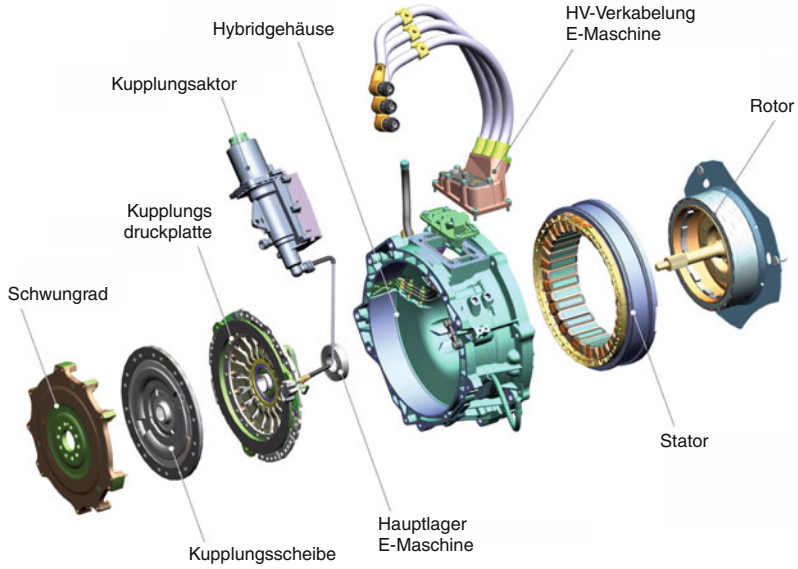



**Abb. 4.100** P2 Hybridkopf im VW Touareg Hybrid [90]

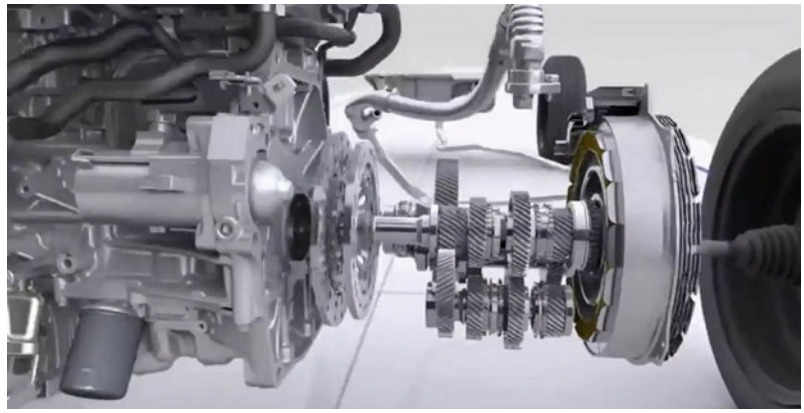


**Abb. 4.101** P2 Hybridtriebstrang des Honda Fit Hybrid [91]

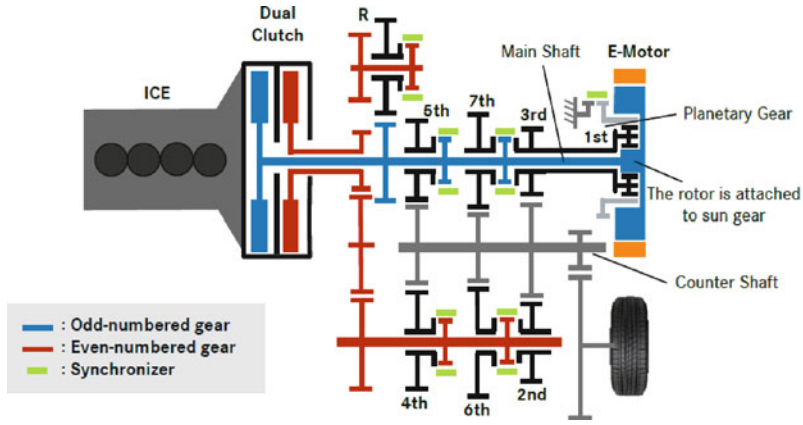



**Abb. 4.102** Strichgetriebedarstellung des P2 Doppelkupplungsgetriebes Honda Fit Hybrid [91]

hinter dem Getriebe (P3), wie bei dem als Prototyp gebauten smart-Hybriden (Abb. 4.103). Bei geöffneter Kupplung können hier Konstantfahrten bei geringer Fahrleistungsanforderung rein elektrisch gefahren werden. Zudem erlaubt diese Anordnung komfortsteigernd die Erhaltung der Zugkraft während der Getriebeschaltvorgänge.

Allein durch die Hybridisierung konnte der smart Diesel Hybrid einen Verbrauch von unter 3 l/100 km im neuen europäischen Fahrzyklus erreichen.

**P4-Konzept** Bei einem weiteren Parallelhybridkonzept ist die E-Maschine an der nicht vom Verbrennungsmotor angetriebenen Achse angeordnet (P4). Diese Lösung hat als weiteres Vorteilsmerkmal die elektrische Traktionsunterstützung über die zusätzlich angetriebene Achse. Ein Nachteil bei diesem Konzept ist jedoch, dass bei Fahrzeugstillstand keine Stromgenerierung über die Traktionsmaschine möglich ist. Dies spielt vor allem bei elektrisch angetriebenen Hochvoltnebenaggregaten eine Rolle, wenn deren Betrieb auch bei langem Fahrzeugstillstand bzw. Stop-and-Go Verkehr sichergestellt werden muss.

Im Citroen DS5 Hybrid4 (Abb. 4.104) ist deshalb neben einer 27 kW elektrisch angetriebenen Hinterachse ein Hochvolt-Riemenstartergenerator verbaut. Die von ihm erzeugte elektrische Energie kann zum Laden der Batterie (auch im Stand), zur Versorgung der Nebenaggregate oder auch zur Aufrechterhaltung des elektrischen Allradantriebs

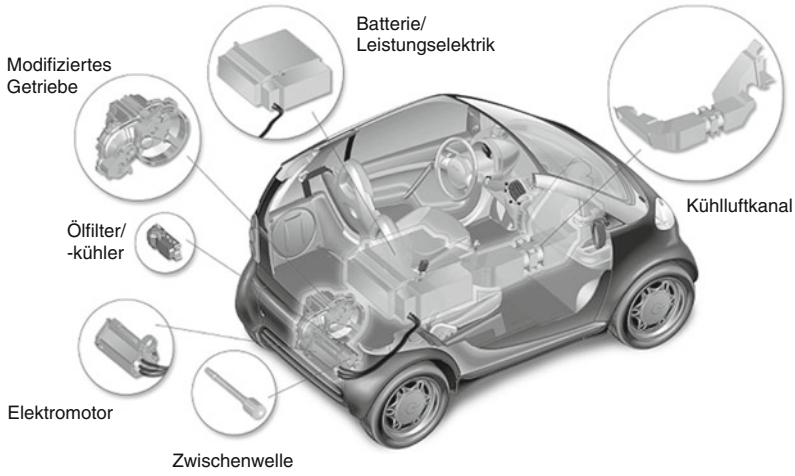



**Abb. 4.103** Smart Hybrid mit E-Maschine am Getriebeausgang

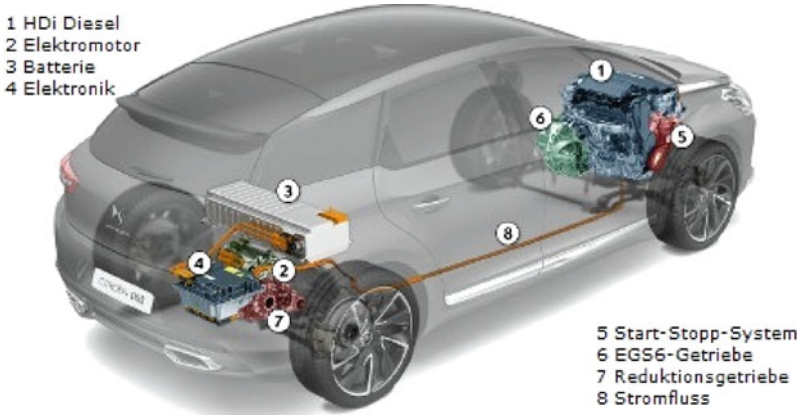



**Abb. 4.104** Citroen DS5 Hybrid4 mit elektrisch angetriebener Hinterachse [92]

bei geringer Leistung verwendet werden. Es handelt sich also um eine P1/4 Konfiguration mit der Möglichkeit eines seriellen hybridischen Betriebs in geringem Umfang. In Verbindung mit einem 120 kW 4-Zyl Dieselmotor wird mit diesem Antriebskonzept ein Verbrauch von 3,8 l/100 km bzw. 99 g $CO_2$/km erreicht. Der Hybridantriebsstrang wird in dieser Form auch in weiteren Modellen innerhalb des PSA Konzerns eingesetzt, z. B. im Peugeot 3008 Hybrid.

In einigen Konzeptstudien findet man auch Radnabenantriebe, bei denen die E-Maschine inkl. mechanischer Bremse in das Rad integriert ist. Radnabenantriebe konnten sich jedoch wegen der zusätzlichen ungefederten Massen, der engen Bauraumverhältnisse sowie der Temperatur- und Schwingungsbeanspruchungen im Rad bisher nicht durchsetzen.

**Serielle Hybride** Beim seriellen Hybriden erfolgt der Radantrieb immer rein elektrisch, wobei die elektrische Energie von einem Verbrennungsmotor in Verbindung mit einem Generator an Bord erzeugt wird. Mit einer Batterie als Energiepuffer kann der Verbrennungsmotorbetrieb unabhängig von der aktuellen Fahraufgabe wirkungsgrad- oder emissionsoptimiert eingestellt werden. Wie bei allen anderen Hybridvarianten kann auch hier die Bremsenergierückgewinnung verbrauchsmindernd eingesetzt werden.



**Abb. 4.105** BMW i3. Serieller Hybrid mit Range Extender [93]

Der Verbrauchsvorteil wird allerdings dadurch geschmälert, dass die gesamte vom Verbrennungsmotor abgegebene Leistung die elektrische Wirkungsgradkette von E-Maschine und Inverter durchlaufen muss.

Beim seriellen Hybriden gibt es zwei Auslegungsvarianten. Soll das Fahrzeug dauerhaft die vollen Fahrleistungen bieten, so müssen die Verbrennungsmotor-, die Generator- und die E-Motorleistung unter Berücksichtigung aller Wirkungsgrade auf die Dauerhöchstgeschwindigkeit ausgelegt werden. Die Elektromotoren müssen die maximale Beschleunigung darstellen. Damit hat dieser Hybridtyp in Summe die höchsten installierten Komponentenleistungen mit den entsprechenden Kostennachteilen. In der zweiten Variante wird nur die Fahr-E-Maschine auf die volle Fahrleistung ausgelegt. Der Verbrennungsmotor wird bewusst kleiner dimensioniert und seine Aufgabe besteht darin, bei optimalen Wirkungsgraden über einen Generator die Batterie nachzuladen, um damit die Fahrzeugreichweite zu vergrößern (Range extender). Ein Beispiel für ein solches Fahrzeug ist der BMW i3. (Abb. 4.105) Als Elektrofahrzeug ist er mit einer 125 kW E-Maschine an der Hinterachse und einer 21,6 kWh Unterbodenbatterie ausgerüstet. Auf Wunsch ist er mit einem 0,65 l 2-Zylinder Verbrennungsmotor mit Generator erhältlich, der mit 25 kW die Batterie nachladen kann. Das serielle Stromaggregat inkl. 9 l-Kraftstofftank ist ebenfalls im Heck untergebracht.

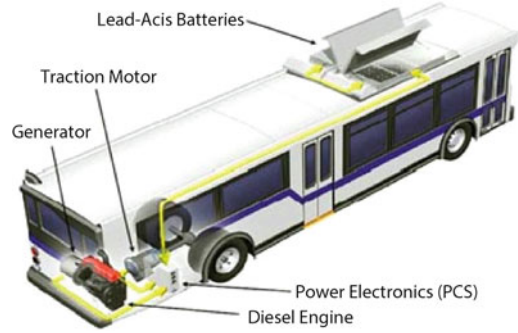



**Abb. 4.106** Serieller Hybridantrieb im OrionVII Bus der Fa. Daimler Buses NA

Eine andere Anwendung von seriellen Hybriden kommt aus konstruktiven Nöten, wenn die Übertragung der Antriebsleistung zum Rad über Wellen zu aufwendig oder ungünstig für die Raumnutzung wäre, z. B. bei Fahrkränen oder Niederflurbussen, wie bei dem in Abb. 4.106 dargestellten Orion-VII Bus der Fa. Daimler Buses NA. 3000 solcher Busse sind in Nordamerika unterwegs, darunter fast die komplette Busflotte der New Yorker Verkehrsbetriebe. Im Laufe der Produktion wurde die auf dem Dach untergebrachte Bleibatterie auf Li-Ionen-Technologie umgestellt.

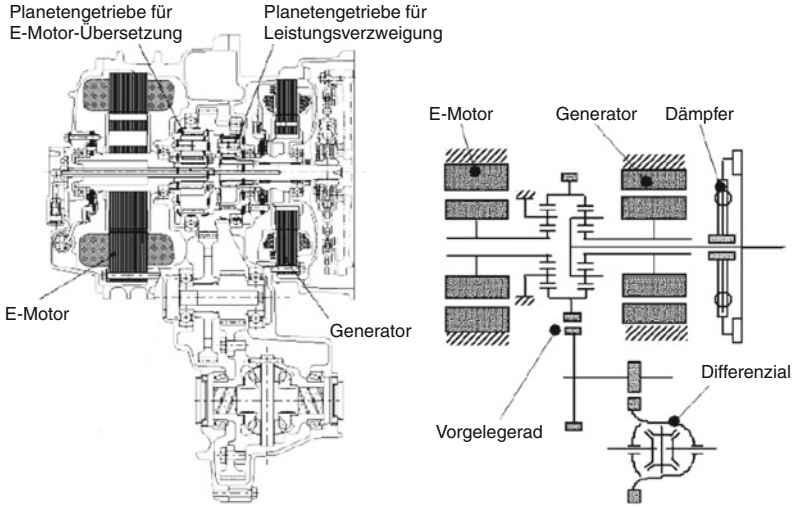



**Abb. 4.107** Toyota Hybrid System (THS) mit Leistungsverzweigung [94]

**Mischhybride** Die Kombination aus parallelem und/oder seriellem Leistungsfluss führt zu den so genannten Mischhybriden. Deren Ausgestaltung mit Verbrennungsmotor, elektrischen Maschinen, Getriebekomponenten, Kupplungen, Freiläufen, Bremsen ist beliebig vielfältig.

Mischhybride zeichnen sich im Wesentlichen durch folgende Vorteilsausprägungen aus:

- Der Verbrennungsmotor kann zumindest mit einem Teil seiner Leistung direkt das Rad antreiben.
- Mit einer Leistungsverzweigung können stufenlos variable Getriebe für den Verbrennungsmotor dargestellt werden.

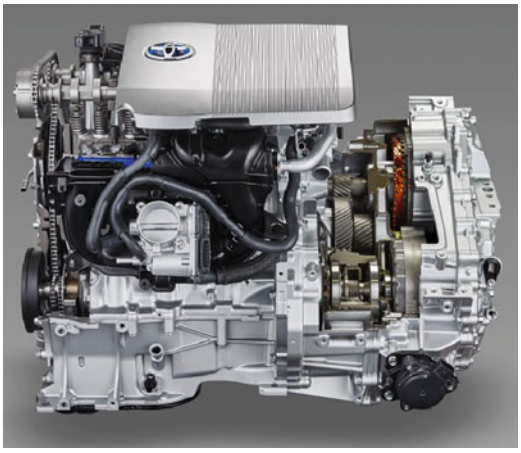


**Abb. 4.108** Getriebeschnitt Toyota Hybrid System mit Leistungsverzweigung im Prius IV [95]

Nachteilig ist die erhöhte Komplexität mit entsprechendem Steuerungsaufwand. Die installierten elektrischen Antriebsleistungen sind bei Mischhybriden konzeptbedingt i. d. R. höher als bei Parallelhybriden mit entsprechenden Kostennachteilen.

Beim Toyota Prius wurde das Konzept der mechanischen Leistungsverzweigung mittels Planetengetriebe realisiert (Abb. 4.107 und Abb. 4.108). Im Prius der vierten Generation mit Markteinführung in 2016 sind ein Zertifizierungsverbrauch von 3,0 l/100 km (70 g $CO_2$/km) sowie ein verbrennungsmotorischer Wirkungsgrad-Bestwert von bis zu 40 % angekündigt. Wie bereits beim Vorgängermotor erfolgt die Auslegung auf die hybridspezifischen Betriebspunkte durch Anwendung des Atkinson-Cycle. Von den zahlreichen Überarbeitungen des 1,8 l Verbrennungsmotors stellen die durch eine Abgasrückführung optimierte Verbrennung, eine Reibungsoptimierung und die Restwärmenutzung des Abgases zur beschleunigten Motorerwärmung die größten Potenziale dar. Während beim Generationensprung die verbrennungsmotorische Leistung bei 73 kW konstant bleibt, steigt die elektrische Spitzenleistung auf 53 kW. Mit der



**Abb. 4.109** Hybridsystem Motor, Getriebe, Leistungselektronik des Toyota Prius IV [95]

angegebenen Systemleistung von 90 kW und fahrzeugseitigen Maßnahmen, wie eine aerodynamische Optimierung und Leichtbau, beschleunigt der Prius von 0 auf 100 km/h in 10,6 Sekunden.

Hier wird auch deutlich, wie die konsequente Optimierung von Komponenten in Verbindung mit dem Hybridantrieb neue Synergien eröffnet. So läuft der elektrische Klimakompressor mit verbessertem Wirkungsgrad auf der hohen Traktionsspannung und kann unabhängig vom Verbrennungsmotor betrieben werden. Ein elektrohydraulisch geregeltes Bremssystem ermöglicht höchste Bremsenergierückgewinnung durch ein optimiertes Zusammenspiel von mechanischer und elektrischer Bremse.

Wie bereits in früheren Generationensprüngen wurden auch im Prius 4 Gewichts- und Bauraumeinsparungen bei den Hybridkomponenten umgesetzt. So verringerte sich das Gewicht der Nickel-Metallhydrid-Batterie um 2 % und das Volumen um 10 %. Das Hybridgetriebe inkl. E-Maschine wurde um 6 % leichter und 12 % kleiner als beim Vorgänger (Abb. 4.109).

Nach dem einfach leistungsverzweigten Prinzip arbeiten auch der Toyota Highlander Hybrid, Camry Hybrid, Yaris Hybrid, Auris Hybrid, der Lexus CT 200h, IS 300h, LS 600h sowie der Lexus RX 450h, wobei bei Letzterem durch die Anordnung eines weiteren Elektromotors auf der nicht verbrennungsmotorisch angetriebenen Achse eine Allradfunktionalität dargestellt wird. Eine Weiterentwicklung des Toyota-Hybridantriebs in Form einer zusätzlichen, 2-stufigen Übersetzung des EM findet sich erstmals im Lexus GS 450h. Damit wird der Zielkonflikt gelöst, einerseits ein hohes elektrisches Anfahrmoment und andererseits gute Wirkungsgrade im Hochgeschwindigkeitsbereich darzustellen. (Abb. 4.110)

Neben Toyota/Lexus setzt auch Ford zur Hybridisierung seiner Fahrzeugflotte auf einfach leistungsverzweigte Getriebe (Escape Hybrid, Fusion Hybrid, C-MAX Hybrid).

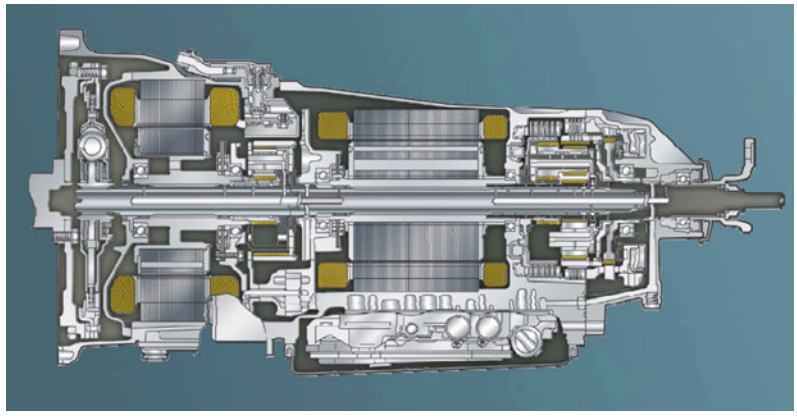


**Abb. 4.110** Leistungsverzweigtes Getriebe des Lexus GS 450h mit zusätzlicher 2-Gang Schaltstufe des E-Motors am Getriebeausgang [96]

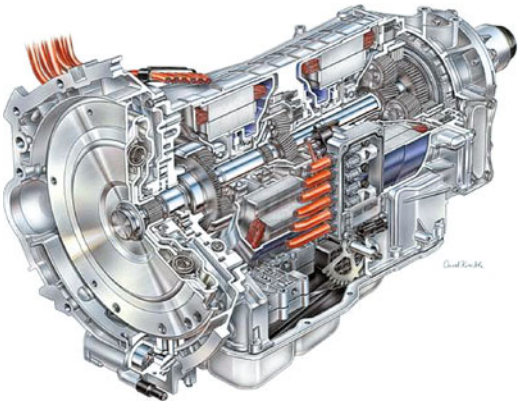


**Abb. 4.111** Das Two-Mode Hybridgetriebe aus der Kooperation GM, Daimler, Chrysler und BMW

Alle oben genannten leistungsverzweigten Getriebe arbeiten mit 1 Planetenradsatz zum Zwecke der Leistungsverzweigung, was die Getriebemechanik einfach hält. Aus den erforderlichen Stützmomenten und Drehzahlen der E-Maschinen ergibt sich jedoch ein hoher Leistungsfluss durch den elektrischen Zweig, was eine entsprechend große Dimensionierung der E-Maschinen und Leistungselektroniken zur Folge hat.

Für stärkere Motorisierungen ist in Kooperation von GM, Daimler, Chrysler und BMW der „Two Mode Hybrid" mit doppelter Leistungsverzweigung entwickelt worden (Abb. 4.111), bei dem der Leistungsfluss im elektrischen Zweig deutlich kleiner ausfällt.

Je nach Kupplungsstellungen sind damit folgende Betriebsmodi möglich (Abb. 4.112):

- einfach leistungsverzweigter stufenloser Betrieb,
- zweifach leistungsverzweigter stufenloser Betrieb mit geringer Leistung im elektrischen Zweig,
- 4 feste mechanische Gänge mit 1 bzw. 2 parallel arbeitenden E-Maschinen mit der Möglichkeit, E-Maschinen zur Wirkungsgradverbesserung bei hohen Geschwindigkeiten abzukoppeln,
- rein elektrische Fahrt.

Das Getriebe ermöglicht sämtliche hybriden Fahrfunktionen in stufenlosem Fahren sowie Fahren in festen Gängen und kann dabei komfortabel zwischen den Betriebsmodi wechseln. Serienanwendungen des Getriebes finden sich im Mercedes-Benz ML 450 HYBRID, im BMW X6 Active Hybrid sowie in Fahrzeugen der GM-Marken Cadillac, GMC und Chevrolet.

Hybridgetriebe mit doppelter Leistungsverzweigung haben auch in Bussen bereits Anwendung gefunden: Seit 2003 sind über 350 Stadtbusse mit einem Hybridgetriebe von GM Allison (Abb. 4.113) in den USA im Einsatz.

### 4.3.3.4 Betriebsstrategien

Um die Vorteile eines Hybridantriebs voll auszuschöpfen bedarf es ausgefeilter Betriebsstrategien. Mit Hilfe mathematischer Simulationsprogramme werden dabei z. B. Verbrauch, Abgasemissionen, Fahrdynamik, Leistungsflüsse in den Komponenten und das thermische Verhalten für vorgegebene Fahrzyklen optimiert.

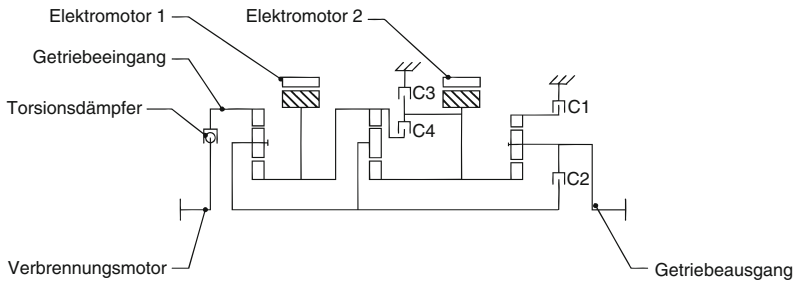



**Abb. 4.112** Struktur des Two-Mode Hybridgetriebes aus der Kooperation GM, DaimlerChrysler und BMW

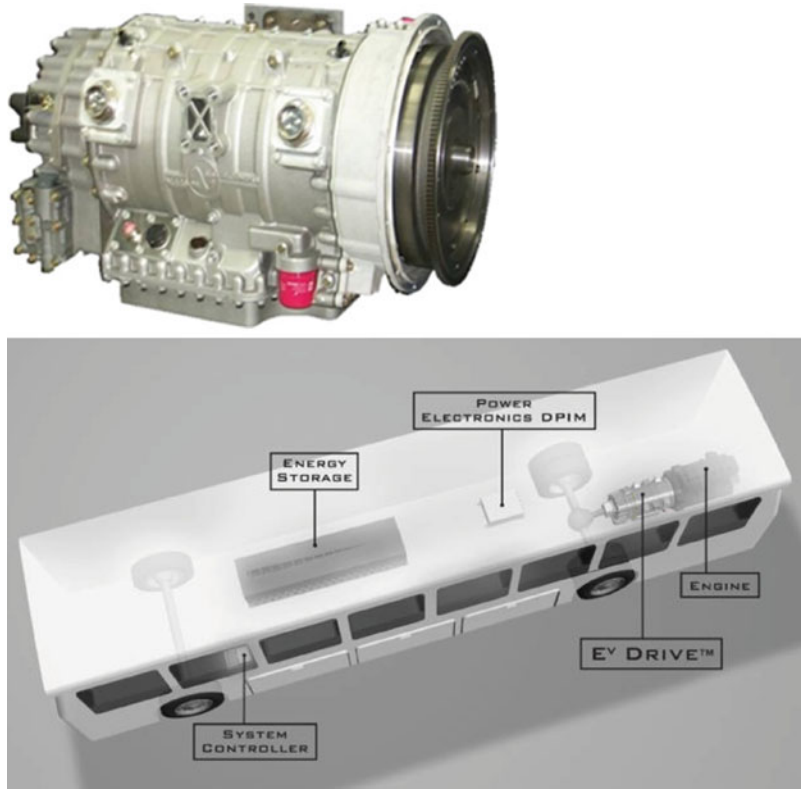



**Abb. 4.113** Leistungsverzweigtes Hybridgetriebe von GM Allison in Busanwendung [97]

Abb. 4.114 zeigt beispielhaft eine mögliche Betriebsstrategie eines Parallelhybriden im europäischen Fahrzyklus. Dabei ist ersichtlich, dass der Verbrennungsmotor nur bei erhöhtem Fahrleistungsbedarf zugeschaltet wird. Im Stand, Schub oder bei geringer Konstantgeschwindigkeit bleibt der Motor abgeschaltet, sofern das der Batterieladezustand erlaubt. Mit der Simulation können Leistungsbedarfe und somit die Größe des Verbrennungsmotors, des Elektromotors und der Batterie festgelegt werden. Ebenso ist der Einsatz des Elektromotors für rein elektrische Fahrt und Beschleunigungsunterstützung sowie die Nachladestrategie der Batterie optimierbar.

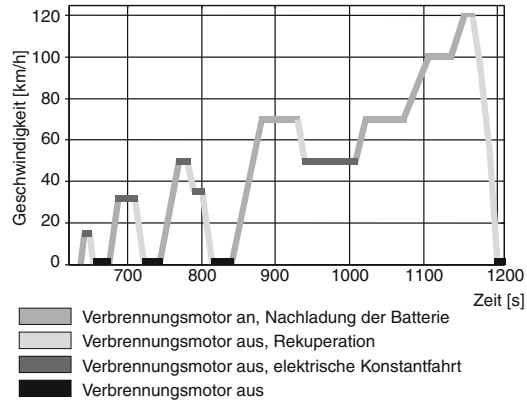



**Abb. 4.114** Betriebsstrategie eines Parallelhybriden im europäischen Fahrzyklus

Die Verbrauchseinsparung durch Hybridantriebe ergibt sich im Wesentlichen aus den folgenden drei Punkten:

1. Bremsenergierückgewinnung während Fahrzeugverzögerung (Rekuperation),
2. Vermeidung von Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors mit ungünstigem Wirkungsgrad durch Auflasten (Laden parallel zur Fahraufgabe),
3. Abschalten des Verbrennungsmotors bei Fahrzeugstillstand oder für rein elektrischen Betrieb.

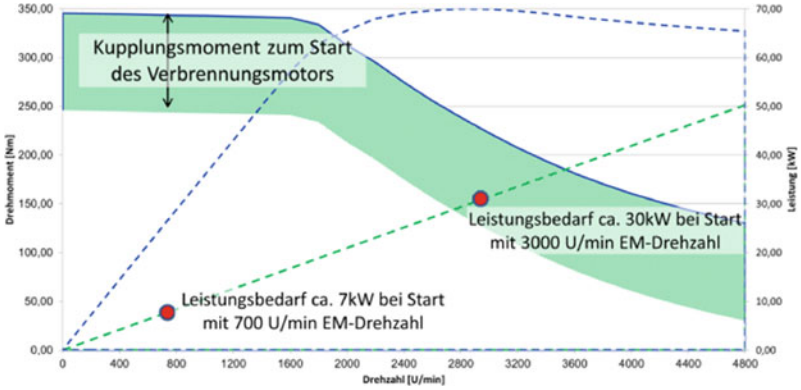



**Abb. 4.115** Abhängigkeit der Startleistung von der Abtriebsdrehzahl bei P2-Anordnung

Aus den genannten Punkten wird deutlich, dass der Verbrauchsvorteil eines Hybridantriebs bei langsamen Stadtfahrten mit hohem Stopp-Anteil am größten ist. Bei konstanter Überlandfahrt mit hohen Geschwindigkeitsanteilen hingegen ergibt sich durch das Gewicht der Hybridkomponenten gegenüber dem konventionellen Antrieb sogar ein leichter Nachteil, wenn keine Maßnahmen speziell für diesen Betriebsbereich getroffen werden. Beim Mercedes-Benz S 400 HYBRID wurde durch eine längere Hinterachsübersetzung und Verwendung des Atkinson-Cycle auch bei Konstantfahrt mit hoher Geschwindigkeit ein Verbrauchsvorteil erzielt. Der entstehende Dynamiknachteil kann im Bedarfsfall durch den Boosteffekt des E-Motors wieder ausgeglichen werden

**Motorstart** Bei allen aufgeführten Triebstrangkonzepten ist die Art des Motorstarts mit dimensionierungsbestimmend für das gesamte Hybridsystem, weshalb es sich lohnt die Unterschiede hier etwas genauer zu beleuchten. Da das erforderliche Moment um einen Verbrennungsmotor anzudrehen stark von der Temperatur abhängt bietet es sich an zwischen Kalt- und Warmstart zu unterscheiden. Ersterer bezeichnet dabei den ersten Motorlauf nach einer längeren Pause, mit allen Warmlaufmaßnahmen, während der Warmstart einen Start bei Betriebstemperatur beschreibt. Dabei sinkt das für den Motorstart erforderliche Moment hin zu höheren Temperaturen. Daher gibt die tiefste Temperatur, bei der ein Start sicher ermöglicht werden soll, den maximalen Momentenbedarf für das Startsystem vor.

Worauf ist nun bei der Auslegung der unterschiedlichen Systeme zu achten? Am einfachsten ist die Dimensionierung bei einem P1-System (Starter/Generator), da das notwendige Startmoment für einen Kaltstart deutlich höher ist, als es die zweite Aufgabe, die Generatorfunktion erfordert.

Schwieriger ist die Lage bei einem P2-System, in dem bei Fahrzeugstillstand die gleichen Voraussetzungen gelten wie beim P1, doch sobald sich das Fahrzeug in der E-Fahrt befindet muss die E-Maschine zwei Aufgaben gleichzeitig ausführen. Zum einen ist sie für die Umsetzung der Fahraufgabe zuständig, zum anderen muss sie den Motorstart über eine sich schließende Kupplung ausführen. Hierbei sind zwei Problemfelder zu lösen:

1. Da die Drehzahl der E-Maschine durch die Fahraufgabe vorgegeben ist, muss auch das für den Start erforderliche Moment bei dieser Drehzahl erzeugt werden. Daher ist der Leistungsbedarf bei größeren Geschwindigkeiten bzw. E-Maschinendrehzahlen deutlich höher als bei einem P1-System. D. h. für die Fahraufgabe steht nicht die gesamte Nennleistung des HV-Systems zur Verfügung (Abb. 4.115).
2. Beim Schließen der Kupplung geht dem Antrieb das entsprechende Moment verloren, weshalb dies durch die E-Maschine ausgeglichen werden muss. Um eventuelle Ungenauigkeiten in der Ist-Momentenbestimmung auszugleichen wird daher meist über ein schlupfendes Antriebsele-

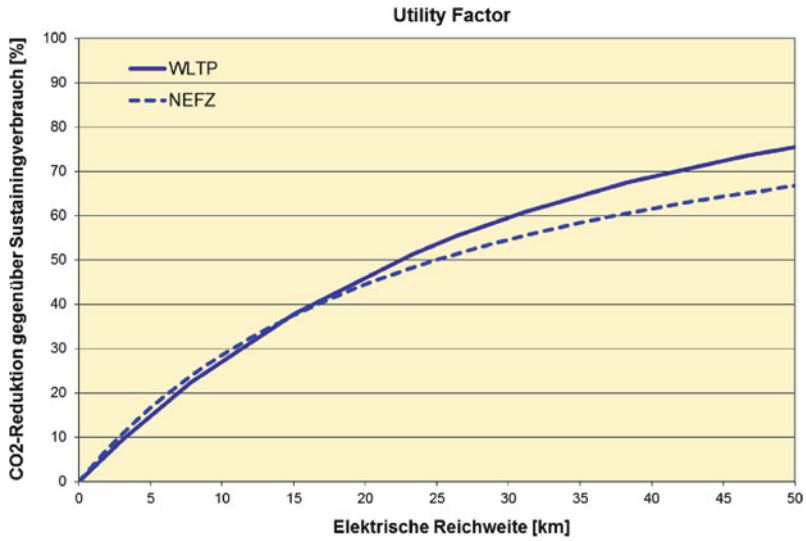



**Abb. 4.116** Zusammenhang zwischen elektrischer Reichweite und Verbrauchseinsparung (Utility Factor) im NEFZ und WLTP

ment eine Entkopplung der E-Maschine vom Antrieb erreicht.

Im Gegensatz zu P2 Systemen haben P3 und P4-Systeme i. d. R. keine Abkoppelmöglichkeit zwischen E-Maschine und Rad, weshalb diese für gewöhnlich ein zusätzliches Startsystem (also eine zusätzliche P1-Maschine) besitzen.

Bei leistungsverzweigten Systemen mit 2 E-Maschinen wird der Start i. d. R. über die Generatormaschine ausgeführt, indem diese aus ihrer Fahrsituation heraus gemäß der Übersetzung das Startmoment für den Verbrennungsmotor in das System gibt. Dabei stützt sie sich jedoch über den Planetensatz an der Fahrmaschine ab, weshalb die Fahrmaschine im gleichen Augenblick das zusätzliche Stützmoment aufbringen muss, damit am Abtrieb kein Ruck spürbar wird. Dies erfordert eine hohe Regelgenauigkeit beider Maschinen. Zudem kann der Motorstart nur bis zu einer Generatordrehzahl erfolgen, bis zu der er das Startmoment noch aufbringen kann, was mit den Übersetzungsverhältnissen die maximale E-Fahrtgeschwindigkeit begrenzt.

#### 4.3.3.5 Plug-In Hybride

Gegenüber autarken Hybriden, bei denen Energie durch Rekuperation oder Auflasten des Verbrennungsmotors ins System eingetragen wird, bietet die Gruppe der Plug-In Hybride die Möglichkeit, die Batterien zusätzlich durch Anschluss an das Stromnetz aufzuladen. Für die Ankopplung an das Stromnetz haben sich 3 Verfahren etabliert:

- AC Laden an der Haushaltssteckdose mit fahrzeugseitigem Ladegerät,
- DC Laden über eine netzseitige Ladestation,
- induktives, kontaktfreies Laden über je eine fahrzeugseitige und eine netzseitige Ladeplatte.

Sowohl die gegenwärtige EU-Gesetzgebung als auch die zukünftige WLTP-Gesetzgebung erlauben die Anrechnung der elektrischen Reichweite bei der Zertifizierung des $CO_2$-Ausstoßes in Form von prozentualen Abschlägen (Utility Factor siehe Abb. 4.116). Die Grundlage hierfür bildet die Argumentation, dass höhere elektrische Reichweiten auch zu größeren $CO_2$ neutralen Fahranteilen im Realbetrieb führen.

Im NEFZ wird der $CO_2$-Ausstoß mit folgender Formel berechnet (Abb. 4.117):

$$M = \frac{(D_e \times M_1 + D_{AV} \times M_2)}{(D_e + D_{AV})}$$

$D_e$: elektrische Reichweite des Fahrzeugs,
$D_{AV}$: 25 km (angenommene Strecke zwischen 2 Batterieladevorgängen),

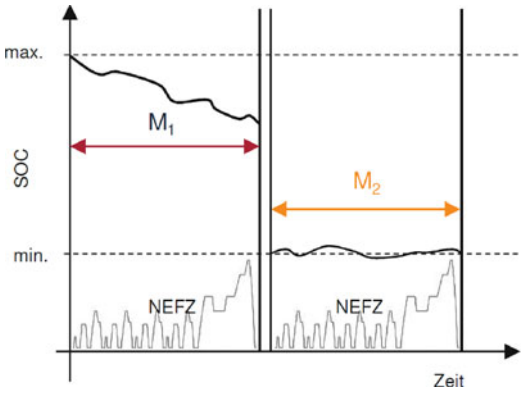



**Abb. 4.117** Verbrauchszertifizierung im NEFZ

$M_1$: $CO_2$ Wert [g/km] des Tests im NEFZ mit voller Batterie,
$M_2$: $CO_2$ Wert [g/km] des Tests im NEFZ mit leerer Batterie.

„Test im NEFZ mit leerer Batterie" bedeutet hierbei, dass das Fahrzeug wie ein konventioneller Hybrid mit ausgeglichener Ladebilanz betrieben wird.Hierbei bewegt sich der Ladezustand der Hybridbatterie um einen Arbeitspunkt, d. h. sie ist nie vollständig entladen.

Vorgehen: Der $CO_2$ Wert des Tests mit voller Batterie $M_1$ darf gegenwärtig zu null gesetzt werden, wenn die elektrische Reichweite die Länge des NEFZ überschreitet (ca. 11 km). Dabei muss die elektrische Reichweite nicht am Stück gefahren werden, sondern darf aus einzelnen elektrisch gefahrenen Teilstücken aufsummiert werden.

Für ein Fahrzeug mit z. B. einem $CO_2$-Ausstoss von 120 g $CO_2$/km im Test mit leerer Batterie und 30 km elektrischer Reichweite mit voller Batterie bedeutet dies, dass ein Verbrauch von ca. 55 g $CO_2$/km für den Flottenverbrauch angerechnet wird. Das Beispiel zeigt den großen Stellhebel für Automobilhersteller, durch den Verkauf von Plug-In Hybriden ihren Flottenverbrauch signifikant zu senken.

Beim Vergleich der Utility Faktoren von NEFZ und WLTP zeigt der WLTP insbesondere für größere Reichweiten eine größere Vergünstigung. Dabei ist aber zu berücksichtigen dass die Fahrwiderstände im WLTP um gut 50 % höher sind als im NEFZ. Daher muss eine Batterie deutlich mehr Kapazität haben, um im WLTP die gleiche Reichweite zu erzielen.

**Ausführungsbeispiele für Plug-In Hybridkonzepte**
Beim Audi A3 e-tron (Abb. 4.118) wird eine Lithium-Ionen Hybridbatterie mit einem Energieinhalt von 8,8 kWh eingesetzt, wobei das nutzbare SOC (State of Charge)-Betriebsfenster durch Randbedingungen wie Alterung und Performance auf 6,2 kWh eingeschränkt wird. Entsprechend der Regularien im NEFZ resultiert daraus eine rein elektrische Reichweite von 50 km.

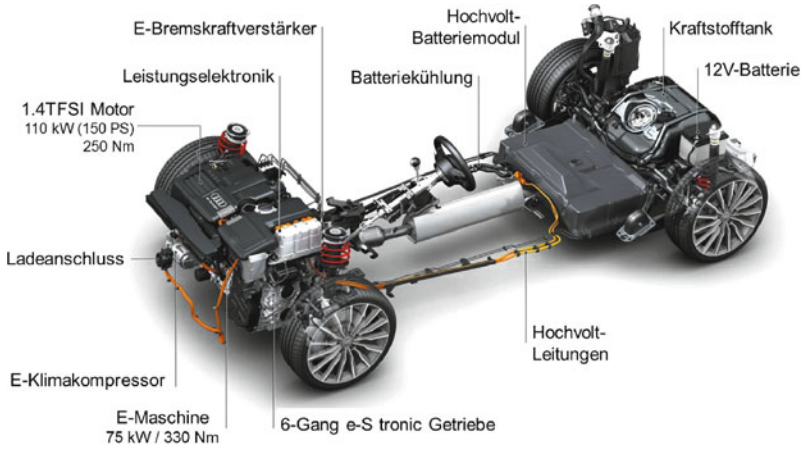



**Abb. 4.118** Audi A3 e-tron, P2-Plug-In Hybrid mit Doppelkupplungsgetriebe [98]

Toyota hat als ersten Plug-In Hybriden eine Variante des Prius auf den Markt gebracht. Das Fahrzeug baut auf dem Antriebskonzept des Prius Vollhybriden auf. Eine Lithium-Ionen Batterie mit einem Energieinhalt von 4,4 kWh ermöglicht dabei eine rein elektrische Reichweite von ca. 25 km im NEFZ und elektrische Höchstgeschwindigkeiten bis zu 85 km/h. Erreicht die Lithium-Ionen Batterie ihren Mindestladezustand, wird zu einer ladungserhaltenden Betriebsstrategie umgeschaltet, bei der der Verbrennungsmotor die Fahraufgabe übernimmt. Der Kunde erlebt das Fahrzeug dann wie einen Prius Vollhybriden. Ihm stehen dann die 73 kW des 1,8 l Ottomotors zur Verfügung, mit der Möglichkeit die Systemleistung durch elektrischen Boost kurzzeitig zu erhöhen. Der Verbrauch im NEFZ liegt bei 2,1 l/100 km oder 49 g $CO_2$/km.

Während beim Prius Plug-In Hybriden die installierte verbrennungsmotorische Leistung überwiegt, gibt es auch Konzepte, deren Schwerpunkt auf elektromotorischer Fahrt liegt. Die Leistung des elektrischen Traktionsmotors und der Traktionsbatterie übersteigt dabei die Leistung des Verbrennungsmotors zum Teil deutlich. Solche Konzepte werden auch als hybridisierte Elektrofahrzeuge oder Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung bezeichnet. Ebenso hat sich der englische Begriff „range extender" durchgesetzt.

Beispiele hierfür sind der Chevrolet Volt sowie der BYD F3DM und sein Nachfolger Qin. Für den Antrieb im BYD F3DM bei elektrischer Fahrt sorgt ein 50 kW starker Elektromotor an der Vorderachse. Dieser wird von einer Lithium-Eisen-Phosphat Batterie mit einer Spitzenleistung von bis zu 75 kW und einem Energieinhalt von 16 kWh gespeist. Damit ist laut Herstellerangabe eine rein elektrische Reichweite von bis zu 100 km bei 50 km/h Konstantgeschwindigkeit in der Ebene möglich. Auch hier schaltet die Batterie bei Erreichen des Mindestladezustands auf eine ladungserhaltende Betriebsstrategie um. Dabei wird die Batterie über einen Generator mit bis zu 25 kW Leistung von einem 1 l-3-Zylinder Ottomotor nachgeladen. Bei höheren Geschwindigkeiten kann dieser das Fahrzeug über einen direkten Gang aber auch direkt antreiben. Dabei leistet er bis zu 50 kW. Es handelt sich dabei also um einen seriell-parallelen Hybriden. Das



**Abb. 4.119** Hybridgetriebe des Chevrolet Volt [99]

Umschalten zwischen seriellem und parallelem Betriebsmodus wird dabei durch eine Trennkupplung realisiert.

Bei Volllastanforderung durch den Fahrer ist es außerdem möglich, die volle Leistung der Batterie über Elektromotor und Generator für Antriebszwecke zu nutzen und mit der Leistung des Verbrennungsmotors zu einer Systemleistung von 125 kW zu kombinieren.

Der Chevrolet Volt wird seit Mitte 2010 in den USA angeboten, in Europa mit gleichem Konzept als Opel Ampera seit Anfang 2012. Eine 16 kWh Lithium-Ionen Batterie ermöglicht hierbei eine nach EPA-Vorschrift (Environmental Protection Agency) zertifizierte elektrische Reichweite von 35 Meilen. Für den Opel Ampera wird im NEFZ eine elektrische Reichweite von 40–80 km und ein Verbrauch von 1,2 l/100 km (27 g $CO_2$/km) angegeben. Der Triebstrang des Chevrolet Volt stellt einen seriell-leistungsverzweigten Mischhybriden dar. (Abb. 4.119 und Abb. 4.120)

Die wesentlichen Komponenten dabei sind:

- ein elektrischer Traktionsmotor mit einer Leistung von bis zu 111 kW und einem Drehmoment von bis zu 370 N m,
- ein elektrischer Generator mit einer Leistung von 55 kW,
- ein 1,4 l 4-Zylinder Ottomotor mit einer Nennleistung von 63 kW,
- ein Planetenradsatz sowie drei hydraulisch betätigte Bremsen/Kupplungen.

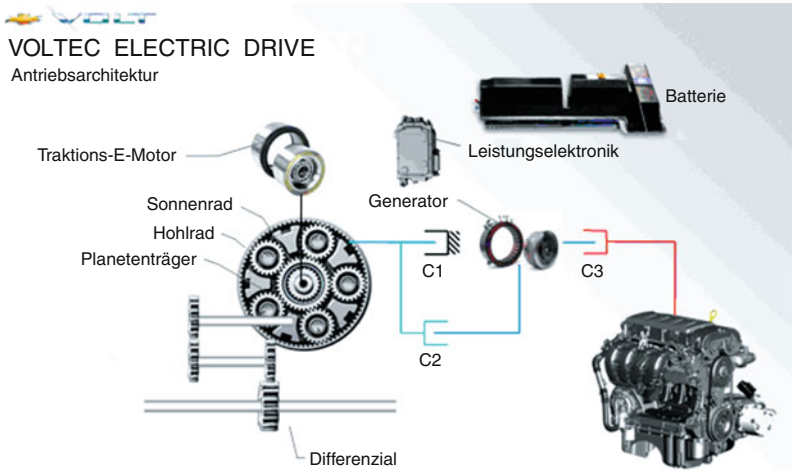



**Abb. 4.120** Struktur des GM Voltec Triebstrangs im Chevrolet Volt [100]

Hiermit werden vier verschiedene Betriebsmodi realisiert.

1. E-Fahrt bei niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten: Der E-Traktionsmotor treibt über das Sonnenrad das Fahrzeug an. Das Hohlrad des Planetengetriebes ist durch die Bremse C1 am Gehäuse festgebremst, die Kupplung C2 trennt Generator und Ottomotor vom Planetengetriebe.
2. E-Fahrt mit höheren Geschwindigkeiten (> 70 mph (113 km/h)): Die Bremse C1 ist geöffnet, während die Kupplung C2 geschlossen wird. Kupplung C3 bleibt geöffnet und trennt damit den Verbrennungsmotor vom restlichen Triebstrang. Der Generator stellt nun über das Hohlrad eine variable Übersetzung für den Traktionsmotor ein, wodurch dieser bei wirkungsgradoptimalen Drehzahlen arbeiten kann.
3. Ladungserhaltung bei Erreichen des minimalen Batterieladezustands: Hierbei wird bei niedrigen Geschwindigkeiten ein rein serieller Betriebszustand hergestellt. Die Kupplung C3 wird dabei geschlossen und somit der Verbrennungsmotor mit dem Generator verbunden, der die Batterie lädt. Die Bremse C1 verbindet Hohlrad und Gehäuse, die Kupplung C2 ist geöffnet. Für Vortrieb sorgt in diesem Modus alleine der elektrische Traktionsmotor.
4. Ladungserhaltung bei höheren Geschwindigkeiten: Der serielle Betriebszustand wird aufgrund der hohen Leistungen, die die Wirkungsgradkette vom Verbrennungsmotor über den Generator zum elektrischen Traktionsmotor durchlaufen, und der erhöhten Drehzahlen des E-Motors unwirtschaftlich. Deshalb wird zum Erreichen eines mischhybridischen Betriebs die Bremse C1 gelöst und Kupplung C2 geschlossen. Dadurch wird eine Ausgangsleistungsverzweigung mit stufenlos variabler Übersetzung realisiert.

**Mercedes S 500 e** Ein Beispiel für einen heckangetriebenen Plug-In Hybriden ist der Mercedes S 500 e. Er kombiniert einen 245 kW starken V6 Biturbomotor mit einer 85 kW E-Maschine, die im Hybridgetriebe integriert ist. Das Getriebe, das auf dem bekannten 7-Gang Planetengetriebe 7G-TRONIC PLUS basiert, beinhaltet zudem eine Trenn- bzw. Anfahrkupplung. Diese entkoppelt einerseits den Verbrennungsmotor bei rein elektrischer Fahrt und bietet andererseits die Möglichkeit, über den Verbrennungsmotor mit der Performance einer nassen Anfahrkupplung anzufahren. Die Trennkupplung ersetzt hierbei den Wandler und beansprucht dank vollständiger Integration ins Wandlergehäuse keinen zusätzlichen Einbauraum. (siehe Abb. 4.121).

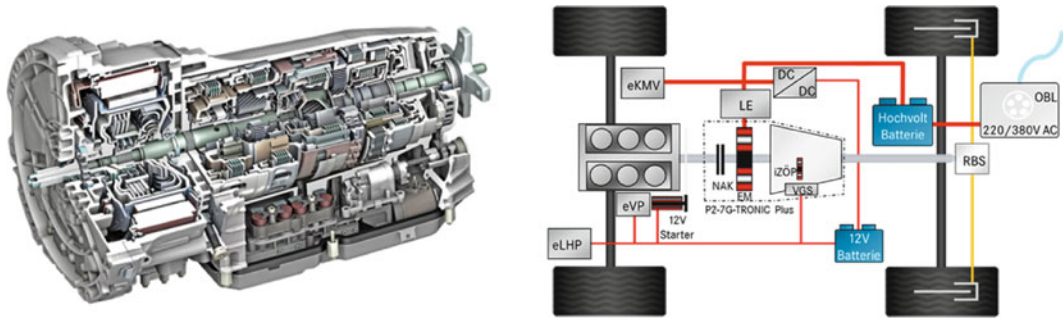



**Abb. 4.121** Mercedes S 500 e, Hybridgetriebe und Strukturbild

Mit einer Systemleistung des S 500 e Plug-In Hybrid von 325 kW und einem maximalen Drehmoment von 650 N m sind Fahrleistungen auf dem Niveau eines 8-Zylinders möglich. Die im Kofferraum integrierte Batterie mit einer Nennkapazität von 8,7 kWh ermöglicht voll aufgeladen eine rein elektrische Reichweite von 33 km. Hierbei wird der Fahrer durch das sogenannte haptische Fahrpedal unterstützt, indem das Fahrzeug eine Rückmeldung über den Einschaltpunkt des Verbrennungsmotors liefert bzw. auch Hinweise zur Nutzung von Segel- und Rekuperationsphasen gibt. Unter Zertifizierungsbedingungen (NEFZ) wird damit ein Verbrauch von 2,8 l/100 km entsprechend 65 g $CO_2$/km realisiert.

### 4.3.3.6 Hybrid Sportwagen

Auch im Rennsport kommt es vermehrt zum Einsatz von Hybridsystemen. Das in 2009 in der Formel 1 eingeführte sogenannte KERS-System (Kinetic Energy Recovery System) zur Rückgewinnung von Bremsenergie wird seit der Saison 2014 in abgewandelter Form als ERS System (Abb. 4.122) mit folgenden Komponenten eingesetzt:

- eine Li-Ionen HV Batterie,
- eine Motor/Generator Einheit am Getriebe zur Rückgewinnung von Bremsenergie und zum Boosten beim Beschleunigen (Motor Generator Unit-Kinetic [MGU-K]),
- eine Motor/Generator Einheit am Turbolader zur Stromgewinnung aus der Turbine und zum Hochbeschleunigen des Laders zur Reduzierung des Turbolochs und zur Regelung der Turboladerdrehzahl anstelle des bisherigen Wastegates (Motor Generator Unit-Heat [MGU-H]),
- eine Leistungselektronikbox zur Ansteuerung der o. g. Komponenten.

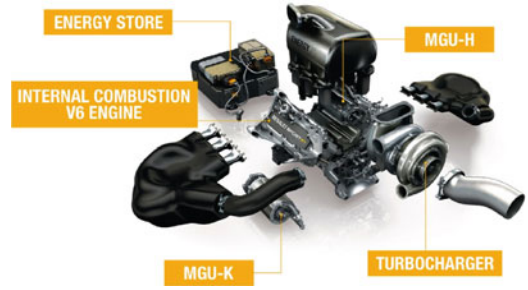



**Abb. 4.122** Das Energie-Rückgewinnungs-System ERS am Renault F1 Motor [101]

Die Limitierung des ERS-Systems beträgt 4 MJ/Runde und entsprechend ist die Maximalleistung von 120 kW für 33,3 Sekunden abrufbar. Die rückgewinnbare Bremsenergie wurde auf 2 MJ/Runde begrenzt, während die Energie aus dem Turbolader (MGU-H) unlimitiert ist. Die Masse des Energiespeichers muss zwischen 20 und 25 kg liegen.

Mit dem Porsche GT3 R Hybrid (Abb. 4.123) wurde auf dem Genfer Automobilsalon 2010 ein Hybridsystem vorgestellt, das auf der Speicherung von Bremsenergie in einem Schwungrad statt in einer Batterie beruht. Damit unterscheidet es sich deutlich von den bisher vorgestellten Hybridsystemen.

1 Leistungselektronik
2 Portalachse mit zwei Elektromaschinen
3 Hochvoltkabel
4 Elektrischer Schwungradspeicher
5 Leistungselektronik

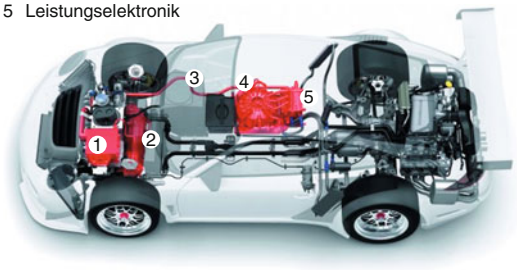
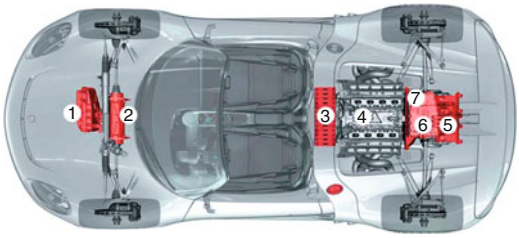



**Abb. 4.123** Porsche GT3 R Hybrid Architektur [102]




1 Leistungselektronik
2 Elektroantrieb
3 Lithium-Ionen-Batterie
4 V8-Hochdrehzahlmotor
5 Porsche Doppelkupplungsgetriebe (PDK)
6 Elektromaschine
7 Leistungselektronik

**Abb. 4.124** Porsche 918 Spyder Hybrid Architektur [103]

Das Schwungrad speichert in seinem Rotor, der mit bis zu 40.000 Umdrehungen/min rotiert, die Energie in mechanischer Form. Der Fahrer kann diese Energie bei Bedarf abrufen. Dabei wird der Rotor elektromechanisch gebremst. Aus seiner Bewegungsenergie können dann bis zu 120 kW elektrische Leistung für wenige Sekunden gewonnen werden.

Zwei Elektromotoren mit jeweils 60 kW an der Vorderachse ergänzen dann den verbrennungsmotorischen Hinterachsantrieb. Bei Bremsvorgängen wird der Schwungradspeicher dann in umgekehrter Weise aufgeladen.

Der Porsche GT3 R Hybrid wurde als Rennfahrzeug beim 24-Stunden-Rennen auf der Nordschleife des Nürburgrings im Mai 2010 zum ersten Mal eingesetzt.

Neben Fahrzeugen, die rein für die Rennstrecke gedacht sind, lässt sich auch bei Sportwagen für öffentliche Straßen ein Trend zur Hybridisierung erkennen.

Ein Beispiel ist der Porsche 918 Spyder Plug-In Hybrid (Abb. 4.124), der von November 2013 bis Juni 2015 in limitierter Stückzahl verkauft wurde.

Eine 5,1 kWh Plug-In Batterie ermöglicht eine elektrische Reichweite von 25 km, angetrieben durch einen 95 kW E-Motor an der Vorderachse und eine in das Doppelkupplungsgetriebe integrierte 115 kW E-Maschine. Die Summenleistung in Verbindung mit dem 4,6 l V8-Verbrennungsmotor beträgt 652 kW.

Eine ähnliche Anordnung der Antriebskomponenten findet man beim BMW i8 (Abb. 4.125 und Abb. 4.126), der seit Juni 2014 auf dem Markt ist. Er verfügt über einen Elektromotor an der Vorderachse (96 kW) und einen 3-Zylinder 170 kW Verbrennungsmotor an der Hinterachse. Der 5,2 kWh Plug-In Akku ermöglicht eine rein elektrische Reichweite von 37 km. Bemerkenswert ist die gewichtsreduzierte Karosserie aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), die zu der beeindruckenden Fahrperformance beiträgt.



**Abb. 4.125** BMW i8 mit verbrennungsmotorischem Antrieb an der Hinterachse und Elektroantrieb an der Vorderachse mit Tunnelbatterie [104]

Im Fisker „KARMA“ Sportwagen finden wir den sonst eher seltenen seriellen Hybridantrieb (Abb. 4.127). Der Verbrennungsmotor hat keine mechanische Verbindung zu den Rädern. Stattdessen treiben zwei Elektromotoren mit je 150 kW die Hinterachse an. Durch die somit fehlende Kardanwelle im Mitteltunnel wird dieser frei für die




**Abb. 4.126** BMW i8 mit P1/4 Hybridantrieb [105]

Aufnahme der länglichen Li-Ionen Batterie (Eisen Phosphat Typ) mit einer Kapazität von 20 kWh und max. 200 kW Leistung. Während der Fahrt erzeugt ein 2 l 4-Zylinder Turbo-Direkteinspritzer-Ottomotor mit max. 190 kW elektrische Energie über einen direkt angeflanschten Generator. Die elektrische Leistung wird entweder direkt dem Fahrantrieb zugeführt, oder aber in der Batterie zwischengespeichert. Über ein Ladegerät kann der Akku je nach verfügbarer Ladeleistung in 6 bis 14 Stunden extern aufgeladen werden (Plug-In).

#### 4.3.3.7 Antriebskomponenten aus Hybridsicht

**Wärmekraftmaschinen** Die Anbindung der Wärmekraftmaschine an das Rad variiert bei den Hybriden von der konventionellen Anordnung mit Getriebe beim Parallelhybriden bis zur totalen mechanischen Entkopplung beim seriellen Hybriden.

Die heute am Markt befindlichen Hybrid-PKW basieren überwiegend auf Ottomotoren. Für den Ottomotor sprechen die größere Verbreitung auf den Weltmärkten, das meist höhere Hybrid-Einsparpotenzial und die geringeren Kosten. Diesel-Hybride erzielen hingegen bedingt durch ihren geringeren Absolutverbrauch Spitzenwerte bei der Zertifizierung.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ermöglicht neue Freiheitsgrade in Bezug auf den Technologieeinsatz an den Antriebskomponenten. Dabei entstehen im Wesentlichen nachfolgende Strategien:

Die Möglichkeit, mit dem Elektromotor beim Beschleunigen zu unterstützen, kann dazu genutzt werden, den Verbrennungsmotor in Bezug auf Hubraum oder Zylinderzahl kleiner auszulegen als bei konventionellen Antrieben.

Diese Boostfähigkeit erlaubt weiterhin den Leistungsverlust von verbrauchsreduzierenden Verfahren wie z. B. dem Miller- oder Atkinson-Prinzip mehr als zu kompensieren. Damit kann im Gesamtsystem sowohl der Wirkungsgrad wie die Leistung gesteigert werden, allerdings nur soweit die elektrische Boost-Energie im System bereitgestellt werden kann.

Alternativ können die Antriebskomponenten technologisch entfeinert werden, wobei nachteili-

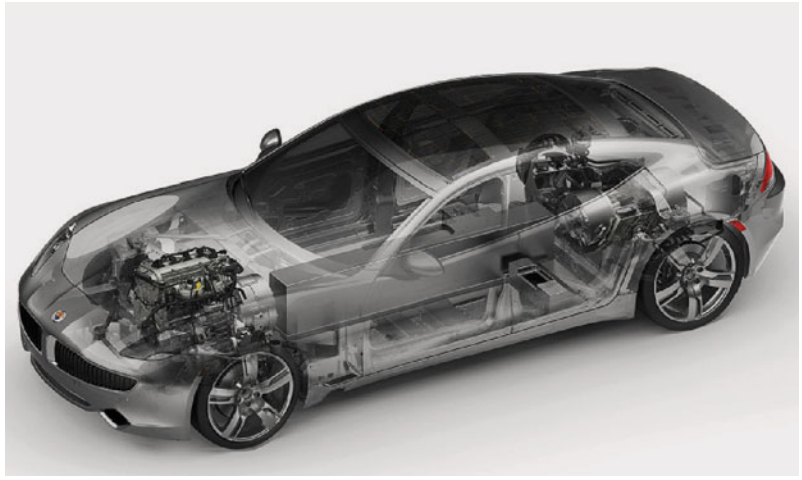


**Abb. 4.127** Fisker Karma mit seriellem Hybridantrieb [106]

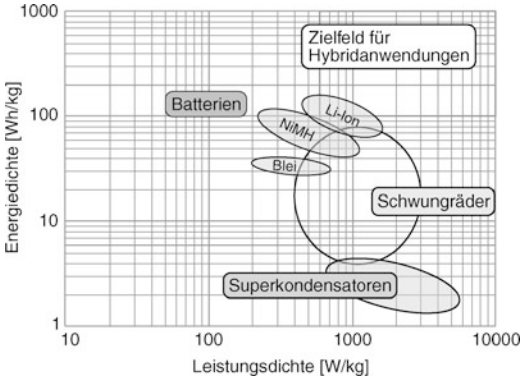



**Abb. 4.128** Energie und Leistung von Energiespeichern

ge Effekte auf die Antriebseigenschaften durch die Hybridisierung kompensiert werden. Diese Strategie ist insbesondere dann wirksam, wenn der Anteil des verbrennungsmotorischen Betriebs durch größere elektrische Reichweite reduziert wird.

Bei Hybriden mit fester Anbindung der E-Maschine an die Kurbelwelle sind schleppleistungsreduzierende Maßnahmen besonders interessant, weil damit das Rekuperationspotenzial über die E-Maschine gesteigert werden kann.

Bei seriellen Hybriden im Forschungsstadium findet man die größte Bandbreite von Energiewandlern vom kompakten Wankelmotor oder, wo die Dynamik der Wärmekraftmaschine von untergeordneter Bedeutung ist, auch Gasturbinen und Stirlingmotoren. Auch eine Brennstoffzelle als Stromerzeuger lässt sich leicht in die Systemwelt eines Hybriden einfügen.

**Batterie** Bei der Batterie muss man zwischen zwei verschiedenen Auslegungen unterscheiden: Werden größere emissionsfreie Reichweiten gewünscht, so kommen Hochenergie-Batterien zum Einsatz mit den gleichen Problemen bzgl. Gewicht, Packaging und Kosten wie beim Elektrofahrzeug. (siehe ► Abschn. 4.3.1) Im anderen Fall dient die Batterie nur als Leistungspuffer zur Bremsenergierückgewinnung und Beschleunigungsunterstützung.

Betrachtet man die elektrischen oder elektromechanischen Energiespeicher in einem Vergleich der Energiedichte über Leistungsdichte (Abb. 4.128), so drängt sich zunächst der Gedanke an Superkondensatoren oder Schwungräder auf. Wegen der geringen Energiedichte ergeben sich bei dem benötigten Energieinhalt für die Superkondensatoren jedoch ein relativ großer Bauraum- und Gewichtsbedarf und hohe Kosten. Man findet deshalb auch Vorschläge für Kombinationen aus Batterien und Superkondensatoren. Das Problem dabei ist die deutlich höhere Abhängigkeit der Spannung vom Ladezustand bei Superkondensatoren gegenüber Batterien, wodurch entweder nur ein kleiner Teil des Energieinhalts ausgenutzt werden kann oder zusätzliche Spannungswandler erforderlich werden.

Für Schwungräder in einer automobilen Anwendung sind die Entwicklungsaufgaben hinsichtlich Betriebssicherheit, Crashverhalten, Dauerverlusten, Packaging und Kosten in Summe noch nicht befriedigend gelöst.

Blei-Batterien haben für die beschriebenen Hybridanwendungen unzureichende Eigenschaften. Die hohen Energieumsätze bei teilentladenem Zustand führen zu geringen Lebensdauern. Bei Ladezuständen $> 50–60\,\%$ muss die Ladeleistung drastisch reduziert werden, da sonst die Gasungsspannung überschritten wird. Bleibatterien sind andererseits sehr kostengünstig.

Die alkalischen Akkumulatoren (Nickel/Cadmium und Nickel/Metallhydrid) bieten von Hause aus hohe Leistungsfähigkeit auch noch bei relativ niedrigen Ladezuständen. Diese Aussage gilt ebenso für schnelles Laden bei hohen Ladezuständen, z. B. bei der Rekuperation. Das sind für die meisten Hybridanwendungen die entscheidenden Parameter. Wegen der Toxizität des Cadmiums, des Memory-Effektes und der geringeren Lebensdauer kommen von den alkalischen Systemen jedoch heute ausschließlich Nickel/Metallhydrid-Batterien zum Einsatz.

Aufgrund ihrer höheren Energie- und Leistungsdichte haben sich heute jedoch in den meisten Fahrzeugmodellen Li-Ion Batterien in Hybrid- und Plug-In Fahrzeugen durchgesetzt. Die kompakteren Abmessungen erlauben eine bessere Fahrzeugintegration bei den steigenden Leistungs- und Reichweitenanforderungen.

Wesentliche Auslegungsgrößen für eine Hybridbatterie sind die erforderliche Leistung und der Energieinhalt, deren Verhältnis auch den Zelltyp

bestimmt. Die Wahl der Zellchemie, der Zellgröße und damit deren Anzahl bestimmt die Spannungslage, die unter Einbeziehung der Leistungselektronik, des E-Motors und der Verkabelung nach Kosten und Funktion optimiert werden kann. Weitere wichtige Batteriekriterien sind das Temperaturverhalten, die Recyclingfähigkeit und das Verhalten der Batterie bei Betriebsstörungen und Unfällen.

Um die einwandfreie Funktion der Batterie zu gewährleisten, werden die Batterien mit einem eigenen Steuergerät ausgerüstet, häufig als Batteriemanagementsystem bezeichnet. Dessen typische Funktionen sind die laufende Überwachung des Batterieladezustandes, der Ströme, Spannungen und Temperaturen. Das Batteriemanagementsystem steuert häufig auch die Batteriekühlung und schützt die Batterie vor Missbrauch.

**Getriebe** Alle heute bekannten Getriebetypen können mit ausgesuchten Hybridkonzepten kombiniert werden. In seltenen Anwendungen wurden Handschaltgetriebe in P1 Hybridantrieben eingesetzt. Sobald jedoch rein elektrische Fahrt mit zu und Abschaltung des Verbrennungsmotors hinzukommt, empfiehlt sich grundsätzlich der Einsatz von automatisierten Getrieben.

Dabei können konventionelle Grundgetriebe um einen Hybrid-Triebkopf modular erweitert werden, oder aber spezielle Hybridgetriebe, z. B. mit Leistungsverzweigung, ersetzen die herkömmlichen Getriebe auch gänzlich. Auch beim seriellen Hybriden wird kein herkömmliches Getriebe mehr benötigt.

Durch eine Anfahrunterstützung mittels E-Motor können die Anfahrelemente Kupplung oder Wandler vereinfacht oder gänzlich ersetzt werden.

In ► Abschn. 4.3.1 wird gezeigt, dass die Effizienz des Elektroantriebs drehzahlabhängig ist. Dadurch kommt dem Hybridgetriebe die Bedeutung zu, die für die E-Fahrt erforderlichen Leistungen bei möglichst effizienten Drehzahlen darzustellen. Anhand einer energetischen Betrachtung kann der Zugewinn an Antriebseffizienz durch zusätzliche Gangstufen mit den dadurch entstehenden Verlusten im Getriebe abgewogen und dadurch die optimale Ganganzahl bestimmt werden.

**Elektromaschinen und Leistungselektronik** Bzgl. der Grundlagen zu elektrischen Antrieben verweisen wir auf das Kapitel „Elektroauto“. Beim Hybridantrieb sind die Maschinen i. d. R. im Antrieb integriert, wodurch das erzielbare Moment im zur Verfügung stehenden Bauraum die ausschlaggebende Größe für die Maschinenauswahl wird. Deshalb haben sich in heutigen Hybridanwendungen permanent erregte Synchronmaschinen durchgesetzt. Auch bei der Leistungselektronik steht die Fahrzeugintegration im Vordergrund: So liegt die die spezifische Leistung heute bei ca. 25 kW/l und damit um den Faktor 10 höher als bei der ersten Markteinführung von Hybridfahrzeugen.

Für Spannungen bis ca. 200 V und damit kleinen und mittleren Leistungen, haben sich Metal Oxide Semiconductor Feldeffekttransistoren (MOSFETs) etabliert. Insulated-Gate-Bipolar-Transistoren (IGBTs) werden bevorzugt im Spannungsbereich $> 200$ V für mittlere und hohe Leistungen eingesetzt. Der Fokus der Weiterentwicklung bei den Leistungshalbleitern liegt in der Reduzierung der statischen und dynamischen Verluste. Weiteres Ziel ist die Steigerung der maximalen Sperrschichttemperatur sowie eine verbesserte thermische Anbindung des Chips an den Kühlkörper.

Siliziumcarbid (SiC) Transistoren zeichnen sich durch sehr gute Wirkungsgrade und hohe thermische Belastbarkeit aus, was neue Perspektiven für die Integration der Leistungselektronik in der Nähe von Motor und Getriebe eröffnet. Die Technologie ist allerdings noch im Entwicklungsstadium. CarbonNanoTube (CNT) Transistoren lassen auf Grund der Materialeigenschaften sehr gute Leistungsdaten erwarten, sind aber noch in einem frühen Forschungsstadium.

Ein hohes Differenzierungspotenzial bzgl. Wirkungsgrad und funktionaler Kundenwahrnehmung liegt in der Regelungstechnik der E-Antriebe. Hier gehen die Automobilhersteller z. T. eigene Wege.

#### 4.3.3.8 Fahrzeugintegration

Eine große Herausforderung liegt in der Unterbringung der zusätzlichen Hybridkomponenten im Fahrzeugpackage, ohne dabei kundenrelevan-

te Einschränkungen gegenüber dem konventionellen Grundfahrzeug hervorzurufen. Dies gestaltet sich besonders schwierig, wenn das Fahrzeugkonzept auf konventionellen Antrieb ausgelegt wurde. Die Hochvoltbatterie stellt die größten Anforderungen an die Fahrzeugintegration, nicht nur aufgrund des großen Volumens sondern auch aufgrund der Crashsicherheit. Darüber hinaus kann durch das Batteriegewicht die Nutz- und Anhängelast beeinträchtigt werden.

Frontantriebstopologien erleichtern die Möglichkeit, die Batterie in den Unterboden zu integrieren. Ein mögliches Konzept ist ein Sandwichboden im Fahrzeug, bei dem die Traktionsbatterie unterhalb der Innensassen untergebracht wird. Der niedrige Schwerpunkt und die zentrale Lage des Mehrgewichts im Fahrzeug beeinflussen die Fahrdynamik positiv. Die zentrale Anordnung begünstigt weiterhin eine Modularisierung der Batterien über verschiedene Baureihen. In dieser Bauform ist jedoch eine Anhebung des Innenraums erforderlich, was zu einem insgesamt höheren Fahrzeugaufbau führt. Bei geringerem Kapazitätsbedarf kann mit einer Tunnelbatterie und/oder einer Anordnung unterhalb der Rücksitzbank eine Anhebung des Innenraums vermieden werden. Ein Beispiel hierfür ist der Opel Ampera.

Bei Heckantriebstopologien ist eine Batterieintegration in den Unterboden aufgrund der mechanischen Antriebskomponenten schwierig. Häufig findet man in dieser Konstellation eine Integration der Batterie in den Kofferraum. In diesem Fall muss bei der Gesamtfahrzeugentwicklung eine Einschränkung in der Nutzbarkeit zwischen dem Volumen des Energiespeichers (korreliert mit elektrischer Reichweite) und dem Kofferraumvolumen abgewogen werden. Dies wird dadurch verstärkt, dass die Ladeinfrastruktur möglichst nah an der Batterie zu positionieren ist, um die Leitungswege zwischen Batterie und Ladedose kurz zu halten.

Die zusätzlichen Hybridkomponenten müssen nicht nur im Fahrzeug untergebracht werden, sondern auch auf verschiedenen Temperaturniveaus gekühlt werden. Dies macht eine Anpassung der Hoch- und Niedertemperatur-Kühlkreisläufe erforderlich. Hybridspezifische Maßnahmen und Komponenten des Thermomanagements werden in ► Abschn. 3.3.3 beschrieben. Bei der Anordnung von Hochvoltkomponenten wie E-Maschine, Inverter und elektrischem Kältemittelverdichter im Motorraum werden hohe Anforderungen an das Thermomanagement gestellt, um die Bauteile vor den hohen Temperaturen von Motor und Abgasanlage zu schützen.

Neben dem Fahrzeug-Package sind auch funktionale Randbedingungen zu beachten. Für die rein elektrische Fahrt bei abgestelltem Verbrennungsmotor muss besonderes Augenmerk auf den Betrieb der normalerweise vom Verbrennungsmotor angetriebenen Nebenaggregate Lenkung, Unterdruckpumpe und Klimakompressor gelegt werden. Durch die zunehmende Einführung elektrischer Lenksysteme auf 12 V Basis auch bei konventionellen Fahrzeugen sind für das Lenkungsproblem Lösungen verfügbar. Wegen ihres hohen Leistungsbedarfs werden elektrisch angetriebene Klimakompressoren auf Traktionsspannungsniveau betrieben. Auch muss das Zusammenspiel der Fahrzeugbremsanlage mit der Rekuperationsbremse sowie der Hybridtraktionskomponenten mit Sicherheitssystemen wie Anti-Blockier-System oder Fahrstabilitätsregelungen optimiert werden.

Zur Versorgung des 12 V Bordnetzes werden DC/DC Wandler eingesetzt, die die Energie aus dem Hochvoltnetz des Fahrzeugs zur Verfügung stellen. Bei korrekter Auslegung ist dieser Weg nicht nur energetisch günstiger, es können auch längere Verbrennungsmotor-Stopp-Zeiten überbrückt werden.

Zum Schutz der Insassen und empfindlicher elektronischer Systeme vor elektromagnetischen Wellen aus dem Antrieb muss auf die Kabelverlegung und geeignete Schirmungsmaßnahmen im Fahrzeug geachtet werden. Die hohe Spannung der Traktionskomponenten erfordert entsprechende Kennzeichnungen im Fahrzeug, geeignete Schulung von Werkstattpersonal sowie Sicherheitsabschaltungen bei unsachgemäßem Zugriff.

Das Thema Geräuschkomfort erhält beim Hybriden eine neue Dimension. Bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor treten das E-Maschinen-Geräusch sowie bislang nicht störende Hintergrundgeräusche stärker in den Vordergrund. Auch das Zu- und Abschalten des Verbrennungsmotors muss diesbezüglich komfortabel gelöst sein. Zur Warnung anderer Verkehrsteilnehmer bei ge-

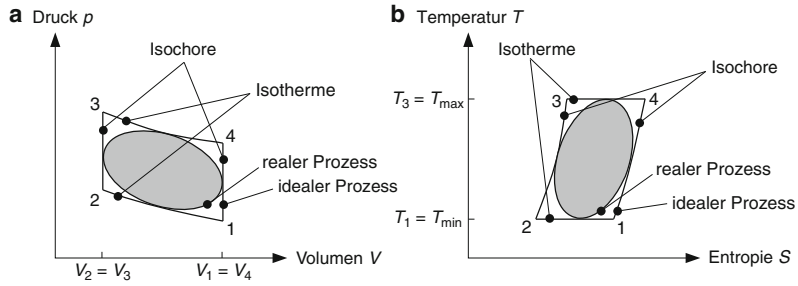



**Abb. 4.129** Kreisprozess im Stirlingsmotor: **a** $p$-$V$-Diagramm, **b** $T$-$S$-Diagramm

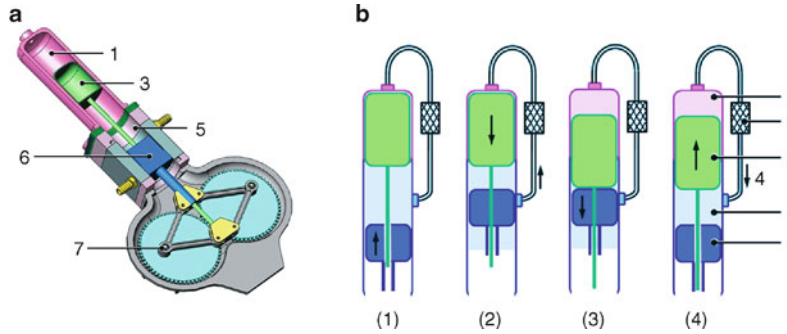



**Abb. 4.130** Stirlingmotor: **a** Axialer Aufbau, **b** Funktionsprinzip 1: heißer Raum; 2: Regenrator (am Umfang); 3: Verdrängerkolben; 4: Luftbewegung; 5: kalter Raum; 6: Arbeitskolben; 7: Kurbeltrieb. Die Kolbenstellungen (1), (2), (3) und (4) entsprechen den Diagrammeckpunkten des Stirling-Vergleichsprozesses im $p$-$V$- und $T$-$S$-Diagramm (vgl. Abb. 4.129)

räuscharmer elektrischer Fahrt sind in einigen Ländern Soundgeneratoren vorgeschrieben, die das Fahrzeug insbesondere bei geringer Geschwindigkeit besser akustisch wahrnehmbar machen.

## 4.3.4 Stirlingmotor, Dampfmotor, Gasturbine und Schwungrad

### 4.3.4.1 Stirlingmotor

Der Stirlingmotor arbeitet mit kontinuierlicher äußerer Wärmezufuhr oder Verbrennung und äußerer Kühlung [131]. Ein Wärmetauscher überträgt die Wärme auf das Arbeitsgas (z. B. Helium) im Zylinder. Mithilfe eines Verdrängers wird das Arbeitsgas zwischen einem Raum mit konstant höherer Temperatur und einem Raum mit konstant niedrigerer Temperatur hin- und hergeschoben, wodurch der Innendruck periodisch schwankt. Die Druckschwankungen werden über einen Arbeitskolben und einen Kurbeltrieb in kinetische Energie umgesetzt. Ein Kühler entzieht dabei dem Stirlingmotor die abzuführende Wärme. Zur Steigerung des Wirkungsgrades ist zwischen dem heißen und dem kalten Raum ein Regenerator angeordnet [132] (vgl. Abb. 4.129).

Der ideale Zyklus des Stirlingprozesses (geschlossener Kreisprozess mit kontinuierlicher Wärmezufuhr) ist durch zwei Isothermen und zwei Isochoren beschreibbar. In Abb. 4.130 ist der ideale Kreisprozess des Stirlingmotors als $p$-$V$- und $T$-$S$-Diagramm dargestellt, wobei $p$ den Druck, $V$ das Volumen, $T$ die Temperatur und $S$ die Entropie bezeichnet. Beim Motorprozess wird der Zyklus rechtsläufig und bei der Kältemaschine und bei der Wärmepumpe linksläufig realisiert.

Die Einzelschritte des idealen Kreisprozesses sind:

**Von 1 nach 2, isotherme Kompression** Das Arbeitsgas wird nach der adiabaten Verdichtung in einem Küh-

ler auf seine Anfangstemperatur gekühlt, wobei die Wärme an die Umgebung oder an ein aufzuheizendes Medium abgegeben wird.

**Von 2 nach 3, isochore Wärmeaufnahme** In einem Regenerator wird Wärme aufgenommen.

**Von 3 nach 4, isotherme Expansion** Das Arbeitsgas wird nach adiabater Expansion im Erhitzer auf den Ausgangszustand erhitzt, wobei eine Zufuhr von Wärme durch eine äußere, kontinuierliche Verbrennung notwendig ist. In diesem Teilschritt wird die kinetische Energie abgegeben.

**Von 4 nach 1, isochore Wärmeabfuhr** Im Regenerator wird Wärme abgegeben.

Der Wirkungsgrad $\eta$ des idealen Kreisprozesses ist gleich dem Carnot-Wirkungsgrad, d. h.:

$$\eta = 1 - T_1/T_3 = 1 - T_{\min}/T_{\max}.$$

(◘ Abb. 4.130).

Als Arbeitsmedium für den geschlossenen Kreisprozess werden fast ausschließ1ich Gase wie Wasserstoff, Helium, Stickstoff und Luft verwendet. An das Arbeitsmedium werden die Anforderungen wie hohe spezifische Wärmekapazität, niedrige Dichte, niedrige Viskosität und hohe Wärmeleitfähigkeit gestellt. Gut geeignet sind Helium und Wasserstoff. Der mittlere Prozessdruck, der für eine optimale Leistungsdichte möglichst hoch gewählt werden sollte, beträgt in der Praxis zwischen 2 und 20 MPa [133].

In der Praxis ergeben sich folgende Abweichungen vom idealen Stirlingprozess [134]: Im ◘ Abb. 4.130 sieht man den idealen Zyklus des Stirlingprozesses. Die Verwirklichung des Stirlingprozesses setzt ideale, diskontinuierliche Kolbenbewegung voraus. Dieses ist beim Einsatz realer kinematischer Triebwerke nicht möglich. Des Weiteren ist ein Totraum durch Wärmeübertrager und Überströmleitungen nicht zu vermeiden. Dabei kann das Wärmeübertragervolumen in keinem Fall zu null werden. Die Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr erfolgt nicht nur wie gewünscht über die Zylinderwände, sondern es tritt auch eine schwer vermeidbare, schädliche und direkte Wärmeleitung zwischen heißem und kaltem Raum auf, die nicht zur Erzeugung kinetischer Energie beiträgt. Auch der Wärmeübertrager arbeitet nicht ideal, da seine Temperatur räumlich und zeitlich nicht konstant ist.

Die Anzahl der gebräuchlichsten Bauarten von Stirlingmaschinen als Antriebsmaschinen sind vielfältig und werden in der weiteren Fachliteratur ausführlicher beschrieben (vgl. [135]).

Ein meist mechanisches Triebwerk wandelt die lineare Kolbenbewegung in eine Drehbewegung um. Es werden u. a. Kurbel-, Rhomben- und Schiefscheibentriebwerke unterschieden, aber auch Triebwerke mit hydrostatischen Verdrängern und Kolben sind bekannt [135]. Die Bauweise als Rotationskolbenmaschinen wird bei Stirlingmotoren ebenfalls angewendet. Gemeinsames Kennzeichen ist, dass die Bewegungen von Arbeitskolben und Verdrängern gekoppelt ablaufen. Moderne Motoren arbeiten als doppelt wirkende Motoren mit mehreren Zylindern mit geeigneter Phasenverschiebung.

Vorteile des Stirlingmotors gegenüber Motoren mit innerer Verbrennung [136] ergeben sich aufgrund der kontinuierlichen äußeren Verbrennung. Es sind beliebige Wärmequellen oder Treibstoffe nutzbar. Es können sehr niedrige Emissionen aller limitierten Schadstoffe HC, CO, $NO_x$, erreicht werden, insbesondere bei Verwendung von katalytischen Brennkammern. Stirlingmotoren haben einen hohen Wirkungsgrad im Bestpunkt, mit Hubraumregelung können sie auch gute Teillastwirkungsgrade erreichen [137]. Gegenüber Motoren mit innerer Verbrennung haben sie eine für Fahrzeugantriebe besonders günstige Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik, da sie vom im Stillstand an Drehmoment erzeugen können und kein Starter erforderlich ist. Vorteilhaft ist auch ihr Vibrations- und Geräuschverhalten [138].

Nachteile im Vergleich zu Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung sind u. a. ein langsameres Drehmoment-Ansprechverhalten (außer bei Stirlingmotoren mit Hubraumregelung), da die zur Drehmomenterhöhung erforderliche Zunahme der Wärmezufuhr infolge von Wärmekapazitäten nicht beliebig schnell erfolgen kann; auch bei einem Kaltstart muss erst vorgeheizt werden [137]. Der Bauraumbedarf der Stirlingmotoren ist wegen der Wärmetauscher recht groß, die Fertigungskosten sind wegen der aufwändigen Bauweise auch bei einer

**Tabelle 4.13** Kennwerte von Stirlingmotoren

| Kennwert | Zahlenwert | Einheit |
|---|---|---|
| Spezifische Leistung | 100–500 | W/kg |
| Leistungsdichte | 50–500 | W/l |
| Wirkungsgrad Teillast | 30 | % |
| Wirkungsgrad Bestpunkt | 40 | % |
| Kosten | 50–1500 | €/kW |
| Lebensdauer (Betrieb) | > 11.000 | h |



**Abb. 4.131** Dreizylinder Dampfmotor im Motorraum eines Pkw (IAV GmbH)

Serienfertigung höher als bei Motoren mit innerer Verbrennung [138].

#### 4.3.4.1.1 Kennwerte von Stirlingmotoren

Tab. 4.13 gibt einen Überblick über den Bereich der Kennwerte heutiger Stirlingmotoren. Wegen der vielfältigen Bauarten und Anwendungen können die spezifischen Leistungsgrößen und die Kosten sehr unterschiedlich sein (vgl. [139–141]).

### 4.3.4.2 Dampfmotor

Stirlingmotor und Dampfmotor arbeiten mit äußerer Wärmezufuhr (Verbrennung), während das Arbeitsmedium in einem inneren geschlossenen Kreislauf geführt wird. Gegenüber dem Stirlingmotor, der als Arbeitsmedium verschiedene Gase hat, arbeitet der Dampfmotor mit Wasser oder organischen Flüssigkeiten (z. B. Pyridin). In einem Kraftfahrzeug ist bei der Wahl des Arbeitsmediums auch dessen Wintertauglichkeit, seine Toxizität, seine Gefährlichkeit (z. B. Brennbarkeit) und seine Umweltverträglichkeit zu beachten [142]. Der Wärmeübergang zum und vom Medium findet hier nicht im Motor selbst statt (wie beim Stirlingmotor), sondern in einem Dampferzeuger, einem Überhitzer und einem Kondensator. Die Wärmeerzeugung erfolgt wie beim Stirlingmotor mit einem Brenner, so dass auch hier geringe Emissionswerte erreicht werden. Ein mit Dampfmotor ausgerüsteter Pkw ist in der Lage, ohne zusätzlich Abgasnachbehandlung die höchsten Emissionsanforderungen zu erfüllen [143].

Fahrzeugantriebe mit Dampfmotoren kommen ohne Kupplung und Getriebe aus, da diese Motorart wie auch der Stirlingmotor bereits im Stillstand ein hohes Drehmoment entwickeln kann. Schon vor über hundert Jahren ist daher dieser zum Fahrzeugantrieb wegen seiner Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik besonders gut geeignete Motor auch in Pkw eingesetzt worden. Es gibt auch aktuelle Fahrzeugprototypen mit Dampfmotor, jedoch keine Serienanwendungen. In neuerer Zeit stellte ein automobiltechnisches Forschungs- und Entwicklungsunternehmen erneut einen Pkw mit Dampfmotor vor (siehe Abb. 4.131).

Abb. 4.132 zeigt einen Schnitt durch einen modernen Dampfmotor inkl. Brenner und Dampferzeugungsanlage.

Die Übertragung der kinetischen Energie erfolgt in einer Kolbenmaschine mit geschlossenen Prozesszyklus mittels Phasenumwandlungen des Arbeitsmediums (z. B. Rankine-Prozess). Prozessbedingt ist der Volllastwirkungsgrad des Dampfmotors im Vergleich zu dem des Dieselmotors mit Direkteinspritzung etwas geringer. Durch den günstigeren Wirkungsgrad im Teillastbereich ergibt sich aber sowohl im normalen Fahrbetrieb, als auch z. B. nach dem **N**euen **E**uropäischen **F**ahr**z**yklus (NEFZ) ein äußerst niedriger Kraftstoffverbrauch [144].

Die weiteren Vor- und Nachteile entsprechen etwa denen des Stirlingmotors, wobei der Dampfmotor das Potenzial hat, deutlich kompakter gebaut werden zu können. Trotz einiger Vorteile haben sich Dampf- und Stirlingmotoren jedoch nie gegen die Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung durchsetzen können. Die Gründe hierfür sind in einigen Nachteilen bei der Anwendung,

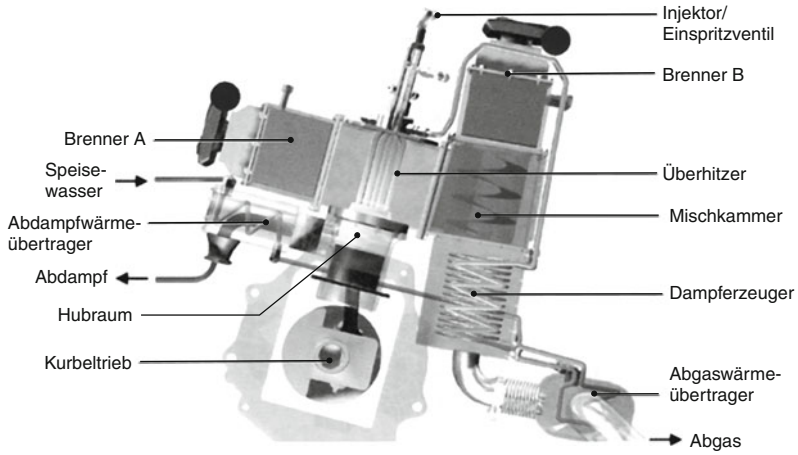



**Abb. 4.132** Schnitt durch einen Dampfmotor inkl. Brenner und Dampferzeugungsanlage (IAV GmbH)

**Tabelle 4.14** Kennwerte von Gasturbinen

| Kennwert | Zahlenwert | Einheit |
|---|---|---|
| Spezifische Leistung | 300–500 | W/kg |
| Leistungsdichte | 200–400 | W/l |
| Wirkungsgrad Teillast | 10–15 | % |
| Wirkungsgrad Bestpunkt | 25–40 | % |
| Kosten | 15–25 | €/kW |
| Lebensdauer (Betrieb) | 2000–4000 | h |

wie z. B. der Vorheizzeit bis zur Betriebsbereitschaft nach einem Kaltstart und dem langsamen Ansprechen beim Beschleunigen zu sehen.

### 4.3.4.3 Gasturbine

Die Gasturbine ist eine Verbrennungskraftmaschine mit kontinuierlicher innerer Verbrennung [159]. Die für die Oxidation des Brennstoffes benötigte Luft durchläuft die einzelnen Zustandsänderungen des offenen Kreisprozesses in voneinander räumlich getrennten Bauteilen wie Verdichter, Brennkammer, Turbine(n), die durch Diffusoren oder Spiralen miteinander verbunden sind, Tab. 4.14.

In einer Gasturbine wird die kontinuierlich durch einen Filter und einen Schalldämpfer angesaugte Frischluft mit Atmosphärendruck in einem Radial- oder Axialverdichter auf den Arbeitsdruck komprimiert, anschließend in einem Wärmetauscher vorgewärmt und in eine Brennkammer geleitet. In diese wird kontinuierlich gasförmiger oder flüssiger Brennstoff eingespritzt und durch eine Initialzündung mit einem Teil des Luftstromes gezündet. Durch Zumischen der restlichen Luft kühlen sich die Verbrennungsgase auf etwa 1300 K am Turbineneintritt ab. Sie geben ihre Energie über ein bis drei Turbinenstufen ab, die auf einer gemeinsamen Welle oder auf getrennten Wellen angeordnet sein können. Das Gasgemisch expandiert in der Turbine, die mit einem Teil der Leistung den Verdichter antreibt und den Rest als Nutzleistung an der Welle abgibt. Die restlichen bei der Verbrennung entstandenen heißen Gase durchströmen den Wärmetauscher und liefern so die Energie für die Vorerhitzung der Ansaugluft. Die sehr hohe Drehzahl der Arbeitsturbine wird über eine starke Untersetzung (Reduziergetriebe) auf die übliche Getriebeeingangsdrehzahl herabgesetzt [145]. Die Verdichterturbine wird auch genutzt, um Hilfsaggregate wie Lichtmaschine oder Hydraulikpumpen anzutreiben. Wegen ihrer hohen Arbeitsdrehzahl haben Gasturbinen, bezogen auf die ihre Leistung, ein sehr geringes Gewicht.

Die Bauarten für Gasturbinen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen unterscheiden sich in der Anzahl der Wellen und der Einzelaggregate wie Wärmetauscher, Zwischenkühler oder Zwischenverbren-

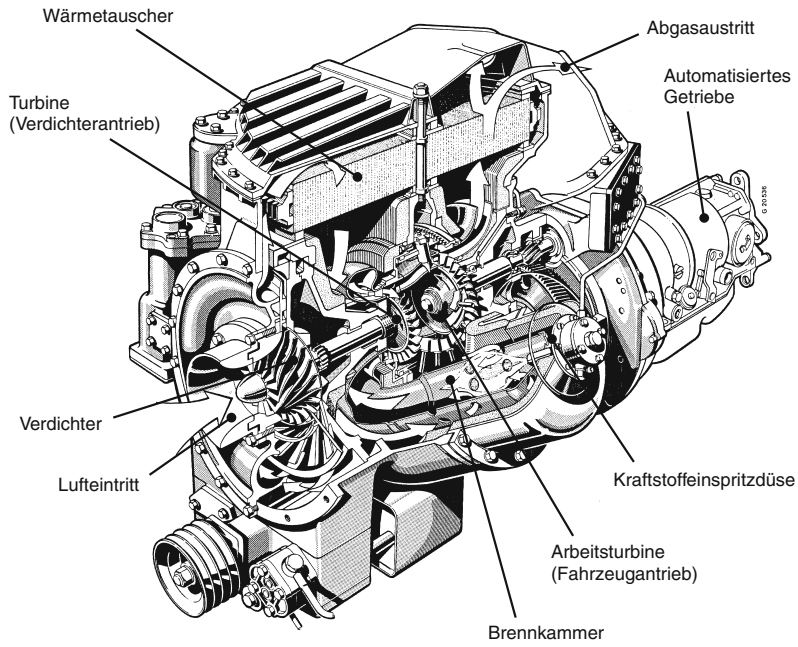



**Abb. 4.133** Gasturbine für den Pkw-Einsatz (Daimler-Benz Forschung)

nungseinheit zur Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades [133].

Bei der Einwellen-Gasturbine sind Verdichter und Nutzturbine auf einer Welle angeordnet. Diese einfache Bauweise weist einen für Kraftfahrzeuge ungünstigen Drehmoment-Drehzahlverlauf beim Anfahren auf, da die Verdichterdrehzahl zu jedem Zeitpunkt gleich der Drehzahl der Abtriebswelle ist. Unproblematisch ist dieses Drehmomentenverhalten jedoch bei einem seriellen Hybrid, bei dem die Gasturbine direkt einen Generator antreibt [146].

Bei der Zweiwellen-Gasturbine (vgl. Abb. 4.133) sind Gaserzeugerwelle (mit Verdichter, Verdichterturbine und Hilfsgetriebe) und Abtriebswelle mit Nutzturbine mechanisch voneinander entkoppelt. Der Drehmomentenverlauf der Zweiwellengasturbine ist deutlich günstiger und für den direkten mechanischen Fahrzeugantrieb besser geeignet als der einer Einwellen-Gasturbine. Um den Kraftstoffverbrauch bei Fahrzeuggasturbinen im Teillast- und Leerlaufverbrauch zu verringern sowie das Beschleunigungsverhalten zu verbessern, erfolgt die Lastregelung über die Regelung der Arbeitsgastemperatur oder über verstellbare Leitschaufeln an Turbine und Verdichter.

Bei der Dreiwellen-Gasturbine ist die Kompression zweistufig mit einer Zwischenkühlung und zwischen den Turbinenstufen ist eine zweite Verbrennung vorgesehen, wodurch die Verbrauchscharakteristik mit höherem Bauaufwand und größerer Komplexität weiter verbessert werden kann.

Als Brennstoffe für Gasturbinen im Fahrzeug kommen Diesel- oder Otto-Kraftstoffe, aber auch alternative Kohlenwasserstoffe, Erd- und Kohlegase oder sogar Kohlenstaub in Frage. Der Verbrennungsvorgang erfolgt kontinuierlich mit hohem Luftüberschuss und wird durch Beimischen von kalter Luft bei Eintritt in die Brennkammer der Gasturbine so geführt, dass die Verbrennungstemperaturen mit 1300 K niedriger liegen als die Spitzentemperaturen von Verbrennung. Das hat zur Folge, dass der Treibstoffverbrauch des kontinuierlichen Prozesses der Verbrennung in bisher für den Einsatz in Fahrzeugen verfügbaren Gasturbinen zwar höher ist als die von herkömmlichen Verbrennungsmotoren, die erreichbaren CO-, HC- und mit Einschrän-

kung auch die $NO_x$-Emissionen aber deutlich darunter liegen.

Bei einem Gasturbinenantrieb für Pkw (◘ Abb. 4.133) oder Lkw stehen den günstigen Emissionswerten und Vorteilen wie Vielstofffähigkeit, günstige Drehmomentcharakteristik, geringe Vibrationen, lange Wartungsintervalle ein deutlich höherer Kraftstoffverbrauch, die für gute Wirkungsgrade erforderlichen großen Wärmetauscher, für den Serieneinsatz im Fahrzeug noch nicht wirtschaftlich verfügbare Materialien für Bauteile der Brennkammern (hochtemperaturfeste Keramiken wie $Si_3N_4$, SiC, Glaskeramiken), eingeschränkte Eignung für kleinere Baugrößen sowie ein schlechteres Ansprechverhalten als Nachteile gegenüber. Der Haupteinsatzbereich liegt heute daher überwiegend bei großen Militärfahrzeugen [147].

#### 4.3.4.4 Schwungrad

Ein Schwungrad ist ein mechanischer Energiespeicher, mit dem Energie als kinetische Energie (Bewegungsenergie) einer rotierenden Masse übertragen werden kann. Häufig werden Schwungräder zum Ausgleich von kurzzeitigen Lastschwankungen, zur Erzielung hoher Leistungsspitzen und zur Überbrückung von Leistungsunterbrechungen verwendet. Es kann auch zur Speicherung von Energie ähnlich einem elektrischen Kondensator oder einer elektrochemischen Batterie eingesetzt werden.

In Fahrzeugen kann mit einem Schwungrad (Energiespeicher) die nicht genutzte kinetische Energie beim Abbremsen des Fahrzeuges zurückgewinnen. Bei einem regenerativen Bremsvorgang wird die kinetische Energie auf ein oder mehrere Schwungräder übertragen und so gespeichert. Diese gespeicherte Energie kann während eines Beschleunigungsvorgangs wieder auf das Fahrzeug übertragen werden [148].

Die im Schwungrad gespeicherte Energie $W$ lässt sich aus dem Massenträgheitsmoment $J$ und der Winkelgeschwindigkeit $\omega$ des Schwungrades zu $W = 1/2 J\omega^2$ berechnen. Das Massenträgheitsmoment $J$ ist dabei proportional zur Masse und zu dem Quadrat ihres Abstandes $r$ von der Drehachse. Je nach radialer Massenverteilung muss dabei ein Formfaktor $K_f$ berücksichtigt werden. Der Wert des Formfaktors $K_f$ liegt, jeweils bezogen auf den gleichen Außendurchmesser, z. B. bei einem dünnen Kreisring bei 1, bei einer gelochten Kreisscheibe bei der der Innendurchmesser halb so groß ist wie der Außendurchmesser bei 0,75 und bei einem massiven Zylinder bei 0,5. Die je Masseneinheit maximal speicherbare Energie, auch massespezifische Energiedichte des Schwungrades genannt, wird durch das Verhältnis von Zugfestigkeit $\sigma$ zu Dichte $\varrho$ des verwendeten Materials und durch den Formfaktor $K_f$ beschrieben. Aus der massespezifischen Energie ($W/m$, dabei sind $W$ = Energie und $m$ = Masse des Schwungrads) kann aber auch das Quadrat der maximalen Umfangsgeschwindigkeit $v_{max}$ berechnet werden:

$$W/m = K_f\sigma/\varrho = 1/2\, K_f v_{max}^2.$$

Hohe spezifische Energiedichten lassen sich also mit hoher Zugfestigkeit und kleiner Dichte des Materials und weitgehender Konzentration der Masse am Umfang des Schwungrades realisieren. Als Kenngröße für die Leistungsfähigkeit eines Schwungrades kann auch die maximale Umfangsgeschwindigkeit angegeben werden [149].

Schwungradspeicher werden im Betrieb nicht ganz entladen, da bei niedrigen Drehzahlen nur noch kleine Leistungen übertragen werden können. Mit der minimalen Winkelgeschwindigkeit $\omega_{min}$ und der maximalen Winkelgeschwindigkeit $\omega_{max}$ ergibt sich der technisch nutzbare Energieinhalt des Schwungrades zu

$$W = 1/2\, J(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2).$$

Liegt die minimale Drehzahl bei der Hälfte der Maximaldrehzahl, kann dreiviertel der insgesamt speicherbaren Energie technisch genutzt werden [150].

Ein Schwungradspeichersystem besteht aus dem Rotor, dem Gehäuse, den Lagern und einer Energieübertragungseinrichtung zur Kopplung mit dem Fahrzeugantrieb. Die nutzbare Leistung des Schwungrades hängt, unabhängig von der speicherbaren Energie, nur von der Leistungsfähigkeit dieser Übertragungseinrichtung ab. Beim Schwungradspeicher sind also, anders als bei den meisten anderen Energiespeichern, speicherbare Energie und zu- bzw. abführbare Leistung unabhängig voneinander. Die Speicherzeitkonstante,

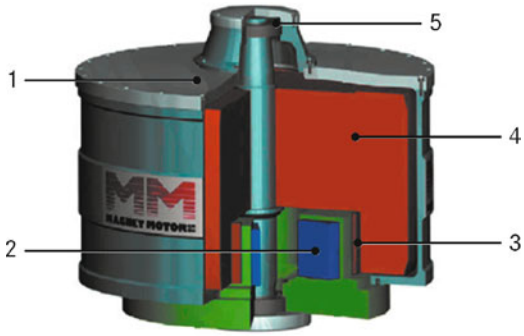



**Abb. 4.134** Elektrodynamischer Schwungradspeicher mit permanenterregtem Synchronmotor und vakuumdichtem Schutzgehäuse (Magnet Motor Starnberg): 1: Schutzgehäuse; 2: Permanenterregter Synchronmotor (Stator); 3: Rotor innerhalb des Schwungrades; 4: Karbonfaser-Epoxidharz-Wickelkörper; 5: Präzisionskugellager

definiert als Verhältnis der Maximalwerte von Leistung und Energie, kann also besonders gut an die Anforderungen angepasst werden kann [151].

Die Energieübertragung kann sowohl mechanisch mit einem stufenlosen Getriebe (CVT) als auch elektrisch mit einem elektromechanischen Energiewandler realisiert werden. Dieser wird heute häufig als umrichtergespeiste, permanenterregte Synchronmaschine, die mit dem Schwungradrotor zu einer mechanischen Einheit verbundenen ist, ausgeführt (vgl. Abb. 4.134). Rein mechanische Energieübertragung mit einem CVT-Getriebe ist bisher nur in besonderen Einzelfällen eingesetzt worden [152].

Schwungräder werden heute nicht mehr aus hochzugfesten Walz- und Schmiedestählen hergestellt, sondern aus Faserverbundwerkstoffen, mit denen deutlich höhere Energiedichten entsprechend dem Verhältnis von Zugfestigkeit $\sigma$ zu Werkstoffdichte $\varrho$ realisiert werden können. Tab. 4.15 zeigt die massebezogene speicherbare Energie und die dazu gehörige maximale Umfangsgeschwindigkeit bei Schwungrädern aus Stahl, Titan, GFK (Glasfaser-Epoxidharz) und CFK (Karbonfaser-Epoxidharz). Die Werte der speicherbaren Energie sind, wie in der Literatur oft angegeben, allein auf die Masse des Schwungrades bezogen. Praktisch erreichbare spezifische Werte des Gesamtsystems Schwungrad sind durch Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors und der Massen von Antrieb, Lagern, Gehäuse, kardanischer Lagerung usw. deutlich kleiner [153].

Das Gehäuse eines Schwungradspeichers soll einerseits zur Reduzierung der Gasreibungsverluste den Betrieb des Rotors in einer Atmosphäre geringen Druckes ermöglichen und andererseits eine Schutzfunktion beim Bersten des Schwungrades erfüllen. Die Lagerung von Schwungrädern muss sehr hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen und soll möglichst geringe Reibungsverluste verursachen. Für schnelllaufende Schwungräder kommen keramische Lager mit permanentmagnetischer Lagerentlastung oder elektromagnetische Lager ohne mechanische Berührung zum Einsatz. Die Aufhängung des Schwungradspeichers im Fahrzeug erfolgt idealer Weise kardanisch [154], da dann keine Reaktionskräfte bei Drehungen um die Fahrzeugachsen auftreten können. Bei der Aufhängung im Fahrzeug über eine gedämpfte Federung sollten Schwungradsysteme zur Vermeidung von Präzessionskräften beim Kurvenfahren senkrecht aufgehängt werden. Präzessionskräfte [154] können so nur beim Kippen und bei Steigungsänderungen auftreten.

Über den elektromechanischen Energiewandler wird die Energie in elektrischer Form eingespeist und entnommen, welche wiederum als kinetische Energie durch Erhöhung und Verminderung der Drehzahl gespeichert wird.

Schwungradspeicher sind besonders in solchen Fahrzeugen sinnvoll, bei deren Betrieb häufige Brems- und Beschleunigungsphasen auftreten (z. B. bei Stadtbussen und Bahnen im öffentlichen Nahverkehr [155]). Sie bilden zusammen mit dem Verbrennungsmotor und dem Elektromotor ein Hybridantriebssystem. Bei realisierten Hybridbussen mit Schwungradspeicher liegt die Treibstoffeinsparung bei etwa 25 % gegenüber Omnibussen ohne Speicherung der kinetischen Energie, die beim Bremsen anfällt.

Schwungradspeicher stehen bei Hybridantrieben in Konkurrenz zu elektrostatischen Speichern mit Supercaps und elektrochemischen Speichern mit Hochleistungsbatterien. Die pro Masse speicherbare Energie von Schwungrädern ist deutlich höher als die von Supercaps und ihre Lebensdauer deutlich höher als die von Batterien. Der Einsatz

**Tabelle 4.15** Massebezogene speicherbare Energie und dazugehörige maximale Umfangsgeschwindigkeit

| | Maximale Zugspannung in $MN/m^2$ | Dichte in $kg/m^3$ | Massebezogene gespeicherte Energie in Wh/kg | Maximale Umfangsgeschwindigkeit in m/s |
|---|---|---|---|---|
| Stahl | 1500 | 7800 | 53 | 620 |
| Aluminium | 600 | 2700 | 62 | 667 |
| Titan | 1200 | 4500 | 74 | 730 |
| GFK | 1600 | 2000 | 222 | 1270 |
| CFK | 2000 | 1500 | 444 | 1790 |

**Tabelle 4.16** Kennwerte von elektromechanischen Schwungradspeichern (unter Einbeziehung von Schutzgehäuse, Lagern, elektrischem Antrieb und Sicherheitseinrichtungen)

| Kennwert | Zahlenwert | Einheit |
|---|---|---|
| Spezifische Leistung | 500–4000 | W/kg |
| Spezifische Energie | 5–55 | Wh/kg |
| Speicherzeitkonstante | 20–200 | s |
| Leistungsdichte | 700–6000 | W/l |
| Energiedichte | 10–60 | Wh/l |
| Wirkungsgrad (Be-/Entladen) | je 90 | % |
| Energieverlust im Leerlauf | 2–10 | %/h |
| Kosten | 10.000–25.000 | €/kWh |
| Lebensdauer | 20 | A |
| Zyklenzahl | 1.000.000 | Zyklen |

von Schwungradspeichern kann besonders dann wirtschaftlich sinnvoll sein, wenn die hohe Lebensdauer von 20 Jahren und die mögliche Zahl von mehr als $10^6$ Lastzyklen ausgenutzt werden kann, Tab. 4.16.

Moderne Schwungradspeicher mit Faserverbundkreisel sind inhärent sicher und stellen auch bei Unfällen keine besondere Gefahr dar, da im Zerstörungsfall der CFK-Rotor in kleine Teile zerfasert [143]. Die Bruchstücke werden vom Schutzgehäuse aufgefangen, so dass keine schweren Teile nach außen dringen können. Die im Zerstörungsfall frei werdende Energie würde lediglich eine geringe Erwärmung des zerstörten Systems um 10 bis 20 K verursachen. Die im Falle eines Unfalls vom Schwungrad ausgehende Gefahr wäre nicht größer als die, die in diesem Fall von brennbaren Flüssigkeiten und Feststoffen ausgehen würde (Treibstofftank).

Interesse an einem System zur Rückgewinnung von kinetischer Energie ist in den Rennfahrzeugen der Formel 1 erneut aufgekommen [156]. Einige der bedeutenden Formel 1-Rennsportteams haben Lösungsmöglichkeiten eines funktionierenden Systems mit einem Schwungradspeicher entwickelt. So hat beispielsweise Williams ein Kinetic Energy Recovery System (KERS) für das Formel 1 Rennfahrzeug in der Saison 2009 eingesetzt. Dieses KERS besitzt ein Schwungrad mit einem Energieinhalt von 400 kJ und einer Leistung von 60 kW. Die ge-

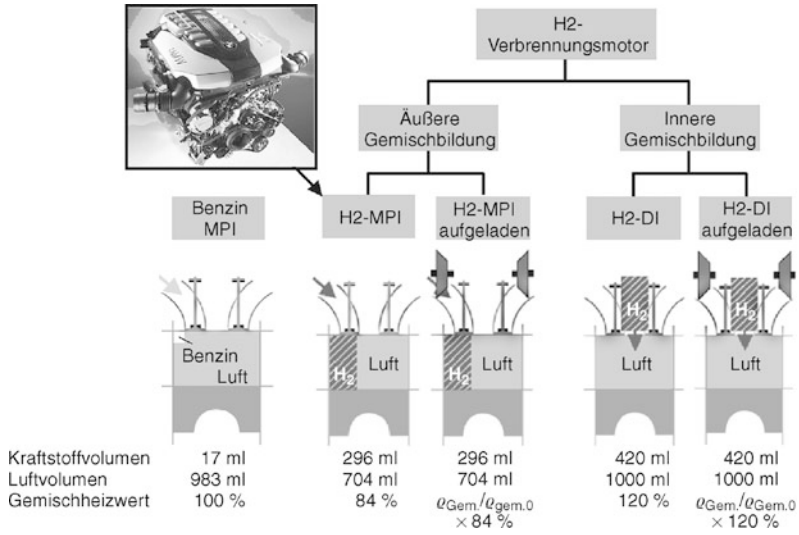



**Abb. 4.135** Gemischheizwerte von unterschiedlichen $H_2$-Motorkonzepten im Vergleich zu einem Benzinmotor (MPI)

speicherte Energie reicht für 6,6 Sekunden zur Beschleunigung des Fahrzeugs.

Ein KERS mit Schwungrad besteht aus den Komponenten Schwungrad, Kupplung und dem Continuous Variable Transmission (CVT). Ein von der Firma Ricardo veröffentlichtes KERS hat ein Schwungrad mit einer Energiedichte von 200 kJ/kg bei einer maximalen Drehzahl von 60.000/min, einem Durchmesser von 280 mm und bei einem Gewicht von ca. 13 kg. Dabei kann ein Energieinhalt von 0,5 kWh gespeichert werden [157, 158].

### 4.3.5 Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor

Die Wasserstoff-Motorenentwicklung konnte in den letzten 30 Jahren, beginnend mit den Arbeiten von Erren [165] und Oehmichen [166] sowie durch die Entwicklungsprogramme von BMW [167] und fortwährende Aktivitäten weiterer Automobilhersteller [168, 169], große Fortschritte verzeichnen. Dabei hat der Ottomotor das größte Potenzial für Automobilanwendungen gezeigt. Hierfür wurden hauptsächlich Otto-4-Takt Motoren mit gasförmigem Kraftstoff [170, 171], aber auch $H_2$ 2-Takt- [172] und Wankel-Motoren [169] entwickelt.

$H_2$-Verbrennungsmotoren können auf den entsprechenden Grundmotoren der Benzinvarianten aufgebaut werden [168, 169, 173, 179, 182–184]. Sie können sowohl mit äußerer als auch mit innerer Gemischbildung realisiert werden (Abb. 4.135). Die spezifische Leistungsdichte lässt sich durch Aufladung sowohl bei äußerer als auch bei innerer Gemischbildung erheblich steigern.

Am Beispiel des BMW 12-Zylindermotors [173, 179], der über ein äußeres $H_2$-Gemischbildungssystem verfügt, zeigen sich typische $H_2$-Entwicklungsumfänge:

- konstruktive Anpassung des Grundmotors,
- Entwicklung $H_2$-Brennverfahren,
- Anpassung der Elektronik und Zündung,
- Entwicklung der $H_2$-Motorsteuerung inklusive Steuergeräteentwicklung und Applikation für $H_2$ spezifische Funktionen.

Der bivalente Betrieb ermöglicht dabei, kundenwertige $H_2$-Fahrzeuge anzubieten, solange noch kein flächendeckendes $H_2$-Tankstellennetz existiert.

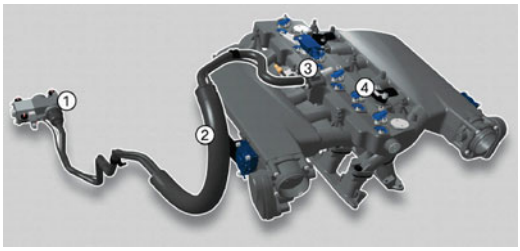



**Abb. 4.136** $H_2$-Versorgung des Motors: 1: Druckregelventil, 2: Vorlaufleitung, 3: $H_2$-Rail, 4: Einblaseventile

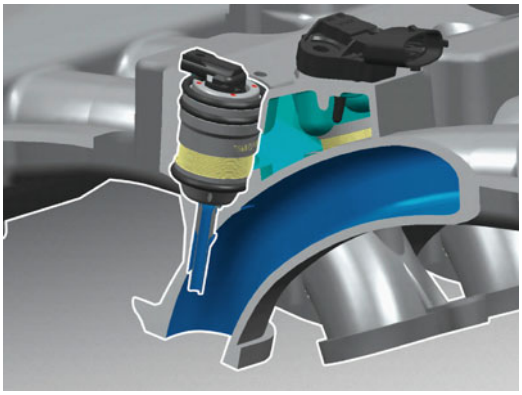


**Abb. 4.137** Einblaseventil

### 4.3.5.1 Konstruktive Merkmale

Brennraumgeometrie und Zündanlage sind für Benzin- und $H_2$-Verbrennung ausgelegt. Der Motor ist als bivalentes Motorkonzept ausgeführt. Er wird im Benzinbetrieb wie die Serienvariante mit Direkteinspritzung und im $H_2$-Betrieb mit äußerer Gemischbildung betrieben.

Zur Beherrschung irregulärer Verbrennungserscheinungen (Klopfen, Selbstentflammung, Rückzündung) ist das Verdichtungsverhältnis angepasst. Für eine ausreichende Wärmeabfuhr im OT-Bereich sind zusätzliche Kühlungsmaßnahmen vorgesehen (Kühlkanalkolben und ein Kurbelgehäuse mit Schlitzen zwischen den Zylinderlaufbuchsen für zusätzlichen Kühlmitteldurchfluss). Ein optimiertes Kolbenringpaket minimiert die Blow-by-Gase. Zur Vermeidung von Rückzündungen in das Kurbelgehäuse ist ein zusätzliches Absperrventil in der Zuleitung der Kurbelgehäuse-Entlüftung verbaut. Für den gasmotorischen Betrieb sind wegen der fehlenden Additive Ventilsitzringe aus verschleißoptimierten Legierungen ausgewählt. Die $H_2$-Versorgung erfolgt über ein elektromagnetisches Druckregelventil, eine teilweise flexible Edelstahl-Vorlaufleitung, dem motornahen $H_2$-Rail, das in die Sauganlage integriert ist und die $H_2$-Einblaseventile, die den Wasserstoff sequentiell der Ansaugluft zuführen (Abb. 4.136, Abb. 4.137).

An die $H_2$-führenden Bauteile sind hohe Dichtigkeitsanforderungen gestellt. Eventuell auftretende Leckagen werden über einen zentralen $H_2$-Gassensor im Motorraum erkannt.

### 4.3.5.2 $H_2$-Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung

Die Gemischbildung von $H_2$ und Luft findet bei äußerer Gemischbildung im Ansaugtrakt statt. Maximale Leistungsdichten werden mit äußerer Gemischbildung im $\lambda = 1$-Betrieb realisiert.

Die Stoffeigenschaften von $H_2$, weite Zündgrenzen, geringe Zündenergien sowie die große Flammgeschwindigkeit für $H_2$-Luft-Gemische erhöhen das Risiko irregulärer Verbrennungen (Rückzündungen, Frühzündungen) und sind maßgeblich dafür verantwortlich, dass der Betrieb mit $\lambda = 1$ eine Herausforderung für die Entwicklung darstellt. Hierbei ist das Hauptaugenmerk auf die thermische Bauteilstabilität sowie auf das spezielle $H_2$-Brennverfahren zu legen.

Die Vermeidung von Abgasemissionen bildet neben der Maximierung der Leistungsdichte eine weitere wichtige Randbedingung. Bei $H_2$-Verbrennungsmotoren sind Stickoxide ($NO_x$) die einzig relevanten Schadstoffemissionen. Aus der Verbrennung von Schmieröl entstehen ferner minimale CO und HC Rohemissionen, die im 3-Wege-Katalysator sowohl im Mager- als auch im $\lambda = 1$ Betrieb auf Werte nahe Null reduziert werden.

Die Bildung von $NO_x$ ist abhängig von der Verbrennungstemperatur [176, 182]. Magere homogene Wasserstoff/Luft-Gemische ($\lambda \gg 1$) verbrennen

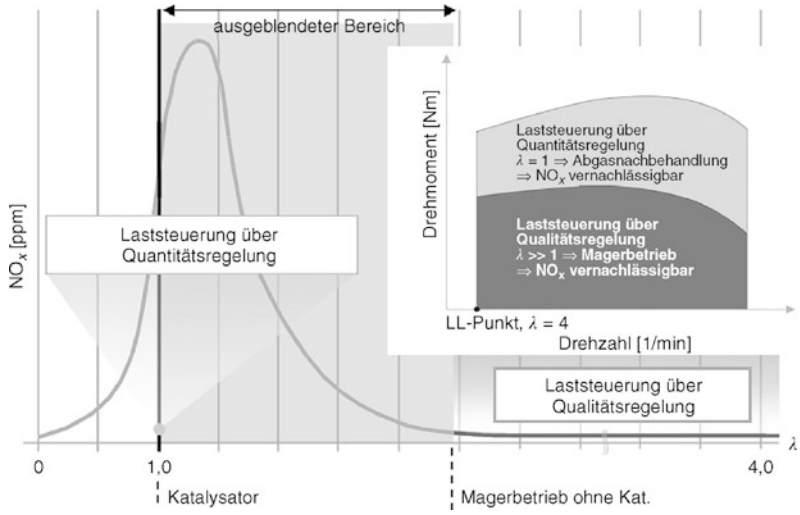



**Abb. 4.138** $NO_x$-Emissionen als Funktion des Luftverhältnisses und Applikationsstrategie für $H_2$-Verbrennungsmotoren

bei niedrigen Temperaturen, sehr guten Wirkungsgraden und minimalen $NO_x$-Emissionen, wobei homogene Wasserstoff/Luft-Gemische auch noch bei $\lambda \approx 4$ stabil verbrennen. Daher kann der Motor in einem weiten Betriebsbereich ungedrosselt qualitätsgeregelt betrieben werden (Abb. 4.138).

Bei Laststeigerung ($\lambda < 2{,}0$) steigen die Rohemissionen deutlich an und erreichen bei $1{,}1 < \lambda < 1{,}2$ ihr Maximum. Auch bei $\lambda = 1$ ergeben sich Rohemissionen auf einem hohen Niveau. Im Gegensatz zum Betrieb mit $\lambda > 1$ können diese aber durch einen herkömmlichen 3-Wege-Katalysator selbst die weltweit strengsten Emissions-Grenzwerte deutlich unterschritten werden [173–175, 180, 182].

Die Betriebsstrategie für einen freisaugenden $H_2$-Motor mit äußerer Gemischbildung wird durch die breiten Zündgrenzen von Wasserstoff sowie die $NO_x$-Bildungsgrenze definiert. Über einen weiten Bereich wird daher der Motor qualitätsgeregelt mit mageren Gemischen betrieben. Vernachlässigbare $NO_x$-Emissionen und sehr gute Wirkungsgrade sind die Folge. Im Bereich von $2{,}0 < \lambda < 2{,}2$ schaltet die Motorsteuerung direkt auf $\lambda = 1$-Betrieb und Quantitätsregelung um, wo maximale Leistungsdichten erzielt werden. Gemische im Bereich $1{,}0 < \lambda < 2{,}0$ werden somit ausgeschlossen. Mit der dargestellten Betriebsstrategie werden äußerst niedrige $NO_x$-Emissionen im gesamten Kennfeldbereich garantiert und die Einhaltung aller weltweit geforderten Emissionsgrenzwerte sichergestellt [181].

Bei äußerer Gemischbildung kann der Gemischheizwert durch Aufladung erheblich gesteigert werden. Bei einer Aufladung von 0,85 bar können indizierte Mitteldrücke größer 18 bar erzielt werden. Das maximal erreichbare Verdichtungsverhältnis liegt bei $\varepsilon \approx 11$ und wird durch Frühzündungen im stöchiometrischen Betrieb an der Volllast begrenzt [174].

#### 4.3.5.3 $H_2$-Brennverfahren mit innerer Gemischbildung

Innere Gemischbildung bietet zusätzlich die Möglichkeit, die Verbrennung über die Einspritzrate und Zündzeitpunktsvariation zu kontrollieren sowie die Motorleistung zu erhöhen. Mit innerer Gemischbildung können indizierte Mitteldrücke von $\approx 15$ bar erreicht werden [174, 175].

Die Schlüsselkomponente bei $H_2$-DI-Motorkonzepten ist der Injektor. Aufgrund der Einblasung in der Kompressionsphase werden hohe $H_2$-Drücke von 50 bis 300 bar benötigt, abhängig vom Einblasezeitpunkt. Der Injektor muss hohe Durch-

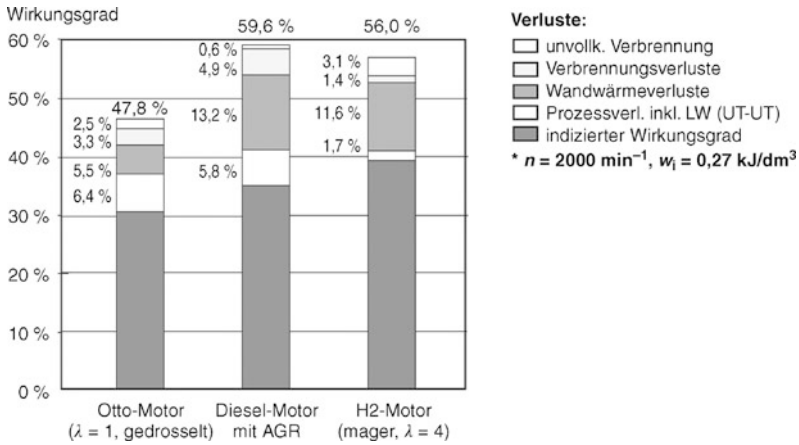



**Abb. 4.139** Vergleich der indizierten Wirkungsgrade eines $H_2$-Ottomotors mit Benzin- und Dieselmotoren aktueller Technologie bei 2000 U/min und Teillast

flussraten und eine präzise Einblasung des $H_2$ gewährleisten und den hohen thermischen Belastungen im Brennraum stand halten.

Aufgrund des effizienteren Gasaustauschs ist der gemessene Zylinderdruck während der Verdichtung bei innerer Gemischbildung erheblich höher als bei freisaugenden Benzin- und $H_2$-Motoren mit äußerer Gemischbildung.

Bei innerer Gemischbildung bietet sich eine ähnliche Betriebsstrategie an wie bei äußerer Gemischbildung. Durch Aufladung kann die spezifische Leistungsdichte beim $H_2$-DI nochmals deutlich gesteigert werden.

#### 4.3.5.4 Wirkungsgradpotenziale

Die motorische Verbrennung beim Betrieb mit Wasserstoff ist in der Teillast durch eine sehr stabile Verbrennung gekennzeichnet. Aufgrund der weiten Zündgrenzen der Wasserstoff/Luft-Gemische sind Verbrennungsverluste von unverbranntem Kraftstoff bei magerem Betrieb sehr gering. Bei Volllast im stöchiometrischen Betrieb ist die Verbrennungsgeschwindigkeit verglichen mit Benzin erheblich höher.

Folglich ist die Verbrennungsdauer deutlich kürzer. Die Annäherung an den Gleichraumprozess durch schnelle Umsetzung des Wasserstoffs führt zu hohen Motorwirkungsgraden im Volllastbetrieb. Andererseits verursachen hohe Verbrennungsraten erhöhte mechanische und thermische Belastungen durch steile Druckanstiege, hohe Verbrennungsenddrücke und hohe Verbrennungstemperaturen.

Der theoretische thermodynamische Wirkungsgrad eines Otto-Motors basiert auf dem Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses $\eta_{th} = 1 - 1/\varepsilon^{\kappa-1}$. Hierbei ist $\varepsilon$ das Verdichtungsverhältnis und $\kappa$ der Isentropenexponent. Höhere Verdichtungsverhältnisse kombiniert mit höheren Werten für $\kappa$ liefern höhere Wirkungsgrade. Mit $\kappa \approx 1{,}4$ für Wasserstoff-Luft-Gemische haben $H_2$-Motoren Vorteile gegenüber Benzin- und Diesel-Motoren, für die $\kappa \approx 1{,}35$ gilt. Der theoretische Wirkungsgrad $\eta_{th}$ steigt als Funktion von $\varepsilon$ (konstantes $\kappa$) für größere Verdichtungsverhältnisse an. Im realen Motorbetrieb wird der Anstieg allerdings durch die Zunahme der Reibleistung zumindest teilweise kompensiert.

In Abb. 4.139 ist ein Vergleich der indizierten Wirkungsgrade eines $H_2$-Ottomotors mit einem Benzin- und Dieselmotor an einem typischen Teillastpunkt (2000 U/min) dargestellt. Der hohe theoretische thermodynamische Wirkungsgrad des $H_2$-Motors folgt aus der mageren Verbrennung. Bei Dieselmotoren ist der wesentliche Faktor das hohe Verdichtungsverhältnis.

Obwohl der theoretische thermodynamische Wirkungsgrad des $H_2$-Motors kleiner ist als der des Dieselmotors haben $H_2$-Motoren einen höheren indizierten Wirkungsgrad. Hauptgründe hierfür sind die höhere Verbrennungsgeschwindigkeit, resultie-

rend in geringeren Verlusten durch Abweichung vom idealen Gleichraumprozess, und erheblich geringere Ladungswechselverluste durch ungedrosselten Betrieb.

Der Vorteil des Dieselmotors durch das höhere Verdichtungsverhältnis wird überkompensiert durch die Vorteile der mageren, ungedrosselten Verbrennung. Verglichen mit einem Benzinmotor ist der indizierte Wirkungsgrad der $H_2$-Ottomotoren ca. 8 Prozentpunkte höher, resultierend in einem 25 % besseren Kraftstoffverbrauch [174, 175, 177].

#### 4.3.5.5 $H_2$-Ottomotor als Fahrzeugantrieb

Erzielbare gravimetrische und volumetrische Leistungs- und Drehmomentdichten von $H_2$-Ottomotoren bewegen sich auf dem Niveau von Benzin- und Dieselmotoren.

Dasselbe gilt bei entsprechenden Stückzahlen für Entwicklungs- und Produktionskosten. Die Wirkungsgradpotentiale bei niedrigen und mittleren Lasten liegen sogar über denen heutiger Dieselmotoren. Die technische Umsetzung basiert auf dem Serienstand heutiger Verbrennungsmotoren. Antriebskonzepte mit $H_2$-Verbrennungsmotor profitieren dadurch automatisch von allen Entwicklungsfortschritten (z. B. Reduzierung der Reibleistung, Energiemanagement, Elektrifizierung Antriebsstrang).

Dynamik, Leistungsentfaltung, Einbaulage und Antriebspackage sowie Schnittstellen im Gesamtfahrzeug bleiben praktisch unverändert. Fahrzeugkomponenten und Dimensionierung (z. B. Getriebe, HAG, Lager, Bremsen) kann daher von Fahrzeugen mit Benzin- und Dieselmotoren übernommen werden.

Alle Vorteile des Wasserstoffs wie $CO_2$-Freiheit, Diversifikation der Energiequellen und Nachhaltigkeit bei Nutzung regenerativer Energiequellen, können mit $H_2$-Verbrennungsmotoren ökonomisch umgesetzt werden. Bei geeigneter Betriebsstrategie werden Abgasemissionen auf nahezu Null reduziert.

Der $H_2$-Ottomotor ist daher geeignet, die Anforderungen an Fahrzeugantriebe in einer Zukunft mit $H_2$ als Kraftstoff zu erfüllen [178–180, 182, 185].

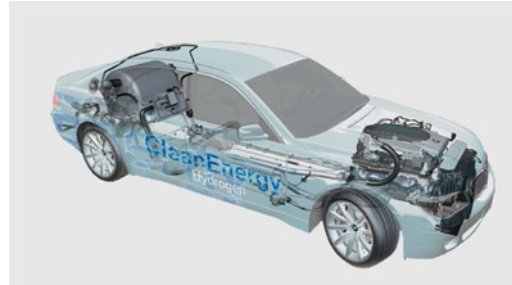



**Abb. 4.140** BMW Hydrogen 7 mit bivalentem V12-Motor

Mit dem BMW Hydrogen 7 (Abb. 4.140) wurde ein kompletter Serienentwicklungsprozess durchlaufen, womit die gleichen hohen Ansprüche, wie bei allen anderen Serienfahrzeugen erfüllt werden. Mit der Kleinserie von 100 Fahrzeugen wurde insgesamt eine Fahrstrecke von 4 Mio. km zurückgelegt und damit weltweit unter allen Bedingungen die Alltagstauglichkeit dieses Konzeptes eindrucksvoll nachgewiesen [179, 181]).

### Literatur

**Literatur und Abbildungen zu Abschnitt 4.1**

1. Mandat, M., Fischer, C., Küster, C.: Studie der Unternehmensberatung Progenium: Wie sich Autokäufer entscheiden – 12 Chancen, Interessenten zu gewinnen und Kunden zu binden. München (2010)
2. Braess, H.H., Seiffert, U. (Hrsg.): Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik. Formen und neue Konzepte. Daimler Konzernarchiv, Wiesbaden (2005)
3. Dr. Teddy Wolff: https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/meister-der-aerodynamik/
4. Shutterstock Inc.: Maserati, 84th International Motor Show in Geneva, Switzerland on March 4, 2014. http://www.shutterstock.com/de/pic-180287186/stock-photo-geneva-mar-maserati-presented-at-the-th-international-motor-show-in-geneva-switzerland-on.html?src=nN48Zf51NfMdl_-lP3Bcfg-1-28 (2015)
5. Audi AG, Presseportal: Bild-Nr: A6140059 (2015)
6. FEV GmbH: Gestaltungsparameter (2015)
7. Ramon Corrado: Mazda CX-3 Concept car Crossover (2012) http://ramoncorrado.blogspot.de/2012/12/mazda-cx-3-concept-car-crossover.html (2015)

8. Luxuo: Mercedes-Benz SLS AMG (2009) http://www.luxuo.it/auto-lusso/mercedes-benz-sls-amg/9601.html (2015)
9. HDnetwork s.r.l©: Volvo Concept Coupe (2012) http://www.hdmotori.it/volvo-concept-coupe-foto-ufficiali/ (2015)
10. Marco Crupi (2015): Tavoletta Grafica http://marcocrupifoto.blogspot.it/2015/03/come-scegliere-la-tavoletta-grafica.html (2015)
11. https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/meister-der-aerodynamik/
12. 3D CAS Oberflächen Fiat 500; http://1080plus.com/8wNy5fmUllU.video
13. O. Demangel: Ferrari 458 Tuning 0.5 (2011) http://www.o-demangel.com (2015)
14. Telepass S.p.A.: Clay Design (2014) http://www.ilovetelepass.it/2014/11/26/clay-modeling-come-si-scolpisce-unautomobile (2015)
15. Italdesign Giugiaro S.p.A.: A polystyrene model under the milling machine (2015); http://www.italdesign.it/en/services/modelling-department/ (2015)
16. The Detroit News (2015): Future of Auto design still in clay modeler's hands http://www.detroitnews.com/story/business/autos/2015/04/06/future-auto-design-still-clay-modelers-hands/25344613/ (2015)
17. Aston Martin: Colour and Trim (2015) https://www.astonmartin.com/en/colour-and-trim (2015)
18. BMW AG: Color an Material Design (2015) http://www.bmw.com/showroom_carribean/en/insights/bmw_design_2012/process/opener.html#row03-1 (2015)
19. Daimler AG: Smart Fortwo (2013) http://www.smart.com (2013)
20. Carscoop & Carscoops: Volkswagen and the Seven Golfs: A Brief History of a 38-Year Old Icon (2012) http://www.carscoops.com/2012/09/volkswagen-and-seven-golfs-brief.html (2015)
21. Daimler Chrysler Konzernarchiv: Entwicklung des Mercedes-Benz-Designs (2005)
22. Gruppo Editoriale L'Espresso Spa (2015): F 015 Luxury in Motion, la guida autonoma è servita http://www.repubblica.it/motori/sezioni/attualita/2015/01/08/news/f_015_luxury_in_motion_la_guida_autonoma_e_servita-104518575/ (2015)

**Literatur zu Abschnitt 4.2**

23. Braess, H.-H.: Das Automobil im Spannungsfeld zwischen Wunsch, Wissenschaft und Wirklichkeit. 2. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, S. 786–799, 1997
24. SAE-Norm J1100
25. GCIE – Global Cars Manufacturers Information Exchange Group: Package Drawing Exchanges
26. Indra, F.: Package: Die Herausforderung für den Motorenentwickler. 19. Internationales Wiener Motorensymposium. Fortschrittsbericht, VDI Reihe 12, Bd. 348. VDI, (1998)
27. van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor. Vieweg, Wiesbaden (2002)
28. 50 Jahre Frontantrieb im Serienautomobilbau. VDI-Bericht 418 (1981)
29. Bandow, F., Stahlecker, H.: Ableitung der Hauptabmessungen eines Fahrzeugs. ATZ **3**(10), (2001)
30. Braess, H.-H.: Zur gegenseitigen Abhängigkeit der Personenwagen-Auslegungsparameter Höhe, Länge und Gewicht. ATZ **81**(9), (1979)
31. Braess, H.-H.: Negative Gewichtsspirale. ATZ **101**(1), (1999)
32. Toyota Prius. ATZ **3** (2004)
33. Lexus LH400. ATZ **09** (2005)
34. Die neue C-Klasse. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **04** (2007)
35. Spiegel, L., Schuermann, M., Rauner, T., Stache, I.: Das Antriebskonzept des neuen Cayenne S Hybrid. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2010, Bd. 1. (2010)
36. Der neue 3er BMW. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ (2005)
37. Der neue Audi A6. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **03** (2004)
38. Die neue S-Klasse. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **10** (2005)
39. Der neue Maybach. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **09** (2002)
40. Der neue Audi A8. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **08** (2002)
41. VW Phaeton. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **07** (2002)
42. Der neue Porsche Boxster. ATZ/MTZ **02** (2005)
43. Der neue Porsche 911. ATZ/MTZ **12** (2004), **01** (2005)
44. Der Porsche Cayenne. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **07** (2003)
45. Jost, K.-E.: Rechts wie links. Christophorus – Das Porsche Magazin **298**(10), (2002)
46. Der neue BMW 7er. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **11** (2001)
47. Der neue CLS von Daimler Benz. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ und MTZ **11** (2004)
48. Der neue Golf Plus. ATZ/MTZ Sonderausgabe zu ATZ/MTZ **02** (2005)
49. Der Porsche Panamera. ATZ **10** (2009)
50. Renner, J.: Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil. Dissertation, TU München (2007)
51. Dietrich, S.: Modularisierung und Funktionsintegration am Beispiel der Automobilkarosserie – Ein Beitrag zur Entwicklung, Bewertung und Lösungsauswahl. Dissertation, TU München (2011)
52. Schmidt, G., Hermann, G.: Plattformbasierte Lösungen für globale Märkte. ATZextra **04**, 28–33 (2011)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.1**

53. Halwart Schrader: Flocken. In: Deutsche Autos 1885–1920. Bd. 1, 1. Aufl., S. 182 (2002)

54. „1888 Flocken Elektrowagen sw“ von Franz Haag – Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY 3.0 über Wikimedia Commons – https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1888_Flocken_Elektrowagen_sw.jpg#/media/File:1888_Flocken_Elektrowagen_sw.jpg
55. Golf City-Stromer
56. General Motors
57. Mercedes-Benz
58. Tesla Motors
59. Mercedes-Benz
60. Mercedes-Benz
61. http://proteanelectric.com
62. von Malottki, S.: Elektrischer Traktionsmotor am Stromzwischenkreis-Wechselrichter. Doktorarbeit, RWTH Aachen (2015)
63. Meyer, M.: Wirkungsgradoptimierte Regelung hoch ausgenutzter Permanentmagnet-Synchronmaschinen im Antriebsstrang von Automobilen. Doktorarbeit, Uni Paderborn (2010)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.2**

64. Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H.A.: Handbook of Fuel Cells. Bd. III, S. 647. Wiley (2003)
65. Carlson, E.J., et al.: Cost analysis of fuel cell systems for transportation. Report to Department of Energy, Ref. No. 49739, SFAA No. DESCO2-98EE50026 (2001)
66. Banken, J., Daimler AG: Die Elektrifizierung des Automobils – technische und ökonomische Herausforderungen. 7. VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 10. November 2010
67. Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H.A.: Handbook of Fuel Cells, Bd. IV, S. 727. Wiley (2003)
68. Wind, J., Fröschle, P., Höhlein, B., Piffaretti, M., Gabba, G., Daimler AG: WTW analyses and mobility scenarios with OPTIRESOURCE. World Hydrogen Energy Conference, Essen, Mai 2010
69. Dehn, S., Dülk, C., Srinivas, S., Cornelio, A.A., Daimler AG: Investigation on the performance of a mechanistic electric turbocharger model for a vehicular fuel cell system. JSAE/SAE Powertrain, Fuels and Lubricants Meeting 2011, Kyoto, Japan, 29. August–03. September 2011
70. Dehn, S., Wöhr, M., Daimler AG, Heinzel, A.: Development of a near-dead-ended fuel cell stack operation in a vehicular drive system. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2011, Chicago, USA, 5.–9. September 2011
71. Dehn, S., Daimler AG: Betriebsweise eines Brennstoffzellensystems mit offener Anode und Abgaskatalysator in einem automobilen Antriebssystem. Fortschritt-Berichte, VDI, Reihe 12, Bd. 754. VDI Verlag, Düsseldorf (2012)
72. Sommer, M., Wöhr, M., Docter, A., Daimler AG: Concepts for future PEM fuel cell systems. Fuel Cell Seminar, San Antonio, 17. Oktober 2007
73. Friedrich, J., Günther, B., Liphardt, S., Nitsche, C., Peters, D., Reiff, S., Schamm, R., Skroza, R., Walz, H., Daimler AG: 150.000 km and 3000 Operating hours with a Daimler F-CELL vehicle, Status Report. EVS24, Stavanger, Norway, 13.–16. Mai 2009
74. Herb, F., Jossen, A., Reiff, S., Wöhr, M., Daimler AG: Investigation of Li-battery and fuel cell aging in a fuel cell hybrid car model. Eleventh Grove Fuel Cell Symposium, London, 23. September 2009
75. Fröschle, P., Daimler AG: Fuel cell power trains. World Hydrogen Energy Conference, Essen, Mai 2010, S. 318–332. Expert Verlag (2010)
76. Maus, S., Hapke, J., Na Ranong, C., Wüchner, E., Friedlmeier, G., Wenger, D., Daimler AG: Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks. Int. J. Hydrog. Energy **33**, 4612–4621 (2008). www.Elsevier.com
77. Mohrdieck, C., Daimler AG: Fuel cell vehicles one step on the path to commercialization. 6th International Hydrogen & Fuel Cell Expo Technical Conference, Tokyo, 5. März 2010
78. Kojima, K., Morita, T.: Fuel cell system engineering div. Development of fuel cell hybrid vehicle in TOYOTA. EVS25, Shenzhen, China, 5.–9. November 2010
79. Kizaki, M.: Development of new fuel cell system for mass production. EVS26, Los Angeles, California, 6.–9. Mai 2012
80. Brachmann, T.: The Honda FCX clarity – A viable fuel cell electric vehicle for today and beyond 2015? World Hydrogen and Energy Conference, Essen, Mai 2010
81. Lim, T.W.: Development of fuel cell electric vehicle in Hyundai – Kia Motors. 6th International Hydrogen & Fuel Cell Expo Technical Conference, Tokyo, 5. März 2010
82. Iiyama, A., Arai, T., Ikezoe, K.: Latest FCV development in Nissan – Challenges for durability and cost. EVS25, Shenzhen, China, 5.–9. November 2010
83. Bork, M.: Fuel cell electric vehicle development at GM – Progress and challenges. 6th International Hydrogen & Fuel Cell Expo Technical Conference, Tokyo, 5. März 2010
84. Flanz, S.: Five years of experience with Ford fuel cell vehicle fleet operations. World Hydrogen and Energy Conference, Essen, Mai 2010
85. Steiger, W., Seyfried, F., Huslage, J., Volkswagen AG: Zweite Generation PEM-Brennstoffzellen: Erste Erfahrungen. MTZ **12**, (2007). www.all4engineers.de, www.atzonline.de
86. Mohrdieck, C., Daimler AG: Next generation fuel cell technology for passenger cars and buses. EVS24, Stavanger, Norway, 13.–16. Mai 2009
87. Babovsky, C., Daimler AG: Defintion einer neuen Zuverlässigkeitsgröße zur realitätsnahen Darstellung des Ausfallverhaltens kleiner Grundgesamtheiten am Bespiel von Brennstoffzellen-Systemen. 24. Fachtagung „Technische Zuverlässigkeit 2009“, VDI Wissensforum, Leonberg, 29./30. April 2009
88. The role of battery electric vehicles, plug-in hybrids and fuel cell electric vehicles. http://www.zeroemissionvehicles.eu (2010)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Abbildungen**

89. Brachmann, T., Honda R&D Europe (Deutschland): „Hondas heutige und zukünftige Hybrid- und

Brennstoffzellenfahrzeuge“, 6. Braunschweiger Symposium vom 18. Februar 2009
90. Böhle, J., Stiebels, B.: Der neue Touareg Hybrid. Volkswagen AG. ATZextra 03/2010.
91. https://www.youtube.com/watch?v=tKfabuubtsg
92. http://www.green-motors.de/auto/citroen-ds5-hybrid4
93. https://www.press.bmwgroup.com/austria/photoDetail.html?titl$e=bmw-i3-mit-range-extender-07-$2013&docNo=P90129295
94. Toyota Motor Corporation, Public Affairs Division. Toyota Hybrid System THS II. http://www.evworld.com/library/toyotahs2.pdf
95. http://www.toyota-media.de/Article/view/2015/11/18/Der-neue-Toyota-Prius-So-effizient-wie-nie/13425?c=toyota&tab=images
96. Toyota Motor Corporation
97. http://www.shadetreemechanic.com/images/allison%20ep50%20hybrid%20top.jpg
98. http://www.kfztech.de/kfztechnik/alternativ/a3-e-tron.htm
99. http://gm-volt.com/2011/05/19/gm-breaks-ground-on-historic-electric-motor-production-plant/
100. http://gm-volt.com/2010/10/12/chevrolet-volt-electric-drive-propulsion-system-unveiled/
101. http://biser3a.com/formula-1/explained-formula-1s-energy-recovery-system-ers/
102. http://www.ausmotive.com/2010/02/12/official-porsche-gt3-r-hybrid.html, 12.11.2015
103. http://www.wired.com/2010/03/porsche-racing-hybrids/
104. https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photoDetail.html?titl$e=bmw-i8-technical-art-08-$2013&docNo=P90130608
105. https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photoDetail.html?titl$e=bmw-i8-mit-exklusivem-vollausstattungspaket-pure-impulse-04-$2014&docNo=P90147846
106. http://i.auto-bild.de/ir_img/8/2/8/7/3/8/Fisker-Karma-729x486-5b321c993e11a4d1.jpg

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Szenario**

107. http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/hv-record/

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Elektrifizierungsklassen (Mild- Full- …)**

108. Timmann, M., Renz, M. (Daimler AG, Stuttgart): 48V at Mercedes-Benz – Options for further applications. 14. Internationales Stuttgarter Symposium (2014)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Konzepte (Parallel – Seriell – Misch)**

109. Iijima, T. (Honda R&D Co. Ltd): „Development of Hybrid System for 2006 Compact Sedan“. SAE Nr. 2006-01-1503
110. Keller, U., Enderle, C., Gödecke, T., Henning, G. (Daimler AG, Stuttgart): Diesel-Hybrid – Die nächste Generation Hybridantriebe von Mercedes-Benz. 33. Internationales Wiener Motorensymposium, 26.–27. April 2012
111. Hofmann, P.: Hybridfahrzeuge – Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien. Springer, Wien (2014)
112. De Backer, J. (Toyota Motor Europe), Yaguchi, H. (Toyota Motor Corporation): „The New Toyota Prius Hybrid System“. 7. Braunschweiger Symposium vom 25. Februar 2010
113. Duhme, M., Saenger Zetina, S., Neiß, K. (Daimler AG): Der Mercedes-Benz ML 450 HYBRID und das Potenzial des elektrischen CVT-Getriebes. 18. Aachener Kolloquium vom 05. Oktober 2009
114. van Berkel, K. (Eindhoven University of Technology, Netherlands): Design of a Low-cost Hybrid Powertrain with Large Fuel Savings. EVS25 Nov 5-9 2010, Shenzhen, China (2010)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Betriebsstrategien**

115. Christ, T., Fuchs, E., Lins, F., Bohne, W. (BMW Group): „Regelstrategien für Hybridantriebe am Beispiel des BMW X6 Active Hybrid“. ATZ elektronik 2010-02, 08–15 (2010)
116. Fleckner, M., Göhring, M. Spiegel, L. (Porsche AG, Weissach): „Neue Strategien zur verbrauchsoptimalen Auslegung der Betriebsführung von Hybridfahrzeugen“. 18. Aachener Kolloquium vom 06. Oktober 2009
117. Hartmann, B. (RWTH Aachen), Renner, C. (Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen): „Autark, Plug-In oder Range Extender? Ein simulationsgestützter Vergleich aktueller Hybridfahrzeugkonzepte“. 18. Aachener Kolloquium vom 06. Oktober 2009
118. Mertins, F.: Energetische Bewertung von Betriebsstrategien im Hybrid-Antriebsstrang. In: Isermann, R. (Hrsg.): Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe. Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe, S.315–328. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Plug-In**

119. Keller, U., Schmiedler, S., Strenkert, J., Ruzicka, N., Nietfeld, F. (Daimler AG, Stuttgart): PLUG-IN Hybrid from Mercedes-Benz – The next generation PLUG-IN Hybrid with 4-cylinder gasoline engine. 15. Internationales Stuttgarter Symposium (2015)
120. Kamichi, K., Yamamoto, M., Fushiki, S., Yoda, T. Kurachi, S., Kojima, K. (Toyota Motor Corporation): Development of Plug-In Hybrid System for Midsize Car. SAE 2012-01-1014 (2012)
121. Furukawa, T., Ibaraki, R., Kimura, H., Kondo, K., Watanabe, M., Mizutani, T., Hattori, H., Takasaki, A. (Toyota Motor Corporation): Development of New Hybrid Transaxle for Sub-Compact-Class Vehicles. SAE 2012-01-0623 (2012)
122. Keller, U., Back, M., Nietfeld, F., Mürwald, M., Docter, A.: Plug-In Hybrid von Mercedes-Benz – Der Antriebsstrang des S 500 Plug-In Hybrid. Wiener Motorensymposium (2014)

123. Carlson, R.B. (Idaho National Laboratory): Primary Factors that Impact the Fuel Consumption of Plug-In Hybrid Electric Vehicles

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Sportwagen**

124. Sontheim, J. (Compact Dynamics GmbH): „Kinetischer Speicher für Hybridfahrzeuge – Die mechanische Batterie". ATZ Ausgabe 2008-03, 226–231 (2008)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Komponenten**

125. Lohmann, N., Fischnaller, M., Melbert, J., Musch, T. (Ruhr-Universität Bochum), Lamp, P., Scharner, S., Liebau, V. (BMW Group): Cycle Life Investigations on Different Li-Ion Cell Chemistries for PHEV Applications Based on Real Life Conditions. SAE 2012-01-0656 (2012)
126. Lamp, P., Hockgeiger, E., Reischl, S., Scharner, S. (BMW Group): „Electric Vehicle Batteries – Requirements and Status". 7. Braunschweiger Symposium vom 24. Februar 2010
127. Caselitz, P. (Fraunhofer IWES): „Modellierung und Simulation von Lithium-Ionen-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge". 7. Braunschweiger Symposium vom 24. Februar 2010
128. Auer, J. (Maxwell Technologies GmbH, Deutschland): ULTRACAPACITOR – Where and When ever Power needed. EVS25 Nov 5–9 2010, Shenzhen, China

**Literatur zu Abschnitt 4.3.3: Fahrzeugintegration**

129. Deiss, H. (ZF Friedrichshafen AG): Elektrifizierung im Antrieb-Chancen und Herausforderungen durch Systemintegration. Universität Stuttgart, 21. Mai 2012
130. Morche, D., Schmitt, F., Genuit, K., Elsen, O., Kampker, A., Friedrich, B.: Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität. In: Achim Kampker, Dirk Vallée, Armin Schnettler (Hrsg.): Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Springer, Berlin, Heidelberg (2013)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.4**

131. Meijer, R.J.: Der Philips-Stirlingmotor. In: MTZ 29, S. 284–289. Springer, München (1970)
132. Meijer, R.J.: Prospects of the Stirling Engine for Vehicular Propulsion. In: Philips Technical Review, 20. Aufl., S. 245–276 (1970)
133. Förster, H.J., Pattas, K.: Fahrzeugantriebe der Zukunft, Teil 1 und 2. Sonderdruck aus der Automobilindustrie. Vogel Buchverlag, Würzburg (1972)
134. Künzel, M.: Stirlingmotor der Zukunft. VDI-Verlag, Düsseldorf (1986)
135. Werdich, M., Kübler, K.: Stirling-Maschinen – Grundlagen, Technik, Anwendung. Ökobuch Verlag, Freiburg (2001)
136. Gelse, W.: Erfahrungen mit Stirlingmotoren bei DB im mobilen Einsatz. Vortrag, DB-Technologie-Workshop Stirlingmotor, Stuttgart (1994)
137. Walker, G.: Stirling powered regenerative retarding propulsion system for automotive application. Proc. 5th Int. Autoshow, Prop. Systems Symposium, Detroit, April 1980
138. Peters, H.: Stirlingmotor – Stand der Technik und Anwendungsmöglichkeiten. Staatsexamensarbeit, Universität Bonn (1996)
139. Feulner, P.: Five and six-cylinder Stirling engines – a first essay. European Stirling Forum 2002, Fachhochschule Osnabrück, September 2002
140. Schleder, F.: Stirlingmotoren. Vogel Buchverlag, Würzburg (2002)
141. Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 27. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
142. v. Fersen, O.: Saab Dampfmotor. Saab Scania, Schweden (Dezember 1975)
143. v. d. Burg, P.: Moderne Schwungmassenspeicher – eine alte Technologie in neuem Aufschwung. VDI – GET Fachtagung, Gelsenkirchen, 1998
144. Mayr, B., Buschmann, G., Hoetger, M., Clemens, H.: Zero Emission Engine (ZEE) – Der isotherme Dampfmotor als Fahrzeugantrieb. VDI Berichte, Bd. 1565. VDI Verlag, Düsseldorf (2000)
145. Förster, H.J.: Stufenlose Fahrzeuggetriebe in mechanischer, hydrostatischer, hydrodynamischer, elektrischer Bauart und in Leistungsverzweigung. Verlag TÜV Rheinland, Köln (1996)
146. Seiffert, U., Walzer, P.: Automobiltechnik der Zukunft. VDI-Verlag, Düsseldorf (1989)
147. Walzer, P.: Die Fahrzeug-Gasturbine. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)
148. Biermann, J. W.: Untersuchungen zum Einsatz von Schwungradspeichern als Antriebselemente für Kraftfahrzeuge. Dissertation, RWTH Aachen (1981)
149. Widmer, J., Asper, H.K.: Woven ribbon composite flywheel with self-centering hub. Proceedings of the 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference IECEC, Bd. 2, S. 538–543. SAE, Warendale, USA (1985)
150. Sprengel, U., et al.: Positionspapier zur Energieversorgung in der Raumfahrt. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLVR), Stuttgart (1986)
151. Reiner, G., Reiner, K.: Energetisches Betriebsverhalten eines permanenterregen Drehmassenspeichers in Theorie und. VDI-Tagung Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte, Leipzig, 1994. VDI-Berichte, Bd. 1168 (1994)
152. Tholen, F.J.M.: Development of an advanced high speed flywheel energy storage system. Thesis, Eindhoven University of Technology Holland (1993)
153. v. Druten, R.M., et al.: Design Optimization of a Compact Flywheel System for Passenger Cars. In: Hybridantriebe. VDI-Bericht, Bd. 1459, S. 331–343. VDI-Verlag, Düsseldorf (1999)
154. Khammas, A.: Buch der Synergie. Damaskus (2007)
155. Reiner, G., Weck, W.: Operation experience with magnetodynamic flywheel storage systems in public transport buses. EESAT 2000, Orlando, Florida, September 2000

156. Kawamura, T., Atarashi, H., Takehiro, M.: Development of F1 KERS motor. Automobile R&D Center, Honda R&D Co. Ltd., Japan (2010)
157. Feulner, P., Atkins, A.: Reducing $CO_2$. The Ricardo mechanical hybrid drive. Ricardo Deutschland Aachen Kolloquium, 05. Oktober 2010
158. Feulner, P., Atkins, A.: Der mechanische Hybridantrieb von Ricardo. MTZ, Springer Fachmedien, Wiesbaden (2011)
159. Buschmann, H., Koeßler, P.: Handbuch für den Kraftfahrzeugingenieur. Gasturbinen, S. 485–510. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1991)
160. Kolk, M.: Ein Schwungrad-Energiespeicher mit permanentmagnetischer Lagerung. Bericht des Forschungszentrums. Forschungszentrum Jülich, Jülich (1997)
161. Steimle, F.: Stirling-Maschinen-Technik: Grundlagen, Konzepte und Chancen. C. F. Müller, Heidelberg (1996)
162. Ter-Gazarian, A.: Energy Storage for Power Systems. Peter Peregrinus (1994)
163. van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
164. Walker, G., et al.: The Stirling Alternative, Power Systems, Refrigerants and Heat Pumps. Gordon and Breach Science Publishers (1994)

**Literatur zu Abschnitt 4.3.5**

165. Westerkamp, L.: The Erren-Hydrogen Engine. ATZ **19**, 523 (1939)
166. Oehmichen, M.: Hydrogen as Engine Fuel. Deutsche Kraftfahrtforschung, Bd. 68. VDI-Verlag, Berlin (1942)
167. Pehr, K., Burckhardt, S., Koppi, J., Korn, T., Patsch, P.: With Hydrogen into the future – The BMW 750 hL. ATZ **2** (2002)
168. http://www.ford.com/en/innovation/engineFuelTechnology/hydrogenInternalCombustion.htm
169. Mazda Motor Corp: Company Website, History of Rotary since 1967. http://www.mazda.com/history/rotary/index.html. Zugegriffen: 24. November 2003
170. Schüers, A., Abel, A., Artmann, R., Fickel, Chr., Preis, M.: The 12-Cylinder Hydrogen Engine in the BMW 750hL. MTZ **55**(9), 476–487 (1994)
171. MAN Nutzfahrzeuge AG: MAN – Hydrogen Powertrain for City Busses. Technical Information. MAN Nutzfahrzeuge AG, Nürnberg (1996)
172. Furuhama, S., Kobayashi, Y.: Hydrogen cars with LH2-tank, LH2-pump and cold GH2-injection two-stroke engine. SAE Paper 820349
173. Kiesgen, G., Berger, E., Gruber, M., Staar, B.: Die Weiterentwicklung des Wasserstoffantriebs im BMW 7er. Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 11./12. November 2004
174. Berckmüller, M., Rottengruber, H., Eder, A., Brehm, N., Elsässer, G., Müller-Alander, G., Schwarz, C.: Potentials of a charged SI-hydrogen engine. SAE Paper 2003-01-3210
175. Rottengruber, H., Berckmüller, M., Elsässer, G., Brehm, N., Schwarz, C.: A high efficient combustion concept for direct injection hydrogen internal combustion engines. 15th World Hydrogen Conference, Yokohama (Japan), 27. Juni–2. Juli 2004
176. Rottengruber, H.: Nitrogen oxide formation in the hydrogen diesel engine. TU München (1999)
177. Witt, A.: Analysis of thermodynamical losses of a SI-engine under conditions of variable camphasing. Technische Universität, Graz (1999)
178. Göschel, B.: The hydrogen combustion engine as the drive system for the BMW of the future. 24th International Engine Symposium, Vienna, 16. Mai 2003
179. Enke, W., Gruber, M., Hecht, L., Staar, B.: Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7. MTZ **68**(6), 446–453 (2007)
180. Kiesgen, G., Schwarz, C., Rottengruber, H., Berger, E.: Zukünftige Wasserstoffantriebe für leistungsstarke und effiziente Fahrzeuggenerationen. 14th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, Deutschland, Oktober 2005
181. Wallner, T., Lohse-Busch, H., Gurski, S., Duoba, M., Thiel, W., Martin, D., Korn, T.: Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 mono-fuel demonstration vehicles. Int. J. Hydrog. Energy **33**(24), 7607–7618 (2008)
182. Eichlseder, H., Klell, M.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2008)
183. Gerbig, F., Heller, K., Eichlseder, H., Grabner, G.: Innovative Brennverfahrenskonzepte für Wasserstoffmotoren. 11. Tagung – Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors, Graz, September 2007
184. Eichlseder, H., Spuller, C., Heindl, R., Gerbig, F., Heller, K.: Konzepte für die dieselähnliche Wasserstoffverbrennung. MTZ **01**, 60–66 (2010)
185. Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L.: Hydrogen as a Future Energy Carrier. WILEY-VCH, Weinheim (2008)

# Antriebe

*Prof. Dr.-Ing. Roland Baar, Dr.-Ing. Henning Baumgarten, Dipl.-Ing. Markus Beck, Marius Böhmer, M.Sc., Dr. Dennis Bönnen, Dipl.-Ing. Richard Dorenkamp, Dr. Thorsten Düsterdiek, Georg Eichner, Dr. Jürgen Greiner, Dr.-Ing. Gerhard Gumpoltsberger, Dr.-Ing. Jan Hentschel, Michael Hinz, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Emmanuel Jean, Hugo Kroiss, Gerhard Kurz, Roman Lahmeyer, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Heribert Lanzer, Dr.-Ing. Martin Nijs, Ing. Hermann Pecnik, Dipl.-Ing. MSc Bert Pingen, Prof. Dr. Dr. E.h. Franz Pischinger, Dr. Christoph Sasse, Dr. Klaus-Peter Schindler, Dr. Torsten Schütte, Mike Souren, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing. Klaus Spindler, Dipl.-Ing. Klaus Steinel, Dr.-Ing. Matthias Thewes und Michael Zeiser*

5.1 **Grundlagen der Motorentechnik – 254**

5.2 **Dieselmotor – 344**

5.3 **Aufladung – 401**

5.4 **Triebstrang – 417**

5.5 **Allradantriebe, Brems- und Antriebsregelungen – 465**

5.6 **Abgasanlagen – 495**

5.7 **Bordenergie-Management – 503**

5.8 **Chancen und Risiken des Zweitaktmotors – 517**

5.9 **Konventionelle und alternative Kraftstoffe und Energieträger – 524**

5.10 **Kraftstoffsystem – 540**

5.11 **Kraftstoffversorgungsanlagen für alternative Energieträger – 557**

**Literatur – 564**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_5

In den über 100 Jahren des Gebrauchs von Kraftfahrzeugen hat sich der Hubkolben-Verbrennungsmotor mit einem Drehzahl-/Drehmomentwandler und einer Anfahr-/Schaltkupplung als bevorzugtes Antriebskonzept durchgesetzt und behauptet. Der Antrieb hat eine Reihe von Aufgaben zu erfüllen, von denen die wichtigsten nachfolgend aufgelistet sind:

- Das Fahrzeug muss aus dem Stillstand anfahren und bis zur Höchstgeschwindigkeit jede beliebige Geschwindigkeit darstellen können.
- Antriebsdrehmoment und -drehzahl müssen schnell regelbar sein, um dynamische Fahrvorgänge zu ermöglichen.
- Der Energieträger muss auf kleinem Raum bei geringem Gewicht einen hohen Energieinhalt aufweisen. Ohne große Nutzlast- und Raumverluste soll eine möglichst hohe Reichweite ohne Unterbrechung oder Wiederbetankung möglich sein.
- Die Masse und das Bauvolumen sind möglichst klein zu halten.
- Das gesamte System muss Erschütterungen und Bewegungen standhalten können.
- Der Antrieb soll kurzfristig (auch bei niedrigen und hohen Temperaturen) betriebsbereit sein.

Neben diesen grundlegenden technischen Anforderungen sind auch ökonomische Ziele bei der Herstellung und beim Betrieb des Fahrzeugs zu erfüllen, zunehmend ökologische Bedingungen einzuhalten sowie ein stetig wachsender Anspruch auf Bedienungskomfort zu befriedigen.

Trotz des bisher geringen Marktanteils alternativer Antriebe wird seitens der Automobilindustrie ein hoher Entwicklungsaufwand betrieben. Die Kombination eines Verbrennungsmotors mit einem weiteren Energiespeicher und -wandler (Hybridisierung) bietet Potential bei der Reduzierung von Verbrauch und Abgasemissionen. Verschiedene Konzepte sind dazu bei verschiedenen Herstellern bereits in Serie. Es ist zu erwarten, dass die Verbreitung von elektrifizierten Antriebssträngen weiter zunimmt.

Die vorherrschende Bauform von Kraftfahrzeugmotoren ist der Hubkolben-Verbrennungsmotor, welcher nach dem Prinzip des Ottomotors oder des Dieselmotors arbeitet. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind die Art der Zündung (Fremdzündung beim Ottomotor und Selbstzündung beim Dieselmotor) sowie die Regelung der Last (Quantitäts- bzw. Drosselregelung beim Ottomotor und Qualitätsregelung beim Dieselmotor). Während beim Ottomotor das Verdichtungsverhältnis durch die Klopffestigkeit des Kraftstoffs begrenzt wird (Saugmotoren ca. $\varepsilon = 10$ bis 14, Turbomotoren ca. $\varepsilon = 8$ bis 12), sind beim Dieselmotor höhere Verdichtungsverhältnisse (ca. $\varepsilon = 14$ bis 19) zur Darstellung der Selbstzündung erforderlich und tragen auf diese Weise auch zum höheren thermischen Wirkungsgrad bei.

## 5.1 Grundlagen der Motorentechnik

### 5.1.1 Prozess des Verbrennungsmotors

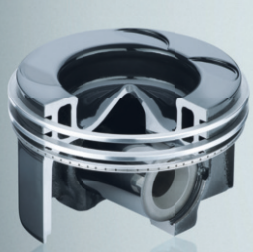
Im Motor wird die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie in einem Arbeitsprozess mit Verbrennung in Wärme und mechanische Arbeit an der Kurbelwelle umgesetzt. Die Theorien für den Arbeitsprozess sind in der Lehre der Thermodynamik beschrieben [1–4]. Ein Charakteristikum ist die „innere Verbrennung", d. h. der Verbrennungsvorgang findet innerhalb des von Kolben, Zylinder und Zylinderkopf gebildeten Arbeitsraumes statt. Soll fortwährend eine Arbeit erbracht werden, so muss dieser Prozess zyklisch wiederholt werden. Hierzu muss das Arbeitsmedium in seinen Ausgangszustand zurückgeführt werden. Das kann wegen der vorangegangenen Verbrennung im geschlossenen Raum nur durch Austausch der Verbrennungsgase mit frisch zugeführtem Kraftstoff und Luft erfolgen, was als Ladungswechselvorgang bezeichnet wird. Eine übliche Darstellungsweise des Prozessverlaufes ist das $p$-$V$-Diagramm, auch Indikatordiagramm genannt, in dem der Verlauf des Druckes im Zylinder in Abhängigkeit vom Zylindervolumen gezeigt ist (◘ Abb. 5.1).

#### 5.1.1.1 Viertakt-Verfahren

Beim Viertakt-Verfahren (◘ Abb. 5.1) saugt der Kolben auf dem Weg vom oberen (OT) zum unteren (UT) Totpunkt bei geöffnetem Einlassventil Luft oder Luft-Kraftstoff-Gemisch an (1. Takt). Nach Schließen des Einlassventils wird der Zylinderinhalt




**UNSER HERZ SCHLÄGT FÜR IHREN ANTRIEB.**







www.rheinmetall-automotive.com
A Rheinmetall Company

KOLBENSCHMIDT PIERBURG MOTORSERVICE RHEINMETALL AUTOMOTIVE

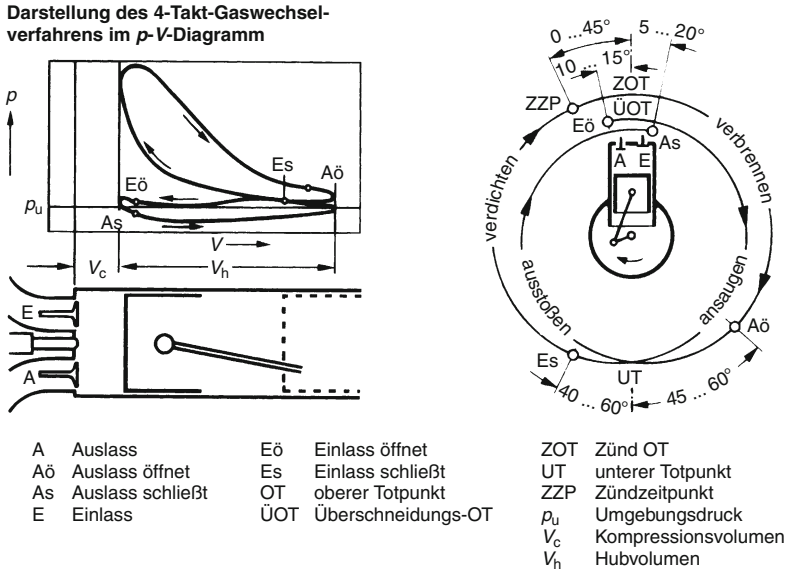



**Abb. 5.1** 4-Takt-Arbeitsverfahren des Ottomotors

bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens vom UT zum OT verdichtet (2. Takt). Druck und Temperatur steigen dabei entsprechend den physikalischen Eigenschaften des im Zylinder befindlichen Gemisches (Luft, Kraftstoff/Kraftstoffdampf, Restgas) an. Um den OT erfolgt die Zündung mit anschließender Verbrennung und Expansion des Verbrennungsgases bis zum UT (3. Takt). Das Auslassventil wird geöffnet und die verbrannten Gase werden auf dem Kolbenweg nach OT ausgeschoben (4. Takt). Danach wiederholt sich der 4-Takt-Prozess.

Die im Kreisprozess an den Kolben abgegebene Arbeit $W_{KA}$ wird nach der Beziehung

$$W_{KA} = -\int p(\alpha) \cdot dV$$

ermittelt. Im $p$-$V$-Diagramm stellt sich die Arbeit $W_{KA}$ als die im Uhrzeigersinn umfahrene Fläche dar. Die bei Saugmotoren üblicherweise im Gegenuhrzeigersinn umfahrene Fläche (Ladungswechselschleife) ist physikalisch als die vom Triebwerk für den Ladungswechselvorgang aufzubringende Arbeit zu interpretieren.

### 5.1.1.2 Zweitakt-Verfahren

Beim Zweitakt-Verfahren erfolgt der Ladungswechsel am Ende des Expansionstaktes (Auspuffvorgang) und in der ersten Phase des Kompressionstaktes (Spülvorgang). Hierzu ist ein positives Spüldruckgefälle erforderlich, was den Einsatz entsprechender Spülgebläse notwendig macht. Für kleinere, vorwiegend in Zweirädern eingesetzte Zweitaktmotoren wird hierzu der von der Kolbenunterseite und dem Kurbelgehäuse gebildete Raum als Gemischpumpe genutzt. Bei der sogenannten Umkehrspülung wird die Aufgabe der Gaswechselventile von Schlitzen im unteren Teil des Zylinders übernommen. Bei der Längsspülung dagegen erfolgt der Austausch der Zylinderladung einerseits über Einlassschlitze im unteren Teil des Zylinders und andererseits über Auslassventile im Zylinderkopf. Diese Bauform findet sich insbesondere im Großmotorenbau für Schiffsantriebe.

Zur Erzielung einer ausreichenden Ausspülung der Restgase aus dem Zylinder ist ein Spülverlust hinzunehmen. Bei Gemischspülung kommt es auf diese Weise zu beträchtlichen Kohlenwasser-

stoffemissionen, die einen der wesentlichen Nachteile gegenüber dem Viertaktmotor darstellen. Die Vorteile des Zweitaktmotors liegen dagegen in seinem einfachen und kompakten Aufbau.

Im Bereich der Kraftfahrzeugantriebe wird das Zweitaktprinzip heute nur noch vereinzelt im Zweiradsektor angewendet. Mit steigenden Anforderungen an die Abgasemissionen ist von einer weiteren Verdrängung durch Viertaktmotoren auszugehen.



## 5.1.2 Definitionen und Kenngrößen

### 5.1.2.1 Leistungskenngrößen

Die Leistung eines Motors wird inkl. aller für den Betrieb des Motors erforderlicher Hilfseinrichtungen unter den in der Norm DIN ISO 1585 festgelegten Bedingungen ermittelt und auf einen „Normzustand“ $T_u = 298\,K$, $p_u = 990\,mbar$ (bezogen auf trockene Luft) zurückgerechnet. Der Bezug auf einen festgelegten Zustand der Umgebung ist wichtig, da sich die Motorleistung bei unterschiedlichen Luftzuständen ändert. Sie nimmt mit „dünnerer“ Luft ab. Je 100 m Höhenzunahme beträgt die Reduzierung der Motorleistung ca. 1 %. Auch feuchtere Luft verringert die Motorleistung.

Die an die Kurbelwelle abgegebene Nennleistung $P_e$, in der Norm auch Nettoleistung genannt, berechnet sich nach der Beziehung

$$P_e = M \cdot \omega = 2\pi \cdot M \cdot n$$

wobei $n$ die Motordrehzahl und $M$ das Drehmoment ist. Wenn das Drehmoment in der Einheit Nm und die Drehzahl in 1/min eingesetzt werden, lässt sich die Leistung in kW nach der Formel

$$P_e = M \cdot n/9549$$

überschlägig berechnen.

Unter Verwendung der spezifischen Kenngröße $p_{me}$ (effektiver Mitteldruck, siehe ► Abschn. 5.1.2.2) berechnet sich die Leistung des Motors zu

$$P_e = i \cdot n \cdot p_{me} \cdot V_H$$

wobei

$i = 1$ beim 2-Takt-Verfahren

$i = 0{,}5$ beim 4-Takt-Verfahren

ist.

Mit der Drehzahl in 1/min, dem effektiven Mitteldruck $p_{me}$ in bar und dem Gesamthubraum des Motors $V_H$ in $dm^3$ ergibt sich die Leistung in kW zu

$$P_e = i \cdot n \cdot p_{me} \cdot V_H/600.$$

Die maximale Leistung eines Motors wird als Nennleistung bezeichnet. Die Drehzahl, bei welcher diese Leistung erreicht wird, heißt Nenndrehzahl. Je nach Auslegung des Ladungswechselprozesses hinsichtlich Ventilsteuerzeiten, Strömungswiderständen der Gaswechselorgane und dynamischer Vorgänge im Ansaug- und Abgassystem liegt diese Drehzahl mehr oder weniger weit unterhalb der maximal zulässigen Drehzahl des Triebwerks.

### 5.1.2.2 Spezifische Motorkenngrößen

Da die Leistungskenngrößen des Verbrennungsmotors direkt von seiner Größe abhängen, ist es sinnvoll diese Größen in spezifischen, auf das Zylinderhubvolumen bezogene Größen anzugeben. Dies gestattet einen direkten Vergleich von Motoren unterschiedlicher Größe.

Das auf das Hubvolumen bezogene Drehmoment des Motors stellt thermodynamisch gesehen die an den Kolben geleistete Nutzarbeit abzüglich der Reibungsverluste des Triebwerks dar. Physikalisch lässt sich diese Arbeit auch als derjenige Druck interpretieren, welcher, wenn er während des Expansionstaktes konstant im Brennraum herrschen würde, die gleiche Arbeit an den Kolben abgibt wie der zeitlich veränderliche Verbrennungsdruck. Es hat sich deshalb hierfür auch die Bezeichnung Mitteldruck etabliert. Soweit das an der Motorkupplung verfügbare Drehmoment gemeint ist, ist vom effektiven Mitteldruck $p_{me}$ die Rede, der sich nach den folgenden Beziehungen berechnen lässt:

$$p_{me} = P_e/(i \cdot V_H \cdot n)$$

oder

$$p_{me} = (2\pi/i) \cdot (M/V_H).$$

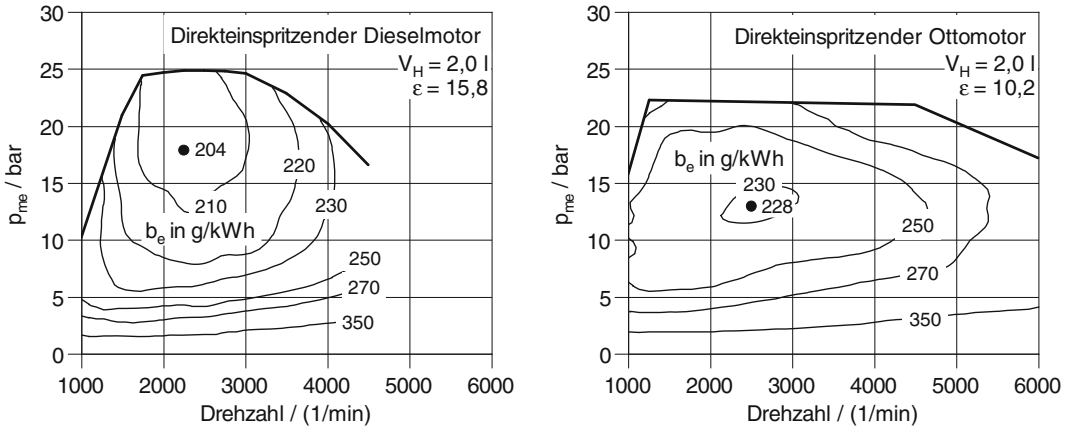



**Abb. 5.2** Verbrauchskennfeld typischer Pkw-Motoren

Bei der thermodynamischen Analyse des Motorprozesses ist es oft nützlich, die Reibungsverluste des Triebwerkes außer Acht zu lassen. In diesem Fall interessiert ausschließlich die an den Kolben abgegebene Volumenänderungsarbeit. Sie kann messtechnisch mittels Zylinderdruckindizierung erfasst und als das auf das Hubvolumen bezogene Integral $\int p(\alpha)\mathrm{d}V$ berechnet werden. In diesem Fall wird vom indizierten (oder auch inneren) Mitteldruck $p_{\mathrm{mi}}$ gesprochen.

Weitere gebräuchliche spezifische Motorkenngrößen sind:

- Hubraumleistung (Literleistung) üblicherweise angegeben in kW/l

$$P_{\mathrm{H}} = P_{\mathrm{e}}/V_{\mathrm{H}}$$

- Leistungsmasse üblicherweise angegeben in kg/kW

$$m_{\mathrm{P}} = m/P_{\mathrm{e}}$$

- Spezifischer Kraftstoffverbrauch üblicherweise angegeben in g/kWh

$$b_{\mathrm{e}} = \dot{m}_{\mathrm{B}}/P_{\mathrm{e}} = 1/(H_{\mathrm{u}} \cdot \eta_{\mathrm{e}})$$

($\dot{m}_{\mathrm{B}}$ = Kraftstoffmassenstrom in g/h)

Abb. 5.2 zeigt am Beispiel des Verbrauchskennfelds die Verwendung der spezifischen Kenngrößen $b_{\mathrm{e}}$ und $p_{\mathrm{me}}$ zur vergleichenden Beurteilung unterschiedlicher Motoren.

### 5.1.2.3 Wirkungsgrade

Die Güte oder Effektivität des Arbeitsprozesses wird üblicherweise mit dem verglichen, was theoretisch unter „idealen" Randbedingungen möglich wäre. Mit idealen Randbedingungen ist eine verlustfreie Prozessführung gemeint, die auch einfachen Berechnungsmethoden zugänglich ist. Aufgrund der diversen den realen Motorprozess bestimmenden Einflussfaktoren ergibt sich eine Wirkungsgradkette des Motors (siehe auch DIN 1940), die sich in die folgenden Schritte aufteilt (Abb. 5.3).

**Thermischer Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses**

$\eta_{\mathrm{thv}}$ Als thermodynamisch idealer Vergleichsprozess wird der Gleichraumprozess angenommen, der sich aus einer isentropen Verdichtung ($1 \rightarrow 2$), einer isochoren Wärmezufuhr (Verbrennung, $2 \rightarrow 3$), einer isentropen Expansion ($3 \rightarrow 4$) und einer isochoren Rückführung des idealen Arbeitsgases auf den Ausgangszustand ($4 \rightarrow 1$) des Prozesses zusammensetzt. Als Randbedingungen und Annahmen gelten dabei:

- keine Wärme-, Gas- und Reibungsverluste,
- kein Restgas,
- ideales Gas mit konstanten spezifischen Wärmekapazitäten $c_{\mathrm{p}}, c_{\mathrm{v}}, \kappa = c_{\mathrm{p}}/c_{\mathrm{v}} = 1{,}4$,

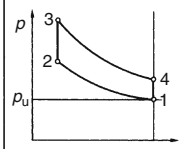
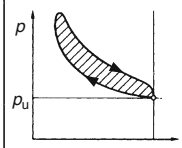
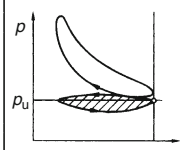
| Arbeitsdiagramm | Bezeichnung | Randbedingungen | Definition | Wirkungsgrade |
|---|---|---|---|---|
|  | theoretischer Vergleichs-„Gleichraum-prozess“ | ideales Gas, konstante spezifische Wärme, unendlich schnelle Wärmezu- und -abfuhr usw. | $\eta_{thv} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa}$ theoretischer oder thermischer Wirkungsgrad | $\eta_{thv}$ |
|  | realer Hochdruck-Arbeits-prozess | Wandwärmeverluste, reales Gas, endliche Wärmezu- und -abfuhr Geschwindigkeiten, veränderliche spezifische Wärmen | $\eta_{GHP}$ Gütegrad des Hochdruck-prozesses | $\eta_G$ |
|  | realer Ladungs-wechsel (4-Takt) | Strömungsverluste, Aufheizung des Gemisches oder der Luft usw. | $\eta_{GLW}$ Ladungs-wechsel-wirkungs-grad | $\eta_i$ |
| mechanische Verluste | Verluste wegen Reibung, Neben-aggregate | realer Motor | $\eta_m$ | $\eta_m$ $\eta_m$ $\eta_e$ |

**Abb. 5.3** Einzel- und Gesamtwirkungsgrade des Hubkolbenmotors

- unendlich schnelle Wärmezufuhr und -abfuhr,
- keine Strömungsverluste.

Der thermische Wirkungsgrad $\eta_{thv}$ oder auch der Wirkungsgrad des idealen „vollkommenen Motors“ ist definiert als

$$\eta_{thv} = (Q_{zu} - Q_{ab})/Q_{zu} = 1 - Q_{ab}/Q_{zu}.$$

Mit $Q_{zu}$ (zugeführte Wärmemenge von $2 \rightarrow 3$)

$$Q_{zu} = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

und $Q_{ab}$ (abgeführte Wärmemenge von $4 \rightarrow 1$)

$$Q_{ab} = m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

folgt

$$\eta_{thv} = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2).$$

Aus der Gleichung für die adiabaten Zustandsänderungen von $1 \rightarrow 2$ und von $3 \rightarrow 4$

$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{const.}$$

lässt sich herleiten:

$$\eta_{thv} = 1 - T_1/T_2$$

und mit

$$T_1/T_2 = (1/\varepsilon)^{\kappa-1}$$

folgt für den thermischen Wirkungsgrad des Gleichraumprozesses

$$\eta_{thv} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa}.$$

Diese Beziehung macht den direkten Einfluss des Verdichtungsverhältnisses $\varepsilon = (V_c + V_h)/V_c$ auf den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors deutlich. Hieraus wird auch einer der wesentlichen Unterschiede zwischen dem Ottomotor und dem Dieselmotor ersichtlich, weil das Verdichtungsverhältnis des Ottomotors zur Vermeidung klopfender Verbrennung begrenzt ist.

**Gütegrad $\eta_G$** Hierin werden alle Unterschiede zwischen dem „idealen“ und dem „realen“ Kreisprozess

im Hochdruck- ($\eta_{GHP}$) und im Niederdruckprozess ($\eta_{GLW}$) erfasst. Dies sind das reale Arbeitsgas, das Restgas im Zylinder, die Wandwärmeverluste, die Gasverluste, die Ladungswechselverluste ($\eta_{GLW}$) und der reale Verbrennungsablauf. Der Gütegrad berechnet sich nach der Beziehung

$$\eta_G = \eta_{GHP} \cdot \eta_{GLW} = W_i / W_{thv}$$

mit

$W_i$ = indizierte Arbeit, errechnet aus dem realen Druckverlauf, und

$W_{thv}$ = Arbeit des Vergleichsprozesses $= Q_{zu} - Q_{ab}$.

**Indizierter (innerer) Wirkungsgrad $\eta_i$** $\eta_i$ ist das Verhältnis der am Kolben geleisteten (indizierten) Arbeit zu dem im Brennstoff zugeführten Wärmeäquivalent

$$\eta_i = W_i / W_B$$

$W_B = m_B \cdot H_u$ (Arbeitsinhalt des zugeführten Brennstoffes).

Der Wirkungsgrad $\eta_i$ ist auch durch das Produkt aus dem thermischen Wirkungsgrad und dem Gütegrad zu beschreiben

$$\eta_i = \eta_{thv} \cdot \eta_G.$$

**Mechanischer Wirkungsgrad $\eta_m$** Im mechanischen Wirkungsgrad werden die Verluste aus der Reibung in Triebwerk und Zylinderkopf sowie die Antriebsleistung der Nebenaggregate (Öl-, Wasser- und Kraftstoffpumpe, Generator usw.) berücksichtigt.

$$\eta_m = W_e / W_i$$

$W_e$ = an der Kupplung effektiv verfügbare Arbeit.

**Effektiver Wirkungsgrad $\eta_e$** Der Gesamtwirkungsgrad des Motors, auch effektiver Wirkungsgrad $\eta_e$ genannt, ist das Produkt aller Einzelwirkungsgrade der Wirkungsgradkette:

$$\eta_e = \eta_{thv} \cdot \eta_G \cdot \eta_m$$

Er entspricht dem Verhältnis $W_e / W_B$ von effektiv an der Kupplung verfügbarer Arbeit zu dem mit dem Kraftstoff zugeführten Arbeitsvermögen.

Aktuelle Fahrzeugmotoren erreichen effektive Wirkungsgrade von $\eta_e = 0{,}38$ für Pkw-Ottomotoren bis zu $\eta_e = 0{,}43$ für Dieselmotoren. Diese Bestwerte werden in dem vom effektiven Mitteldruck und von der Motordrehzahl aufgespannten Motorkennfeld bei üblicher Auslegung etwa in der Mitte des Drehzahlbandes und etwas unterhalb der Volllastkurve erreicht (siehe auch ◘ Abb. 5.2).

## 5.1.3 Bauarten

### 5.1.3.1 Hubkolbenmotoren

#### 5.1.3.1.1 Bauformen

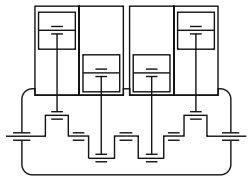
Die im Kraftfahrzeugbau anzutreffenden Motorbauformen sind Reihenmotoren, V-Motoren, Boxermotoren und selten auch W-Motoren (◘ Abb. 5.4). Eine Untergattung des V-Motors stellt die VR-Bauform dar, bei der die beiden Zylinderbänke mit engem V-Winkel unter einem gemeinsamen Zylinderkopf angeordnet sind. 1- und 2-Zylinder-Motoren sind nur bei Krafträdern üblich, der 2012 introduzierte Fiat Twinair (0,8 l) bildet bislang die Ausnahme. Im Pkw-Sektor werden 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 8-, 10- und 12-Zylinder-Motoren eingesetzt, in Einzelfällen und Prototypen auch 16- und 18-Zylindermotoren in V-, V-VR und W-Bauform.

Die Zählfolge der Zylinder ist nach DIN 73021 für Kraftfahrzeugmotoren genormt (für allgemeine Verwendung und Schiffsmotoren gilt nach ISO 1204, 1205 die umgekehrte Richtung, von der Kraftabgabe aus gesehen). Die Zylinder werden von der der Kraftabgabe (Schwungrad) gegenüberliegenden Seite fortlaufend nummeriert. Bei Motoren mit mehreren Zylinderbänken werden zunächst die Zylinder der in Blickrichtung auf die Kraftabgabeseite links von der Kurbelwellenachse liegenden Zylinderbank durchgezählt und nachfolgend die Zylinder der in Drehrichtung des Uhrzeigers um die Motorachse folgenden Zylinderbänke.

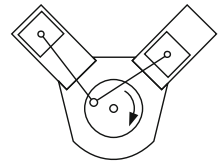
Die Zündfolge ist die Reihenfolge, in der die Zylinder nacheinander zünden. Sie wird durch die Bauart des Motors sowie durch das Anstreben gleicher Zündabstände, einfach herstellbarer Kurbel-

## Bauformen von Hubkolbenmotoren

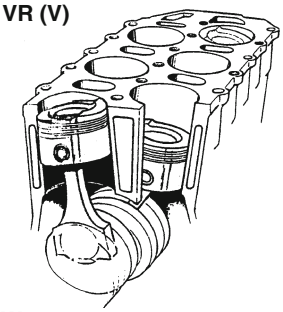
**1 Reihe**



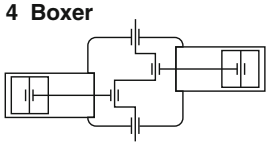
**2 V**



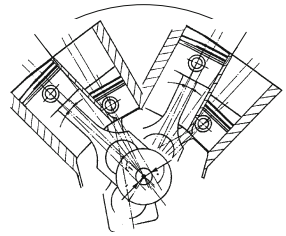
**3 VR (V)**



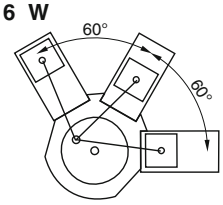
**4 Boxer**



**5 V-VR (W)**



**6 W**



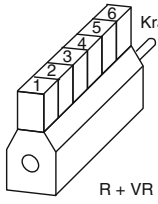
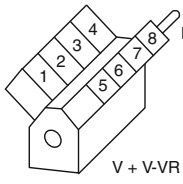
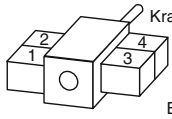
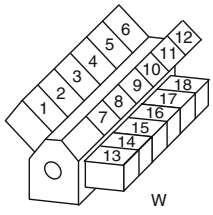

| Zählrichtung | Zylinder-zahl | Übliche Zündfolge (Beispiele) |
|---|---|---|
|  Kraftabgabe R + VR | 3 | 1 3 2 oder 1 2 3 |
| | 4 | 1 3 4 2 oder 1 2 4 3 |
| | 5 | 1 2 4 5 3 oder 1 5 2 3 4 |
| | 6 | 1 5 3 6 2 4 oder<br>1 2 4 6 5 3 oder<br>1 4 2 6 3 5 oder<br>1 4 5 6 3 2 |
|  Kraftabgabe V + V-VR | 4 | 1 3 2 4 |
| | 6 | 1 2 5 6 4 3 oder<br>1 4 5 6 2 3 |
| | 8 | 1 6 3 5 4 7 2 8 oder<br>1 5 4 8 6 3 7 2 oder<br>1 8 3 6 4 5 2 7 |
| | 10 | 1 6 2 8 4 9 5 10 3 8 oder<br>1 6 5 10 2 7 3 8 4 9 |
| | 12 | 1 7 5 11 3 9 6 12 2 8 4 10 oder<br>1 12 5 8 3 10 6 7 2 11 4 9 |
| | 16 | 1 14 9 4 7 12 15 6 13 8 3 16 11 2 5 10 |
|  Kraftabgabe B | 4 | 1 4 3 2 |
| | 6 | 1 6 2 4 3 5 |
|  W | 18 | 1 14 18 15 17 13<br>9 11 7 10 8 12<br>16 4 2 6 3 5 |

**Abb. 5.4** Bauformen, Zählrichtung und Zündfolge von Kraftfahrzeugmotoren

wellenformen sowie günstiger Beanspruchung der Kurbelwelle bestimmt. Bei der Angabe der Zündfolge wird mit Zylinder 1 (Zählfolge, s. o.) begonnen.

Reihenmotoren (Beispiel 1) werden heute in bis zu 6-Zylinder-Ausführungen gebaut und haben eine Kurbelwellenkröpfung je Zylinder und in der Regel einen einstückigen Zylinderkopf. Die Boxermotoren (Beispiel 4) mit 180° gegenüberliegenden Zylinderreihen haben auch eine Kurbelwellenkröpfung je Zylinder und einen Zylinderkopf je Zylinderreihe.

V-Motoren (Beispiel 2) sind dadurch charakterisiert, dass von einer Kurbelwellenkröpfung zwei Pleuel von je einer Zylinderbank betrieben werden. Jede Zylinderbank verfügt über einen gemeinsamen Zylinderkopf. Der Winkel zwischen den Zylinderbänken ist entweder 60°, 72° oder 90°. Der V-Winkel ist von der Anzahl der Zylinder (gleichmäßige Zündfolge) oder vom Leitmotor einer Motorfamilie mit unterschiedlichen Zylinderzahlen abhängig. Einen Sonderfall stellt das im Bild gezeigte Beispiel 3 dar, bei dem der V-Winkel auf 15° so eng zusammengerückt ist, dass nur ein einteiliger Zylinderkopf für beide Zylinderbänke gebraucht wird, wobei in diesem Fall die Kurbelwelle für jeden Zylinder eine eigene Kröpfung hat. Hiernach wäre er als Reihenmotor zu benennen, und dementsprechend ist auch die Zählfolge der Zylinder angegeben. Darum wurde dieser Motor anfänglich auch als VR-Motor bezeichnet, was die nicht eindeutige Bauformzuordnung zu den Reihen- oder V-Motoren beschreibt. Erwähnenswert ist weiterhin der geschränkte Kurbeltrieb dieses Motors. Die Schnittlinie der beiden Ebenen durch die „ungeraden" Zylinder 1, 3 usw. und der „geraden" Zylinder 2, 4 usw. liegt unterhalb der Kurbelwellenachse. Folglich beträgt der Abstand vom OT zum UT für die Zylinder 1, 3, … weniger als 180° KW und für die Zylinder 2, 4, … mehr als 180° KW. Diese Schränkung wird jedoch vermehrt auch bei R-Motoren angewendet als reibungsmindernde Maßnahme.

Als weitere Variante dieser VR-Motorbauart werden auch V-VR-Motoren (Beispiel 5) ausgeführt, auf die auch die Bezeichnung W-Motor angewendet wird. Hierbei arbeiten auf einer Kröpfung zwei Pleuel von je einer VR-Zylinderbank. Die Zählfolge wird wie beim V-Motor je Seite angegeben.

Auch das im Bild gezeigte Beispiel 6 wird als W-Motor bezeichnet. Dieses Triebwerk hat 3 Zylinderbänke im Winkel von je 60° zueinander und wird mit $3 \times 6 = 18$ Zylindern ausgeführt. Auf einer Kurbelkröpfung laufen drei Pleuel. Hauptvorteil dieser Konstruktionen ist, dass eine große Anzahl von Zylindern sehr kompakt in der Baulänge unterzubringen ist und ein sehr gleichförmiger, vibrationsarmer Motorlauf erreicht wird.

Während die breite Masse der Pkw-Motorisierungen mit 4-Zylinder-Motoren im Hubraumbereich von ca. 1,2 bis 2,0 l Hubraum ausgeführt ist, kommen im Bereich der Kompakt- und Sub-Kompaktklasse vermehrt 3-Zylinder-Motoren und in jüngster Zeit auch 2-Zylinder-Motoren zum Einsatz. Früher wurden die 3-Zylinder-Motoren häufig konstruktiv von vorhandenen 4-Zylinder-Motorfamilien abgeleitet, was gerade in diesem Marktsegment zu wichtigen günstigen Entwicklungs- und Herstellkosten führt. Aktuell werden jetzt auch spezielle Entwicklungen im 3-Zylinderbereich beobachtet. Im Komfort- und Luxussegment kommen weiterhin 6-, 8-, 10- und 12-Zylinder-Motoren zum Einsatz. Insgesamt ist eine Entwicklung zu geringeren Zylinderzahlen zu beobachten, die durch den zunehmenden Anteil aufgeladener Motoren mit gleichzeitig gesteigertem Aufladegrad verursacht wird.

#### 5.1.3.1.2 Kinematik des Kurbeltriebs

Der Kurbeltrieb dient dazu, die translatorische Bewegung des Kolbens über die Pleuelstange in eine Rotation der Kurbelwelle umzuwandeln. Die folgenden Angaben beschreiben den Fall eines Kurbeltriebs ohne Schränkung, d. h. die Zylinderachse und die Kurbelwellenachse schneiden sich in einem Punkt. Ebenso wird der Einfluss durch einen Kolbenbolzenversatz, der bei PKW-Motoren 0,5 mm selten übersteigt, hier vernachlässigt. Aus der Geometrie des Kurbeltriebs (◘ Abb. 5.5) lässt sich für den Weg $s_K$ des Kolbens in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel $\alpha$, ausgehend vom oberen Totpunkt, mit dem Pleuelstangenverhältnis $\lambda = r/l$ ableiten:

$$s_K = r(1 - \cos\alpha) + l(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\alpha}).$$

Näherungsweise gilt:

$$s_K \approx r \cdot (1 - \cos\alpha + \lambda/2 \sin^2\alpha).$$

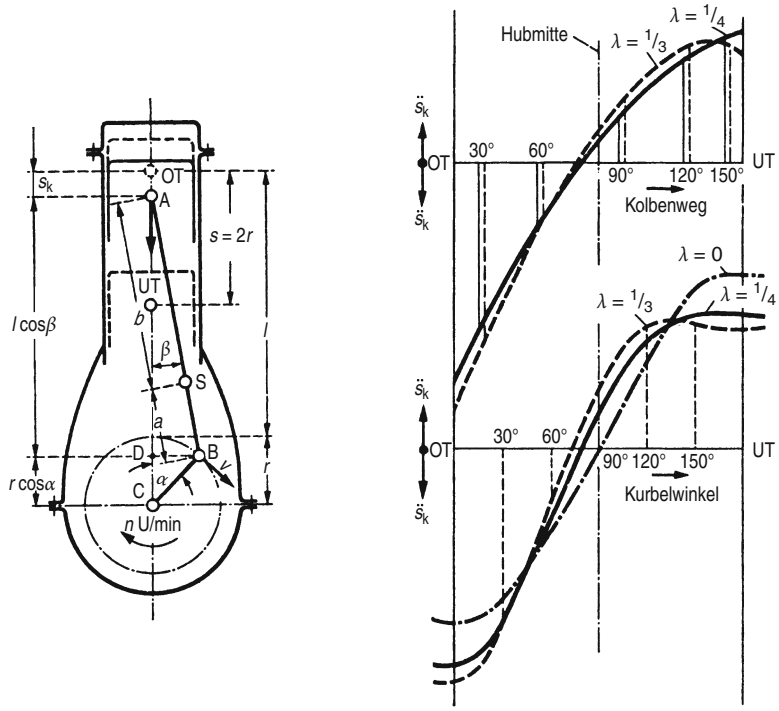



**Abb. 5.5** Geometrie und Beschleunigungen der oszillierenden Massen des Kurbeltriebs

Für die Kolbengeschwindigkeit folgt daraus

$$\dot{s}_K = \omega \cdot r \cdot \sin\alpha\,(1 + \lambda \cdot \cos\alpha)$$

mit

$$\omega = \pi \cdot n$$

und die Kolbenbeschleunigung

$$\ddot{s}_K = \omega^2 \cdot r(\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha).$$

Der Verlauf der Beschleunigung über dem Kurbelwinkel $\alpha$ und über dem Kolbenweg $s_K$ für verschiedene Werte von $\lambda$ sind auch in Abb. 5.5 dargestellt. Bei $\lambda = 0$, d. h. unendlich langem Pleuel, sind Kolbenweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung rein sinusförmig. Da die Pleuellänge in der Realität nicht unendlich sein kann, wird sich der Beschleunigungsverlauf von der reinen Sinusform entfernen. Die maximale Beschleunigung im OT wird dadurch ansteigen, während die Beschleunigung im UT reduziert wird.

#### 5.1.3.1.3 Kräfte und Momente im Triebwerk

Neben den Gaskräften wirken im Hubkolbentriebwerk infolge der zyklischen Arbeitsweise und des ungleichförmigen Bewegungsablaufes Massenkräfte. Dabei wirken „innere" und „äußere" Kräfte. Die „inneren" Kräfte sind für die Auslegung von Kolben, Pleuel, Kurbelwelle und Lagern bestimmend, die freien „äußeren" Kräfte verursachen Kräfte und Momente des Motors, die sich in Schwingungen auswirken, in den Motorlagern aufgenommen werden müssen und auf diesem Weg in die Struktur des Fahrzeuges eingeleitet werden.

Aus der Beschleunigung folgt für die oszillierende Massenkraft $F_M$ in Zylinderrichtung

$$F_M = m_h \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\alpha + \lambda \cos 2\alpha).$$

Annähernd gilt für die oszillierende Masse

$$m_h \approx 1/3 \cdot m_S + m_K$$

($m_S$ = Pleuelmasse, $m_K$ = Kolbenmasse).

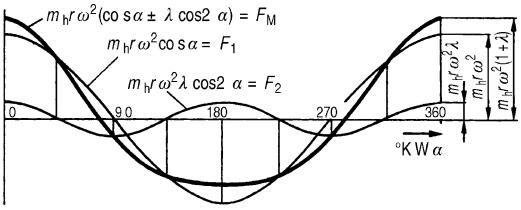



**Abb. 5.6** Aufteilung der oszillierenden Massenkraft in Grund- und Oberschwingung

Der Verlauf der oszillierenden Kraft kann grafisch veranschaulicht werden, wenn die Glieder mit $\cos\alpha$ und mit $\cos 2\alpha$ über dem Kurbelwinkel aufgetragen werden (Abb. 5.6). Der sinusförmige Verlauf der Massenkraft 1. Ordnung wird überlagert von der Massenkraft 2. Ordnung mit zwei vollen Schwingungen je Kurbelwellenumdrehung. In der Überlagerung beider Kraftverläufe ergibt sich eine Überhöhung im OT und eine Minderung im UT.

Die rotierende Masse ist näherungsweise

$$m_r \approx 2/3 \cdot m_S + m_{Kur}$$

wobei $m_{Kur}$ die nicht durch Gegengewichte ausgeglichene, auf die Mitte des Kurbelzapfens bezogene rotierende Masse der Kurbelwelle ist.

Damit berechnet sich die rotierende Kraft nach der Beziehung

$$F_r = m_r \cdot r \cdot \omega^2.$$

Die Größe der Kräfte $F_M$ und $F_r$ steigt linear mit der Masse und quadratisch mit der Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehzahl an. Das Ziel ist daher, möglichst leichte Kolben, Kolbenbolzen und Pleuel zu bauen und ein möglichst kleines Schubstangenverhältnis $\lambda$ zu erreichen, also ein langes Pleuel zu verwenden.

Bei Mehrzylinder-Motoren überlagern sich die Massenkräfte der einzelnen Zylinder und heben sich teilweise auf. In Längsrichtung des Motors wirken sie aber in verschiedenen Ebenen im Abstand der Zylindermitten voneinander und bewirken auf diese Weise die sogenannten Massenmomente. Je nach Zylinderanordnung und Kurbelwellenbauform kann dies zu Erhöhungen der äußeren Kräfte und zu Momenten führen, aber auch zur gegenseitigen Aufhebung der Kräfte nach außen. Man spricht von den „freien" Kräften und Momenten des Motors. Einige der meist verbreiteten Bauformen und deren freie Massenkräfte und -momente der 1. und 2. Ordnung (ohne Massenausgleichsmaßnahmen) sind in der Tab. 5.1 dargestellt.

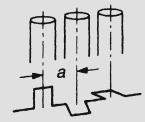
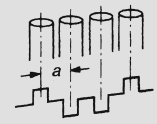
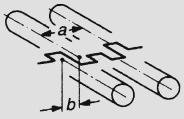
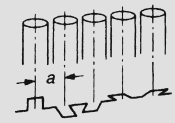
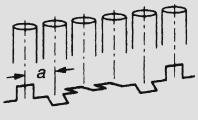
Die auf den Kolben wirkende Gaskraft $F_G$ teilt sich in die auf das Pleuel wirkende Stangenkraft $F_{SG}$ und die an der Zylinderwand abgestützte Seitenkraft $N_G$ auf (Abb. 5.7). Diese Seitenkraft kann durch eine Schränkung des Kurbeltriebs verringert werden, wodurch die Reibung verringert wird und der Kolben leichter ausgeführt werden kann. Die Stangenkraft $F_{SG}$ wiederum bewirkt an der Kurbelwellenkröpfung eine Radialkraft $F_{RG}$ sowie die tangential wirkende Kraft $F_{TG}$, die am Kurbelradius $r$ angreift und das Drehmoment auf die Kurbelwelle überträgt. Mit dem Kurbelwinkel $\alpha$, dem Schwenkwinkel $\beta$ der Pleuelstange und dem Pleuelstangenverhältnis $\lambda$ können analog zur Herleitung die Massenkräfte berechnet werden:

Werden nun die auf den Kolben wirkende periodisch veränderliche Gaskraft und die periodisch wirkenden Massenkräfte der Triebwerksteile zusammengefasst, so erhält man den Verlauf der resultierenden Kolbenkraft $F_K$, welcher in Abb. 5.7 qualitativ gezeigt ist. Die Größe der Gaskräfte verändert sich nahezu linear mit der Motorlast während die Massenkräfte quadratisch mit der Motordrehzahl ansteigen. Bei kleinen Drehzahlen und Volllast ist deshalb die Gaskraft bestimmend, bei hohen Drehzahlen dominieren dagegen die Massenkräfte.

Arbeiten in einem Motor mehrere Zylinder mit relativ zueinander verschränkten Kurbelkröpfungen auf eine Welle, so überlagern sich die einzelnen Drehkräfte. Der daraus resultierende Drehkraftverlauf $F_T$ ist in Abb. 5.8 für verschiedene Motorbauarten über ein Arbeitsspiel von 720° KW dargestellt. Er regt die Kurbelwelle zu Drehschwingungen an, die maßgeblich für die Dauerfestigkeit der Kurbelwelle sind. Je mehr Zylinder auf eine Welle wirken, desto geringer ist die Ungleichförmigkeit der Drehkraft und sie nähert sich der mittleren Drehkraft $F_{Tm}$ an. Die verbleibenden Schwankungen der Drehkraft über dem Arbeitsspiel bewirkt ei-

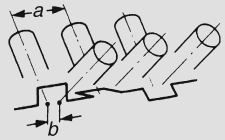
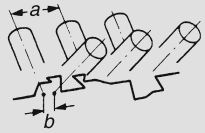
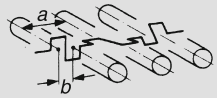
**Tabelle 5.1** Freie Kräfte und Momente 1. und 2. Ordnung (ohne Ausgleichsmaßnahmen) einiger gebräuchlicher Motorbauarten

$F_r = m_r \cdot r \cdot \omega^2 F_1 = m_h \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha F_2 = m_h \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha$

| Zylinderanordnung | Freie Kräfte 1. Ordnung[a)] | Freie Kräfte 2. Ordnung[a)] | Freie Momente 1. Ordnung[a)] | Freie Momente 2. Ordnung[a)] | Zündabstände |
|---|---|---|---|---|---|
| 2-Zylinder | | | | | |
|  Reihe, 2 Kröpfungen | 0 | $2 \cdot F_2$ | $F_1 \cdot a$ | 0 | 180°/540° |
| 3-Zylinder | | | | | |
|  Reihe, 3 Kröpfungen | 0 | 0 | $\sqrt{3} \cdot F_1 \cdot a$ | $\sqrt{3} \cdot F_2 \cdot a$ | 240°/240° |
| 4-Zylinder | | | | | |
|  Reihe, 4 Kröpfungen | 0 | $4 \cdot F_2$ | 0 | 0 | 180°/180° |
|  Boxer, 4 Kröpfungen | 0 | 0 | 0 | $2 \cdot F_2 \cdot b$ | 180°/180° |
| 5-Zylinder | | | | | |
|  Reihe, 5 Kröpfungen | 0 | 0 | $0,449 \cdot F_1 \cdot a$ | $0,449 \cdot F_2 \cdot a$ | 144°/144° |
| 6-Zylinder | | | | | |
|  Reihe, 6 Kröpfungen | 0 | 0 | 0 | 0 | 120°/120° |

a) Ohne Gegengewichte

**Tabelle 5.1** (Fortsetzung)

| Zylinderanordnung | Freie Kräfte 1. Ordnung[a)] | Freie Kräfte 2. Ordnung[a)] | Freie Momente 1. Ordnung[a)] | Freie Momente 2. Ordnung[a)] | Zündabstände |
|---|---|---|---|---|---|
| 6-Zylinder | | | | | |
|  V 90°, 3 Kröpfungen | 0 | 0 | $\sqrt{3} \cdot F_1 \cdot a$ [b)] | $\sqrt{6} \cdot F_2 \cdot a$ | 150°/90° |
|  Normalausgleich<br>V 90°, 3 Kröpfungen<br>30° versetzte Hubzapfen | 0 | 0 | $0{,}4483 \cdot F_1 \cdot a$  | $(0{,}966 \pm 0{,}256)$<br>$\sqrt{3} \cdot F_2 \cdot a$  | 120°/120° |
|  Boxer, 6 Kröpfungen | 0 | 0 | 0 | 0 | 120°/120° |
|  V 60°, 6 Kröpfungen | 0 | 0 | $3 \cdot F_1 \cdot a/2$ | $3 \cdot F_2 \cdot a/2$ | 120°/120° |
| 8-Zylinder | | | | | |
|  V 90°, 4 Kröpfungen<br>in zwei Ebenen | 0 | 0 | $\sqrt{10} \cdot F_1 \cdot a$ [b)] | 0 | 90°/90° |
| 12-Zylinder | | | | | |
|  V 60°, 6 Kröpfungen | 0 | 0 | 0 | 0 | 60°/60° |

a) ohne Gegengewichte;
b) durch Gegengewichte voll ausgleichbar

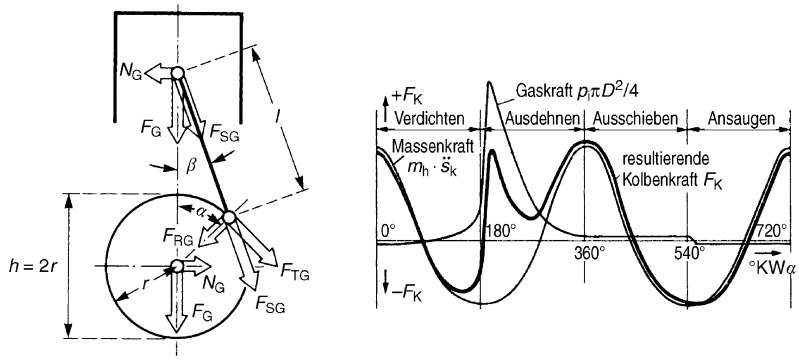



**Abb. 5.7** Gaskraftzerlegung und resultierende Kolbenkraft $F_K$ (aus Massen- und Gaskraft)

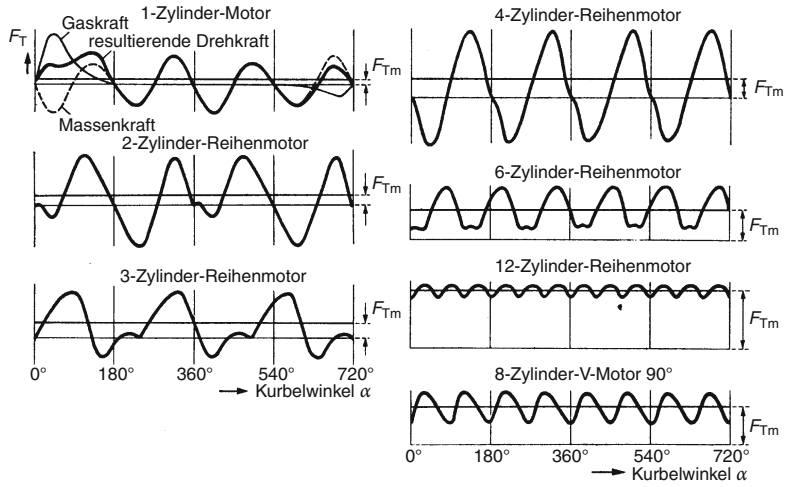



**Abb. 5.8** Verlauf der Drehkraft $F_T$ bei verschiedenen Motorbauarten

ne ungleichförmige Drehgeschwindigkeit am Kurbelwellenende. Der Ungleichförmigkeitsgrad ist dabei definiert als

$$\delta_S = (\omega_{max} - \omega_{min})/\omega_{min}.$$

Er muss durch die Massenträgheit des Schwungrades auf ein Maß zurückgeführt werden, das dem Anwendungsfall angemessen ist (Kompromiss aus Drehgleichförmigkeit und spontanem Beschleunigungs-Hochlaufverhalten).

Die freien Kräfte und Momente können durch rotierende Ausgleichsmassen mit Kurbelwellendrehzahl (1. Ordnung) oder mit doppelter Kurbelwellendrehzahl (2. Ordnung) voll oder zumindest teilweise kompensiert werden, sodass in den Motorlagerungen keine oder nur geringe Kräfte aus den Massenbewegungen des Triebwerks aufgenommen werden müssen. Die Auslegung der Motor- und Getriebelagerung konzentriert sich dann auf die Abstützung der Reaktionskräfte aus dem Abtriebsmoment des Motor-Getriebe-Verbunds und aus den Massenträgheiten des Gesamtmotors im längs, hoch und quer beschleunigten Fahrzeug in Fahrt. Verzichtet man auf einen zusätzlichen Massenausgleich, so kann bei einigen Motorbauarten durch eine gezielte Massenverteilung an der Kurbelwelle bzw. am Schwungrad und TSD zumindest die Wirkung der freien Massenkräfte und -momente 1. Ordnung positiv beeinflusst werden.

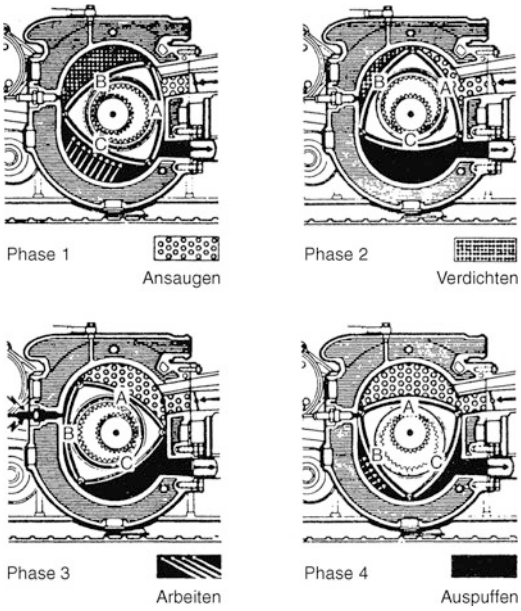



**Abb. 5.9** Prinzip des Wankelmotors

### 5.1.3.2 Rotationskolbenmotoren

Unter den Rotationskolbentriebwerken hat hauptsächlich der 2:3-Kreiskolbenmotor, auch unter dem Namen Wankelmotor bekannt geworden, eine praktische Anwendung im Motorenbau gefunden (Abb. 5.9). Die Vorteile dieses 4-Takt-Motors beruhen auf dem vollkommenen Massenausgleich und der daraus resultierenden großen Laufruhe, seiner kompakten Bauweise und dem Entfall des Ventiltriebes. Wesentliche Nachteile stellen die Abdichtung der Brennräume, die gestreckte Brennraumform mit ungünstigem Oberflächen/Volumen-Verhältnis, was zu Quencheffekten und entsprechend hohen HC-Emissionen führt, sowie sein hoher Kraftstoff- und auch Ölverbrauch dar. Nach dem Ersteinsatz bei NSU (Wankel Spider, 1964 und RO 80, 1967) hat die Firma Mazda diese Motorenbauart kontinuierlich weiterentwickelt, und zuletzt von 2003 bis 2012 als Zweischeiben-Wankelmotor im Mazda RX-8 eingesetzt. Für das Jahr 2017 wurde die Vorstellung des Mazda RX-7 mit Wankelmotor angekündigt [29]. Zudem wurde in verschiedenen Prototypenfahrzeugen der Betrieb mit Wasserstoff, auch in Kombination mit hybridisierten Antriebssträngen, erprobt [9]. Weiterhin wird der Rotationskolbenmotor auch in einer potentiellen Nutzung als Range Extender, also als zusätzlicher Verbrennungsmotor zur Reichweitensteigerung in Elektrofahrzeugen, gesehen.

### 5.1.3.3 Range Extender Aggregate

Aus Gründen des Klimaschutzes sollen zunehmend Elektroautomobile in den Markt eingeführt werden. Bei Verwendung einer Batterie als Energiespeicher stellt die Sicherstellung einer ausreichenden Reichweite bei vertretbaren Kosten die größte Herausforderung hinsichtlich der Kundenakzeptanz für dieses Fahrzeugkonzept dar. Die heute bekannten elektrischen Speichermedien wie z. B. chemische Batterien reichen nicht aus, um mit akzeptablem Gewichtszuwachs eine ausreichende Speicherkapazität zur Verfügung zu stellen. Die Batterietechnik erfährt zwar in letzter Zeit eine enorme Entwicklung, jedoch muss man immer noch ein Zusatzgewicht von ca. 8 kg pro kWh in Kauf nehmen. Bei Außentemperaturen über dem Gefrierpunkt können ca. 70 km dann rein elektrisch gefahren werden, wenn bei Kleinfahrzeugen, wie z. B. einem Fiat 500, 12 kWh nutzbare Batteriespeicherkapazität installiert sind. Sinkende Temperaturen verringern die Batteriekapazität. Die Nutzung von zusätzlichen elektrischen Verbrauchern wie Scheibenwischern, Gebläse, oder Radio, etc., verringern die Reichweite zusätzlich.

Um die daraus entstehende Reichweitenangst der Fahrzeugführer zu nehmen, bietet sich der Einsatz eines Range Extender Aggregates an. Das Range Extender Aggregat ist ein Verbrennungsmotor, der die Batterien mittels eines von ihm angetrieben Generators dann auflädt, wenn sie einen vorher definierten Ladezustand (SOC - State Of Charge) unterschritten haben. Der Verbrennungsmotor treibt somit ausschließlich einen Generator an, der Fahrzeugantrieb erfolgt weiterhin über den Elektromotor. Dieses Antriebskonzept wird serieller Hybrid genannt (Abb. 5.10).

Range Extender Aggregate sind meistens nicht so leistungsstark ausgelegt, wie der entsprechende Elektro- also Hauptantrieb. Sie dienen ausschließlich dazu, das Fahrzeug mit leerem Batteriestand noch bis zum Ziel zu bringen. So befinden sich derzeitig Leistungsvarianten von ca. 25 kW bis 50 kW, hauptsächlich als Ottomotoren und mit ca. 0,8 l bis

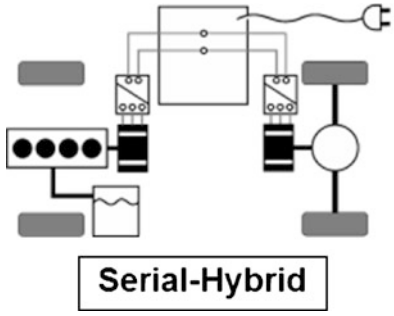



**Abb. 5.10** Funktionsskizze eines Serial-Hybrid-Antriebs

1,2 l Hubraum ausgeführt, in der Entwicklung. Das einzig zur Zeit in Serie befindliche Range Extender Aggregat ist im BMW I3 verbaut (Abb. 5.11). Es ist ein Zweizylinder Otto-Reihenmotor, mit 650 ccm und 25 kW Spitzenleistung.

In Abb. 5.12 ist der liegende V2-Range Extender der Firma KSPG dargestellt, der mittlerweile in einem Demofahrzeug eingesetzt wird. Neben der kompakten Bauweise ist eine Besonderheit dieses Aggregats das besonders gute NVH Verhalten. Dies wird dadurch realisiert, dass ein vollständiger Ausgleich der Rollmomente durch gegenläufig zur KW rotierende Massenträgheiten erzielt wird. Als gegenläufig rotierende Massenträgheiten können hier die zwei Generatoren genutzt werden, die über Zahnräder angetrieben sind. Dieses Ausgleichssystem wird FEVcom genannt (Full Engine Vibration Compensation) und ist ein Patent der FEV GmbH.

### 5.1.3.4 Konstruktive Anforderungen an Verbrennungsmotoren für hybride Antriebsstränge

Die Hauptanforderung, die ein Verbrennungsmotor für eine Anordnung in einem hybriden Antriebsstrang erfüllen muss, ist ein möglichst geringer spezifischer Kraftstoffverbrauch in Kombination mit günstigen Herstellkosten.

Hinsichtlich der Motorkonstruktion und -Mechanik bestehen aber noch weitere wichtige Anforderungen. Typisch für alle Arten des Hybridantriebs ist die wesentlich höhere Anzahl an Start-Stopp-Ereignissen, die der Verbrennungsmotor ertragen muss. Im Prinzip bedeutet jeder dieser Vorgänge ein Durchlaufen des Mischreibungsbetriebs an den Lagern und erfordert einen Neuaufbau des Öldrucks. Besonders kritisch ist diese Belastung für die Hauptlager der Kurbelwelle und die Pleuellager. Neben einer Absicherung der bestehenden Lager durch Langzeittests mit häufiger Durchführung dieser Start-Stopp-Vorgänge bringen die Hersteller von Lagerschalen derzeit auch Varianten mit einer Beschichtung auf den Markt, welche die Standfestigkeit bei diesen neuen Anforderungen erhöht.



- 0 – 100 km/h = 8,1 s
- 80 – 120 km/h = 5,7 s
- Top speed fully electrical = 150 km/h
- Electrical range = 130 - 140 km
- Customer orientated range = 330 km
- Capacity of lithium ionen battery = 27,2 kWh
- Electrical consumption = 11,3 kWh/100km
- Electrical power = 125 kW
- Electrical max. torque = 250 Nm
- Charging time of high-voltage battery at 16 A (80%) = 7,5 hours
- Unladen weight (DIN) = 1440 kg

**Abb. 5.11** BMW i3 mit Range Extender Quelle: [30]



**Abb. 5.12** V2 Range Extender von KSPG im Heck eines Fiat 500. Quelle: [31]

Bei den sogenannten „Micro-“ und „Mild Hybrids“ (vgl. ► Abschn. 3.3.3.2ff.) werden als Anlasser entweder verbesserte Ritzelstarter oder Riemen-Starter/Generatoren beziehungsweise am hinteren Kurbelwellenende integrierte Starter/Generatoren eingesetzt. Die beiden letztgenannten Systeme ermöglichen neben der Anlasser- auch die Übernahme zusätzlicher Generator- und Boostfunktionen. Während integrierte Starter/Generatoren lediglich einen erhöhten Bauraumbedarf in der Motorlänge erfordern, erzeugen Riemen-Starter/Generatoren einige spezielle Anforderungen am freien Motorende:

- Die Belastung auf die Kurbelwelle, die durch diesen Starter/Generator erzeugt wird, steigt an, was zur Notwendigkeit führt, den vorderen Teil der Kurbelwelle und das erste Hauptlager auf diese Belastungen auszulegen und abzusichern.
- Da der Riemen-Starter/Generator nicht nur von der Kurbelwelle angetrieben wird, sondern in einigen Betriebssituationen auch die Kurbelwelle antreibt muss ein spezielles Riemenspannkonzept eingesetzt werden, welches die notwendige Riemenspannung auch bei einer Umkehrung der Drehmomentverhältnisse am Starter/Generator sicherstellt.

Die Hybridisierung des Antriebsstrangs eröffnet die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor einfacher aufzubauen. Abhängig von der Topologie des Hybridsystems und dessen Betriebsstrategie können Teilsysteme des Motors, wie beispielsweise Ventiltrieb, Aufladung oder das Kühl- und Schmiersystem einfacher und kostengünstiger gestaltet werden, wodurch ein Teil der Mehrkosten des Hybridsystems kompensiert werden kann.

### 5.1.4 Konstruktion und Motormechanik

Im Motorenbau haben Kunststoffe mit und ohne Faserverstärkung, neue Leichtmetalllegierungen und Kompositmaterialien auf Basis von Aluminium und Magnesium, Sintermetalle und verbesserte Eisenwerkstoffe Einzug gehalten (siehe auch ► Kap. 10) [8, 10]. Dadurch wird eine verbesserte Funktionalität bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung erreicht. Beschichtungsverfahren wie DLC und Plasmabeschichtungen tragen zur Reibungsreduzierung damit zu einer Verringerung des $CO_2$-Ausstoßes bei.

Der Einsatz moderner Werkstoffe und Verfahren wird vorrangig durch die Material- und Prozesskosten bestimmt. Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt bei der Auswahl neuer Werkstoffe ist die Recyclingfähigkeit. Die Werkstoffe müssen nicht nur in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können, sondern sie sollen zu einem möglichst hohen Anteil selbst aus recyceltem Material bestehen.

Im Zuge der immer mehr verkürzten Entwicklungszeiten neuer Verbrennungsmotoren kommt der konstruktionsbegleitenden Berechnung eine zunehmende Bedeutung zu. Die unter dem Sammelbegriff CAE (Computer Aided Engineering) zusammengefassten Entwicklungs- und Berech-

nungsmethoden umfassen die Vorausberechnung thermischer und mechanischer Strukturbeanspruchungen sowie von Strukturschwingungen, die Simulation von Strömungs- und gasdynamischen Vorgängen bis hin zur vollständigen Simulation eines Fahrzeuges zur Voraussage fahrdynamischer Kenngrößen. CAE-Methoden ermöglichen in einer frühen Entwicklungsphase eine grenznahe Auslegung hinsichtlich Gewichts- und Reibungsreduzierung. Gleichzeitig wird der Versuchsaufwand deutlich verringert und bereits mit der ersten Prototypen-Generation ein hohes Maß an Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit erreicht [11], ▶ Abschn. 11.3. In den weiteren Entwicklungsschritten zum Serienprodukt werden die Erkenntnisse der nachfolgenden Funktions- und Systemversuche umgesetzt sowie die Konstruktion im Detail an die jeweiligen Serienfertigungsprozesse der Komponenten angepasst.

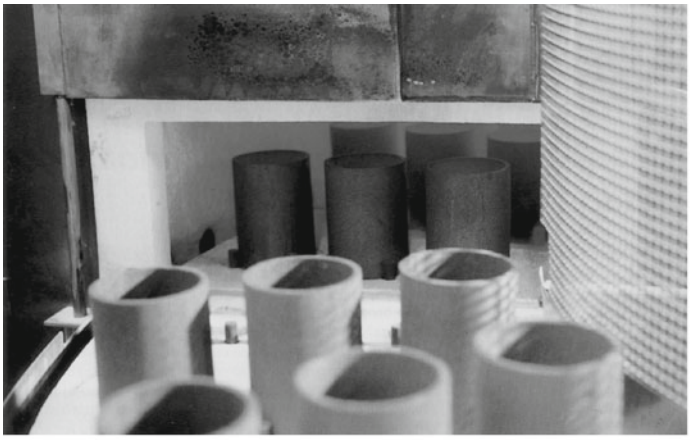
#### 5.1.4.1 Kurbelgehäuse

Der klassische Werkstoff für Zylinderkurbelgehäuse ist Grauguss. Er ist preiswert, leicht zu vergießen und zu bearbeiten, hat gute Laufeigenschaften für den Kolben in der Zylinderbohrung, ist warmfest sowie gut schall- und schwingungsdämpfend. Einige high-end Anwendungen verwenden heute Grauguss mit Vermikulargrafit (GGV), im englischen Sprachgebrauch Compacted Graphite Iron (CGI), dessen Festigkeit höher ist, und der in dünneren Wandstärken ($< 3$ mm) vergossen werden kann, was über gezielter Wandstärkenauswahl zu beträchtlichen Bauteilgewichtsreduzierungen führt. GGV wird sowohl für Ottomotoren (wie z. B. Audi R5 TFSI) als auch bei größeren Pkw-Dieselmotoren (V6, V8) eingesetzt. Die Hauptlagerdeckel können „gecrackt" werden, d. h. der Bearbeitungs- und Montageaufwand ist reduziert. Aufgrund der geringen Festigkeit bei gleicher Belastung steigt das Gewicht des einzelnen Lagerdeckels mit GGV im Vergleich zum klassischen Lagerdeckelmaterial GJS.

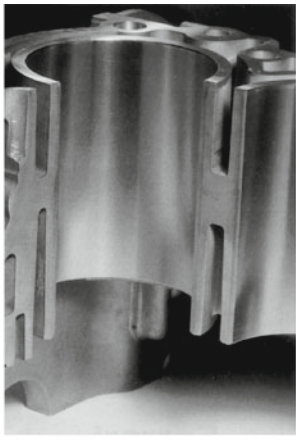
Erhebliche Gewichtsreduzierungen bietet der Werkstoff Aluminium. Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminiumlegierung werden mit eingesetzten (sogen. nassen), thermisch gefügten (sogen. trockenen) oder umgossenen Grauguss-Zylinderbuchsen oder Alu-Zylinderbuchsen mit Nikasilbeschichtung (Nickel-Silizium-Verbindung) ausgerüstet, weil das Grundmaterial nicht als Kolbenlauffläche für Aluminiumkolben geeignet ist. Gehäuse aus übereutektischer Legierung, im Niederdruck-Kokillenverfahren gegossen, erhalten eine geeignete Zylinderlauffläche, indem die bei der Erstarrung ausgeschiedenen Siliziumkristalle an der Oberfläche durch chemisches Ätzen freigelegt werden. Es gibt auch Verfahren, diese Oberfläche auf rein mechanischem Wege herzustellen, wobei die Bearbeitung des harten Materials aber aufwendig ist. Eine weitere Alternative stellt die Beschichtung der Zylinderlauffläche in einem Laserverfahren oder nach einem Plasma-Spritzverfahren mit Keramikpartikeln oder eisenhaltigem Material dar. Andere Hersteller fertigen dünne Zylinderbuchsen entweder aus übereutektischer Legierung oder in einem speziellen Spritzverfahren, das besonders feine Siliziumkornverteilungen in der Aluminiumlegierung gewährleistet. Diese Buchsen werden in die Druckgussmaschine eingelegt und mit der „Standardlegierung" umgossen. In einem weiteren Verfahren wird die Zylinderlauffläche lokal mit Silizium angereichert. Beim Gießprozess wird ein „Preform" aus Keramikfasern mit Siliziumanlagerungen in die Gussform gelegt und mit „Standardmaterial" vergossen, das den Preform durchdringt. (Squeeze casting, Lokasil®-Verfahren, ◘ Abb. 5.13). Im Bereich der Zylinder bildet sich eine der übereutektischen Legierung ähnliche Morphologie der Randschicht aus, die dann durch Honen und Ätzen oder Bürsten zu einer geeigneten Zylinderoberfläche bearbeitet wird.

Die Entwicklung ist heute so weit gediehen, dass nicht nur bei immer mehr Ottomotoren, sondern auch bei den mechanisch sehr hoch beanspruchten Dieselmotoren Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse eingesetzt werden können. In dem extrem auf Gewichtsreduzierung ausgelegten 3-Liter Auto von Volkswagen kam ein 1,2 l TDI-Motor aus Vollaluminium zum Einsatz. Der V8 CDI-Motor von DaimlerChrysler ist in Aluminium mit Grauguss-Buchsen ausgeführt.

Die Ausführung von Kurbelgehäusen in Aluminium erfordert im Vergleich zu Grauguss wegen der abweichenden Schwingungsdämpfungseigenschaften und Festigkeit gezielte Versteifungen, Verrippungen und optimierte Kraftanbindungen, damit



Mit Preforms bestückter Vorwärmofen



Mit dem „lokalen Werkstoff-Engineering“ während des Gießens erzeugte LOKASIL-Zylinderlauffläche

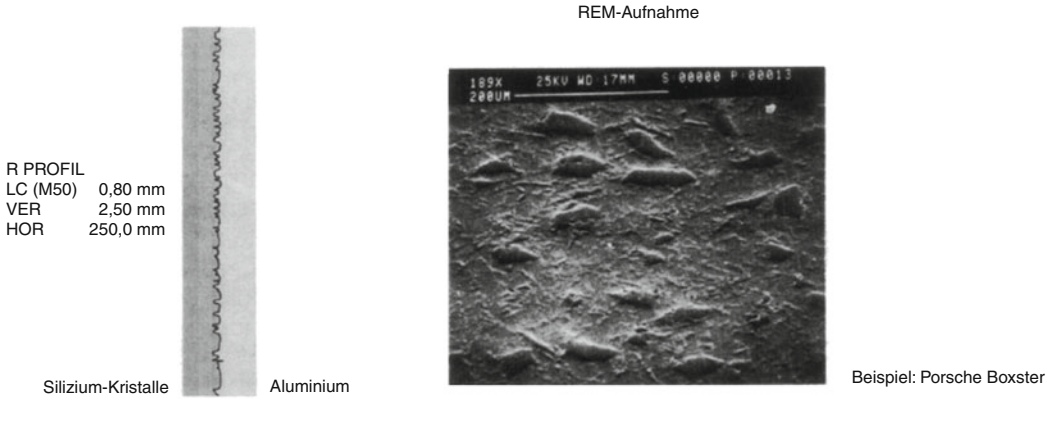



**Abb. 5.13** Zylinderkurbelgehäuse in Aluminiumlegierung, Lokasil®-Verfahren (Beispiel Porsche)

der Motor nicht akustisch auffällig wird. Oft sind bei Aluminium-Kurbelgehäusen zusätzliche Halter für eine robuste Anbindung von z. B. Nebenaggregaten erforderlich.

Auch Magnesium findet wieder verstärktes Interesse als Leichtbauwerkstoff für Strukturbauteile im Motorenbau. Die bekannten Probleme hinsichtlich der Korrosionsanfälligkeit und der geringeren Warmfestigkeit von Magnesium versucht man einerseits mit hochreinem Material sowie neuen Legierungen und andererseits mit Verbundkonzepten zu begegnen. Im Motorenbau werden Saugrohre, Zylinderkopfhauben, Abdeckungen aber auch Halter aus Magnesium-Druckguss gefertigt. Bei diesen Teilen geht aber seit einigen Jahren die Tendenz in Richtung faserverstärkte Kunststoffe. Vor einigen Jahren hat die BMW AG mit ihrem Reihensechszylinder Ottomotor in Mg/Al-Verbundkurbelgehäuse gesetzt (Abb. 5.14) [12]. Das open-deck Kurbelgehäuse entsteht aus einem Insert aus übereutektischer Aluminiumlegierung, welches in einem Druckgießvorgang mit Magnesium umgossen wird. Zur Versteifung der Gesamtstruktur dient ein Bedplate, welches in Magnesium-Druckguss mit Stahlsinter-Einlagen im Bereich der Hauptlager ausgeführt wird. Es wird von einer Gewichtsreduzierung

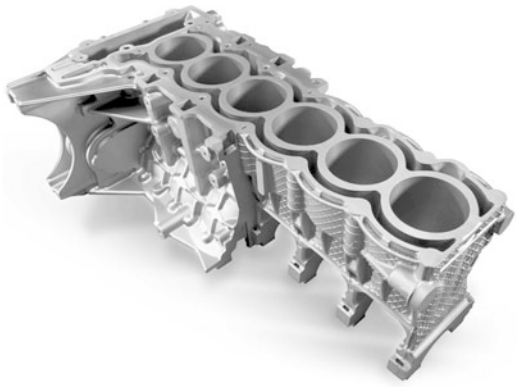


**Abb. 5.14** Mg/Al Verbundkurbelgehäuse (BMW AG)

um 24 % gegenüber einem vergleichbaren Aluminium-Kurbelgehäuse berichtet. Dieses Kurbelgehäusekonzept wurde bei den aufgeladenen Nachfolgermotoren wieder verlassen. Bei Verwendung von Magnesium ist zu beachten, dass im Falle eines Brandes ein Löschen mit wasserhaltigen Löschmitteln zu erhöhter Explosionsgefahr führen kann.

### 5.1.4.2 Kurbelwelle

Kurbelwellen (Abb. 5.15) für Motoren hoher spezifischer Leistung werden aus Vergütungsstahl geschmiedet oder aus Kugelgrafit-Gusseisen gegossen.

Die Belastungen der Kurbelwelle sind im Wesentlichen Torsions- und Biegebelastungen. Die daraus folgenden Spannungen nehmen im Allgemeinen in zwei Bereichen hohe Werte an:

1. Übergang der Lagerzapfen zu den Kurbelwangen,
2. Ein- und Austritt der Ölbohrungen (Pleuellager-Ölversorgung).

In diesen Bereichen werden besondere Fertigungsverfahren verwendet. Bei gegossenen Kurbelwellen werden die Übergänge üblicherweise rolliert, wobei mit hohen spezifischen Drücken in den Übergangsradien eine deutliche Festigungssteigerung bis zu mehr als dem zweifachen Ausgangswert erreicht werden kann. Bei geschmiedeten Kurbelwellen aus Vergütungsstahl ist mit diesem Verfahren keine derartig große Steigerung zu erzielen, da die Ausgangsfestigkeit des Materials bereits sehr hoch ist. Hier kann durch ein induktives Härten eine um ca. 80 % höhere Festigkeit erreicht werden. Für kleinere Stückzahlen ist auch ein Kurz- oder Langzeitnitrieren der Kurbelwelle möglich, welches zu vergleichbaren Verfestigungen wie das Induktionshärten führt.

Für die Ölein- und -austritte existieren verschiedenste Ansätze. Die häufigste Form ist eine einfache Ansenkung, die üblicherweise senkrecht zur Lagerfläche ausgeführt wird. Hierbei sind sowohl die Übergänge der Ansenkung zur Bohrung und zu den Lagerflächen bei der Fertigung besonders zu behandeln (z. B. durch Polieren), um die Gefahr einer von diesen Stellen ausgehenden Rissbildung zu minimieren.

Bei der Auslegung der Hauptabmessungen sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen.

Generell wird eine Minimierung der Lagerdurchmesser angestrebt, da diese einen großen Einfluss auf die Motorreibung haben. Je kleiner die Lagerdurchmesser bei definiertem Hubradius sind, desto geringer ist die s. g. Zapfenüberschneidung, die für den Kraft- und Momentenfluss durch die Kurbelwelle bis zum Abtrieb wichtig ist. Eine geringe bzw. fehlende Zapfenüberschneidung kann in gewissem Maß durch eine gut ausgelegte Kurbelwangenstruktur kompensiert werden. In axialer Richtung ist dies jedoch nur eingeschränkt möglich, da eine Verstärkung der Wangen (bei definiertem Zylinderabstand) automatisch eine Reduzierung der Lagerbreiten zur Folge hat.

Moderne Lager lassen immer höhere spezifische Lagerlasten und kleinere Ölfilmdicken zu. Sie funktionieren nur in Kombination mit sehr guten Oberflächenqualitäten, sowohl hinsichtlich der Rauigkeiten als auch der Form (Rundheit, Geradheit, Welligkeit, etc.). Daher werden die Lagerzapfen geschliffen oder durch weiterführende Fertigungsverfahren, wie Polieren, optimiert.

Die Masse der Kurbelwelle lässt sich insbesondere durch ein Hohlbohren oder Hohlgießen der Hubzapfen reduzieren. Diese Maßnahme wirkt sich mehrfach aus, da zum Erreichen des gleichen Ausgleichsgrads ebenfalls die Gegengewichte verkleinert werden können. Diese Maßnahme ist mit Zusatzaufwand in der Fertigung verbunden, wird jedoch in Hinblick auf weitere Verbesserungen hinsichtlich des Gewichts und der Reibung in Zukunft sicher weitere Verbreitung finden.

Die Lagerung der Kurbelwelle im Kurbelgehäuse sowie die Lagerung der Pleuel auf dem Kur-

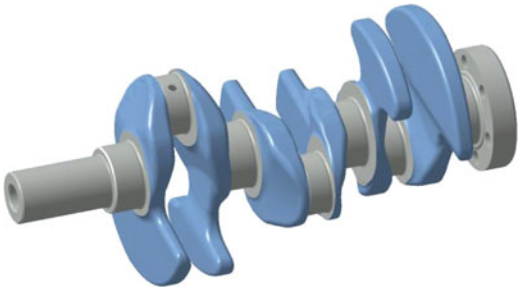


**Abb. 5.15** Kurbelwelle (3-Zyl. Motor)

belzapfen wird üblicherweise durch hydrodynamische Gleitlager (Mehrschichtlager) ausgeführt [8]. Die Auslegung der Lager erfolgt unter Anwendung moderner Berechnungsverfahren [13]. Bemühungen zur weiteren Minderung der Triebwerkreibung unter Anwendung von Wälzlagern sind vereinzelt veröffentlicht worden [14], befinden sich aber noch im Stadium der Vorausentwicklung.

### 5.1.4.3 Pleuel

Pleuelstangen werden üblicherweise als Schmiedeteil aus Kohlenstoff- oder Vergütungsstahl, als Schmiede-Sinter-Teil oder im Temperguss z. B. aus GTS-70 hergestellt (Abb. 5.16). Der Rohling ist meist einteilig ausgeführt, die Trennung von Pleuelober- und -unterteil erfolgt erst bei der mechanischen Bearbeitung. Die Trennebene verläuft vorzugsweise horizontal, je nach Bauraum- und Montagerandbedingungen auch schräg. Durch den Einsatz geeigneter Werkstoffe mit geringer Duktilität lässt sich die Trennung mittels Bruchtechnik („Cracken") durchführen. In der Bruchfläche ergibt sich eine passgenaue Oberflächenstruktur, wodurch auf die sonst notwendigen Positionierelemente wie Passstifte, -hülsen, -schrauben oder Sägezahnprofile in der Trennfläche und auf den Aufwand für die mechanische Bearbeitung der Trennfläche verzichtet werden kann. Bei sehr hoch belasteten Pleueln wird das Bruchtrennverfahren wegen der hohen Duktilität der eingesetzten hochfesten Werkstoffe dagegen nicht eingesetzt.

Der Pleuelschaft wird üblicherweise als querliegendes, gut schmiedbares I-Profil gestaltet. Sein Querschnitt muss so dimensioniert sein, dass bei

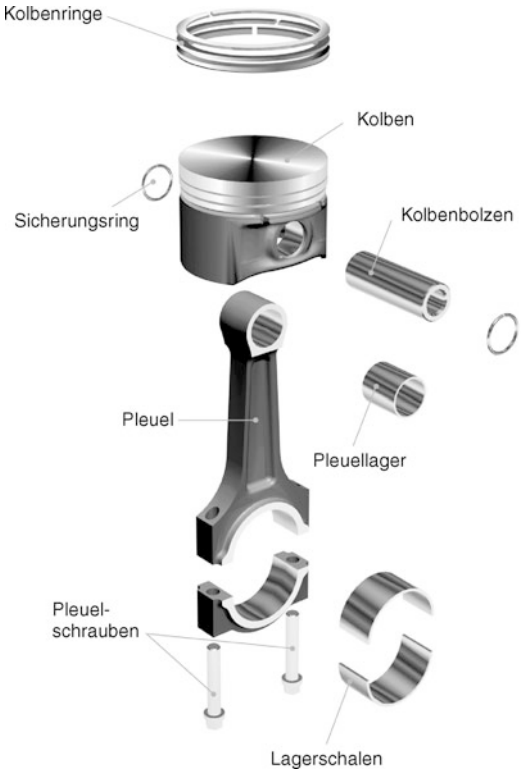



**Abb. 5.16** Kolben-Pleuel-Komponenten

den höchsten anzunehmenden Belastungen kein Knicken auftritt.

Wegen des Einflusses auf Massenkräfte und Reibleistung wird grundsätzlich ein möglichst geringes Pleuelgewicht angestrebt. Dies begründet eine Tendenz zu spezifisch hoch belastbaren Werkstoffen. Zur weiteren Gewichtsreduzierung dient das sogenannte Trapezpleuel, bei dem das kleine Pleuelauge am oberen Pleuelende schmaler ausgeführt ist. Insbesondere ermöglicht das Trapezpleuel auch eine günstigere Gestaltung der Kolbenunterseite, die nochmals zu einer deutlichen Reduzierung der oszillierenden Massen führt beziehungsweise eine höhere Kolbenbelastung durch Gasdruck zulässt.

Kann eine ausreichende Genauigkeit der Rohteilkontur nicht sichergestellt werden, werden bei besonderen Anforderungen an das NVH-Verhalten die Pleuel nach Gewicht klassiert und nur eine Gewichtsklasse je Motor verbaut.

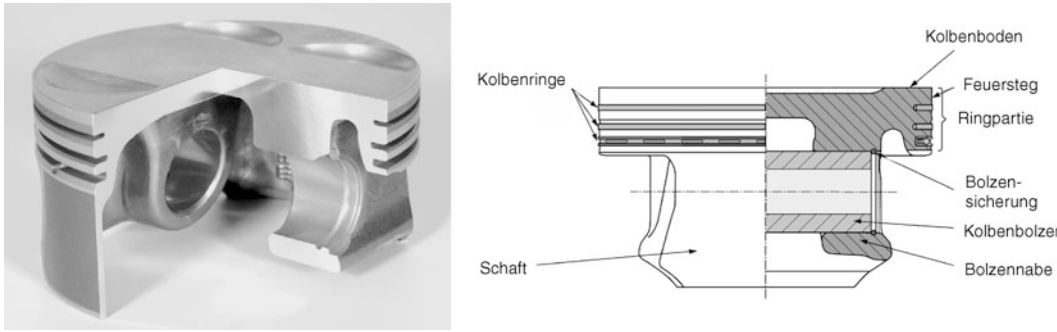



**Abb. 5.17** Leichtbaukolben Ottomotor (Beispiel MAHLE)

### 5.1.4.4 Kolben

Da die Kolbenmasse direkt in die oszillierende Massenkraft eingeht, bemüht man sich um ausgeprägten Leichtbau (Abb. 5.17). Kolben für Pkw-Motoren werden überwiegend in Kokillenguss, bei höherer Belastung und geeigneter Form auch in Druckguss aus speziellen Aluminiumlegierungen hergestellt [8, 15]. Das Material muss besonders warmfest sein, geringe Verschleißneigung aufweisen und hohe Wärmeleitfähigkeit haben sowie gut vergießbar bzw. pressbar sein. Nach der Ausformung folgt eine Wärmebehandlung (Vergütung), die die Festigkeit und Härte sowie die Formstabilität im Betrieb erhöht.

In Nutzfahrzeug- und vereinzelt in Pkw-Dieselmotoren werden daneben auch geschmiedete und gebaute Stahlkolben eingesetzt. Bei höheren Herstellkosten bieten diese eine gesteigerte Standfestigkeit gegenüber mechanischen und thermischen Belastungen. Stahlkolben haben im Vergleich zu Aluminiumkolben eine deutlich verringerte Bauhöhe, die sich vorteilhaft auf die Kurbeltriebskinematik auswirkt und die höhere Werkstoffdichte kompensiert. Die Wärmeausdehnung des Stahlkolbens ist geringer als diejenige von Aluminium, so dass ein deutlich kleineres Kaltspiel zwischen Kolben und Zylinderrohr vorgehalten werden kann. In Kombination mit Grauguss-Kurbelgehäusen oder -Zylinderrohren, die eine ähnliche Wärmeausdehnung aufweisen, ergibt sich ein über dem gesamten Temperaturbereich verringertes Laufspiel, das zu einem verminderten Geräusch beim Anlagewechsel des Kolbens führt. Beim Einsatz in Verbindung mit Vollaluminium-Zylinderblöcken verringert das resultierende, vergrößerte Laufspiel im warmen Motor die Kolbenreibung.

Zur Verbesserung des Einlaufverhaltens und als Sicherheit gegen Fressen werden Kolben an der Lauffläche (Kolbenschaft) mit einer widerstandsfähigen Gleitschicht beschichtet. Für Zylinderrohre aus Gusseisen wird eine Polymermatrix mit eingebetteten Graphitpartikeln verwendet, während bei Aluminiumzylindern Schaftbeschichtungen mit Eisen- oder Stahlanteilen eingesetzt werden.

Hochbelastete Kolben werden üblicherweise von unten mit einem gerichteten Ölstrahl gekühlt, wobei die Kühlwirkung durch einen umlaufenden Kühlkanal im Hinterland der Kolbenringe weiter gesteigert werden kann.

### 5.1.4.5 Zylinderkopf und Dichtung

Zylinderköpfe moderner Ottomotoren werden üblicherweise in Aluminiumlegierung AlSixx hergestellt. Dabei erfordert die immer weiter steigende spezifische Leistung heutzutage sehr hochwertigere Legierungen hinsichtlich hoher Belastbarkeit, guter Wärmeabfuhr und Gießbarkeit. Eine derzeit häufig genutzte, hochwertige Aluminiumlegierung, die auch den Kostenansprüchen noch genügt, ist AlSi7Mg, die auch A356 genannt wird. Für konstruktive Verbesserungen z. B. der thermischen Randbedingungen (kürzere Warmlaufphase beim Kaltstart, reduzierte Abgastemperatur und demzufolge geringere Notwendigkeit der Gemischanfettung zum Bauteilschutz) werden bei modernen Zylinderköpfen immer häufiger die Abgaskrümmer in den Zylinderkopf integriert (Abb. 5.18). Dies er-

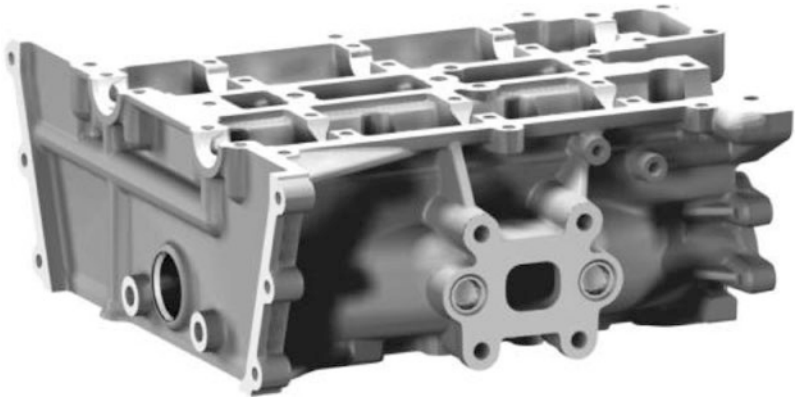


**Abb. 5.18** Ford 3-Zylinder Zylinderkopf mit integriertem Abgaskrümmer. Quelle: [32]

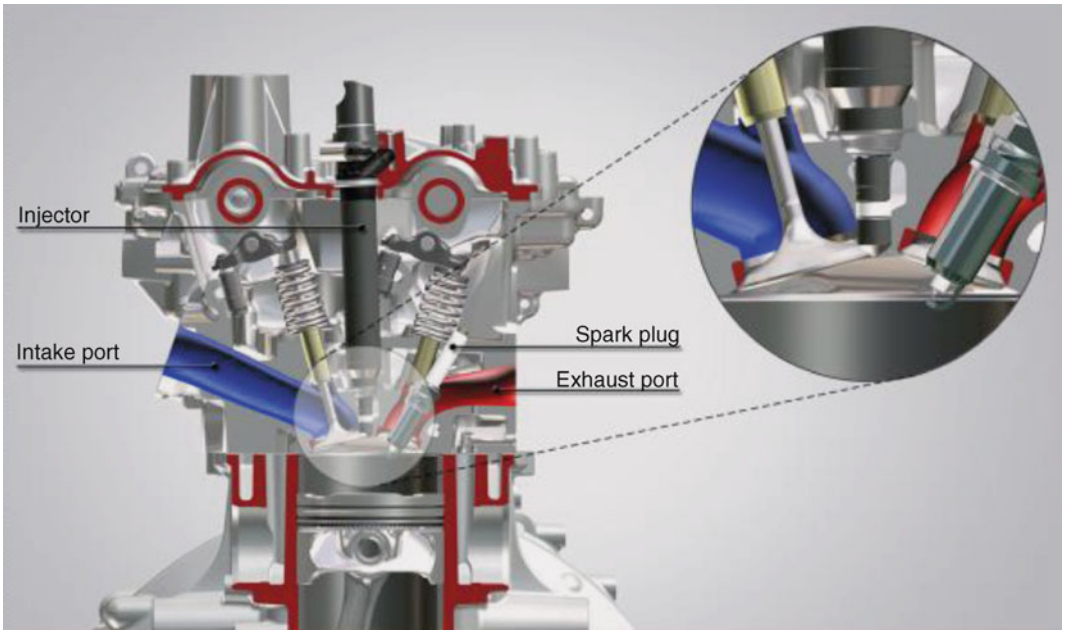



**Abb. 5.19** Mercedes Benz 4-Ventil-Brennraum mit zentralem Piezo-Injektor. Quelle: [33]

fordert meist einen zweiteiligen Wassermantel und eine ebenfalls angepasste Gießtechnik. Die Kühlungsanforderungen hinsichtlich Wasserraumgestaltung, insbesondere im Bereich der Zündkerze, des Injektors (DI-Motoren) und der Auslassventile (Abb. 5.19), verlangen oft sehr enge und schmale Wasserführungen, die beim Gießprozess nicht mit dem Gießkern (Sandkern) versintern dürfen. Wegen der komplexen Geometrie der Ein- und Auslasskanäle, des Kühlwassermantels und des Ölkerns

im Bereich des Ventiltriebs fertigt man moderne Zylinderköpfe für den Automobilen Bereich oft im Niederdruck-Kokillen-Gießverfahren. Andere, spezielle Gießverfahren (wie z. B. Schwerkraft-Kokillenguss, Lost-Foam, Schwenkguss oder Kern-Paket-Sandguss) kommen mittlerweile auch häufiger zum Einsatz. Das Material muss gut vergießbar sein und darf keine Materialfehler wie z. B. Porositäten oder Lunker aufweisen. Hochbeanspruchte Zylinderköpfe werden zur Homogenisierung und Steigerung der Warmfestigkeit des Materials nach dem Gießen noch wärmebehandelt.

Die Zylinderkopfdichtung stellt ein wesentliches Konstruktionselement dar, welches den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich Dauerhaltbarkeit und steigender Verbrennungsdrücke (insbesondere bei aufgeladenen Dieselmotoren) gewachsen sein muss. Moderne Zylinderkopfdichtungen sind als Mehrlagenstahldichtungen ausgeführt, deren Bereich um den Brennraum mit Sicken versehen ist. Eine als Stopper bezeichnete Gestaltung der Dichtung limitiert die Zusammenpressung dieser Sicken und erhöht somit die Lebensdauer des Dichtsystems [16, 17].

### 5.1.4.6 Ventiltrieb und Steuertrieb

#### 5.1.4.6.1 Hauptbauteile des Ventiltriebs

Der Ventiltrieb besteht aus den Ein- und Auslassventilen, den sie schließenden Ventilfedern, dem Nockentrieb und den Übertragungsgliedern.

**Ventile** Auslassventile werden, zumindest im Ventilteller-Bereich, aus hochwarmfestem und zunderbeständigem Stahl (z. B. NiCr20TiAl, Nimonic) gefertigt. Der Ventilschaft ist aus weniger hoch legiertem Stahl und wird durch Reibschweißen verbunden. Im Ventilsitzbereich sind die Ventilteller entweder mit einem verschleißfesten Material plasmabeschichtet oder gehärtet. Das Temperaturniveau für Auslassventile liegt in einem Bereich von ca. 700–800 °C. Die Auslassventile von Hochleistungsmotoren werden auch mit einem bis in den Ventilteller hineinreichenden Hohlraum, welcher teilweise mit Natrium gefüllt ist, ausgeführt. Durch die schnelle Bewegung des Ventils sorgt das flüssige Natrium (Schmelzpunkt = 97 °C) im Hohlraum für den verbesserten Transport der Wärme vom heißen Ventilteller zum Schaft, von wo sie über die Ventilführung abgeleitet wird.

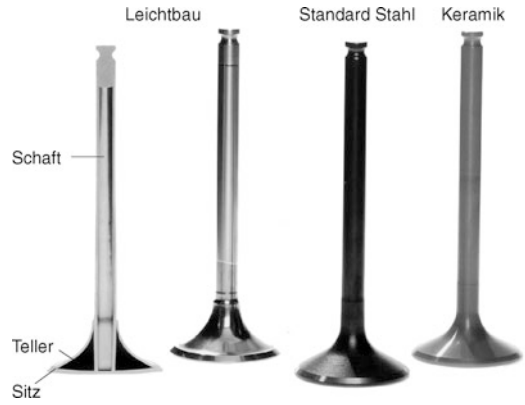



**Abb. 5.20** Ventile aus unterschiedlichen Materialien (Beispiel MAHLE)

Hierdurch ist eine Absenkung der Temperatur im Ventiltellerbereich um bis zu 130 °C möglich. Einlassventile sind auf Grund der niedrigeren Temperaturbelastung (ca. 500–580 °C) in der Regel aus weniger hochlegiertem Stahl wie beispielsweise X45 gefertigt. Deshalb bestehen sie überwiegend aus einem Material, man spricht hierbei auch von monometall Ventilen. Da die Ventilmasse direkt in die Ventiltriebskräfte eingeht und auch die notwendige Ventilfedersteifigkeit maßgeblich beeinflusst, werden möglichst leichte Ventile angestrebt. Eine in der Erprobung befindliche Leichtbauvariante eines Ventils ist in Abb. 5.20 gezeigt. Der Ventilschaft ist aus einem Stahlrohr, der Ventilteller aus umgeformtem Blech hergestellt. Gewichtsreduzierungen von 30 bis 40 % sind das Ziel. Alternativ wird auch an Ventilen aus Titan-Werkstoff gearbeitet.

Auch mit Keramik als Ventilwerkstoff können Gewichtsreduzierungen auf weniger als die Hälfte im Vergleich zum Standardventil erreicht werden. Sie konnten sich aber insbesondere wegen offener Fragen zur Sicherstellung einer gleich bleibend guten Qualität und nicht konkurrenzfähiger Herstellkosten in der Großserie bisher nicht durchsetzen.

**Nockenwellen** Nockenwellen verlangen eine harte, ermüdungs- und verschleißfeste Nockenoberfläche. Hierzu kommen Stahlwerkstoffe (Einsatzstahl, Nitrierstahl) oder Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgrafit, z. B. GGG60 zum Einsatz. Die Nockenoberfläche wird mittels Wolfram-Inertgas-Umschmelzverfahren (WIG) oder induktiv auf die



**Abb. 5.21** Nockenwelle mit Wälzlagerung Hochdruckpumpennocken und Geberrad (FEV)

erforderliche Härte gebracht. Auch das Schalenhartgussverfahren (Croning) wird angewandt. Zur Gewichtsreduzierung werden die Wellen auch hohl gegossen oder nachträglich gebohrt.

Neuere Varianten bestehen aus einer Verbundkonstruktion, bei der Nocken, Lager, Antriebsräder, Abstandshülsen und sonst noch erforderliche Teile als Einzelteile (kostengünstig) hergestellt und auf ein Tragrohr in Position aufgeschoben werden. Die feste Verbindung der Elemente zum Tragrohr erfolgt entweder über einen Schrumpfsitz, mit einem Lötverfahren oder durch mechanische Aufweitung von innen oder durch hydraulisches Innenhochdruck-Umformen des Tragrohres (Abb. 5.21). Ziel ist dabei, dass keine weitere Endbearbeitung notwendig ist. Gelegentlich wird noch ein letzter Schliff für die Nockenkontur vorgenommen. Vorteile sind die Freiheit der Materialauswahl für die einzelnen Teile und deutliche Gewichtseinsparungen, die durch den Einsatz eines Rohres anstelle von Vollmaterial erreicht werden.

Das entscheidende Kriterium zur Auswahl der Nockenwellenbauart für einen Motor ist die hertzsche Pressung, die an den Nocken zur Betätigung des Ventiltriebs anliegt sowie die zur Sicherstellung der Verschleißfestigkeit erforderliche Härte.

Im Allgemeinen gelten folgende Größenordnungen:

- Schalenhartguss bis ca. 1200 N/mm$^2$,
- Gusseisen bis ca. 1500 N/mm$^2$,
- Stahl ca. 1500–2000 N/mm$^2$.

Sind in der Vergangenheit nahezu ausschließlich Nockenwellen mit Gleitlager zur Anwendung gebracht worden, so geht für dieses Bauteil verstärkt der Trend in Richtung Wälzlagerung, zum Zwecke der Reibungsoptimierung. Verschiedene Automobil- und Motorenentwickler haben bereits oder sind kurz davor wälzgelagerte Nockenwellen in die Serienfertigung einzuführen.

Die Antriebsarten des Ventiltriebes sind in ► Abschn. 5.1.4.6.2 beschrieben.

Für Ventiltriebsteile, die aufgrund ihrer Formgebung aufwändig zu bearbeiten wären oder die besondere Legierungen erfordern, werden bevorzugt Sintermetalle eingesetzt. Ölpumpen-, Ketten- und Zahnriemenräder sind „Fertigteile“, die keiner mechanischen Nachbearbeitung mehr bedürfen. Ventil-Schlepp- oder Kipphebel sind weitere Formteile, die nur noch geringe Bearbeitung oder Nacharbeit erfordern. Sie werden sowohl gesintert als auch durch Blechumformung gefertigt. Ventilsitzringe erfordern spezielle warmfeste Legierungen, damit die Ventile sich über die Betriebsdauer nicht „setzen“. Ventilführungen werden aus vorteilhaften und verschleißarmen Legierungen hergestellt.

### 5.1.4.6.2 Bauformen des Ventiltriebs

In Abb. 5.22 sind die gebräuchlichsten Konstruktionen für Ventiltriebe sowie ein typisches Steuerdiagramm mit den zugehörigen Ventilgeschwindigkeiten und -beschleunigungen gezeigt. Im Kraftfahrzeugmotorenbau werden heute generell „hängende“ Ventile eingesetzt, was dem englischen Sprachgebrauch entlehnend mit „overhead valves“ (OHV) bezeichnet wird. Ebenso hat sich die oben liegende Anordnung der Nockenwelle(n) durchgesetzt; die gebräuchlichen Bezeichnungen hierfür lauten „overhead camshaft“ (OHC) bzw. bei zwei oben liegenden Nockenwellen „double overhead camshaft“ (DOHC). Wesentlicher Vorteil dieser Bauformen ist die Tatsache, dass die geringeren bewegten Massen höhere Motordrehzahlen gestatten als dies mit der früher bevorzugten Bauform der im Kurbelgehäuse untergebrachten „unten liegen-

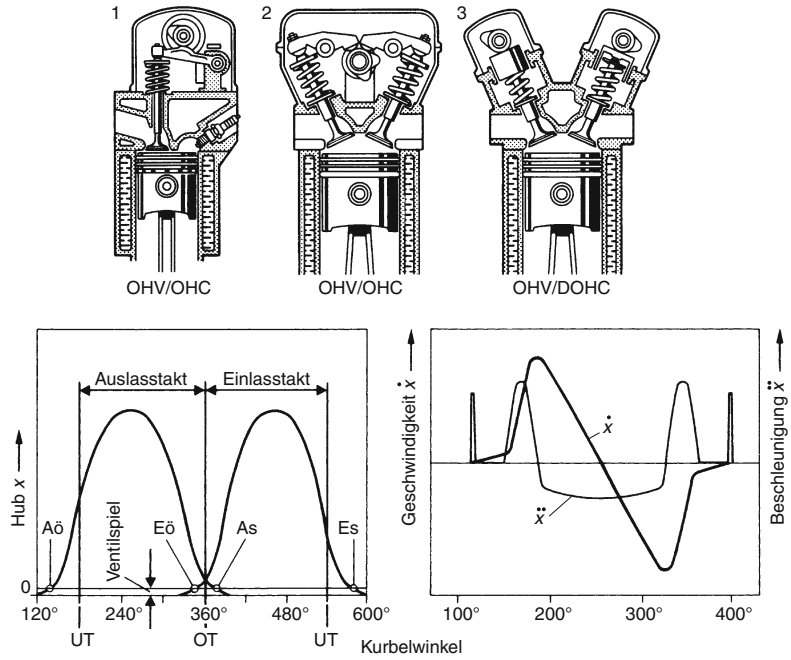



**Abb. 5.22** Ventilsteuerungsbauarten mit Steuerdiagramm, Ventilgeschwindigkeit und -beschleunigung

den" Nockenwelle mit Stoßstangenübertragung auf die im Zylinderkopf befindlichen Kipphebel möglich war.

Neben der möglichen Motordrehzahl definiert der Ventilquerschnitt über die Zylinderfüllung die erzielbare Leistungsdichte des Motors. Dies erklärt den anhaltenden Trend zu Mehrventilmotoren, welcher ausgehend vom klassischen Zweiventilkonzept Anordnungen mit 3, 4 und 5 Ventilen pro Zylinder und mit einer oder zwei (getrennt für Einlass- und Auslassventile) Nockenwellen hervorgebracht hat. Bei ungeraden Zahlen ist immer ein Einlassventil mehr vorhanden als Auslassventile.

Die Bewegung der Ventile wird von der Nockenwelle ausgelöst und über Schlepp- oder Schwinghebel, Kipphebel oder Tassenstößel auf den Ventilschaft übertragen. Die Übertragungsglieder (z. B. Rollenschlepphebel) nehmen in ihren Lagerungen die Kräfte auf, die sich aus der Gleitbewegung des Nockens, den Ventilfederkräften und den Massenträgheiten ergeben. Der Ventilschaft sollte nur möglichst geringe Seitenkräfte aufnehmen müssen; diesbezüglich weist die Ausführung mit Tassenstößeln ideale Bedingungen auf, da diese in einem Schiebesitz in Ventilachsrichtung geführt sind.

Die Auslegung der Steuernockenkontur erfolgt unter Berücksichtigung der zulässigen Hertz'schen Pressung im Nockenkontakt sowie des Beschleunigungsverlaufs auf der Anlauframpe und auf der Ablauframpe bis zum Ventilaufsetzen im Interesse maximaler Fülligkeit des Ventilhubes, d. h. möglichst langes Offenhalten bei großem Ventilhub. Es werden „harmonische" Nocken ausgelegt, bei denen die Beschleunigung des Ventils stetig, d. h. ohne Kraftsprünge verläuft. Beim Ventiltrieb mit Rollenkontakt sind konkave Nockenflanken erforderlich, um einen harmonischen Ventilhub zu erreichen. Das Schleifen solcher Hohlnocken erfolgt mit speziellen Band- und Scheibenschleifmaschinen.

In der Kontaktkette vom Nocken bis zum Ventil muss immer Kraftschluss bestehen. Dies wird einerseits durch entsprechend geringe Massen angestrebt und andererseits durch ausreichend bemessene Steifigkeit der Ventilfedern sichergestellt. Wegen der hohen Flächenpressung im Nockenkontakt, wie zuvor erwähnt, sind besondere Werkstoffbehandlungen oder Oberflächenbeschichtungen auf

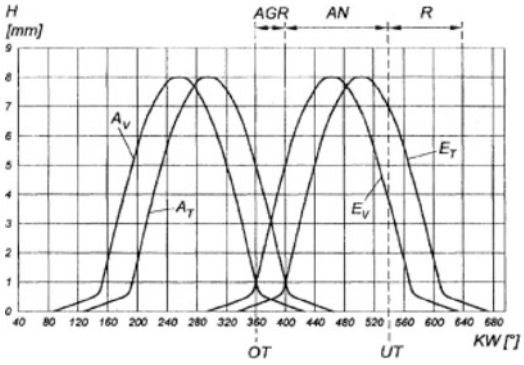



**Abb. 5.23** Ventilüberschneidung. Patent EP 1251254A2

dem Nocken und der Gegenfläche erforderlich, die gleichzeitig in ihrer Paarung günstige Reibeigenschaften aufweisen sollen. Trotz aller Vorkehrungen kommt es bei der Gleitbewegung auf dem Hebel oder Tassenstößel zu beträchtlichen Reibmomenten. Moderne Motoren nutzen deshalb zunehmend Schlepphebel, die an der Nocken-Kontaktstelle nadelgelagerte Rollen haben (Rollenschlepphebel „RSH"). Damit kann die Reibleistung beträchtlich reduziert werden. Bei kleinen Drehzahlen geht der Reibmitteldruck des gesamten RSH-Ventiltrieb bis auf $\frac{1}{3}$ des Wertes für Gleitabgriff mit Tassenstößel (TS) zurück (Abb. 5.24). Bei hohen Drehzahlen liegen am Gleitkontakt so gute hydrodynamische Schmierverhältnisse vor, dass ähnlich gute Reibmitteldrücke wie beim Rollenhebel erreicht werden. Da für den praktischen Fahrbetrieb aber die unteren Drehzahlbereiche von großem Einfluss sind, wirkt sich die Reibungsminderung der Rollenschlepphebel merklich auf den Kraftstoffverbrauch aus.

Zur Minderung des Wartungsaufwandes am Ventiltrieb sind Tassenstößel bzw. bei den Schlepp- oder Kipphebeln Widerlager hydraulisch wirkende Ausgleichselemente entwickelt worden. Diese Hydro-Elemente werden vom Motorölkreislauf gespeist und halten das Spiel zwischen Nockengrundkreis und Ventilschaft immer auf null. Ventilsetzen infolge von Einschlagen im Ventilsitzring und thermische Längenänderungen im Langzeit- und Kurzzeitbetrieb werden somit ständig ausgeglichen. Die damit erzielte Spielfreiheit des Ventiltriebs wirkt sich auch günstig auf die Ventiltriebgeräusche aus. Allerdings bewirkt dieser Ausgleich auch den dauernden Reibkontakt zwischen Stößel bzw. Hebel und Nockengrundkreis. Einige Hersteller gehen deshalb wieder vom hydraulischen Ventilspielausgleich ab, seitdem die Werkstoffe für die Ventilsitze besser langzeitwärmestabil sind und das eingestellte Ventilspiel sich auch über lange Betriebszeiten kaum verändert.

Die Nockenwellen werden über eine Kette (Einfach- oder Doppel-Rollenkette) oder einen Zahnriemen mit halber Kurbelwellendrehzahl angetrieben (4-Takt-Verfahren). Bei einem festen Nockentrieb (ohne Verstellung) laufen Kette oder Zahnriemen über ein oder beide Nockenwellenräder. Die Belastung des Übertragungsgliedes ist schwellend, da der Drehkraftverlauf an der Nockenwelle aus der Summierung der zyklischen Belastungen der einzelnen Nocken nicht konstant ist.

Die Ventile mit dem Ventiltrieb steuern im Zusammenwirken mit dem Ansaugtrakt und dem Abgassystem den Ladungswechsel des Motors. Dies ist ein hochdynamischer Vorgang, der von den Strömungsquerschnitten und -längen sowie den Öffnungscharakteristiken der Ventile beeinflusst wird. Die Füllung der Zylinder wird daher nur für einen eingeschränkten Drehzahlbereich optimal ausgelegt, wenn keine variablen Geometrien und Ventilsteuerzeiten verwirklicht sind.

Zur besseren Anpassung an unterschiedliche Drehzahlniveaus des Motors (Drehzahlspanne $< 1000$ 1/min bis $> 6000$ 1/min) dient die variable Verstellung der Einlassnockenwelle. Dabei wird die Ventilüberschneidung drehzahlabhängig so verändert, dass mit zunehmender Drehzahl das Einlassventil früher öffnet, während das Auslassventil noch geöffnet ist (Ventilüberschneidung, siehe Abb. 5.23). Ziel ist, sowohl bei kleineren als auch bei höheren Drehzahlen des Motors die Füllung und damit das Drehmoment des Motors zu steigern. Die praktische Grenze beim Ottomotor liegt jedoch darin, dass im Zusammenspiel von Füllung, Verdichtungsverhältnis und Zündung die Klopfgrenze des Motors das Drehmoment begrenzt.

Primäre Kriterien für die Auswahl des für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Antriebs-

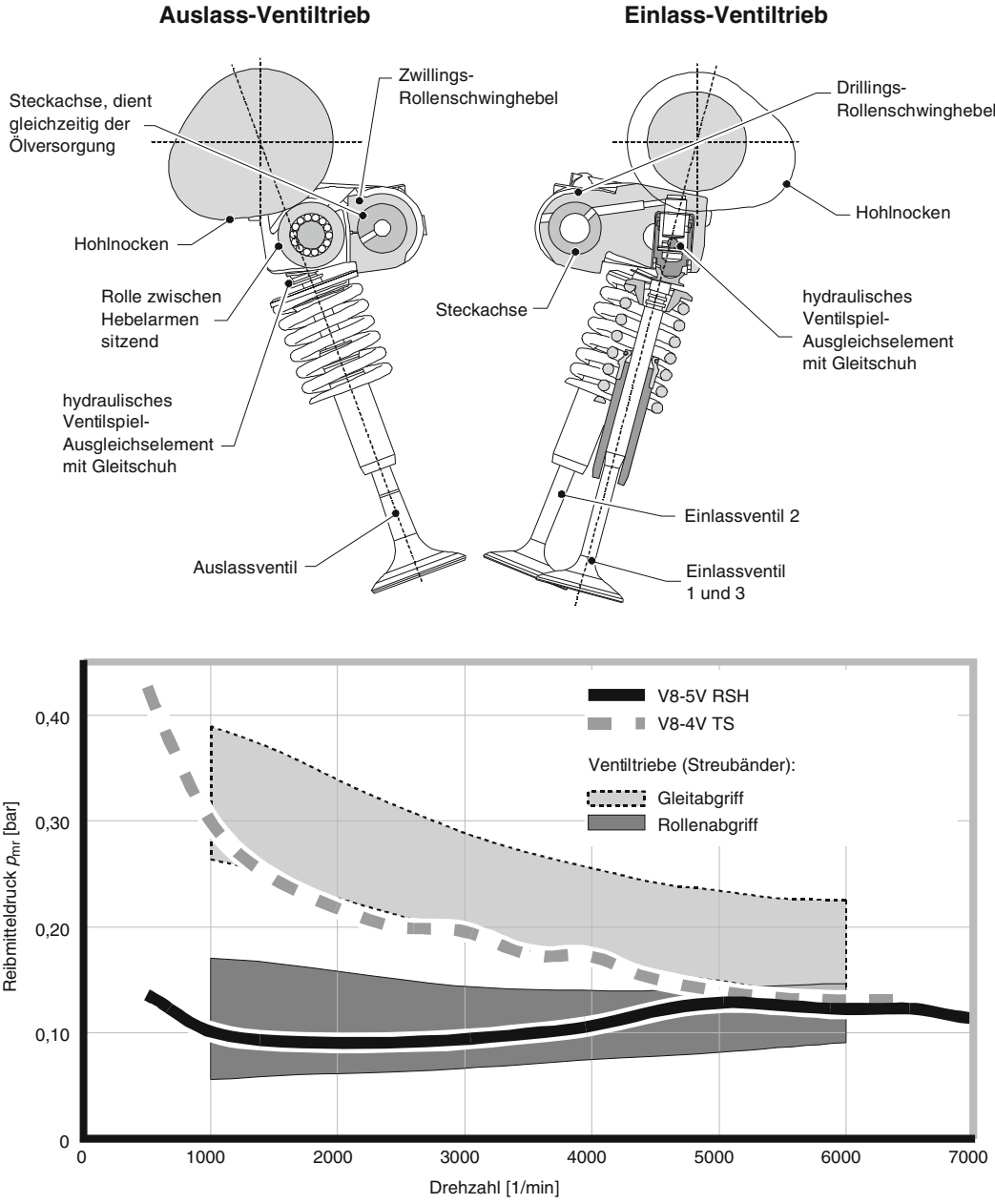



**Abb. 5.24** Ventiltrieb mit Rollenübertragung und Vergleich des Reibmitteldruckverlaufes beim Gleitabgriff (Beispiel Audi V8 mit Fünfventiltechnik)

konzeptes sind der Wartungsaufwand sowie die zu übertragenden Kräfte.

Herkömmliche Riementriebe haben selbst für direkteinspritzende Dieselmotoren, bei denen zusätzlich die Hochdruck-Einspritzpumpe vom Riemen angetrieben werden muss, ihre Tauglichkeit unter Beweis gestellt. Wegen der außenliegenden Anordnung sind sie jedoch wartungsintensiv, wes-

halb trotz höherer Systemkosten ein Trend zu Kettentrieben zu verzeichnen war.

Neuartige ölresistente Riemen, sogenannte „Belt in Oil" (BIO)-Riemen, die hingegen geschützt innerhalb des Motors angeordnet sind, werden genauso wie die Kettensysteme auf Wartungsfreiheit ausgelegt. Diese Eigenschaft führte in jüngster Zeit zu einem Revival des Riementriebs. Darüber hinaus haben die Nassriemen mit einer „Längung" von 0,1–0,2 % über die Lebensdauer durchaus Vorteile gegenüber einer Steuerkette.

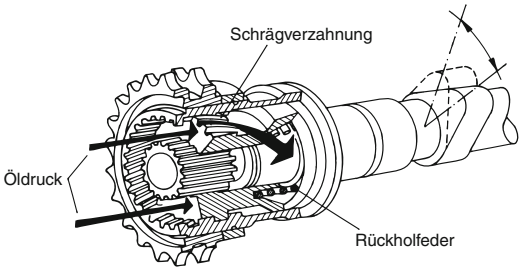



**Abb. 5.25** Nockenwellensteller

#### 5.1.4.6.3 Variable Ventilsteuerung

Neben den konventionellen Systemen mit fester Zuordnung von Ventilhub und Kurbelstellung des Motors setzen sich verstärkt Variabilitäten im Ventiltrieb durch. Hierbei wird eine betriebspunktabhängige Veränderung der zeitlichen Zuordnung der Ventilöffnung zur Kurbelstellung und auch des Ventilhubs verwirklicht. Inwieweit die dort beschriebenen Vorteile der variablen Ventilsteuerung in der Praxis nutzbar gemacht werden können hängt wesentlich davon ab, in welchem Ausmaß die gewählte konstruktive Umsetzung Variabilitäten hinsichtlich der Ventilsteuerzeiten und des Ventilhubes gestattet. Hinsichtlich der konstruktiven Umsetzung der variablen Ventilsteuerung sind eine Vielzahl von Konzepten vorgeschlagen und teilweise auch umgesetzt worden. Der nachfolgende Überblick über die wichtigsten Konzepte ist in nockenbetätigte und direkt betätigte Systeme unterteilt.

**Nockenbetätigte Systeme** Bei nockenbetätigten Systemen können durch entsprechende Eingriffe in die Kinematik des Ventiltriebs die Phasenlage der Ventilöffnung, die Öffnungsdauer und der Ventilhub in Grenzen variabel beeinflusst werden.

Die Variation der Steuerzeiten erfolgt üblicherweise mittels einer Verdrehung der Nockenwelle relativ zum Kurbeltrieb. Nockenwellensteller wurden erstmals von Alfa Romeo 1983 in Serie eingesetzt. Neben Zwei-Punkt-Stellern, die nur die Einstellung zweier definierter Positionen ermöglichen, kommen heutzutage hauptsächlich kontinuierlich wirkende Systeme zum Einsatz [18]. Die Funktion dieser Nockenwellensteller beruht beispielsweise auf einer hydraulisch verschiebbaren Schrägverzahnung (Abb. 5.25) oder auf dem umgekehrten Prinzip der Flügelzellenpumpe. Im 4,6 L V8 32 V DOHC Motor des Lexus 460 wurde unter der Bezeichnung VVT-iE erstmalig ein elektromotorisch betätigter Einlass-Nockenwellensteller eingesetzt. Heute in Serie produzierte Systeme realisieren Verdrehwinkel von bis zu 40° NW (entsprechend 80° Kurbelwinkel). Damit lassen sich die Steuerzeiten aller von der jeweiligen Nockenwelle gesteuerten Ventile in einheitlicher Richtung verschieben. Bei Motoren mit zwei obenliegenden Nockenwellen (DOHC) kann auf diese Weise sowohl die Größe als auch die Lage der Ventilüberschneidung beeinflusst werden. Wenn auch damit beträchtliche Verbesserungen des Teillast- und Volllast-Betriebsverhaltens erzielt werden können, so ist aufgrund des begrenzten Verstellbereiches sowie wegen der fehlenden Beeinflussung der Ventilöffnungsdauer eine drosselfreie Laststeuerung ohne weitere Systemveränderungen nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit liegt in schaltbaren Übertragungselementen zwischen Nockenprofil und Ventilstößel. Schaltbare Tassenstößel oder Abstützelemente ermöglichen die Abschaltung einzelner Ventile. Auch der alternierende Betrieb mit zwei unterschiedlichen Nockenprofilen ist realisiert worden, wobei die Nockenwelle je Ventil zwei unterschiedliche Nocken beziehungsweise Nockenpaare aufweist, welche konzentrische Teilflächen eines schaltbaren Tassenstößels betätigen. Damit sind eine teillast- und eine volllast-optimale Ventilerhebung darstellbar, was den ansonsten notwendigen Kompromiss hinsichtlich Steuerzeiten und Ventilhub entschärft. Ein Beispiel für diese Technologie ist der von Mitsubishi in Serie produzierte MIVEC-Motor, bei dem der Schaltmechanismus in die Kipp-

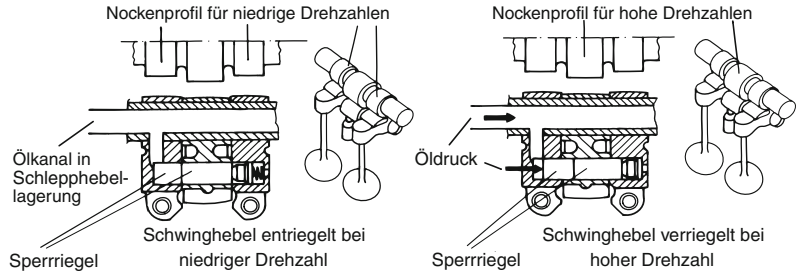



**Abb. 5.26** Schaltbarer Ventiltrieb (Honda VTEC)

hebel integriert ist. Damit wird eine Umschaltung zwischen einer Ventilhubkurve für niedrige und hohe Motordrehzahlen sowie eine völlige Deaktivierung einzelner Ventile zur Zylinderabschaltung realisiert. Abb. 5.26 zeigt eine ähnliche Lösung der Firma Honda, die unter dem Namen VTEC dieses System an diversen Motoren in Serie produziert. Unter der Bezeichnung VarioCam Plus setzt die Porsche AG diese Technologie in diversen Hochleistungsmotoren ein.

Das von Audi am 2,8 L V6 FSI Motor erstmals unter dem Namen AVS eingesetzte System schaltet ebenfalls zwischen zwei Ventilerhebungskurven. Auf den gewalzten Passverzahnungen der Nockenwelle sind Nockenstücke mit zwei unterschiedlichen Nockenprofilen verschiebbar geführt. In der Grundkreisphase bewirken hydraulisch betätigte Stifte in Kombination mit zwei im Nockenstück eingearbeiteten Verschiebenuten die Schaltung auf das jeweils andere Nockenprofil. Die Übertragung auf die Ventile mittels Rollenschlepphebeln sowie die Nockenwellenlagerung sind dabei prinzipiell vom konventionellen Ventiltrieb übernommen [19]. Das System wird am 2.0 L TFSI System auch auslassseitig eingesetzt, um eine Zündfolgetrennung zu gewährleisten, die ein bei maximaler Ventilüberschneidung durch den Vorauslassstoß des Nachbarzylinders verursachte Rückströmen von Abgas in das Saugsystem verhindert [26].

Neben den zwischen zwei Ventilerhebungskurven umschaltenden Systemen gibt es weitere Systeme, die einen variablen Ventilhub ermöglichen. Unter dem Namen MultiAir ist ein hydraulisches System in verschiedenen Motoren von FIAT und Alfa Romeo in Serienproduktion [27]. Das System basiert auf dem Lost-Motion Prinzip, bei dem die

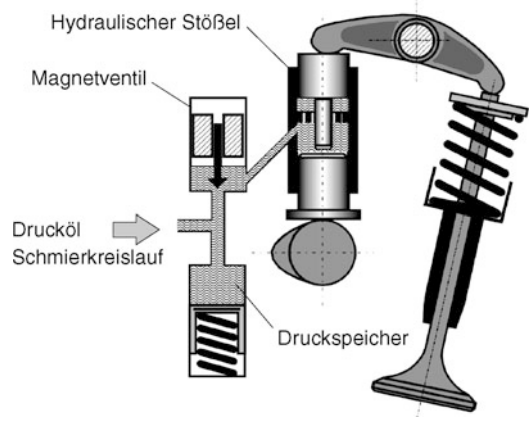



**Abb. 5.27** Hydraulische Ventilsteuerung

Nockenerhebung hydraulisch auf das Ventil übertragen wird, so dass das Schließen des Ventils vorzeitig durch Absteuern des Hydraulikdruckes ausgelöst wird (Abb. 5.27). Dadurch werden der Hub und die Schließzeit des Ventils vom Nockenhubverlauf entkoppelt. Zur Dämpfung der Ventilbewegung bei Annäherung an den Ventilsitz werden hydraulische Systeme eingesetzt. Die Variabilität der Ventilerhebung liegt prinzipbedingt innerhalb der Nockenkontur.

Zur kontinuierlichen Beeinflussung der Übersetzung zwischen Nockenerhebung und Ventilbewegung sind eine Vielzahl konstruktiver Lösungen vorgeschlagen worden. Viele dieser Konzepte arbeiten mit einem Schlepp- oder Kipphebel, dessen Position mittels Exzenter veränderlich ist. Je nach kinematischer Auslegung ist damit eine kombinierte Beeinflussung des Ventilhubes und der Ventilöffnungsdauer möglich (Abb. 5.28). Die aus den

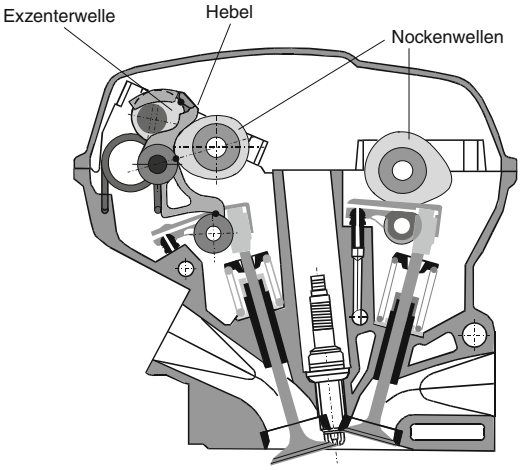



**Abb. 5.28** Mechanisch variable Ventilsteuerung (BMW Valvetronic [20])

zusätzlichen Ventiltriebskomponenten resultierende Zunahme der Reibarbeit wird im Teillastbereich infolge des verringerten Ventilhubes kompensiert, sodass hier sogar zusätzliche Vorteile zu verzeichnen sind [20]. In Kombination mit Nockenwellenstellern wird mit diesen Systemen ein hohes Maß an Variabilität erreicht.

Seit 2008 wird von Toyota die als Valvematic bezeichnete variable Ventilsteuerung in Serie produziert. Das System nutzt einen speziellen Ventilhebel zur kontinuierlichen Verstellung der Steuerzeiten und des Ventilhubes, der zwischen Nockenwelle und konventionellem Ventilhebel angeordnet ist. Ein elektrischer Aktuator steuert Ventilhub und Öffnungsdauer, wobei zusätzlich ein- und auslassseitig hydraulisch kontinuierlich verstellbare Nockenphasensteller verwendet werden [28].

Eine weitere Steigerung der Variabilität folgt aus der Realisierung der Ventilbewegung mittels zweier Nockenwellen, wobei eine für die Ventilöffnung und die andere für das Schließen genutzt wird. Die Nockenerhebungen beider Wellen werden über einen Hebelmechanismus mechanisch zueinander addiert. Bei unabhängiger Verdrehung beider Nockenwellen lässt sich damit sowohl der Öffnungs- als auch der Schließzeitpunkt beeinflussen [21]. Mit dieser Lösung wird eine weitgehende Entkoppelung der Steuerung von Ventilhub und Öffnungsdauer erreicht, was sich positiv auf die Einsparung an Ladungswechselverlusten auswirkt.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Variabilität nockengesteuerter Ventiltriebe liegt in konstruktiven Konzepten, die direkten Einfluss auf die Nockenerhebung nehmen. Aus dem Großmotorenbau sind axial verschiebbare Nocken mit Raumprofil bekannt. Für Pkw-Motoren sind Systeme mit zweischalig aufgebauten Nockenwellen ausgeführt worden, die mittels mechanischen Eingriffs eine Verdrehung einzelner Nocken auf der Welle zulassen [22].

**Direkt betätigte Systeme** Für die direkte Betätigung der Ventile kommen im Wesentlichen hydraulische und elektromagnetische Systeme in Betracht. Die hydraulischen Konzepte arbeiten mit in einem Hydrauliksystem gespeicherter Energie. Die Ventilbetätigung wird über schnelle Magnetventile und Hydraulikzylinder ausgelöst. Die Ventilbewegung ist sowohl hinsichtlich der Steuerzeiten als auch des Ventilhubes variabel. Ebenso ist die individuelle Ansteuerung einzelner Ventile möglich. Die bekannt gewordenen Ausführungen weisen jedoch eine begrenzte Dynamik auf, was dem Einsatz bei höheren Drehzahlen entgegensteht.

Bei der Betätigung der Gaswechselventile mit magnetischer Kraft ist es besonders vorteilhaft, wenn die Bewegung der Ventile durch Federkräfte vorgenommen und die magnetische Kraft nur zur Initiierung und Unterstützung des Öffnens und Schließens genutzt wird. Auf diese Weise kann ein großer Teil der zur Ventilbetätigung üblicherweise aufzuwendenden Energie eingespart werden. In dieser Kombination spricht man von einer elektromechanischen Ventilsteuerung (EMV). Abb. 5.29 zeigt den schematischen Aufbau eines auf diesem Prinzip beruhenden Ventiltriebes. Das Ventil wird von einem Stößel betätigt, welcher mit einem Anker verbunden ist. Dieser Anker bildet in Kombination mit zwei Federn einen Feder-Masse-Schwinger, dessen Totpunktlagen der geschlossenen und voll geöffneten Position des Ventils entsprechen. Die Eigenfrequenz des Schwingers bestimmt maßgeblich die Zeit für das Öffnen und Schließen des Ventils. Mithilfe der beiden Elektromagneten kann nun die oszillierende Bewegung der Ventile in den Tot-

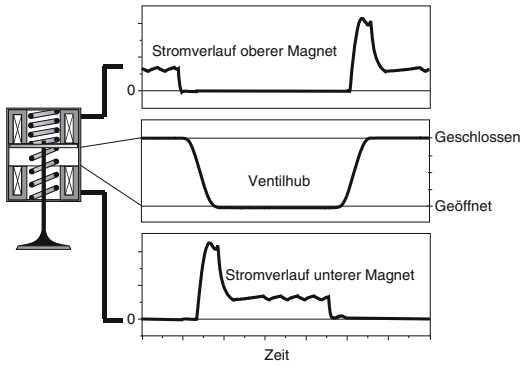



**Abb. 5.29** Elektromechanischer Ventiltrieb

punktlagen unterbrochen werden. Ohne Erregung der beiden Elektromagneten schwingt das System reibungsbedingt aus und verharrt in der Ruhelage, welche dem halben Ventilhub entspricht. Vor Inbetriebnahme des Motors muss das System deshalb zum Beispiel durch wechselweises Erregen der beiden Magneten in Eigenfrequenz angeschwungen werden, bis der Schließmagnet das Ventil in der geschlossenen Position einfängt.

Der Ablauf der Ventilsteuerung ist aus den im Bild gezeigten typischen Stromverläufen erkennbar. Ausgehend von der geschlossenen Position wird die Erregung des Schließmagneten mit Haltestrom unterbrochen. Die in der oberen Feder gespeicherte Energie bewegt das Ventil bis der Schwinger seine untere Totpunktlage erreicht. In dieser Stellung wird die Schwingung durch Zuschalten des Stroms für den unteren Magneten wieder unterbrochen. Die bei der Ventilbewegung auftretenden Reibungsverluste werden durch eine kurzzeitig erhöhte Bestromung des unteren Magneten kompensiert. Dieser Fangstrom wird kurz vor Erreichen der Totpunktlage des Schwingers zugeschaltet. Das Schließen des Ventils ist ein unabhängiger Vorgang und wird in gleicher Weise vorgenommen, wobei jetzt die untere Feder die Bewegung auslöst und der obere Magnet aktiviert wird. In Verbindung mit einer Closed-Loop-Regelung des Aktuators kann die Annäherung des Ankers an die Polflächen der Magnete beziehungsweise das Aufsetzen des Ventils im Ventilsitz so gesteuert werden, dass einerseits keine akustischen oder sogar die mechanische Festigkeit beeinträchtigenden Probleme auftreten und andererseits auch keine unnötig hohen Stromstärken zum sicheren Öffnen und Schließen der Ventile aufgewendet werden müssen. Darüber hinaus gestattet diese Technologie auch ein nur teilweises Öffnen (Minihub) oder ein verzögertes Schließen der Ventile, was sich zur Intensivierung der Ladungsbewegung gezielt nutzen lässt.

Der elektrische Energiebedarf des elektromechanischen Ventiltriebs muss den mechanischen Verlusten eines konventionellen Ventiltriebes gegenübergestellt werden. Bei einem Generatorwirkungsgrad von 80 % ergibt sich für den elektromechanischen Ventiltrieb im Teillastbetrieb ein Energiebedarf, der dem Niveau reibungsarmer Ventiltriebe mit Rollenabgriff entspricht [23].

Die mit variabler Ventilsteuerung erreichbaren Verbrauchseinsparungen im europäischen Testzyklus hängen stark von der realisierten Variabilität ab. Für die elektromechanische Ventilsteuerung in Kombination mit Teillast-Zylinderabschaltung oder Aufladung besteht ein Potenzial von 18 %. Im Gegensatz zum Schichtbetrieb mit Benzindirekteinspritzung bestehen hier keine Beeinträchtigungen von Seiten der Abgasreinigung. Im Gegenteil bietet die variable Ventilsteuerung Möglichkeiten, die Kaltstartemissionen zu reduzieren und das Potenzial der Drei-Wege-Katalysatortechnik durch eine beschleunigte Aufheizung des Katalysators weiter auszuschöpfen.

### 5.1.4.7 Motorkühlung

Die Wandwärmeverluste beim realen Arbeitsprozess führen zur Aufheizung der Brennraumwände (Zylinderkopf, Kolben, Zylinder) und erfordern deren Kühlung, damit keine Bauteilüberhitzung, Schmierölverkokung und Leistungsverlust infolge von Füllungsverlust eintritt. Gut ausgelegte Kühlung und Schmierung sind Grundvoraussetzung für den optimalen Betrieb eines Motors, damit die Reibung aller bewegten Teile und die Betriebstemperatur in vorgegebenen akzeptablen Grenzen ablaufen.

Luftkühlung wird heute in Fahrzeugmotoren nur noch selten angewandt. Obwohl die Kühlfunktion der Luftkühlung immer weiter verbessert wurde durch strömungsgünstige Gestaltung und verfeinerte Gießtechniken für die Kühlrippen, und obwohl die Leistungsaufnahme und Geräuschentwicklung des Gebläses durch konstruktive Maß-

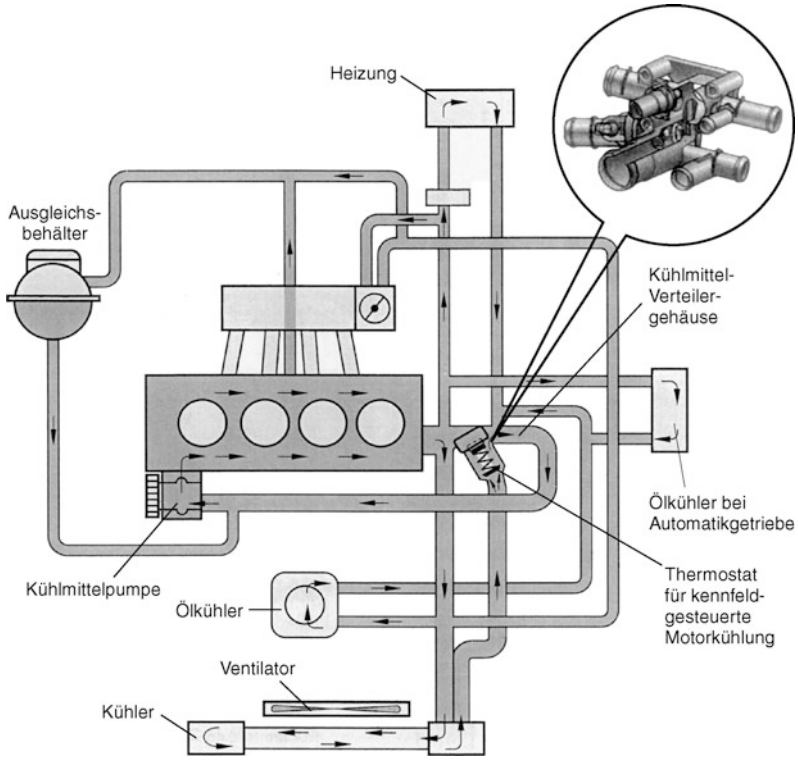



**Abb. 5.30** Kühlmittelkreislauf Flüssigkeitskühlung (Beispiel Volkswagen)

nahmen sehr weit herabgesenkt werden konnte, stößt die Luftkühlung bei höheren (spezifischen) Leistungen an praktische Grenzen. Der im Vergleich zur Wasserkühlung schlechtere Wärmeübergang und die geringere Wärmekapazität der Luft erfordern sehr große Kühlflächen, die durch Rippen geschaffen werden müssen. Selbst bei Motorrädern wird zunehmend auf Flüssigkeitskühlung umgestellt. Die Flüssigkeitskühlung bietet dagegen bessere Voraussetzungen für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung im Motor, und sie hat Vorteile für die Auslegung und Regelung der Fahrzeugheizung.

Die Flüssigkeitskühlung besteht in einem Motor-Fahrzeug-System in der Regel aus 2 oder 3 Kreisläufen, die automatisch per Thermostat und über die Steuerung der Fahrzeuginnenraumheizung gesteuert werden (Abb. 5.30; siehe auch ▶ Abschn. 3.3). Bei einigen Fahrzeugen sind auch noch Motorölkühler, Generator, Getriebeölkühler und Abgasturbolader in das Kühlsystem einbezogen.

Als Kühlmittel kommt ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel (meist Äthylenglykol) und, je nach Einsatzfall, spezifischen Inhibitoren (Korrosionsschutz) zum Einsatz. Das Kühlmittel nimmt die Wärme im Motor auf und transportiert sie in den Kühler, der die Wärme weiter an die durchströmende Umgebungsluft abgibt.

Das Kühlsystem des Motors muss sicherstellen, dass an den Stellen der größten Wärmebelastung, am Zylinderkopf mit den Auslasskanälen, ausreichend Wärme abgeführt wird. Andererseits sollen kühlere Stellen weniger intensiv gekühlt oder gar erwärmt werden, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil zu erreichen. In der Regel wird das Wasser in den Zylinderblock hineingefördert und strömt von dort über die gesamte Motorlänge verteilt in den Zylinderkopf und am anderen Motorende wieder hinaus. Die Durchströ-

mung des Zylinderkopfes wird mit den Durchflussquerschnitten in der Zylinderkopfdichtung gesteuert und mittels angepasster Strömungsführung gezielt zu den „Hotspots" geleitet. Wichtig ist, dass der Strömungsweg im Zylinderkopf keine Dampfblasenansammlungen zulässt, da diese zum Zusammenbruch der Wärmeabfuhr führen würden.

Auf der anderen Seite ist die Kühlung des Motors nur auf die notwendigen Bereiche zu beschränken. Aus diesem Grund ist der Wasserraum an den Zylinderwänden lediglich auf die obere Hälfte oder das obere Drittel des vom Kolben überstrichenen Weges im Zylinder beschränkt. Hiermit wird bezweckt, dass die Zylinderlaufflächen und der dort brennraumseitig vorhandene Schmierölfilm ideale Bedingungen hinsichtlich der Reibungsverluste aufweisen. Diese Bedingungen sollen gerade nach einem Kaltstart des Motors schnell erreicht werden. Da aber die Kühlmittelpumpe üblicherweise direkt mit dem Motorlauf über den Riementrieb gekoppelt ist, wird zunächst über einen Thermostaten ein kleiner Kühlkreislauf geschaltet, der den Kühler umgeht und so die aufzuheizende Wassermenge möglichst klein hält. Erst bei Erreichen der normalen Betriebstemperatur von ca. 80 bis 90 °C öffnet der Thermostat gleitend den Kreislauf durch den Kühler. Übliche Temperaturunterschiede zwischen Kühlereintritt und -Austritt betragen ca. 10 K. Dieser geringe Unterschied hilft zum einen, die Stirnfläche des Kühlers so klein wie möglich zu halten, zum anderen ermöglicht nahezu konstante Randbedingungen im Motor zwischen allen Zylindern zu behalten. Das ist besonders wichtig, weil an den meist belasteten Stellen Blasensieden erwünscht ist, um die höchstmögliche Wärmeübertragung in das Kühlmittel zu ermöglichen. Wäre der Temperaturunterschied zu groß, würde Blasensieden nur schwer erreicht und die Gefahr, Filmsieden zu entstehen, wobei die Wärmeübertragung drastisch senkt, zu groß.

In modernen Motoren wird der Kühlmittelfluss nicht nur im Start, sondern auch im Warmbetrieb der Motorlast angepasst. Dies wird mit einem elektronisch geregelten Kühlsystem erreicht (siehe ◘ Abb. 5.30). Der Thermostat wird nicht allein von der vorherrschenden Wassertemperatur gesteuert, sondern ist noch überlagert von einer kennfeldgesteuerten elektronischen Regelung. Diese Regelung bewirkt, dass die für Teillast auf 95 bis 110 °C eingestellte Kühlmitteltemperatur erst bei höheren Lasten wieder auf die sonst üblichen 85 bis 95 °C geregelt wird. Durch diese Anhebung des Temperaturniveaus erreicht man im Teillastbereich eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs sowie eine Absenkung der CO- und HC-Emissionen. Weitere Verbesserungen lassen sich durch die getrennte Steuerung der Durchströmung von Kurbelgehäuse und Zylinderkopf (split cooling) erzielen. Dabei wird nach dem Kaltstart des Motors zunächst nur der Zylinderkopf gekühlt. Auf diese Weise wird erreicht, dass sich die Zylinderlaufflächen und der dort brennraumseitig vorhandene Schmierölfilm schneller erwärmen. Da die Aufheizung von Motor, Kühlmittel und Schmiermittel einen direkten Einfluss auf die Reibleistung und damit auch auf den Kraftstoffverbrauch während der Aufwärmephase im Zertifizierungsfahrzyklus hat, sind gezielte Maßnahmen zur Beschleunigung der Schmiermittelerwärmung aktueller Entwicklungsstand.

Die Pumpenförderleistung der mechanischen Wasserpumpe ist auf Volllastbetrieb bei kleinen Drehzahlen ausgelegt, d. h. maximale thermische Belastung des Motors bei begrenzter Pumpendrehzahl. Dadurch ist die Förderleistung in den anderen Betriebspunkten überdimensioniert und mit unerwünschter Verlustleistung behaftet. Im Warmlaufbetrieb, wenn die Wasserpumpe der schnellen Erwärmung des Motors entgegensteht, kann die Wasserpumpe mittels eines Reibradantriebes zeitweise abgeschaltet werden [25]. Geregelte, elektrisch angetriebene Wasserpumpen haben sich aber bisher aus Kostengründen kaum durchgesetzt, weil die erforderliche Spitzenleistung große Elektromotoren verlangt. Lediglich Elektropumpen kleinerer Leistung zur Nachlaufkühlung bei abgeschaltetem heißem Motor sind insbesondere bei Motoren mit Abgasturboaufladung zu finden.

Ansätze zur „Verdampfungskühlung" blieben bisher vorwiegend auf stationär betriebene Motoren beschränkt. Die Ausnutzung der Verdampfungswärmekapazität des Wassers würde es ermöglichen, den Kühlmittelstrom auf einen Bruchteil der Durchflussmenge der „Flüssigkeitskühlung" zu reduzieren. Einer Serienanwendung beim Fahrzeugantrieb haben aber bislang die damit verbundene

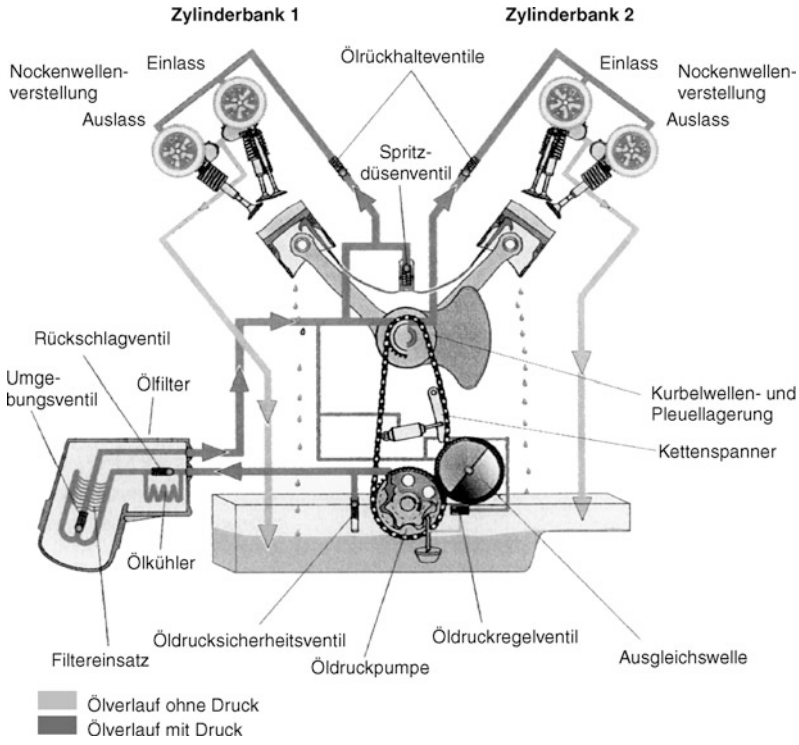



**Abb. 5.31** Schmierölkreislauf Druckumlaufschmierung (Beispiel Audi V6)

grundlegende Neuauslegung des gesamten Fahrzeug-Kühl- und Heizungssystems und auch ungelöste Fragen z. B. der Entmischung der Kühlmittelbestandteile entgegengestanden. Dennoch wird in heute ausgeführten Kühlsystemen die örtliche Dampfblasenbildung und die mit ihr verbundene erhebliche Steigerung des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten zur Kühlung der Hotspots gezielt genutzt.

### 5.1.4.8 Motorschmierung

Die wesentlichen Aufgaben des Öls im Schmierungssystem des Verbrennungsmotors sind die Schmierung und Kühlung aller Triebwerksteile und ggf. Anbaukomponenten (z. B. Abgasturbolader), die Übertragung von Kräften in Lagern, Spannern, Ausgleichs- und Verstellvorrichtungen, die Dämpfung von Schwingungen, der Abtransport von Verunreinigungen und Abriebpartikeln sowie die Neutralisierung von chemisch wirksamen Verbrennungsprodukten, die ins Motorinnere gelangen. Alle diese verschiedenen Funktionen kann das Öl nur erfüllen, wenn es für diese Aufgaben gut geeignet ist und in ausreichender Menge an die Stellen des Motors transportiert wird, wo es erforderlich ist. Motorenöle sind auf der Basis von Mineralöl hergestellt und enthalten ein auf den jeweiligen Einsatzzweck angepasstes Additiv-Package. Vollsynthetische Öle weisen verbesserte Schmiereigenschaften und eine höhere Beständigkeit gegen Alterung auf, sind aber vergleichsweise teuer [24].

Die meisten Fahrzeugmotoren haben eine Druckumlaufschmierung (Abb. 5.31).

Aus dem Ölsumpf unterhalb des Kurbeltriebs saugt die Ölpumpe das Öl an und fördert es unter Druck durch einen Ölfilter und ggf. einen Ölkühler in die Ölkanäle des Motorblocks. Die Ölpumpen werden je nach Bauart entweder als Doppelzahnradpumpen oder als Rotorpumpen unterteilt (Abb. 5.32). Die Doppelzahnradpumpen beinhalten die Innen- sowie die Außenzahnradpumpen während zu den Rotorpumpen gehören die Flügelzellen- und die Pendelschieberpumpen. Der Antrieb der Pumpen geschieht in der Praxis so-

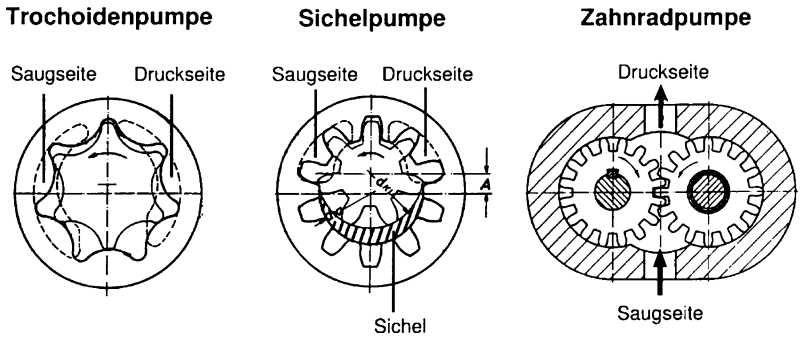



**Abb. 5.32** Bauarten von Schmierölpumpen

wohl über eine direkte Verbindung mit der Kurbelwelle (üblicherweise wird diese direkte Antriebsart nur bei Innenzahnradpumpen verwendet) als auch über Kette, Zahnriemen (*belt in oil*) oder Zahnrad. Die Pumpe ist so ausgelegt, dass bei heißem Motor und Leerlaufdrehzahl über die gesamte Lebensdauer des Motors ein Mindestöldruck nicht unterschritten wird und die Schmierung sichergestellt ist. Bei kaltem Öl und bei hohen Drehzahlen fördert die Pumpe dann zu große Ölmengen, weshalb der Öldruck mit einem Überdruckventil begrenzt und ein Teilstrom über einen Bypass in den Ansaugkanal oder in die Ölwanne zurückgeführt wird.

Es kann auch noch ein zusätzliches Öldruck-Regelventil im Kreislauf angeordnet sein, das einen im Normalbetrieb geringeren Öldruck einstellt als das als Sicherheitsventil arbeitende Überdruckventil. Moderne Motoren werden zunehmend mit regelbarer Ölpumpe ausgestattet, welche den Volumenstrom druckabhängig anpasst [12, 25]. Damit werden die mechanischen Verluste des Motors betriebspunkt- und zustandsabhängig minimiert, was zur Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades und des Verbrauchsverhaltens genutzt werden kann. Im Übrigen kommen solche aufwändigen Systeme insbesondere dann in Betracht, wenn die Anforderungen an ein in allen Betriebszuständen ausreichendes Öldruckniveau hoch sind, weil über den Öldruck wichtige Motorfunktionen (beispielsweise schaltbare Ventiltriebskomponenten und Nockenwellen-Phasensteller) gesteuert werden.

Von der Hauptölgalerie, die sich längs des gesamten Motorblocks erstreckt, werden alle Kurbelwellenhauptlager versorgt. Von diesen aus werden, wieder durch Bohrungen in der Kurbelwelle, die großen Pleuellager und evtl. auch noch durch die Pleuelstange das kleine Pleuellager im Kolben erreicht. Bei höher belasteten Motoren sind an diesem Hauptölkanal auch noch Spritzdüsen für die Kolbenkühlung montiert, die einen Ölstrahl von unten gegen die Kolben richten. Ein oder mehrere Zweigkanäle führt hoch in den Zylinderkopf zur Versorgung der Nockenwellenlager. Je nach Konstruktion werden im Zylinderkopf noch hydraulische Ausgleichselemente für den Ventiltrieb (in Tassenstößeln oder Abstützelementen) versorgt, evtl. Drucköl für einen Ventil- oder Nockenwellen-Verstellmechanismus und evtl. für eine Vakuumpumpe bereitgestellt und Sprühöl zur Schmierung der Nocken geliefert.

Das seitlich aus den Lagern austretende Öl und das sonstige Sprüh- und Lecköl sammelt sich im Zylinderkopf und wird durch Ablauf- und Entlüftungskanäle wieder durch den Motorblock in den Ölsumpf zurückgeführt, wo sich auch das Öl aus dem Triebwerk sammelt. Zur Vermeidung von Ölverschäumung wird der Kurbelraum von der Ölwanne mittels einer Trennwand mit eingearbeiteten Schlitzen für den Ölrücklauf („Ölhobel“) getrennt. Die Ölwanne ist Vorratsbehälter und Beruhigungsreservoir, in dem das rücklaufende Öl entschäumt und rückgekühlt wird. Wenn erforderlich kann es zusätzlich in einem Ölkühler im Druckkreislauf gekühlt werden. Dieser Kühler ist entweder in das Kühlflüssigkeitssystem eingebunden (Abb. 5.33) oder es ist ein Öl/Luft-Kühler.

Nur bei einigen Sport- und Geländefahrzeugen sowie bei Rennfahrzeugen findet man Motoren

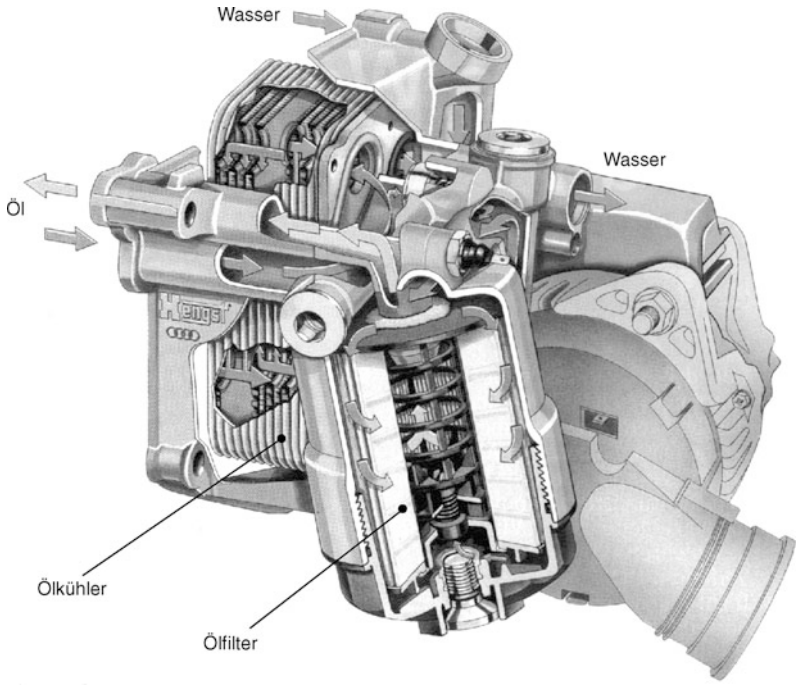



**Abb. 5.33** Ölfilter-Modell (Beispiel Audi V8)

mit Trockensumpfschmierung. Das Öl wird mittels einer zusätzlichen Pumpe aus dem Sammelraum unter dem Motor in einen separaten Ölbehälter abgepumpt und von dort wieder der Druckölpumpe zugeführt. Auf diese Weise wird die zuverlässige Versorgung des Schmiersystems mit Drucköl unter allen Betriebsbedingungen (Steigung, Gefälle, Schräge, extreme Kurvenfahrt, Beschleunigung und Bremsung) gewährleistet.

Der Ölfilter ist wichtig für die Betriebssicherheit und Lebensdauer des Motors. Es entfernt feste Fremdstoffe aus dem Motoröl (Metallabrieb, Staub, Verbrennungsrückstände) und erhält damit die Funktionsfähigkeit des Schmieröles innerhalb der Wartungsintervalle. Überwiegend werden Hauptstromfilter eingesetzt, die vom gesamten Ölstrom der Pumpe durchflossen werden und Verunreinigungen gleich auffangen. Zur Sicherheit gegen einen Ausfall der Schmierung bei verstopftem Filter dient ein Kurzschlussventil oder Umgehungsventil. Bei zu geringem Durchfluss durch die Filterfläche und damit ansteigendem Druckabfall im Filter wird das Ventil geöffnet und stellt so den Schmierölkreislauf sicher.

Ältere Ölfilter haben einen Papierfiltereinsatz, der in einem Blechgehäuse verpackt ist, an den Motor angeschraubt wird und damit die Ölführung schließt. Ein Ölfilterwechsel ist in der Regel mit einer Ölverschmutzung durch Tropföl verbunden. Neuere Filterkonstruktionen haben eine auswechselbare Papierfilterkartusche in einem geteilten Gehäuse, das ohne Tropfölverschmutzung entnommen und entsorgt werden kann. Abb. 5.33 zeigt einen Ölfiltermodul, in dem Ölfilter, Ölkühler und ein Generatorhalter zu einer Einheit zusammengefügt sind. Es wird vom Systemzulieferer fertig vormontiert zur Motormontage angeliefert.

Zur Ölstandskontrolle werden zunehmend elektrische Sensoren eingesetzt, die das Erreichen des minimalen Ölstandes anzeigen und bereits warnen, bevor der Öldruck mangels Ölvorrat zusammenbricht. Zur Kosteneinsparung für den Fahrzeugbetreiber und zur Reduzierung des Ölverbrauches bzw. des Anfalls von Altöl bemüht

man sich, die Ölwechselintervalle ständig auszuweiten. Dabei richtet sich der Ölwechsel nicht mehr nach festen Laufstrecken oder maximalen Zeiten sondern nach der Betriebsart und -dauer des Motors. In der elektronischen Motorsteuerung werden hierzu die Belastungen im Laufe des Betriebes über Kraftstoffdurchsatz, Betriebstemperaturen, Laufzeiten, Nachfüllmengen und Ähnliches aufintegriert und daraus die Notwendigkeit eines Ölwechsels ermittelt und dem Fahrer angezeigt. Für den normalen Betrieb mit gemäßigter Fahrweise resultieren daraus deutlich längere Fahrstrecken für einen Ölwechsel. Diese Intervalle werden durch intensive Kalibrierungsversuche während den Entwicklungsphasen festgelegt, wo der Kraftstoffinhalt im Öl (Ölverdünnung) regelmäßig überprüft wird, da dieser die Schmier- und Tragfähigkeit des Öls stark mindert. Wenn der Kraftstoffinhalt maximal 10 % des gesamten Ölvolumens beträgt, muss das Öl gewechselt werden.

Ölverdünnung entsteht überwiegend durch Benetzung der Zylinderlaufflächen mit Kraftstoff sowie durch Blowby und ist besonders in Motoren mit direkter Einspritzung kritisch (sowohl Benzin- als auch Dieselmotoren). Der Kraftstoff mischt sich mit dem Öl und fließt durch die Kolbenringe zurück in die Ölwanne. Einen großen Anteil des gemischten Kraftstoffes im Öl verdunstet während des heißen Betriebs des Motors und gelangt durch die Kurbelgehäuseentlüftung zurück in den Brennraum, wo es letztendlich verbrannt wird. Bei Dieselmotoren ist Ölverdünnung, aufgrund der höheren Siedetemperaturen gegenüber Benzin, besonders kritisch. Nur ein verhältnismäßig geringer Anteil vom Diesel kann aus dem Öl verdunstet werden. Die Hauptmaßnahmen zur Reduzierung der Ölverdünnung betreffen das Kraftstoffeinspritzsystem, mit dem Ziel, die Wandbenetzung mit Kraftstoff zu reduzieren. Dafür soll das Spritzbild des Kraftstoffes nicht zu breit ausgelegt werden und die Einspritzzeit soll nicht zu einem zu späten Zeitpunkt auftreten. Das stellt bei Dieselmotoren besondere Herausforderungen dar, da sie eine Kraftstoffnacheinspritzung für die Regenerierung des Dieselpartikelfilters und des $NO_x$-Speicherkatalysators brauchen.

Der Ölverbrauch wird überwiegend durch die Kurbelgehäuseentlüftung verursacht. Dabei spielt die Menge der Blowby-Gase und die Effizienz des Ölabscheiders eine wesentliche Rolle. Da verbrauchtes Öl in den Brennraum gelangt, verbrennt und in die Atmosphäre als Ruß- und Aschepartikel bzw. unverbrannte Kohlenwasserstoffe ausgestoßen wird, wird während der Motorentwicklung ein maximaler Ölverbrauchswert spezifiziert, der bei modernen Motoren maximal 0,1 % bis 0,12 % des spezifischen Kraftstoffverbrauchs in g/kWh betragen darf.

### 5.1.4.9 Saugrohr

Ansauganlagen werden (einteilig) aus Aluminium-Sand- oder -Kokillenguss oder mehrteilig in Aluminium- oder Magnesium-Druckguss hergestellt. Zur weiteren Gewichtseinsparung wird häufig glasfaserverstärkter Kunststoff, wie z. B. glasfaserverstärktes Polyamid gewählt. Mit der komplexen räumlichen Geometrie wird die Ansauganlage entweder in Schmelzkern-Technologie einteilig oder mehrteilig reibverschweißt hergestellt. Es gibt auch Mischbauweisen mit Aluminium oder Magnesium. Die Metallkomponenten dienen der Befestigung am Flansch zum warmen Zylinderkopf oder sie enthalten den Umschaltmechanismus für die Saugrohrlängenschaltung (siehe auch ◘ Abb. 5.34) oder zur Schaltung von Klappen zwecks Optimierung der Ladungsbewegung (sog. Drall- oder Tumble-Klappen). Die Kunststoffe müssen eine gute Wärmestabilität (bis 150 °C) und Festigkeit (mit Faserverstärkung) aufweisen. An Anschraubstellen oder besonders wärmebeaufschlagten Stellen (z. B. Abgasrückführstutzen) sind auch Metalleinlagen zu finden. Alle Kunststoffteile tragen eine Materialkennzeichnung nach VDA 260 in Verbindung mit DIN-Normen für Bezeichnungen und Kurzzeichen von Kunststoffen, damit im Recycling die Materialsortierung gezielt und sicher durchgeführt werden kann.

Die oben erwähnten schaltbaren Sauganlagen werden zur Verbesserung des Drehmomentverlaufs freisaugender Ottomotoren eingesetzt. Dabei lassen sich die Gaswechseldynamik beeinflussenden Längen und Querschnitte der Saugrohre drehzahlabhängig verändern. Neben den bereits weiter verbreiteten zweistufigen Schaltsaugrohren sind zuletzt auch kontinuierlich wirkende Systeme verwirklicht worden, welche einen noch homogeneren Verlauf

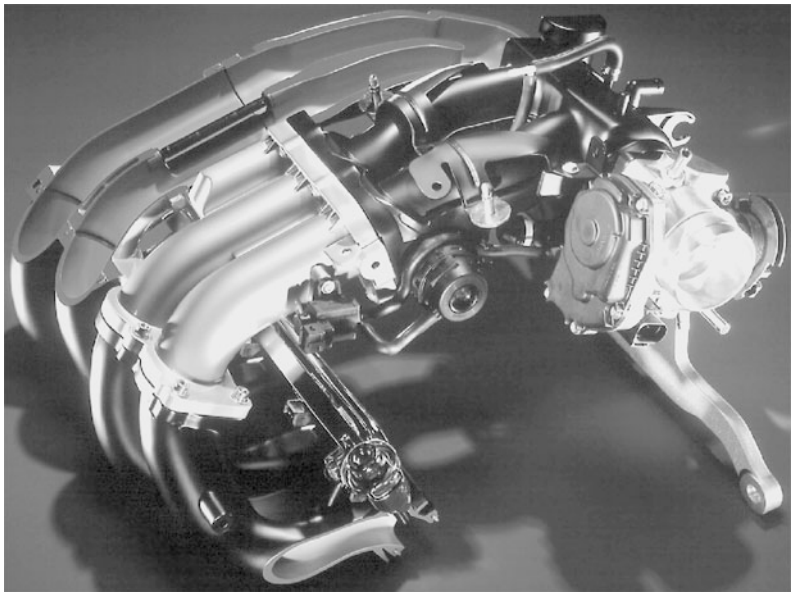


**Abb. 5.34** Ansaugmodul mit Schaltsaugrohr, elektr. Drosselklappe, Kraftstoffeinspritzsystem, inkl. Verkabelung und Verschlauchung

des Volllastdrehmomentes über dem gesamten Motordrehzahlband ermöglichen.

#### 5.1.4.10 Nebenaggregate und Package

Der anhaltende Trend zu kompakten Fahrzeugkonzepten einerseits sowie die Kundenforderung nach zunehmendem Nutzraum für die Fahrgastzelle und Gepäckraumvolumen haben die Package-Anforderungen zu einer wesentlichen Randbedingung für Neuentwicklungen werden lassen. Dabei ist nicht nur das eigentliche Triebwerk zu betrachten, sondern es gilt ausladende Ansauganlagen mit Luftfilter und Luftführungsschläuchen, evtl. zu einem Ladeluftkühler, die Abgasanlage häufig mitsamt der Abgasnachbehandlung sowie die Nebenaggregate einschließlich Lenkhilfepumpe und Klimakompressor im Motorraum unterzubringen. Das Package-Design muss daneben auch die Montierbarkeit der weitgehend vormontierten Antriebseinheit sowie Anforderungen von Seiten der Crash-Sicherheit inklusive Fußgängeraufprallschutz berücksichtigen. Zudem sind auch fahrzeugseitig viele Elemente für Sicherheit und Komfort im „Motorraum" unterzubringen. Damit ist das Package Gegenstand erheblicher Entwicklungsaktivitäten geworden, welche stark von Fahrzeuganforderungen beeinflusst werden. Diese Anfordertungen üben einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die gesamte Motorkonstruktion aus.

Zum Antrieb der Nebenaggregate werden heute überwiegend Poly-V-Riemen (Keilrippenriemen) verwendet. Dies sind faserverstärkte Kunststoff-/Kautschukriemen mit einem Vielkeil-Profil, welches häufig nur auf einer Seite, bei Bedarf aber auch beidseitig aufgebracht ist. Im Gegensatz zu den alten Keilriemen können Keilrippenriemen in beide Richtungen in einer Ebene gekrümmt werden. Es können Umlenk- und Spannrollen mit den Antriebsrollen der Nebenaggregate verschachtelt angeordnet und so der Anbauraum am Motor sehr kompakt ausgefüllt werden (Abb. 5.35). Die heute übliche Bauweise eines Nebenaggregatetriebs beschränkt sich in der Regel auf einen Keilrippenriemen in einer Ebene und nutzt nur in Ausnahmefällen mehrere Riemenebenen (bspw. zur Hybridisierung mittels Starter-Generators). Angetrieben werden die Wasserpumpe, der Drehstrom-Generator (Lichtmaschine) und der Klimakompressor. Mit

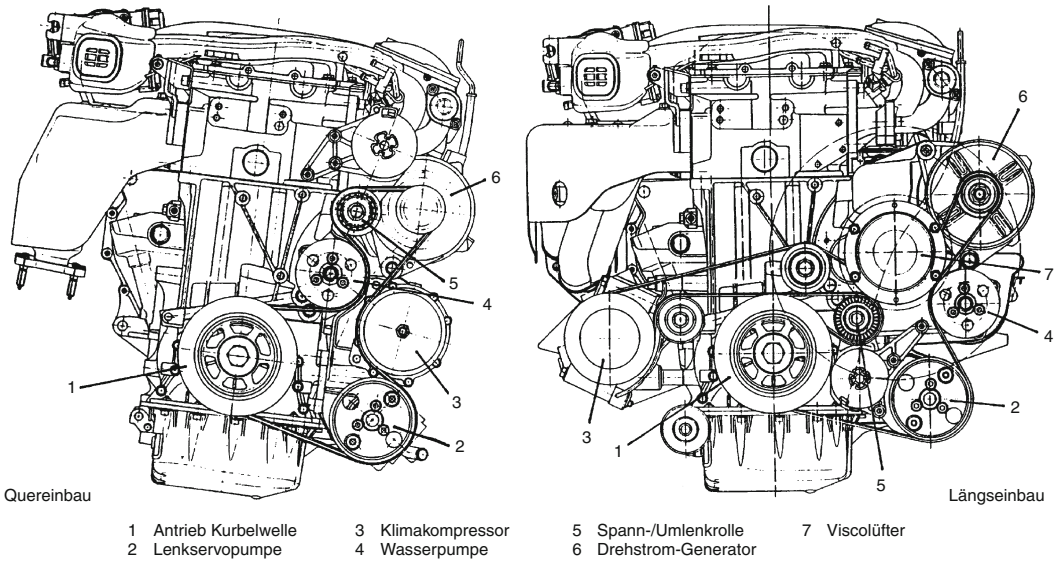



**Abb. 5.35** Poly-V-Riementrieb für Nebenaggregate, Längs- bzw. Quereinbau des Motors (Beispiel Volkswagen Fünfzylindermotor VR5)

derzeit zunehmender Elektrifizierung entfällt häufig der Antrieb der Lenkhilfepumpe mittels Keilrippenriemen.

Da Keilrippenriemen empfindlich gegen Versatz- und Fluchtungsfehler der Antriebsrollen sind, kommt es auch der kompakten Anordnung entgegen, wenn alle Nebenaggregate auf einen gemeinsamen Halter zu einem Modul montiert sind. Dies ermöglicht auch die weitgehende Vormontage der Nebenaggregate, die dann als Block mit großer Anflanschfläche an den Motorblock geschraubt wird.

In letzter Zeit bemüht man sich intensiv, den die Einbaulänge bestimmenden Riementrieb an der Frontseite zu eliminieren. Alternativen sind Ketten- und Wellenantriebe für die Nebenaggregate oder auch Zahnradantriebe sowie Kombinationen daraus, die nicht an der Motorstirnseite, sondern an der Schwungradseite angeordnet sind. Ziel ist es, die Nebenaggregate seitlich am Motor und über dem Getriebeflansch zu montieren. Ein Beispiel zeigt Abb. 5.36. Ein Kettentrieb an der Schwungradseite führt hier zu einem Zahnradmodul, von dem aus die Ölpumpe, Lenkhilfepumpe und Wasserpumpe praktisch im Motor angetrieben werden. Nur der Generator hat noch einen Keilrippenriemen-Antrieb.

Zum Motorpackage gehören weiterhin der Anlasser, der am Schwungrad eingreift, sowie das Ansaug- und Abgasmodul mit den vor- und nachgeschalteten Bauteilen. Deren Anordnung ist nicht nur für eine funktional optimierte Auslegung wichtig, sondern die Komponenten sind auch bei den Untersuchungen zum Crashverhalten und zum Fußgängerschutz des Fahrzeugs mit zu betrachten. Sie bilden feste, schwer deformierbare Blöcke und können den Verformungsweg der Karosserie begrenzen und könnten somit die Insassen gefährden. Abhilfemaßnahmen bestehen unter anderem darin diese Bauteile so zu gestalten, dass sie im Falle eines Unfalls (Fußgänger) definiert wegbrechen oder sich deformieren.

Zwischen Luftfilter und Drosselklappe ist in vielen Fällen der Luftmassenmesser angeordnet, der zur ungestörten Messwerterfassung eine Mindestlänge an gerader Luftführungsstrecke erfordert. Der Unterdruckschlauch für den Bremskraftverstärker, der Verbindungsschlauch zum Aktivkohlebehälter (Tankentlüftung), die Drosselklappenbetätigung (heute in der Regel nur Kabel für elektrische Drosselklappe) sind auf der Luftzuführungsseite zu verlegen. In der Abgasanlage ist im Motorraum der Katalysator mit $\lambda$-Sonde und Wärmeabschirm-

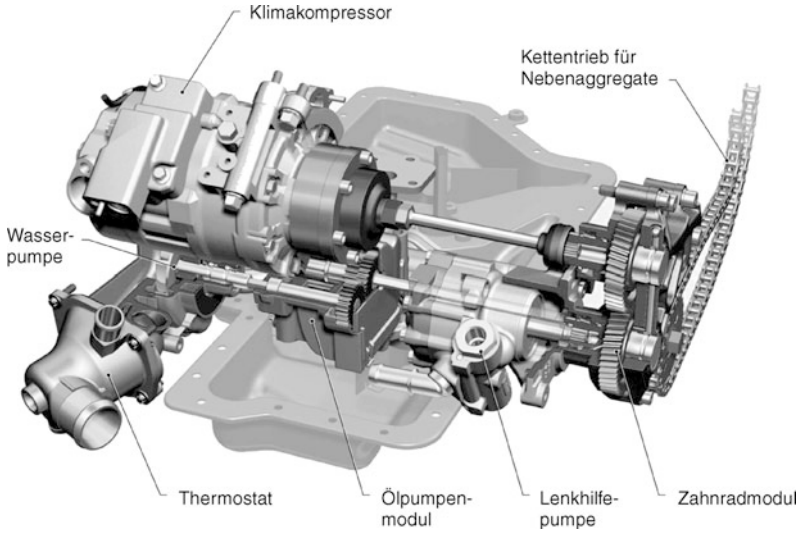



**Abb. 5.36** Antrieb der Hilfs- und Nebenaggregate über Kette und Zahnräder (Beispiel Audi V8)

blech unterzubringen. Elektrische Kabel, Starterkabel, Schläuche für Kühlmittel, Klimaanlagen, Heizung und vieles mehr füllen den Motorraum. Sie alle müssen so verlegt sein, dass keine Scheuerstellen entstehen, sich keine elektrische Beeinflussung ergibt, keine übermäßige Erwärmung auftritt und Wartungs- und Reparaturarbeiten möglichst nicht behindert werden.

In der Endmontage beim Fahrzeughersteller versucht man der mit dem Package verbundenen Komplexität dadurch zu begegnen, dass möglichst viele Einzelkomponenten zu Modulen zusammengepackt werden, die vormontiert an das Fahrzeugband angeliefert werden. Dieser Trend erfordert von den Zulieferern zunehmende Kompetenz, die sich über ein gesamtes System erstrecken muss.

Abb. 5.37 zeigt Streubänder für die Länge, Breite und Höhe (Kistenmaße über alle Motoranbauteile) von 4-Zylinder-Reihenmotoren für Pkw-Ottomotoren. Während der Hubraum über den Bohrungsdurchmesser und damit über den zu wählenden Zylinderabstand einen Einfluss auf die Motorlänge zeigt, scheint steigender Hubraum keinen nennenswerten Einfluss auf die Motorhöhe aufzuweisen. Durch das Fahrzeug wird ein vorhandener Bauraum für den Motor definiert, welcher nach unten durch die Bodenfreiheit der Ölwanne und nach oben durch die zu gewährleistenden freien Deformationswege der Motorhaube zum Schutz von Fußgängern vorgegeben ist. An diese Anforderungen werden die Ölwanne und die Motorabdeckung eines Motors häufig fahrzeugspezifisch angepasst, so dass eine eventueller Einfluss der Hubraums über steigenden Hub auf die Motorhöhe in diesem Streuband nicht zur Geltung kommt.

### 5.1.5 Ottomotoren

Die Bezeichnung Ottomotor geht auf Nicolaus August Otto zurück, der im Jahre 1876 den ersten Motor nach dem Viertakt-Verfahren in der Gasmotorenfabrik Deutz AG entwickelte und für dieses Verfahren am 4. August 1877 das Patent erteilt bekam [34]. Zusätzlich zum Viertakt-Verfahren lässt sich der Ottomotor auch nach dem Prinzip des Zweitakters betreiben (siehe auch ▶ Abschn. 5.7). Wesentliche Unterscheidungsmerkmale des konventionellen Ottomotors gegenüber dem Dieselmotor sind die Drosselregelung, die Homogenität der Zylinderladung, die äußere Gemischbildung mit anschließender Gemischverdichtung und die Fremdzündung.

Hieraus resultiert einer der wesentlichen Nachteile des Ottomotors gegenüber dem Dieselmotor, nämlich die Teillast-Drosselverluste. Zukunfts-

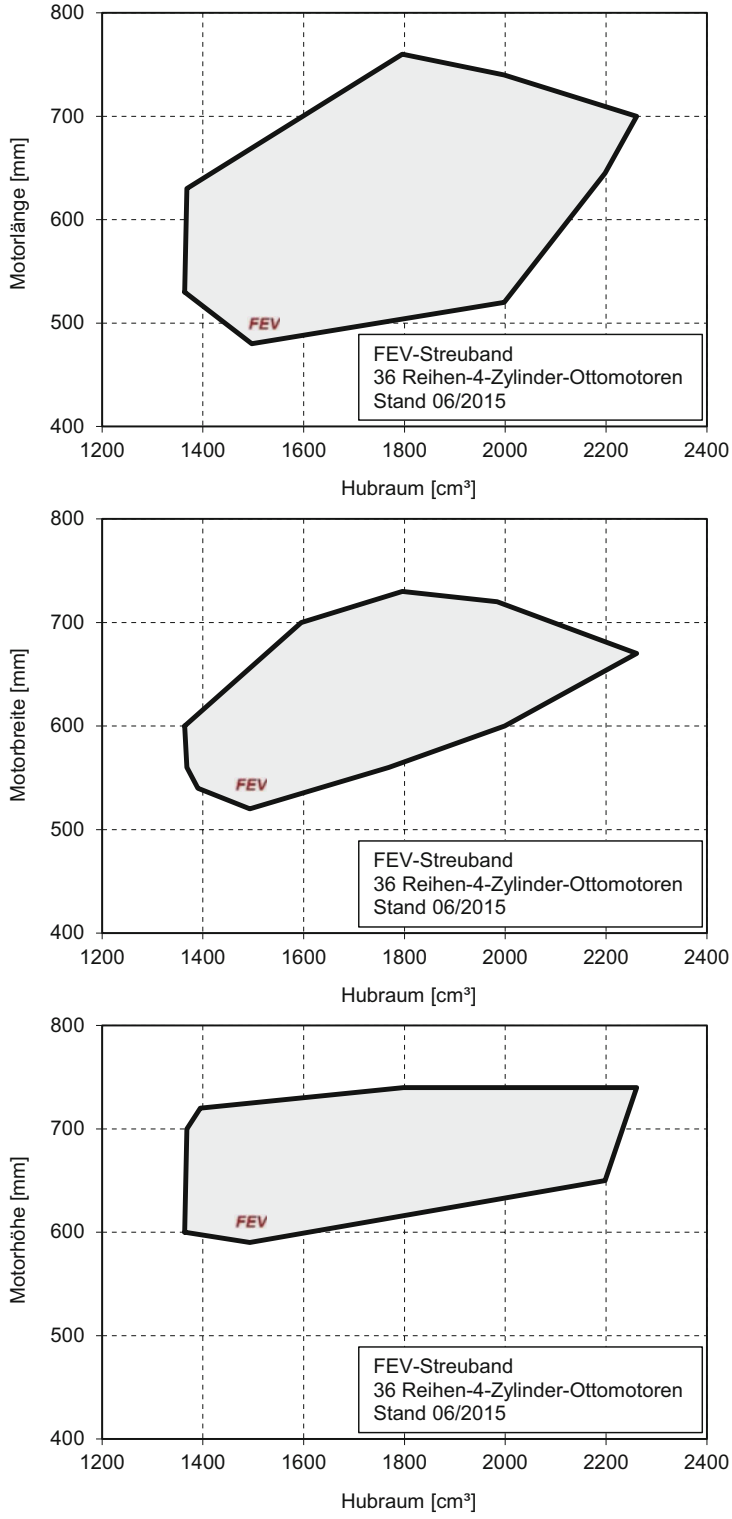



**Abb. 5.37** Streubänder für die Länge, Breite und Höhe (Kistenmaße über alle Motoranbauteile) von 4-Zylinder-Reihenmotoren für Pkw-Ottomotoren (FEV)

lösungen für ottomotorische Kraftfahrzeugantriebe versuchen, die prinzipbedingten Nachteile der konventionellen Ottomotorentechnik zu überwinden und zielen darauf, sich von den Einschränkungen der äußeren Gemischbildung, der Quantitätsregelung sowie einer homogenen Zylinderladung zu lösen. Danach verbleibt als wesentliches Unterscheidungskriterium zum Dieselmotor die Art der Zündung, wie es im angelsächsischen Sprachraum mit den Bezeichnungen SI („Spark Ignition") und CI („Compression Ignition") zum Ausdruck kommt.

Insbesondere seit den bedeutenden Fortschritten in der Entwicklung von Pkw-Dieselmotoren mit Hochdruck-Direkteinspritzung treten die prinzipbedingten Nachteile des konventionellen Ottomotors in den Vordergrund. Konzepte zur Entdrosselung des Ottomotors sind die variable Ventilsteuerung (siehe ► Abschn. 5.1.5.1.3) sowie der Magerbetrieb. Der beim konventionellen Ottomotor möglichen Betriebsweise mit homogenem Kraftstoff-Luft-Gemisch zum thermodynamisch vorteilhaften Magerbetrieb sind durch die Zündgrenzen des Kraftstoffes Grenzen gesetzt. Deshalb hat sich in den letzten Jahren die Benzindirekteinspritzung mit geschichteter Zylinderladung als zielführende Alternative etabliert (siehe ► Abschn. 5.1.5.2.2). Solche Magermotorkonzepte erfordern jedoch neue Lösungen zur Abgasreinigung im sauerstoffreichen Abgas (siehe ► Abschn. 5.1.5.7.2). Auch Downsizing-Konzepte (siehe ► Abschn. 5.1.5.4) schöpfen einen wesentlichen Anteil ihres Verbrauchsvorteils aus der mit der Betriebspunktverlagerung verbundenen Entdrosselung des Motors.

Die Begrenzung des Verdichtungsverhältnisses aufgrund der bei hohen Motorlasten auftretenden Klopfneigung hat eine direkte Auswirkung auf den Wirkungsgrad des Vergleichsprozesses. Üblicherweise muss hier ein Kompromiss zwischen Leistungsdichte und Teillastwirkungsgrad gefunden werden, welcher sich bei einer variablen Steuerung des Verdichtungsverhältnisses vermeiden lässt. Insbesondere in Kombination mit der Aufladung des Ottomotors und den damit verbundenen Downsizing-Effekten lassen sich hiermit große Verbrauchseinsparungen realisieren (siehe ► Abschn. 5.1.5.4.2).

### 5.1.5.1 Ladungswechsel

Als Ladungswechsel wird der Austausch der Verbrennungsgase durch Frischluft oder Frischgemisch bezeichnet. In Abhängigkeit der Öffnungsdauer und -querschnitte sowie der anliegenden Druckrandbedingungen im Einlass- und Auslasssystem bestimmt sich die Füllung des Zylinders. Die Güte des Ladungswechsels wird anhand des Liefergrads beurteilt. Dieser entspricht dem Verhältnis von angesaugter und im Zylinder verbliebener Frischladung zu der theoretisch möglichen Ladungsmenge bei gegebenem Hubraum.

$$\lambda_\mathrm{l} = m_\mathrm{Z}/m_\mathrm{th}$$

Die Zylinderfrischladung ist $m_\mathrm{Z} = m_\mathrm{ZL}$ bei innerer und $m_\mathrm{Z} = m_\mathrm{ZB} + m_\mathrm{ZL}$ bei äußerer Gemischbildung.

Da ausschließlich die nach Schließen der Einlassventile im Zylinder verbliebene Masse des Luft-Kraftstoff-Gemisches an der Verbrennung teilnehmen kann, ist der Liefergrad relevant für die Leistungsabgabe des Motors.

Hinsichtlich der Anordnung der Gaswechselorgane im Zylinderkopf und der Strömungsführung beim Ladungswechsel unterscheidet man zwischen dem Gegenstrom- und dem Querstrom-Prinzip. Beim Gegenstrom-Zylinderkopf sind die Ein- und Auslasskanäle an der gleichen Kopfseite (deshalb wird er manchmal auch als „Gleichstromkopf" bezeichnet), Ansaug- und Auslassstrom laufen entgegengerichtet. Dieses Prinzip findet man häufig bei klassischen Zweiventilmotoren mit der Ventilanordnung in Reihe. Beim Querstromkopf ist eine Seite die Ansaugseite, die gegenüberliegende die Auslassseite. Man findet dieses Prinzip auch bei Zweiventilmotoren, grundsätzlich aber bei allen Mehrventilmotoren ($\geq 3$ Ventile je Zylinder). Beim Querstromkopf ist die „kalte" und die „warme" Seite getrennt. Dies eröffnet auch mehr Freiheiten für die Rohrführungen und Kraftstoffeinrichtungen.

#### 5.1.5.1.1 Ansaugsystem

Der Ansaugvorgang des Motors erfolgt in kurzer Zeit über ca. jeweils 180–240° KW (bei Miller Konzepten teilweise deutlich weniger als 180° KW), das heißt in ca. 30 bis 5 ms bei Drehzahlen von 1000

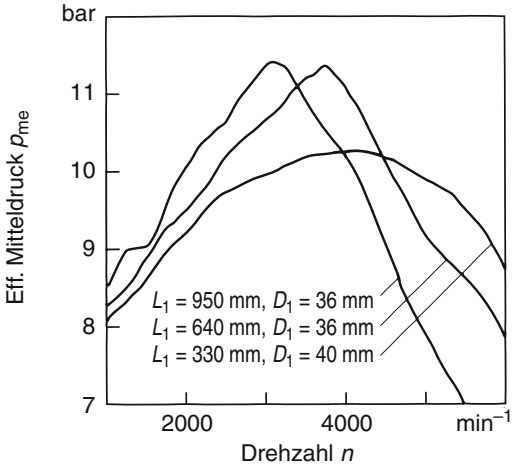



**Abb. 5.38** Verlauf des effektiven Mitteldruckes über der Drehzahl bei unterschiedlicher Saugrohrauslegung

bis 6000 l/min. Dieser Prozess ist von hoher Dynamik geprägt und wird von Druck- und Unterdruckwellen im Ansaugsystem maßgeblich beeinflusst. Mittels der gezielten Auslegung der Sauganlagengeometrie hinsichtlich Kanallänge und -durchmesser lässt sich insbesondere für Saugmotoren der Liefergrad für einen begrenzten Drehzahlbereich optimieren. In Abb. 5.38 ist der Verlauf des effektiven Mitteldrucks über der Drehzahl für unterschiedliche Saugrohrauslegungen dargestellt. Maximale Drehmomente erreicht man üblicherweise bei niedrigen Drehzahlen mit dünneren, längeren Ansaugrohren, hohe Maximalleistung mit größeren, kürzeren Rohren. Bei „Alltagsautos" wird üblicherweise eine Auslegung für hohes Drehmoment bei niedrigen und mittleren Drehzahlen vorgezogen, wohingegen bei Sportfahrzeugen eine auf den oberen Drehzahlbereich ausgerichtete Auslegung gewählt wird.

Die Innenflächen der Ansaugkanäle sollten möglichst glatt sein. Scharfe Kanten und Krümmungen können zu Strömungsablösungen führen und sind deshalb zu vermeiden. Bei Mehrzylinder-Motoren muss auch darauf geachtet werden, dass sich die in der Zündfolge aufeinander folgenden Zylinder nicht negativ beeinflussen. Für die Saugrohrauslegung bedeutet dies, dass die Verwirklichung gleich langer und gleichförmiger Ansaugrohre allein nicht ausreicht, um für jeden einzelnen Zylinder die gleiche Füllung zu gewährleisten. Durch Detailoptimierung, auch unter Zuhilfenahme von eindimensionaler Motorprozessrechnung und dreidimensionaler Strömungssimulationsrechnungen (CFD – Computational Fluid Dynamics) sollen dynamische Effekte, welche zur lokalen Störung der Ansaugströmung führen, vermieden werden.

Immer häufiger werden auch bei gängigen Motorisierungen Schaltsaugrohre verwendet. Klappen oder Drehschieber schalten zwei oder drei unterschiedliche Saugrohrlängen oder ermöglichen gar eine stufenlose Längenverstellung. Damit wird über den vollen Drehzahlbereich ein optimaler Drehmomentverlauf erreicht. Auch die vorgelagerte Ansaugstrecke vom Ansaugschnorchel über den Luftfilter bis zur Drosselklappe hat einen Einfluss auf den Ladungswechsel. Des Weiteren kommen insbesondere bei turboaufgeladenen Ottomotoren Saugrohre mit einer speziellen Vorrichtung zur gezielten Erzeugung von Ladungsbewegung zum Einsatz. Durch eine schaltbare Klappe wird der untere Kanalquerschnitt verdeckt, sodass die Strömung gezielt über ein Blech in den Zylinder geleitet wird und dabei eine besonders ausgeprägt Tumble-Bewegung erzeugt.

Außerdem muss dieser Teil der Ansauganlage im Hinblick auf das Ansauggeräusch optimiert werden. Dies geschieht u. a. durch die Integration von Helmholtz-Resonatoren zur Dämpfung einzelner kritischer Frequenzbereiche oder durch Breitbandresonatoren, welche über eine gute Dämpfung über einen weiten Frequenzbereich verfügen.

Der anhaltende Kostendruck und das Streben nach einer besseren Großserienqualität hat in den vergangenen Jahren die Modultechnik vorangetrieben. Am Ansaugmodul moderner Ottomotoren werden häufig alle mit der Luftführung und Kraftstoffeinspritzung zusammenhängenden Bauteile funktional und räumlich zu einer vormontierten und prüffähigen Einheit zusammengefasst. In Abb. 5.34 ist ein Beispiel eines Ansaugmoduls mit einem mehrteiligen Saugrohr in Kunststoff- und Aluminiumbauweise mit elektronisch gesteuerter Drosselklappe, Saugrohrlängen-Schaltanlage, Kraftstoff-Verteilerleiste und Kraftstoff-Einspritzventilen dargestellt. Bei Ottomotoren mit Turboauf-

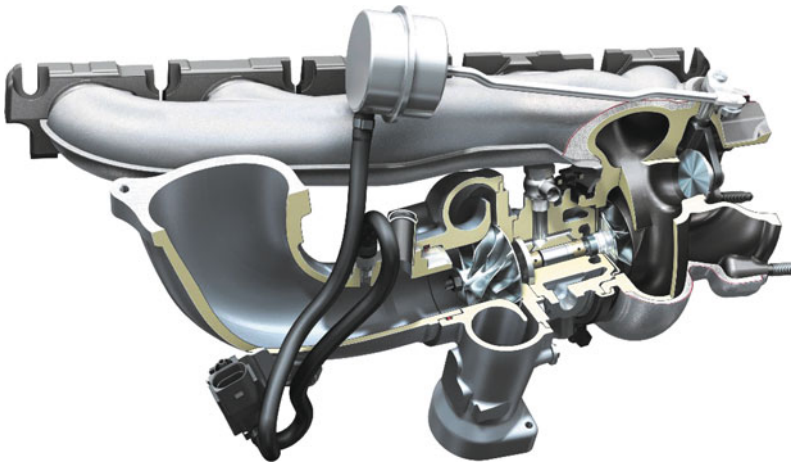


**Abb. 5.39** Integralmodul aus Abgaskrümmer und Turbolader (Beispiel Audi V10 TFSI)

ladung sind üblicherweise keine Saugrohre mit variabler Länge verbaut. Allerdings wird der Ladeluftkühler teilweise als Wasser-Luft-Ladeluftkühler ausgeführt (Standard: Luft-Luft) und direkt in das Saugrohr integriert. Dadurch kann das Leitungsvolumen nach dem Verdichter reduziert und das Transientverhalten des Motors verbessert werden.

#### 5.1.5.1.2 Abgassystem

Zur Erfüllung aktueller und zukünftiger Emissionsvorschriften ist eine schnelle Erwärmung des Abgaskatalysators nach dem Motorstart von entscheidender Bedeutung. Deshalb werden anstelle der relativ dickwandigen Gusskrümmer mit hoher Wärmekapazität auch dünnwandige Blechkrümmer verwendet, die sich in strömungsgünstigen Leitungsformen und -führungen realisieren lassen. Sie sind leichter und entziehen aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität dem Abgas weniger Wärme, so dass mehr Abgasenergie zur schnellen Aufheizung des Katalysators zur Verfügung steht. Blechkrümmer werden oft auch noch mit einer Blechumhüllung versehen, die durch einen Luftspalt isoliert und damit wärmedämmend ist. Mit neuen Fertigungstechnologien, z. B. Hydroforming (siehe auch ▶ Abschn. 10.2), lassen sich technisch gute und kostengünstige Produkte entwickeln, die den erheblichen Temperatur- und Schwingungsbelastungen standhalten. Eine Steigerung dieser Wärmeisolierung stellen Doppelluftspalt-isolierte Auslasskrümmer dar, wie sie derzeit von Audi im V8 TFSI Motor zum Einsatz kommen. Hier sind aufgrund der Anordnung der Turboladermodule zwischen den Bänken des V-Motors, besonders hohe Ansprüche an die Isolierung der Krümmer gestellt.

Bei turboaufgeladenen Motoren kommen zunehmend Abgaskrümmer mit integriertem Turbinengehäuse zum Einsatz. Durch den Wegfall der thermisch hoch belasteten Flansche zwischen Krümmer und Turbinengehäuse kann eine geringe Masse und ein reduzierter Bauraum erzielt werden. Das in Abb. 5.39 gezeigte Integralmodul des Audi V10 TFSI [74] aus Stahlguss ist in Silikatfaserformteile eingepackt und aussen mit einer Edelstahlhülle umschlossen, um den Energieeintrag in den Motorraum zu reduzieren. Die Klemmflanschverbindung zum Zylinderkopf ermöglicht eine freie Wärmeausdehnung der Gussteile in Längsrichtung. Ein weiteres Mittel zur Wärmeabfuhr aus integrierten Turbinengehäusen stellt die wassergekühlte Ausführung dar. Hierbei wird das Gehäuse mit Kühlwasser aus dem Zylinderkopf versorgt.

Dem Abgaskrümmer folgt der Katalysator. Zur Einhaltung der aktuellen Emissionsvorschriften ist seine motornahe Anordnung erforderlich, welche eine raschere Erwärmung des Abgaskatalysators nach dem Kaltstart ermöglicht. Bei hoher Last ist damit jedoch eine erhöhte Wärmebelastung verbunden, die von modernen Katalysatoren allerdings beherrscht wird. Dennoch ist unter bestimmten

Betriebsbedingungen die Anreicherung des Kraftstoff-Luft-Gemisches zum Schutz des Katalysators vor Übertemperatur erforderlich („Bauteilschutz"). Unter Zuhilfenahme integrierter Auslasskrümmer kann teilweise auf einen Mehrverbrauch durch Volllastanreicherung verzichtet werden. Eine solche Anwendung geht allerdings aufgrund von Gasdynamikeffekten im Ladungswechsel abhängig von Motorbauweise mit weiteren Vorkehrungen zur Trennung der zylinderindividuellen Auslassdruckpulsationen einher.

Auch die Geometrie der Abgasanlage (► Abschn. 5.6) hat einen Einfluss auf die Gasdynamik beim Ladungswechselvorgang. Aufwändige Abgasanlagen mit stufenweiser Zusammenführung der einzelnen Abgasstränge (beim 4-Zylindermotor mit 4-in-zwei-in-1 Zusammenführung) unterstützen die Darstellung homogener Volllast-Drehmomentverläufe. Die nachfolgenden Bauteile (Katalysator und Schalldämpfer) sollen einen geringen mittleren Abgasgegendruck erzeugen. Die Schalldämpfung soll wirksam und die eigene Oberflächen-Schallabstrahlung möglichst gering sein. Um der Korrosion vorzubeugen, werden Edelstahl- oder aluminierte Bleche verwendet.

#### 5.1.5.1.3 Ventilsteuerzeiten und variable Ventilsteuerung

Neben der Geometrie der Gaswechselorgane hat die zeitliche Steuerung des Ladungswechselvorgangs entscheidende Bedeutung für den Erfolg des Ladungswechsels. Für den homogenen Teillast-Betrieb wird das Drehmoment beim Ottomotor i. d. R. durch die zugeführte Luftmasse mit Hilfe der Drosselklappe geregelt. Durch die Variation der Steuerzeiten kann die Frischluft im Zylinder beeinflusst werden und der Restgasanteil durch interne Abgasrückführung (AGR) verändert werden. An der Volllast hängt die Füllung (Kenngrößen: Liefergrad und Luftaufwand) von den Steuerzeiten ab. Durch eine Variabilität im Ventiltrieb kann das Motorverhalten für jeden Betriebspunkt einzeln angepasst und optimiert werden.

**Einfluss in der Teillast**

**Entdrosselung in der Teilllast**

Neben dem Betrieb mit magerem Gemisch ermöglicht auch die variable Steuerung der Ladungswechselorgane eine Entdrosselung des Ottomotors in der Teillast. Die mit der üblichen Drosselsteuerung verbundene erhebliche Ladungswechselarbeit stellt einen wesentlichen Anteil der Prozessverluste des Ottomotors dar. ◘ Abb. 5.40 zeigt die mittels Zylinderdruckindizierung gemessene Ladungswechselarbeit als Anteil an der insgesamt geleisteten indizierten Arbeit im Motorkennfeld [30]. Dieser Anteil gewinnt mit abnehmender Motorlast deutlich an Bedeutung, was auf ein hohes Potenzial zur Verbrauchsverbesserung hindeutet.

Die Systeme zur variablen Ventilsteuerung sind in ► Abschn. 5.1.4.6.3 eingehend beschrieben. Die nachfolgend beschriebenen Konzepte zur Entdrosselung des Ottomotors mittels variabler Ventilsteuerung beziehen sich auf die dort vorgestellten Systeme zur Beeinflussung der Ventilsteuerzeiten und der zeitlichen Öffnungsquerschnitte.

Die Ladungsarbeit des konventionellen Ottomotors kann zu einem großen Teil vermieden werden, wenn die angesaugte Ladungsmasse ohne Drosselung des Ansaugstromes gesteuert wird. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Strategien vorgestellt. Eine Möglichkeit ist ein frühes Schließen der Einlassventile (FES) nachdem die gewünschte Frischgemischmasse angesaugt wurde bei vollständig geöffneter Drosselklappe. Das FES erfordert die Beherrschbarkeit sehr kurzer Ventilöffnungsdauern zur Realisierung der im Nulllastbetrieb minimalen Frischgemischmassen. Eine andere Möglichkeit ist ein spätes Schließen (SES) der Einlassventile, welche zum Aussieben der überschüssigen Ladungsmasse zurück in den Ansaugtrakt führt (◘ Abb. 5.41). Bei der Strategie SES ist tendenziell eine höhere Ladungswechselarbeit infolge der wiederholten Strömung, der für den jeweiligen Lastpunkt überschüssigen Ladungsmenge, zu verzeichnen.

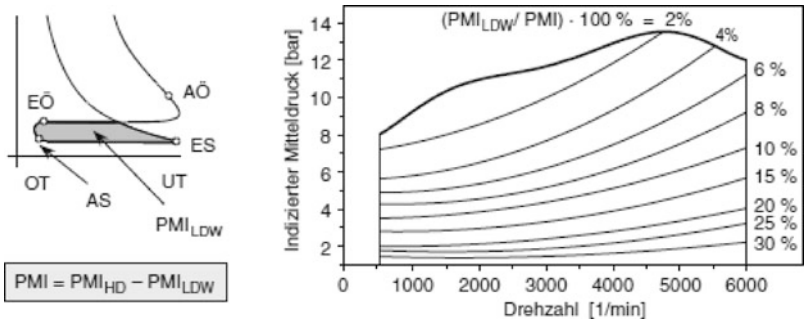



**Abb. 5.40** Ladungswechselverluste des konventionellen Ottomotors

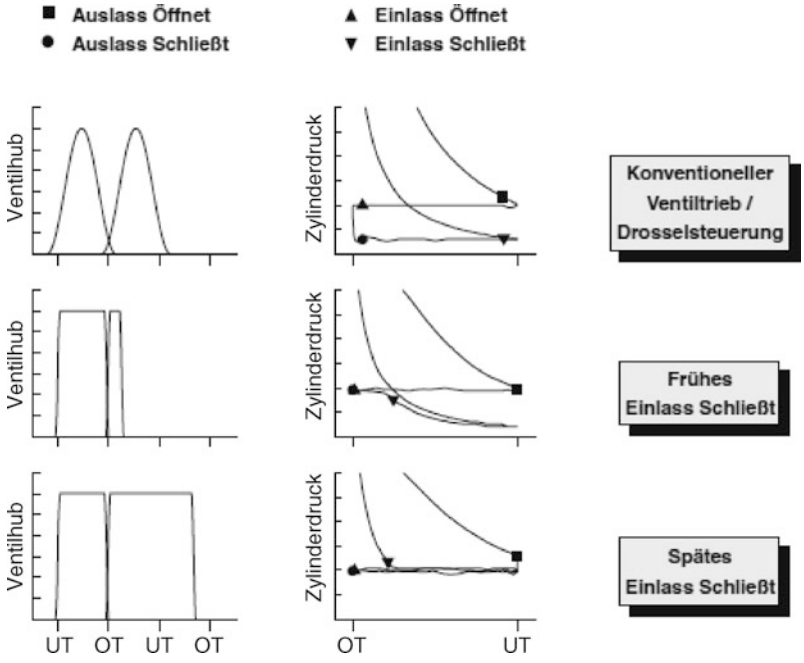



**Abb. 5.41** Laststeuerverfahren (Teillast)

Bei drosselfreier Laststeuerung entfällt der für die Kraftstoffverdampfung erforderliche Unterdruck im Saugrohr, was insbesondere im Kaltstart- und Warmlaufbetrieb des Motors zu Gemischbildungsproblemen führen kann. Dem kann beispielsweise mit dem in Abb. 5.42 gezeigten Verfahren mit einem späten Öffnen des Einlassventils [36] begegnet werden. Dadurch wird erreicht, dass zum Zeitpunkt Einlass-Öffnet (Eö) im Zylinder ein Unterdruck vorliegt, der ein einströmendes Frischgemisches mit Schallgeschwindigkeit bewirkt. Die mit dieser Prozessführung verbundenen Drosselverluste fallen in der Gesamtbetrachtung kaum ins Gewicht, weil nach dem Kaltstart wieder auf drosselfreie Laststeuerung übergegangen wird.

Überdies führt die Abgasrückführung im Teillastbetrieb zu einer begrenzten Entdrosselung des Motors. Neben der externen Abgasrückführung kann der Restgasgehalt mit Hilfe der Steuerzeiten durch innere Abgasrückführung eingestellt werden. Im folgenden Abschnitt wird die Realisierung mit unterschiedlichen Steuerzeiten erläutert. Die Ent-

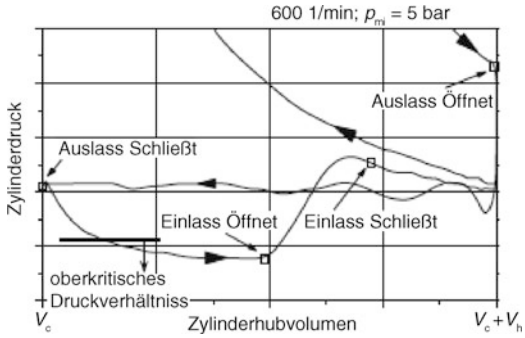



**Abb. 5.42** $p$-$V$-Diagramm bei „Spätem Einlass Öffnet" [36]

drosselung des Motors durch Abgasrückführung ist abhängig von der Restgasverträglichkeit des Brennverfahrens.

#### Interne Restgassteuerung in der Teilllast

Die Variabilität der Ventilsteuerzeiten lässt sich auch für die Steuerung der Restgasmasse nutzen (innere Abgasrückführung). Hierzu kommen prinzipiell drei Alternativen in Betracht (Abb. 5.43).

Bei einer Verschiebung beziehungsweise Ausdehnung der Ventilüberschneidungsphase in den Ausschiebetakt strömt verstärkt Abgas in den Ansaugtrakt („Einlasskanal-Rückführung") und verdünnt dort die nachfolgend angesaugte Frischladung. Dieses Verfahren wird auch zur Verbesserung der Gemischbildung im Einlasskanal genutzt.

Bei der „Auslasskanal-Rückführung" wird die Überschneidungsphase in den Saughub verlegt und in der ersten Phase des Ansaugtaktes Frischgemisch oder Luft über das Einlassventil und Abgas über das Auslassventil gleichzeitig angesaugt. Alternativ hierzu wird bei der „Brennraum-Rückführung" die Restgasmasse durch ein frühes Schließen des Auslassventils bestimmt, wobei das danach im Brennraum verbleibende Restgas infolge der Kolbenbewegung bis zum oberen Totpunkt verdichtet und dann wieder expandiert wird. Nach Erreichen atmosphärischen Druckniveaus im Zylinder wird dann das Einlassventil geöffnet, und der Ansaugvorgang erfolgt gemäß der Strategie FES (vgl. Abb. 5.41).

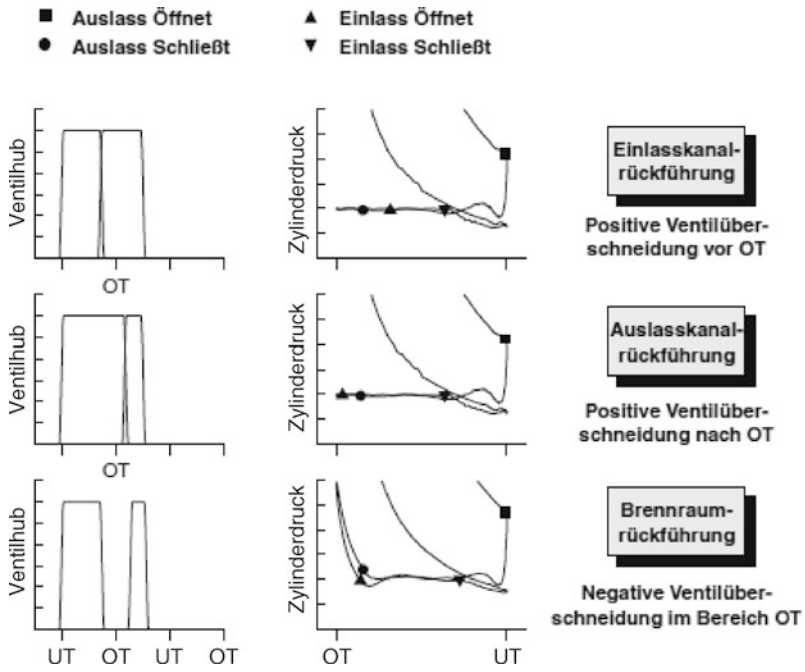



**Abb. 5.43** Restgassteuerverfahren

Neben der Reduzierung der Ladungswechselarbeit durch Entdrosselung bietet die variable Steuerung der Ventile noch weitere Potenziale zur Verbesserung des Betriebsverhaltens.

Bei niedrigen Drehzahlen und niedriger Last kann eine hohe Ventilüberschneidung relativ hohe Restgasanteile zur Folge haben, welche die Leerlaufstabilität des Motors beeinträchtigen können. Durch entsprechende Optimierung des Brennverfahrens mittels einlassseitig generierter Ladungsbewegung wird versucht dem entgegenzuwirken. Gelingt es auf diese Weise, eine hohe Restgasverträglichkeit darzustellen, so lässt sich dies auch zu der sogenannten inneren Abgasrückführung nutzen. Dadurch lassen sich die Rohemissionen, insbesondere die Stickoxidemissionen senken, was die Anforderungen an die katalytische Abgasreinigung mindert.

#### Weitere Einsatzgebiete der variablen Ventilsteuerung in der Teillast

Konstruktive Lösungen, die eine vollständige Deaktivierung einzelner Ventile erlauben, können zur Realisierung einer kennfeldgesteuerten Abschaltung einzelner Zylinder genutzt werden. Für die aktiven Zylinder resultiert daraus eine Betriebspunktverlagerung mit entsprechend günstigerem Kraftstoffverbrauch. Die Möglichkeiten der Ventilsteuerung reichen dabei bis zum zyklisch intermittierenden Betrieb, bei dem zwischen den vier Arbeitstakten jedes einzelnen Zylinders eine wählbare Anzahl von Leertakten zwischengeschaltet ist.

Die mit einigen bekannt gewordenen Systemen verbundene Variabilität des Ventilhubes (siehe auch ▶ Abschn. 5.1.4.6.3) stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Gemischbildung bei niedrigen Lasten durch Nutzung von Ventilspalt-Effekten zu verbessern. Je nach der erreichten Variabilität der Ventilsteuerung lassen sich auch noch weitere Potenziale zur Verbesserung des Motorbetriebs eröffnen. Beispielsweise folgen aus der Möglichkeit einer Leerlaufdrehzahl-Absenkung weitere Verbrauchsvorteile.

#### Strategien für die Volllast

Für den Betrieb des Motors an der Volllast ist die Füllung entscheidend. Diese wird maßgeblich durch die Steuerzeiten beeinflusst. Infolge einer optimierten Restgassteuerung kann eine bessere Füllung bei gleichzeitig verringerter Klopfbegrenzung erreicht werden. Das höhere Volllastdrehmoment, insbesondere im unteren Drehzahlbereich, erlaubt eine Verlängerung der Achsübersetzung, was über eine Betriebspunktverlagerung zu weiteren Verbrauchsvorteilen führt. Außerdem ermöglicht die variable Ventilsteuerung in Kombination mit der Aufladung beispielsweise die Realisierung des Miller-Verfahrens [63]. Andererseits können durch gezielt frühzeitiges Öffnen der Auslassventile Druckpulsationen im Auslasssystem erzeugt werden, die sich im Sinne einer Stoßaufladung zur Verbesserung des instationären Betriebsverhaltens nutzen lassen. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Strategien und Einflüsse der Steuerzeiten auf das Volllastverhalten genauer erläutert.

#### Optimierung der Einlasssteuerzeiten für hohe Füllung

Das Öffnen und Schließen der Einlassventile beeinflusst maßgeblich die Zylinderfüllung in der Volllast. Bei niedrigen Drehzahlen kann das Schließen der Einlassventile nach dem unteren Totpunkt zu einem Zurückschieben der bereits angesaugten Luft im Zylinder in das Saugrohr führen, was wiederum die Füllung reduziert. Aus diesem Grund ist ein früheres Schließen der Einlassventile für ein hohes Drehmoment im unteren Drehzahlbereich vorteilhaft.

Bei hohen Drehzahlen steigt die Luftgeschwindigkeit. Hier führt aufgrund der Trägheit der Luft ein späteres Schließen der Einlassventile nach dem unteren Totpunkt zum so genannten Nachladeeffekt [79] und einer höheren Füllung. Die Unterschiede des Luftaufwandes für eine frühe und eine späte Einlassnockenwellenposition sind in ◘ Abb. 5.44 schematisch dargestellt.

#### Steigerung des Drehmomentes bei niedrigen Drehzahlen durch Ventilüberschneidung

Bei gleichzeitig geöffneten Einlass- und Auslassventilen spricht man von Ventilüberschneidung. Bei aufgeladenen Motoren kann bei niedrigen Drehzahlen der Saugrohrdruck in der Überschneidungsphase größer sein als der Abgasgegendruck. Wenn der Saugrohrdruck im Vergleich zum Abgasgegendruck im Krümmer während der Ventilüberschnei-

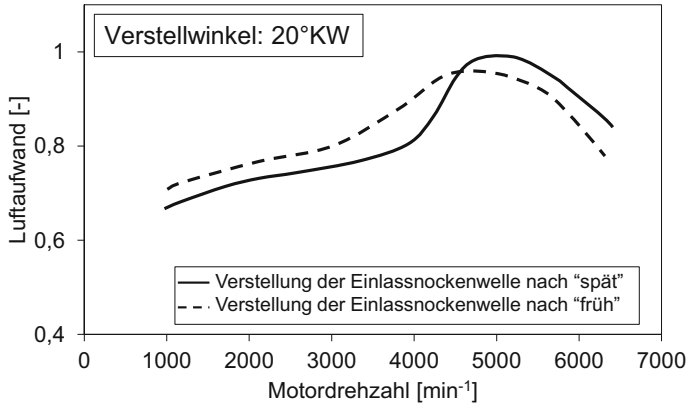



**Abb. 5.44** Einfluss der Einlasssteuerzeit auf den Luftaufwand am Beispiel eines Saugmotors

dung höher ist, kann Luft durch den Brennraum gespült werden. Dies wird als positives Spüldruckgefälle und spülenden Steuerzeiten bezeichnet. Dieser Effekt kann in geringerem Maße ebenfalls bei Saugmotoren durch die Ausnutzung von Druckwellen im Saugrohr genutzt werden.

In Abb. 5.45 sind der Saugrohr- und Abgasgegendruck, sowie die Ventilhubkurven über dem Kurbelwinkel des Motors dargestellt. Die schraffierten Flächen zeigen das Spüldruckgefälle während der Ventilüberschneidung. Ein *negatives* Spüldruckgefällte führt zu einem Zurückschieben des Abgases in den Brennraum, was wiederum die Füllung reduziert und zu einer höheren Klopfneigung führen kann. Aus diesem Grund sollte die Ventilüberschneidung bei einem negativen Spüldruckgefälle vermieden werden. Das positive Spüldruckgefälle hingegen kann an der Volllast verwendet werden, um das verbrannte Abgas aus dem Zylinder zu spülen und so den Luftaufwand zu erhöhen. Bei einem direkteinspritzenden Motor und einem späteren Einspritzbeginn wird ausschließlich Luft durch

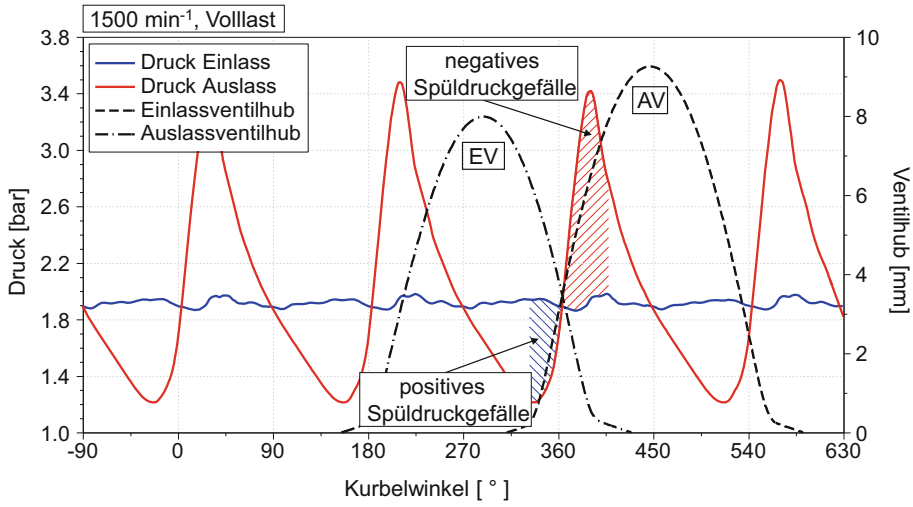



**Abb. 5.45** Analyse der Einlass- und Auslassdruckverläufe zur Beurteilung des Spülverhaltens bei Ventilüberschneidung, nach [80]

den Brennraum gespült, während bei äußerer Gemischbildung ebenfalls unverbrannter Kraftstoff in den Abgaskrümmer gelangt. Dadurch verschlechtern sich zum einen der effektive Wirkungsgrad und die Emissionen. Bei einer Regelung auf ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoffverhältnis im Abgas stellt sich im Brennraum bei spülenden Steuerzeiten ein fettes Luftverhältnis ein.

Außerdem kann der spülende Ladungswechsel Vorteile im Zusammenspiel mit einem Abgasturbolader führen. Bei niedrigen Drehzahlen ist der Luftvolumenstrom gering. Zur Steigerung des Drehmomentes ist ein hohes Druckverhältnis über dem Turbolader notwendig, um den notwendigen Ladedruck aufzubauen. Dies kann dazu führen, dass die Pumpgrenze des Turboladers erreicht wird. Aufgrund des hohen Druckverhältnisses im Kombination mit einem geringen Volumenstrom kommt es zum Strömungsabriss und Rückströmen der Luft im Verdichter. Durch das Spülen der Luft durch den Zylinder erhöhen sich der Luftmassenstrom durch den Verdichter und der Abgasmassenstrom durch die Turbine. Der gesteigerte Luftmassenstrom bewirkt eine Verschiebung des Verdichterbetriebspunktes weg von der Pumpgrenze. Daraus folgt eine mögliche Steigerung des Ladedruckes, was wiederum den Luftaufwand erhöht. Dies ist besonders bei niedrigen Drehzahlen von Interesse.

#### Einfluss des Öffnens der Auslassventile auf Expansions- und Ladungswechselarbeit

Der Zeitpunkt des Öffnens der Auslassventile hat einen Einfluss auf die Expansion und den Ladungswechsel. Bei einer Frühverstellung der Auslassnockenwelle ist eine verringerte Ausnutzung der Expansionsarbeit die Folge, wenn das Auslassventil vor dem unteren Totpunkt geöffnet wird. Infolge dessen wird weniger Arbeit auf den Kolben übertragen. Gleichzeitig kann die Ladungswechselarbeit aufgrund des aus dem früheren Öffnen resultierenden geringeren Druck beim Ausschieben reduziert werden. Daraus ergibt sich ein Trade-Off zwischen dem Verlust an Expansionsarbeit und dem Gewinn von Ladungswechselarbeit. Die beste Auslegung kann mit einem variablen Ventiltrieb durch eine Abstimmung des Zeitpunktes für das Öffnen der Auslassventile für jeden Betriebspunkt individuell definiert werden. Die Öffnungsdauer der Auslassventile (meist angegeben für 1 mm Hub) muss entsprechend angepasst werden, um den Zeitpunkt des Öffnens und des Schließens der Auslassventile mit den zuvor genannten Effekten einzeln abstimmen zu können.

In der ◘ Abb. 5.46 ist der Zylinderdruckverlauf über dem Hubvolumen im $p$-$V$-Diagramm mit zwei unterschiedlichen Öffnungsdauern der Auslassventile dargestellt. Dabei zeigt sich das zuvor beschriebene Trade-Off. Eine lange Öffnungsdauer führt bei gleich bleibenden Schließen der Auslassventile zu einem früheren Öffnen der Auslassventile. Dabei nimmt die nutzbare Expansionsarbeit in diesem Fall geringfügig ab. Gleichzeitig kann jedoch die Ladungswechselarbeit deutlich reduziert werden, sodass insgesamt ein höherer innerer Mitteldruck resultiert.

Zusammenfassend zeigen die zuvor erläuterten Strategien, wie die unterschiedlichen Anforderungen an einen modernen Ottomotor hinsichtlich Leistung, Verbrauch, Emissionen und Komfort ineinander greifen und bei der Feinabstimmung des Motors mittels eines variablen Ventiltriebs abgewogen werden müssen.

### 5.1.5.2 Gemischbildung

Zur Gemischbildung im Ottomotor zählen die Gemischdosierung nach Menge und Zusammensetzung sowie Gemischaufbereitung, -transport und -verteilung. Ziel der Gemischbildung beim konventionellen Ottomotor ist die Darstellung eines möglichst homogenen Gemischs mit stöchiometrischem Mischungsverhältnis von Luft (bzw. Sauerstoff) und Kraftstoff. Die Luftmenge wird mit der Drosselklappe oder mittels drosselfreier Laststeuerung über kontinuierlich variablen Ventilhub der Einlassventile reguliert, die angepasste Kraftstoffmenge mit der Einspritzung.

Die gleichmäßige Luftverteilung auf die Zylinder wird durch die Ansauganlage gewährleistet (► Abschn. 5.1.4.9). Die exakte und gleichmäßige Kraftstoffverteilung wird bei modernen Ottomotoren durch je ein Einspritzventil für jeden Zylinder bewirkt (multi-point injection MPI). Die Einspritzventile sind in den jeweiligen Saugarmen der Ansauganlage nahe bzw. in den Einlasskanälen (port fuel injection PFI) oder im Brennraum (direct injection DI) angeordnet. Die Gemischaufbereitung,

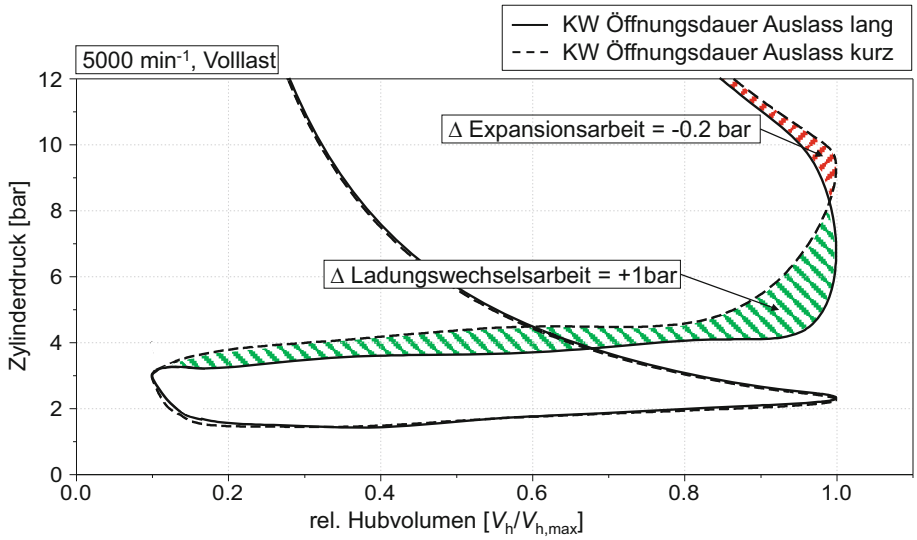



**Abb. 5.46** Einfluss des Öffnens der Auslassventile auf die Ladungswechselarbeit, dargestellt im $p$-$V$-Diagramm bei Nennleistung an der Volllast, nach [80]

d. h. die Verdunstung und Vermischung des Kraftstoffes mit der einströmenden Luft, wird vom Siedeverlauf des Kraftstoffes, der Temperatur, dem Druck, der Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz, der Zerstäubungsgüte und Kraftstoffkonzentration und der zur Verfügung stehenden Zeit beeinflusst.

Das Mischungsverhältnis wird mit dem Luftverhältnis $\lambda$ angegeben. Dieses ist das Verhältnis von zugeführter Luftmenge zum theoretischen Luftbedarf für die vollkommene Verbrennung der eingebrachten Kraftstoffmasse. Für die vollständige Verbrennung von 1 kg konventionellem Ottokraftstoff beträgt der stöchiometrische Luftbedarf etwa 14,6 kg Luft, wobei die erforderliche Luftmasse mit Erhöhung der Ethanolbeimischung sinkt. So liegt der stöchiometrische Luftbedarf für einen Ottokraftstoff mit 10 % Ethanolanteil (massenbezogen) bei etwa 14,0 kg. Bei Kraftstoffüberschuss ist $\lambda < 1$ (fettes Gemisch), bei Luftüberschuss ist $\lambda > 1$ (mageres Gemisch). Der Wert von $\lambda$ bestimmt das Betriebsverhalten des Motors (Abb. 5.47). Maximales Drehmoment und guter Rundlauf des Motors ergeben sich bei $\lambda \approx 0{,}9$, der geringste spezifische Kraftstoffverbrauch zwischen $\lambda = 1{,}1$ und $\lambda = 1{,}4$ bei homogener Gemischbildung. Ebenso hat das Luftverhältnis Einfluss auf die Emissionen des Motors; bei Luftmangel ($\lambda < 1$) steigen die Kohlenwasserstoff-(HC)- und Kohlenmonoxid-(CO)-Emissionen, bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$) steigen die Stickoxidemissionen-($NO_x$) bis zu einem Maximum bei etwa $\lambda = 1{,}1$ an und fällt bei weiterer Abmagerung wieder. Umgekehrt dazu verhalten sich die HC-Emissionen, die bei magerem Gemisch mit $\lambda > 1{,}1$ ansteigen (siehe auch Abb. 5.64).

Die vorteilhafte Auswirkung einer mageren Betriebsweise war immer wieder Gegenstand von Bemühungen, den Teillast-Kraftstoffverbrauch des Ottomotors durch Entdrosselung zu senken. Wegen der Notwendigkeit, zur Zündung an der Zündkerze ein Luftverhältnis zwischen $\sim 0{,}7$ und $\sim 1{,}5$ einzuhalten, sind dieser Maßnahme Grenzen gesetzt. Konzepte mit nicht-homogener, geschichteter Zylinderladung im Brennraum eröffnen hier erweiterte Potenziale (▶ Abschn. 5.1.5.2.2). Mit der Einführung des Drei-Wege-Katalysators wurden die Bestrebungen nach Magerkonzepten zunächst aufgegeben, da zur gleichzeitigen Oxidation von HC und CO und Reduktion von $NO_x$ der Wert $\lambda = 1$ zwingend eingehalten werden muss (▶ Abschn. 5.1.5.7.1).

Im normalen Betrieb bei warmem Motor bereitet die Gemischbildung keine gravierenden Proble-

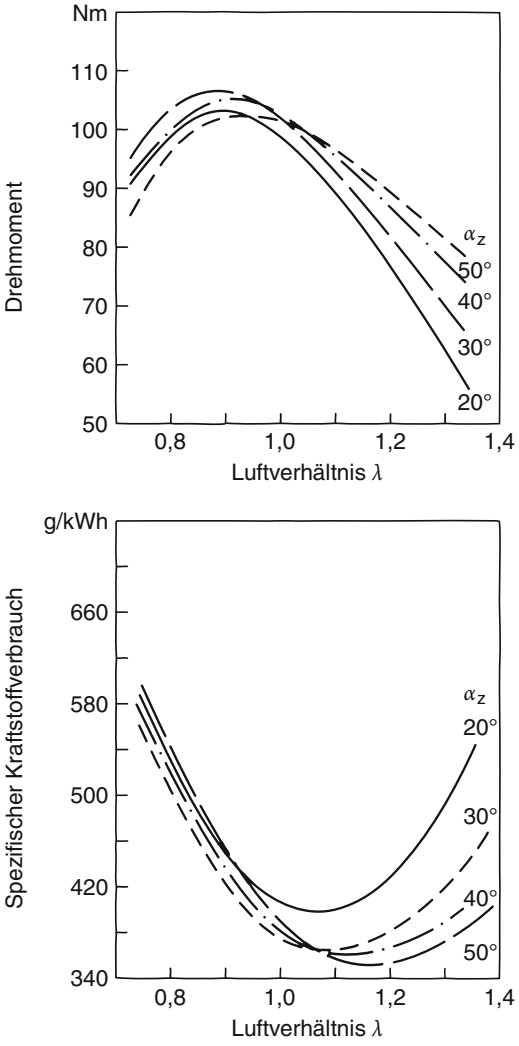


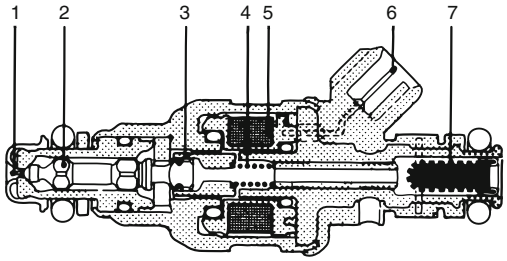

**Abb. 5.47** Einfluss von Luftverhältnis $\lambda$ und Zündzeitpunkt $\alpha_z$ [v. OT.] auf Kraftstoffverbrauch und Drehmoment

me. Kritisch dagegen ist der Kaltstart und Warmlauf des Motors. Bei den niedrigen Bauteiltemperaturen sowie wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz im Brennraum geht ein Teil des eingespritzten Kraftstoffes in einen Wandfilm über und nimmt zunächst nicht an der Verbrennung teil. Um dennoch ein zündfähiges Gemisch zu erhalten, muss eine Übermenge an Kraftstoff eingespritzt werden (Kaltstartanreicherung). Diese kann nicht vollständig verbrennen und führt zu sehr hohen HC-Emissionen, was eine große Herausforderung zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte darstellt. Zur Minimierung dieser Problematik müssen die Position und Ausrichtung der Einspritzventile sowie die Qualität des von ihnen generierten Sprays optimiert werden.

#### 5.1.5.2.1 Homogene Gemischbildung

Mit der Einführung der Katalysatortechnik kam es zur vollständigen Substitution der bis dahin vorwiegend eingesetzten Vergaser durch die Benzineinspritzung. Zunächst wurde an der gleichen Stelle, wo üblicherweise der Vergaser am Ansaugkrümmer angeflanscht war, der Kraftstoff zentral eingespritzt (single point injection SPI). Dies änderte jedoch nur wenig an dem Umstand, dass die Kanäle des Saugrohres mit Kraftstoff benetzt wurden und das dynamische Ansprechverhalten des Motors infolge der Anlagerungs- und Verdampfungsvorgänge im Saugrohr sehr verschleppt war. Deshalb setzte sich schnell die Einzeleinspritzung (MPI) durch. Für jeden einzelnen Zylinder ist ein separates Einspritzventil vorhanden, möglichst nah am Zylinderkopf montiert und in Richtung der Einlassventile spritzend (◘ Abb. 5.48). Die Einspritzung ist intermittierend; sie wird über einen Elektromagneten im Einspritzventil ausgelöst, der die Ventilnadel anhebt und die Spritzbohrung(en) freigibt. Die Dauer der Magnetansteuerung und der Kraftstoffüberdruck zum Saugrohrdruck bestimmen die eingespritzte Kraftstoffmenge. Bei 4-Ventil Zylinderköpfen mit zwei Einlasskanälen verwendet man in der Regel ein Einspritzventil mit einem Doppelstrahl in Richtung der beiden Einlassventile.

Heute üblich ist die Einzeleinspritzung (auch sequenzielle Einspritzung), bei der die Einspritzventile getrennt angesteuert werden, so dass jeder Zylinder zum vorgegebenen Zeitpunkt im Arbeitsspiel den Kraftstoff erhält. Dies kann kurz vor, während oder auch überlappend zum geöffneten Einlassventil vonstatten gehen in Abhängigkeit von Last, Drehzahl und Temperatur des Motors. Damit kann über die Motorsteuerung, abgesichert durch eingehende Versuche, der dynamische Vorgang einer Last- oder Drehzahländerung beherrscht werden, ohne dass zu viel oder zu wenig Kraftstoff in den Zylinder gelangt. Im Schubbetrieb wird die Kraft-




1 Spritzzapfen, 2 Ventilnadel, 3 Magnetanker, 4 Schließfeder, 5 Magnetwicklung, 6 elektrischer Anschluss, 7 Kraftstoffsieb

**Abb. 5.48** Einspritzventil (Bosch)

stoffeinspritzung ganz ausgesetzt (Schubabschaltung).

Die Kraftstoffversorgung zu den Einspritzventilen erfolgt über Verteilerleisten (fuel rail). Bei „top-feed" Ventilen wie in Abb. 5.48 wird diese Leiste von oben auf die in einer Reihe stehenden Einspritzventile aufgesteckt. Bei „bottom-feed" Ventilen ist in das Saugrohr, in Flanschnähe zum Zylinderkopf, ein Kraftstoffkanal integriert, in den das Ventil eingesetzt wird. Unterhalb und oberhalb der Zulaufbohrungen wird der Ventilkörper durch O-Ringe abgedichtet. Der Kraftstoffdruck beträgt bei Saugrohreinspritzung gewöhnlich 3 bis 5 bar über aktuellem Saugrohrdruck und wird von einer elektrischen Kraftstoff-Förderpumpe im Kraftstoffbehälter aufgebracht (▶ Abschn. 5.10). Der Druck wird mit einem Druckregler am Ende der Verteilerleiste je nach Saugrohrdruck und Verbrauch auf konstanten Differenzdruck geregelt. Die Überschussmenge an Kraftstoff wird durch ein Rücklauf-Leitungssystem in den Tank zurückbefördert und sorgt so für die Ableitung von Luft- und Kraftstoffdampfblasen aus dem Leitungssystem. Heutige Systeme arbeiten auch rücklauflos, wobei die Druck- und Mengenregelung in die Pumpe integriert oder im Tank angebracht ist und nur die tatsächliche Bedarfsmenge in den Kraftstoffverteiler gefördert wird.

Neben den bereits erwähnten Varianten mit einem oder mehreren Einspritzstrahlen je Ventil sind auch Ausführungen mit von der Mittelachse des Ventils abweichenden Strahlachsen verfügbar. Unterschiede gibt es auch hinsichtlich der Zerstäubungsqualität. Hier gilt es, eine gute Optimierung auf den jeweiligen Motortyp zu erreichen und insbesondere auch eine gleich bleibende Qualität des Einspritzstrahles bei allen Betriebsbedingungen und über der Laufzeit zu gewährleisten. Durch Zuströmen von Luft an der Öffnung des Ventils kann die Zerstäubung zusätzlich verbessert werden (luftumfasste Ventile). Dabei wird vor der Drosselklappe ein Teilluftstrom abgezweigt und das Druckgefälle zum Saugrohr ausgenutzt, um Kraftstoff und Luft bereits an der Einspritzstelle zu vermischen und mit hohen Luftströmungsgeschwindigkeiten kleinere Tröpfchengrößen zu erzeugen.

#### 5.1.5.2.2 Benzin-Direkteinspritzung

Beim direkteinspritzenden Ottomotor erfolgt die Einspritzung des Kraftstoffs direkt in den Brennraum. Die Zeitdauer zwischen Einspritzung und Zündzeitpunkt bestimmt die Gemischbildung und damit den Ladungszustand gegen Ende der Verdichtung. Eine frühe Einspritzung während des Saughubes ermöglicht eine weitgehend homogene Zylinderladung. Diese Betriebsart wird vor allem für höhere Last und Volllast genutzt.

Beim geschichteten inhomogenen Betrieb erfolgt die Einspritzung gegen Ende der Verdichtung, um eine ausgeprägte Ladungsschichtung zu erzielen. Sowohl die damit verbundene Entdrosselung des Motors als auch die infolge geänderter Stoffwerte der Zylinderladung entstehenden thermodynamischen Vorteile wirken sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Die Zündung erfolgt bei beiden Betriebsarten durch eine konventionelle Zündkerze.

Die Direkteinspritzung hat im Vergleich zum konventionellen Ottomotor mit äußerer Gemischbildung einige Vorteile. Die durch die Kraftstoffverdunstung verursachte Innenkühlung während des Ansaugvorgangs führt zu einer Luftaufwandssteigerung im Volllastbetrieb und zu einer verringerten Klopfneigung, so dass höhere Volllastmitteldrücke erreicht werden können. Üblicherweise wird ein Teil dieses Vorteils zur Anhebung des Verdichtungsverhältnisses genutzt, wodurch eine Steigerung des Innenwirkungsgrades im gesamten Kennfeld erzielt wird.

Der geschichtete Betrieb ermöglicht durch Entdrosselung im Teillastbetrieb eine erhebliche Verringerung der Ladungswechselarbeit und eine Reduktion der Wandwärmeverluste durch die isolie-

rend wirkende Luftumhüllung der kraftstoffreichen Gemischzone im Schichtladebetrieb.

Spezifische Nachteile sind der Mehraufwand für die Abgasreinigung des mageren Abgases und die Verringerung des mechanischen Wirkungsgrades durch höhere Zylinderdrücke im Schichtladebetrieb. Brennverfahrensspezifisch können weitere Nachteile durch die zerklüftete Brennraum- und Kolbenform und durch eine teilweise zu frühe, wirkungsgradungünstige Schwerpunktslage der Verbrennung entstehen.

Eine weitere Option der Benzin-Direkteinspritzung stellt der Direktstart dar [37], bei dem der Motor durch Direkteinspritzung mit nachfolgender Zündung gestartet werden kann. Mit Startzeiten von 300 ms bietet sich dieses Verfahren auch für den kraftstoffsparenden Start-Stopp-Betrieb an [39].

**Betriebsstrategie für die Einspritzung beim DI-Ottomotor** Im Teillastbetrieb kann der direkteinspritzende Ottomotor mit geschichteter Zylinderladung und Abgasrückführung betrieben werden. Ein Beispiel für die Strategie der verschiedenen Betriebsarten im Motorkennfeld ist in ◘ Abb. 5.71 in ▶ Abschn. 5.1.5.8.2 dargestellt. Die Ausdehnung der unterschiedlichen Betriebsarten ist abhängig vom gewählten Verfahren der Ladungsschichtung.

Im Leerlauf und bei sehr niedrigen Lasten ist üblicherweise eine Teilandrosselung erforderlich, um die Abgastemperaturen auf einem Niveau zu halten, welches die katalytische Abgasnachbehandlung erfordert. Zu höheren Lasten entstehen im Schichtladebetrieb Zonen überfetteten Gemisches und es muss auf homogenen Betrieb umgeschaltet werden. Im Bereich hoher Last kann die mit der Einspritzdauer anwachsende Eindringtiefe des Einspritzstrahls durch eine Mehrfacheinspritzung reduziert werden, was zu einer Verringerung von Wandbenetzung und Ölverdünnung beiträgt.

Wesentliche Aufgabe eines Brennverfahrens mit Benzin-Direkteinspritzung ist die Nutzung der prinzipbedingten Vorteile in möglichst weiten Bereichen des Motorkennfeldes und in serientauglicher Stabilität. Beim Schichtladebetrieb steht nur eine vergleichsweise kurze Zeitspanne für die Gemischbildung zur Verfügung. Es sind deshalb besondere Vorkehrungen zu treffen, damit das Gemisch ausreichend aufbereitet wird. Zum Zündzeitpunkt muss an der Zündkerze zündfähiges Gemisch vorliegen, damit eine zuverlässige Entflammung sichergestellt ist.

Daneben soll das Brennverfahren auch potentiell negative Begleiterscheinungen der Direkteinspritzung vermeiden. So ist die Benetzung der Zylinderlaufbuchse mit flüssigem Kraftstoff wegen der Gefahr einer Schmierfilmabwaschung durch geeignete Injektorauslegung zu verhindern. Ebenso ist die Ausbildung ausgemagerter Gemischzonen, die unvollständig verbrennen und erhöhte Kohlenwasserstoffemissionen verursachen, durch geeignete Maßnahmen zu unterdrücken. Um die Bildung von Rußpartikeln zu vermeiden, muss die Aufbereitung des eingespritzten Kraftstoffes so weit unterstützt werden, dass beim Eintreffen der Flammenfront keine flüssigen Kraftstofftröpfchen oder überfettetes Gemisch mehr vorliegen. Die Ablagerung von Rückständen unvollständiger Verbrennung am Kraftstoffinjektor ist zu minimieren. Auch das direkte Anspritzen der Zündkerze mit flüssigem Kraftstoff muss wegen der damit verbundenen Thermoschockwirkung ausgeschlossen werden.

Der Gemischtransport vom Injektor zur Zündkerze im Schichtladebetrieb kann durch unterschiedliche Brennverfahren realisiert werden. Einen Haupteinfluss bilden die Lage von Injektor zur Zündkerze, die Brennraumform sowie die Ladungsbewegung im Zylinder. Auf Basis dieser Eigenschaften kann eine Einteilung in strahlgeführte, wandgeführte und luftgeführte Brennverfahren erfolgen. Wenn auch ausgeführte Brennverfahren nicht immer eindeutig einer dieser drei Grundmuster zuzuordnen sind, trägt diese Klassifizierung zu einem besseren Verständnis der wesentlichen Vorgänge bei.

**Strahlgeführte Verfahren** Beim strahlgeführten Verfahren beruht der Gemischbildungsprozess und das Schichtungsprofil im Wesentlichen auf den Eigenschaften des Kraftstoffstrahls, da keine gezielte Unterstützung durch Ladungsbewegung erfordert wird und der Brennraum für eine ungehinderte Ausbildung des Kraftstoffstrahls ausgelegt ist.

Grundsatzuntersuchungen an einem Einzylinder-Versuchsmotor mit strahlgeführtem Brennverfahren [40] haben gezeigt, dass für den Zündort nur eine sehr dünne Zone am äußeren Strahlrand

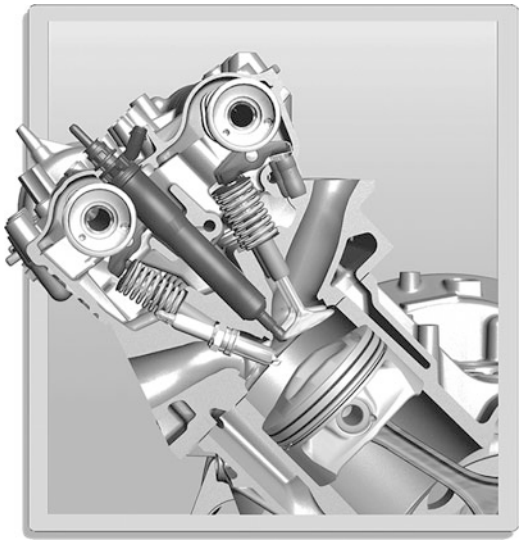


**Abb. 5.49** Strahlgeführtes Brennverfahren (M272 von Mercedes-Benz)

infrage kommt. Deshalb sind an die Kraftstoffinjektoren hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer Streuung zu stellen. Mit der Einführung nach außen öffnender Einspritzventile konnte diesbezüglich ein Durchbruch erzielt werden [41]. Für strahlgeführte Verfahren ist eine nahe räumliche Anordnung von Kraftstoffinjektor und Zündkerze typisch, um auch bei kleinen Einspritzmengen eine Konzentration von zündfähigem Gemisch an der Zündkerze sicherzustellen.

Durch die Anordnung des Kraftstoffinjektors in der Mitte des Zylinderkopfes ergibt sich für den Teillastbetrieb eine Konzentration der Kraftstoff-Luft-Gemischwolke im Zentrum des Brennraumes mit einer wärmeisolierenden Umhüllung aus Luft beziehungsweise Luft-Restgas-Gemisch. Neben niedrigeren Ladungswechselverlusten durch Entdrosselung ist hierauf zurückzuführen, dass derart ausgeführte strahlgeführte Brennverfahren sehr günstige Teillastverbräuche aufweisen. Für den Volllastbetrieb ist die zentrale Anordnung des Kraftstoffinjektors vorteilhaft, weil auf diese Weise eine gute Gemischaufbereitung bei möglichst geringer Benetzung der Zylinderwand erreicht werden kann (Abb. 5.49).

Im Vergleich zu den anderen Verfahren stellt das strahlgeführte Brennverfahren die höchsten Anforderungen an die Toleranzen und laufzeitbedingten Abweichungen des Strahlbildes. Das Emissions- und Verbrauchspotential der Direkteinspritzung lässt sich mit diesem Verfahren jedoch weit ausschöpfen. Hinsichtlich der Partikelanzahlemissionen im Schichtladebetrieb ist eine Optimierung notwendig, da im homogenen Betrieb meist deutlich weniger Partikel emittiert werden.

**Wandgeführte Verfahren** Bei den wandgeführten Verfahren erfolgt die Gemischbildung über die Lenkung des eingespritzten Kraftstoffs durch die Brennraumwand. Der Transport des Gemischs zur Zündkerze erfolgt meistens über eine speziell geformte Kolbenmulde, von der der Einspritzstrahl abgelenkt wird und anhaftender Kraftstoff abdampfen kann. Durch die geometrische Abstimmung der Kolbenmulde in Bezug zur Zündkerze wird die Konzentration eines zündfähigen Gemisches am Zündort unterstützt. Ein allein durch die Mulde geführter Gemischtransport des Kraftstoffstrahls führt jedoch meist zu keinem befriedigenden Betriebsverhalten, so dass zur Unterstützung der Kraftstoffaufbereitung eine speziell abgestimmte Ladungsbewegung genutzt wird. Diese führt die Verbrennungsluft an die kraftstoffreiche Wandanlagerung heran und hilft beim Gemischtransport zur Zündkerze. Ein optimales Zusammenspiel zwischen Kraftstoffstrahl, Kolbenmulde und Ladungsbewegung ist notwendig, damit es nicht zu einem verschleppten Brennende und hohen Kohlenwasserstoffemissionen kommt. Bei ausgeführten Motorkonzepten sind häufig Mischformen der Grundladungsbewegung Drall und Tumble anzutreffen, wobei die Unterscheidung im Wesentlichen anhand der Orientierung der Wirbelachse festzumachen ist.

Die aufwendig gestaltete Brennraumform führt zu einem zerklüfteten Brennraum, der einem optimalen Volllastbetriebsverhalten entgegensteht. Beim Kaltstart ist ein Betrieb mit Schichtladung nur eingeschränkt möglich, da der Verdampfungsprozess deutlich von der Temperatur des Kolbenbodens beeinflusst wird.

Die ersten von japanischen Herstellern in Serie produzierten Motoren mit Benzin-Direkteinsprit-

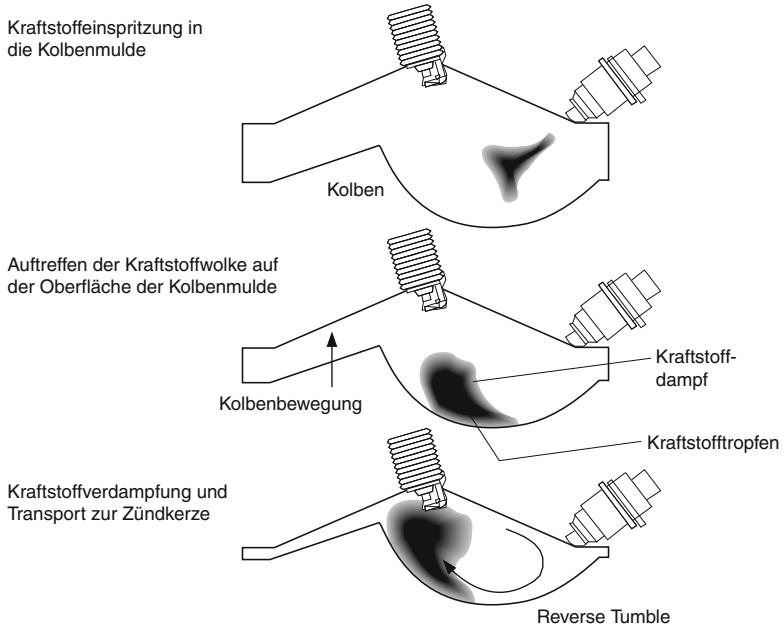



**Abb. 5.50** Wandgeführtes Reverse-Tumble-Brennverfahren [42]

zung sind als typische Vertreter der wandgeführten Brennverfahren anzusehen. Das 1996 unter dem Namen GDI eingeführte DI 4-Ventil-Motor [42] der Firma Mitsubishi Motors Co. (Abb. 5.50) ist mit einem Verdichtungsverhältnis von 12,5 relativ hoch verdichtet, was durch die Innenkühlung infolge der direkten Einspritzung des Kraftstoffes ermöglicht wird. Der Kolben ist mit einer ausgeprägten Mulde versehen, welche zum einlassseitig angebrachten Kraftstoffinjektor hin flach und zur Zündkerze hin steil auslaufend gestaltet ist.

Zur Unterstützung der Gemischbildung und des Gemischtransportes wird eine „Reverse Tumble" Ladungsbewegung eingesetzt, deren Drehrichtung entgegengesetzt zu derjenigen üblicher Tumble-Systeme ist [42].

Das 1997 vorgestellte und von Toyota Motor Co. im 2,0 l-Ottomotor eingesetzte 4-Ventil-DI-Konzept [44] beruhte ebenfalls auf einem wandgeführten Brennverfahren (Abb. 5.51). Der Kraftstoffstrahl ist auf die Randzone einer im Kolben angeordneten Mulde ausgerichtet. Die Gemischbildung wird durch eine Drallströmung unterstützt, welche durch einen Dralleinlasskanal bei Abschaltung des zweiten, als Füllungskanal ausgelegten Einlasskanals erzeugt wird. Durch die Drallströmung wird der Wandabtrag des auf der Kolbenoberfläche angelagerten Kraftstoffes sowie der Transport des Gemisches zur Zündkerze bewirkt. Im oberen Totpunkt

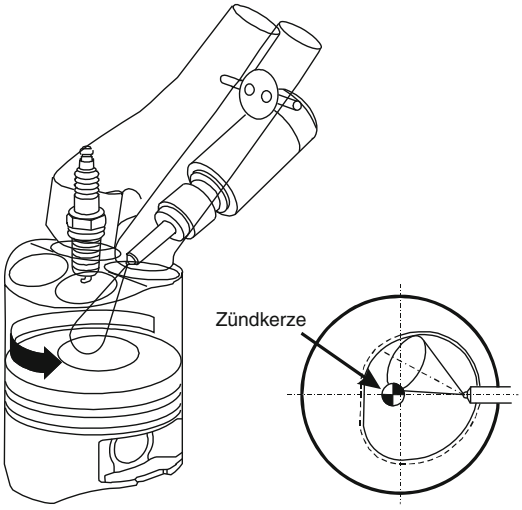



**Abb. 5.51** Wandgeführtes Drall-Brennverfahren [44]

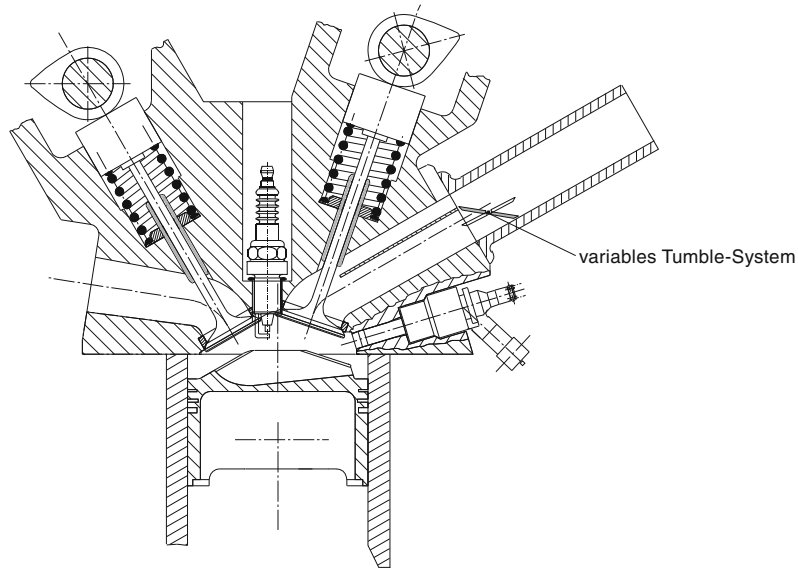



**Abb. 5.52** Luftgeführtes Brennverfahren

des Motors ragt die zentral im Zylinderkopf angeordnete Zündkerze in die leicht eingezogene Mulde hinein.

Das im Jahr 2002 von der damaligen DaimlerChryslerAG vorgestellte Verfahren mit der Bezeichnung CGI beruhte ebenfalls auf einer wandgesteuerten Gemischbildung und Drallladungsbewegung [45]. Hier kam erstmals die Kombination von Benzin-Direkteinspritzung mit Aufladung zum Serieneinsatz. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine mechanische Kompressoraufladung.

Wenn auch wandgeführte Verfahren aus den genannten Gründen nicht das volle thermodynamische Potential der Benzin-Direkteinspritzung auszuschöpfen vermögen, so haben sie doch in einer Reihe von Applikationen unter Beweis gestellt, dass sie hinsichtlich ihrer Betriebsstabilität, das heißt der Vermeidung von Zündaussetzern unter allen im Fahrbetrieb vorkommenden Randbedingungen, günstige praxisrelevante Eigenschaften aufweisen.

**Luftgeführte Verfahren** Bei den luftgeführten Brennverfahren erfolgt die Gemischbildung durch das Zusammenwirken des Kraftstoffsprays mit einer intensiven und gerichteten Strömung der Zylinderladung. Dabei findet die Gemischbildung ohne direkte Beeinflussung durch die Brennraumwand statt. Die Brennraumgestaltung hat die Aufgabe, die in den Einlasskanälen beim Ansaugvorgang erzeugte Strömung der Verbrennungsluft zu stabilisieren und so dafür zu sorgen, dass nach erfolgter Einspritzung Luft in den Kraftstoffstrahl eingemischt und das auf diese Weise gebildete Gemisch zur Zündkerze transportiert wird.

Typisch für luftgeführte Brennverfahren ist ein relativ großer Abstand zwischen Kraftstoffinjektor und Zündkerze. Der Kraftstoffstrahl ist zur Zündkerze ausgerichtet, ohne dabei die Zündelektroden direkt anzuspritzen. Die Brennraumgestaltung ist sowohl für eine optimale Strahlausbreitung bei späten Einspritzungen als auch für eine gute Unterstützung der Ladungsbewegung auszulegen. Der Transport des Kraftstoffs zur Zündkerze erfolgt maßgeblich durch die von den Einlasskanälen beim Ansaugvorgang erzeugte Brennraumströmung. Durch Vermeidung von Wandauftrag des Kraftstoffs besitzt das Verfahren ein hohes Potential zur Darstellung niedriger Kohlenwasserstoffemissionen. Abb. 5.52 zeigt diese Konfiguration am Beispiel eines von der FEV entwickelten Brennverfahrens mit Tumble-Ladungsbewegung [46].

Im Rahmen der Entwicklung dieses Brennverfahrens wurden auch Laseroptische und numerische Verfahren zur Analyse des Gemischbildungs-

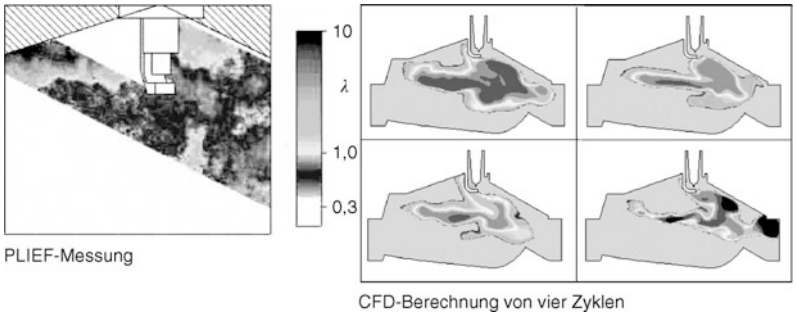



**Abb. 5.53** Optische Diagnostik und numerische Berechnung zur Analyse der Gemischverteilung [47]

prozesses eingesetzt [47]. Abb. 5.53 zeigt die mit LIF (Laser Induzierte Fluoreszenz) gemessenen und mit CFD (Computational Fluid Dynamics) berechnete Gemischverteilung zu den Zeitpunkten Einspritzende und Zündung. Es ist erkennbar, in welchem Maße die Ladungsbewegung den Kraftstoffstrahl zur Zündkerze hin ablenkt und dadurch an der Zündkerze ein zündfähiges Gemisch konzentriert wird. Wie dieses Beispiel zeigt, sind optische Diagnostik und numerische Prozesssimulation leistungsfähige Werkzeuge, welche dem Entwickler gute Voraussagen hinsichtlich der Auswirkung von Modifikationen oder geänderten Betriebsbedingungen erlauben. Diese Methoden haben sich daher als unverzichtbar in der Entwicklung von Brennverfahren für Benzin-Direkteinspritzung etabliert.

Die Generierung der Ladungsbewegung bei wand- und luftgeführten Brennverfahren kann durch verschiedene Systeme realisiert werden. Um den Luftaufwand nicht negativ zu beeinflussen, können variable Systeme eingesetzt werden. Bei Drall-Verfahren (Abb. 5.51) kommt vorzugsweise die Kanalabschaltung zum Einsatz. Dabei wird im Teillastbetrieb einer der beiden Einlasskanäle durch eine Schaltklappe deaktiviert. Bei Tumble-Verfahren wird die Ladungsbewegung durch eine horizontale Teilung der Einlasskanäle realisiert. Eine Hälfte der Teilkanäle kann dann mittels einer Schaltklappe oder -walze deaktiviert werden. Die Intensität der Ladungsbewegung wird von der Kanalgeometrie, der Lage der horizontalen Teilung sowie der Klappenposition bestimmt und ist je nach Brennverfahren anzupassen.

Heute umgesetzte Brennverfahren lassen sich nicht immer eindeutig einem der drei Grundmuster zuordnen. Durch den Versuch die günstigsten Eigenschaften der einzelnen Konzepte zu kombinieren, charakterisiert vielmehr die Art der Ladungsbewegung (Drall, Tumble, Reverse-Tumble) das Brennverfahren. Ebenfalls wirken sich Restriktionen durch die Übernahme von bestehenden Serienbauteilen, sowie Fertigungseinrichtungen auf die Randbedingungen des Brennverfahrens aus.

Abb. 5.54 zeigt ein luftgeführtes Verfahren mit Wandführungsunterstützung am Beispiel des von der Volkswagen AG in Serie gebrachten FSI-Brennverfahrens mit Tumble-Ladungsbewegung. Hierbei wird eine variable Einstellung der Ladungsbewegungsintensität durch eine horizontale Teilung der Einlasskanäle realisiert. Die untere Hälfte der Teilkanäle kann mittels einer Schaltklappe deaktiviert werden und somit wird die Intensität der Tumble-Ladungsbewegung erhöht. Die Kolbenmulde ist zweigeteilt, wobei der dem Injektor zugewandte Teil den Kraftstoffstrahl ablenkt („Kraftstoffmulde“) und der zweite Teil („Strömungsmulde“) die Tumble-Strömung gegen Ende des Verdichtungstaktes so lenkt, dass der gewünschte Gemischtransport zur Zündkerze hin stattfindet [48].

Das Brennverhalten des direkteinspritzenden Ottomotors im Schichtladebetrieb unterscheidet sich deutlich vom konventionellen Verfahren. Verglichen mit dem konventionellen Ottomotor zeigen Verfahren der Direkteinspritzung mit Schichtladebetrieb einen raschen Umsatz zum Beginn der Verbrennung. Die verbrauchsoptimale Schwerpunktlage des Kraftstoffumsatzes liegt aufgrund des gerin-

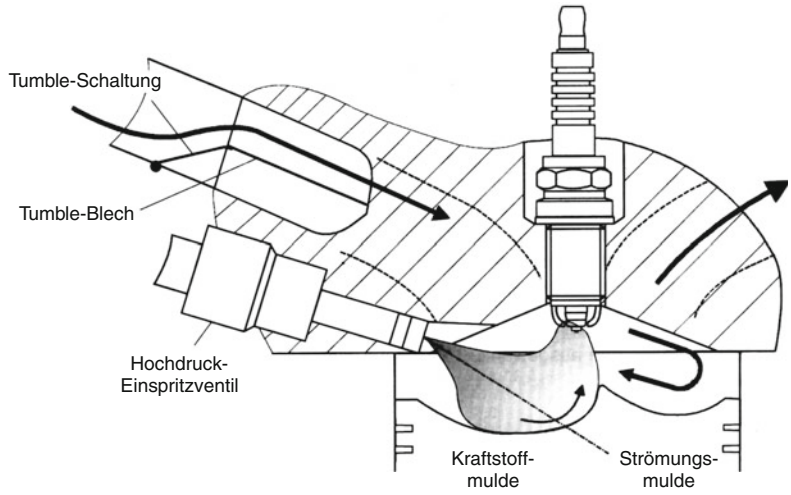



**Abb. 5.54** Tumble Brennverfahren (VW 2.0 l FSI)

geren Wärmeverlustes, sowie des verzögerten Verbrennungsendes früher als bei einem konventionellen Ottomotor.

Der Großteil der heute in Serie verfügbaren Motoren mit Direkteinspritzung arbeitet im Homogenbetrieb mit luftgeführter Gemischbildung. Die Mehrloch-Magnetventilinjektoren sind seitlich oder zentral im Brennraum angeordnet und auf minimale Wandbenetzung ausgelegt. Insbesondere wegen erhöhter Emissionen wird das wandgeführte Verfahren kaum noch eingesetzt. Für den mageren Schichtbetrieb kommen heute ausschließlich Motoren mit strahlegführtem Brennverfahren zum Einsatz.

**Einspritztechnik** Bei den in Serie befindlichen DI Einspritzsystemen kommt die Hochdruck-Flüssigkeitseinspritzung zum Einsatz. Zur Realisierung der auftretenden Drücke bis zu 250 bar erweitert sich das Einspritzsystem gegenüber dem konventionellen Ottomotor um eine Kraftstoffhochdruckpumpe. Als Hochdruckpumpe kommen Mehr- und Einkolbenpumpen in radialer oder axialer Bauart zum Einsatz. Ihr Antrieb erfolgt entweder direkt von der Nockenwelle oder über den Steuertrieb des Motors. Für Zukunftslösungen sind auch elektrisch angetriebene Hochdruckpumpen in der Entwicklung. Der Systemdruck wird über ein Druckregelventil auf einen konstanten oder kennfeldgeregelten Wert eingestellt. Aus der Kraftstoff-Verteilerleiste (Common Rail) wird pro Zylinder ein Kraftstoffinjektor gespeist, über den der Kraftstoff direkt in den Brennraum des Motors eingespritzt wird. Das Gesamtsystem ist in Abb. 5.55 schematisch dargestellt.

Bei den direkteinspritzenden Brennverfahren werden unterschiedliche Injektortypen verwendet, die im Hinblick auf ihr Einspritzstrahlbild an das Brennverfahren angepasst werden. Abb. 5.56 zeigt Spraybilder von drei bei der Hochdruck-Flüssigkeitseinspritzung verwendeten Injektortypen bei Umgebungstemperatur und atmospärischem Gasdruck.

Der Drallinjektor zeigt einen eng begrenzten Strahl, was zur Ausbildung einer kompakten Kraftstoffwolke führt. Eine Erhöhung des Gasdruckes bewirkt eine geringe Änderung der Eindringtiefe, vermindert jedoch gleichzeitig den Ausbreitungswinkel des Strahls. Dies führt zu einer Strahleinschnürung und stärkeren Konzentration des Kraftstoffs. Die Erzeugung des Strahlkegels erfolgt über eine tangentiale Komponente der Kraftstoffströmung, welche über entsprechende Formgebung im Bereich des Düsennadelsitzes der Strömung aufgeprägt wird. Je nach Ausführung dieses Drallerzeugers ist diese Strömungsform bei sehr kleinen Einspritzdauern beziehungsweise zu Beginn des Einspritzvorganges noch nicht voll ausgeprägt. Infolge-

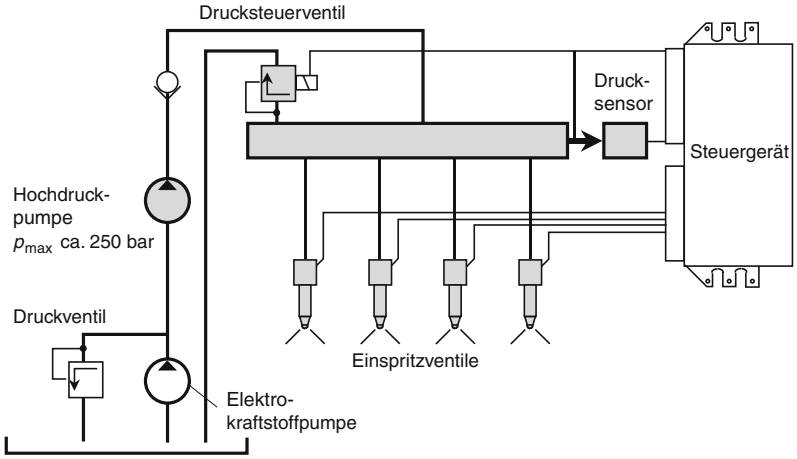



**Abb. 5.55** Hochdruck-Flüssigkeitseinspritzung

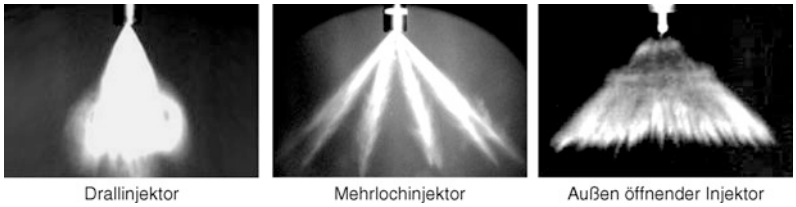



**Abb. 5.56** Spraybilder von verschiedenen Injektortypen [49]

dessen entsteht ein kompakter Vorstrahl mit geringem Kegelwinkel.

Die Einzelstrahlen des Mehrlochinjektors sind über die gesamte Eindringtiefe scharf abgegrenzt. Die Einzelstrahlen bieten die Möglichkeit einer freieren Strahlgestaltung bis hin zu asymmetrischen Strahlbildern. Die Ausbreitungswinkel der Einzelstrahlen sind unabhängig vom Gasdruck, die Eindringtiefe geht mit steigendem Gasdruck leicht zurück. Ein Nachteil des Mehrlochinjektors ist seine Empfindlichkeit gegenüber Verkokungen der Düsenlöcher, der jedoch durch Maßnahmen u. a. zur Düsenlochformung inzwischen weitgehend beherrscht wird. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Mehrlochinjektoren hat zu einer hohen Marktdurchdringung geführt. Kleinere Lochdurchmesser sorgen für verbesserten Strahlaufbruch. Neben der individuellen Gestaltung des Strahlbildes können unterschiedliche Bohrungsdurchmesser der einzelnen Spritzlöcher zur Optimierung der Gemischbildung beitragen.

Der nach außen öffnende Injektor weist im Vergleich der Injektoren den größten Strahlkegelwinkel auf. Durch Kombination dieser Düsenform mit einer Piezo-Aktuatorik ist der Winkel nahezu unabhängig vom Gasdruck. Die Eindringtiefe des Strahls zeigt hingegen einen deutlichen Gasdruckeinfluss. An der Außenseite des Einspritzkegels bildet sich eine ringförmige Rezirkulationszone aus, die für eine gute Gemischaufbereitung sorgt und eine hohe Reproduzierbarkeit aufweist. Dieser Bereich eignet sich daher besonders zur Positionierung der Zündkerze. Vorteil des nach außen öffnenden Injektors sind kleine Tropfengrößen bei geringer Eindringtiefe. Der Piezo-Aktuator des Injektors dehnt sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung aus und öffnet die Injektornadel. Dabei werden sehr geringe Schaltzeiten von 200 µs erreicht. Neben der Möglichkeit von Teilhüben und Mehrfacheinspritzung zeichnen sich Piezo-Injektoren durch eine hohe Wiederholgenauigkeit von Strahlausbreitung und Kraftstoffzumessung sowie

eine gute Gemischaufbereitung aus. Dem Vorteil der dadurch reduzierten Emissionen bei homogener Gemischbildung stehen verhältnismäßig hohe Kosten gegenüber.

Die Eigenschaften des vom Einspritzventil erzeugten Kraftstoffstrahles werden im Wesentlichen durch den Durchfluss, den Strahlkegelwinkel und beim Mehrlochinjektor durch die Winkellage der Einzelstrahlen sowie durch die Tropfengrößenverteilung charakterisiert. Bei der Auslegung des Durchflusses ist der erforderlichen Spreizung der Einspritzmenge zwischen Leerlauf und Nennleistung Rechnung zu tragen. Die Mengenspreizung lässt sich dabei über eine betriebspunktabhängige Steuerung des Kraftstoff-Systemdruckes erweitern.

Die Quantifizierung der Zerstäubungsgüte des Kraftstoffsprays erfolgt über die Tropfengrößenverteilung. Sie wird mit dem Sauter-Durchmesser als eindimensionale Kenngröße quantifiziert. Dieser ist als der Durchmesser eines hinsichtlich Volumen-Oberflächen-Verhältnis repräsentativen Tropfens interpretierbar. Typische Werte für den Sauter-Durchmesser serientauglicher Kraftstoffinjektoren liegen im Bereich $< 20\,\mu m$. Die Optimierung der hydraulischen Eigenschaften des Kraftstoffinjektors ist Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, bei denen sowohl optische Methoden zur Messung der Strahleigenschaften als auch numerische Verfahren der Strahlmodellierung zur Anwendung kommen.

Die Betriebsstabilität des Ottomotors mit Direkteinspritzung hängt wesentlich davon ab, dass die Strahleigenschaften über die gesamte Nutzungsdauer innerhalb eng vorgegebener Toleranzen erhalten bleiben. Aus diesem Grund sind auch brennraumseitige Ablagerungen am Einspritzventil zu vermeiden. Wesentlicher Einflussfaktor für die Ablagerungsbildung ist die Temperatur an der Injektorspitze, weshalb zentrale Düsenanordnungen eher kritisch einzuschätzen sind als solche, bei denen der Injektor an der Einlassseite unter dem Einlasskanal platziert ist. Weiterhin hat sich gezeigt, dass ein möglichst bündiger Abschluss der Injektor-Stirnfläche mit der Brennraumwand vorteilhaft ist, weil dann kaum Verwirbelungen oder Totwassergebiete im Bereich der Injektorspitze auftreten und so die Emissionen reduziert werden können.

**Luftunterstützte Einspritzung** Die Zerstäubung des eingespritzten Kraftstoffes kann auch bei niedrigeren Drücken mit Luftunterstützung erzielt werden. Die Zudosierung des Kraftstoffes erfolgt hierbei in eine Nebenkammer, die dann durch komprimierte Luft oder auch Abgas in den Brennraum ausgeblasen wird. Wegen der Begrenzung des Systemdruckes bestehen allerdings nicht die gleichen Freiheitsgrade hinsichtlich des Einspritzzeitpunktes wie bei der Hochdruck-Flüssigkeitseinspritzung.

Die für die luftunterstützte Einspritzung zur Verfügung stehenden Systemkomponenten wurden im Rahmen der Entwicklung von Zweitakt-Pkw-Ottomotoren verfügbar gemacht und werden in einigen Bootsmotoren auch eingesetzt.

#### 5.1.5.2.3 Abgasrückführung

Die Abgasrückführung ist ein bekanntes Verfahren zur Beherrschung der $NO_x$-Rohemissionen von Verbrennungsmotoren. Sie bewirkt einerseits eine Erhöhung der Wärmekapazität und andererseits eine Abnahme des Sauerstoffgehaltes und folglich eine Reduzierung der Brenngeschwindigkeit. Beides führt zu abgesenkten Spitzentemperaturen während der Verbrennung. Sie wird sowohl bei Otto- als auch bei Dieselmotoren erfolgreich eingesetzt. Insbesondere für mager betriebene direkteinspritzende Ottomotoren sind die Stickstoffoxidemissionen problematisch, weil mit konventioneller katalytischer Abgasreinigung im Magerbetrieb keine $NO_x$-Konvertierung erreicht wird. Auch die in ► Abschn. 5.1.5.7.2 behandelten Zukunftslösungen für die Abgasreinigung im sauerstoffhaltigen Abgas reichen allein nicht aus, um die $NO_x$-Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Deshalb müssen auch innermotorische Möglichkeiten zur Begrenzung der $NO_x$-Rohemissionen genutzt werden.

Hoch entwickelte Direkteinspritz-Brennverfahren weisen im Allgemeinen eine hohe AGR-Verträglichkeit auf. Im Teillastbetriebspunkt $n = 2000\,min^{-1}$, $p_{me} = 2\,bar$ sind AGR-Raten in einer Größenordnung von 10 % als typisch anzusehen. Mit der Abgasrückführung ist auch verbunden, dass der Gesamtluftüberschuss des Motors abnimmt und dadurch die Abgastemperatur ansteigt. Dies ist ein willkommener Begleiteffekt bei Magerbrennverfahren, weil ansonsten im Teillastbereich die Abgastemperaturen unter das für die katalyti-

sche Abgasreinigung erforderliche Niveau absinken würden. Darüber hinaus ist vielfach auch zu beobachten, dass die Gemischbildung von der Abgasrückführung infolge erhöhter Gemischtemperaturen positiv beeinflusst wird.

Beim Ottomotor mit Direkteinspritzung ist die bevorzugte Form der Abgasrückführung die externe Zufuhr von Abgas in das Einlasssystem des Motors. Zur Realisierung des für die Abgasrückführung notwendigen Saugrohrunterdruckes muss ein Saugmotor leicht angedrosselt werden. Diese Maßnahme ist jedoch ohnehin bei niedriger Teillast erforderlich, um ein für die Abgasnachbehandlung ausreichend hohes Abgastemperaturniveau sicherzustellen.

Im 1,6l Nissan MR16DDT Motor, einem aufgeladenen DI-Ottomotor, wurde erstmals die gekühlte Niederdruck-Abgasrückführung (AGR) bei einem turboaufgeladenen Serien-Ottomotor eingesetzt. Die Vorteile dieser Technologie liegen in der möglichen Entdrosselung in einem größeren Kennfeldbereich als mit interner AGR, einer Absenkung der Spitzentemperaturen und somit der Stickoxid-Emissionen, sowie einer Reduzierung der Klopfneigung. Der Kraftstoffverbrauch sinkt also aus mehreren Gründen: Durch die reduzierte Klopfneigung kann früher gezündet werden, die niedrigeren Prozesstemperaturen senken die Wärmeverluste und die Stoffwerte werden positiv beeinflusst.

Die Entdrosselung hat einen besseren Teillastverbrauch zur Folge, da die Ladungswechselverluste sinken. Die niedrigeren Abgastemperaturen führen zusätzlich dazu, dass weniger Volllastanreicherung zum Bauteilschutz notwendig ist. Durch die reduzierte Klopfneigung kann das Verdichtungsverhältnis erhöht werden, was den Wirkungsgrad insbesondere in niedrigeren Lastbereichen zusätzlich erhöht.

Neben der zentralen Einleitung des rückgeführten Abgases in den Saugsammler kommt auch die ventilnahe dezentrale Einleitung in den einzelnen Saugarmen zum Einsatz. Damit wird das Ziel verfolgt, im transienten Fahrbetrieb sowie bei der Regeneration eines $NO_x$-Speicherkatalysators (siehe hierzu ► Abschn. 5.1.5.7.2), eine möglichst schnelle Anpassung der AGR-Rate zu ermöglichen. Problematisch ist jedoch dabei, dass die einzelnen Saugarme durch das AGR-System akustisch gekoppelt sind, was zu Luftaufwandseinbußen an der Volllast führen kann.

Alternativ kommt auch die interne Abgasrückführung mittels Verstellung der Ventilsteuerzeiten in Betracht. Diese Systeme erfordern jedoch zur Darstellung ausreichend großer Abgasrückführraten große Nockenwellen-Verstellwinkel und folglich entsprechend tiefe Taschen im Kolben zur Sicherstellung des Ventilfreiganges. Dies steht häufig im Konflikt mit der Gestaltung der Kolbenkrone, die wesentlich von den Anforderungen des Brennverfahrens bestimmt wird.

#### 5.1.5.2.4 Ladungsbewegung

Der Strömungszustand der Zylinderladung hat einen signifikanten Einfluss auf den Prozess des Ottomotors (► Abschn. 5.1.5.2 und ► Abschn. 5.1.5.5). Die Ladungsbewegung wird beim Ansaugvorgang erzeugt und wesentlich durch die Anordnung der Einlassventile sowie durch die Geometrie des Einlasskanals im Zylinderkopf bestimmt. Grundsätzlich wird zwischen zwei Ladungsbewegungsformen unterschieden. Bei der Drallströmung liegt eine rotatorische Bewegung der Zylinderladung um die Zylinderachse vor. Sie wird einerseits durch exzentrische bzw. unsymmetrische Anordnung der Einlassventile und andererseits durch eine spiralförmige Formgebung der Einlasskanäle bewirkt. Bei Motoren mit mehr als einem Einlassventil je Zylinder besteht zusätzlich die Möglichkeit, im Teillastbetrieb einen der Einlasskanäle über eine Klappe oder eines der Einlassventile zu deaktivieren. Die Tumble-Ladungsbewegung stellt dagegen die Rotation um eine zur Zylinderachse senkrecht stehende Achse dar. Zu ihrer Erzeugung bedarf es einer symmetrischen Anordnung der Einlassventile. Infolge einer speziellen Formgebung des Einlasskanals kommt es ab einem bestimmten Ventilhub zu lokaler Strömungsablösung, wodurch sich ein über den Ventilquerschnitt gesehen einseitiges Einströmen ergibt.

Die vorangegangenen Ausführungen zum Brennverfahren von Direkteinspritz-Ottomotoren (► Abschn. 5.1.5.2.2) haben deutlich gemacht, dass die Zylinderinnenströmung eine zentrale Optimierungsgröße vieler Brennverfahrenskonzepte darstellt. In den heute in Serie produzierten Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung sind

überwiegend Tumblekonzepte anzutreffen. In einigen Fällen ist die Ladungsbewegung auch nicht eindeutig einem der Grundmuster Drall und Tumble zuzuordnen, sondern stellt eine Mischform beider dar. Insbesondere die Generierung reiner Drallströmungen ist unter den konstruktiven Randbedingungen heutiger Ottomotoren kaum darstellbar; zumeist handelt es sich um eine Wirbelströmung mit schräg im Brennraum verlaufender Rotationsachse.

Die für den Teillastbetrieb mit geschichteter Zylinderladung erforderliche Ladungsbewegung muss je nach Brennverfahrenskonzept eine hohe Intensität aufweisen. Die Realisierung derartiger Strömungsintensitäten ist im Allgemeinen nur möglich, wenn die Einlasskanäle zulasten ihrer Durchflusskapazität modifiziert werden. Damit sind Luftaufwandsnachteile im Volllastbetrieb verbunden, die nicht toleriert werden können. Es kommen deshalb bevorzugt Konzepte zur Anwendung, die eine Variabilität hinsichtlich Ladungsbewegung und Durchfluss gestatten. Dabei sind die Einlasskanäle primär auf gutes Durchflussverhalten ausgelegt. Im Teillastbetrieb wird die erforderliche Ladungsbewegung dann über schaltbare Einrichtungen im Saugsystem generiert.

Die bei Drallsystemen an Mehrventilmotoren vorzugsweise zur Anwendung kommende Lösung ist die Kanalabschaltung. Dabei wird einer der beiden Einlasskanäle mittels einer Schaltklappe deaktiviert (siehe auch ◘ Abb. 5.51). Die Einlasskanäle sind hierzu von der Schaltklappe stromabwärts geteilt auszuführen. Hinsichtlich der Dichtheitsanforderungen an die Schaltklappe genügt es, wenn der Einlassstrom des deaktivierten Kanals so weit gedrosselt wird, dass der über den nicht deaktivierten Kanal tangential in den Brennraum einströmende Frischladungsstrom ungestört bleibt. Alternativ kommt für die Deaktivierung auch eine Ventilabschaltung infrage. Hierin bestehen jedoch keine prinzipiellen Vorteile, so dass die Konzeptentscheidung von anderen, nicht zuletzt kostenrelevanten Argumenten getragen wird.

Bei Zweiventilmotoren kommt für die variable Gestaltung der Ladungsbewegung eine Teilaktivierung des Einlasskanals in Betracht. Dabei ist der Kanal bis kurz vor das Einlassventil geteilt ausgeführt, wobei einer der beiden Teilkanäle über eine schaltbare Drallklappe deaktiviert wird. Alternativ ist auch eine in den Einlasskanal einschwenkbare Klappe möglich, mit deren Hilfe die Strömung im Kanal gezielt beeinflusst wird. Damit wird eine unsymmetrische Strömungsverteilung am Ventilspalt erreicht.

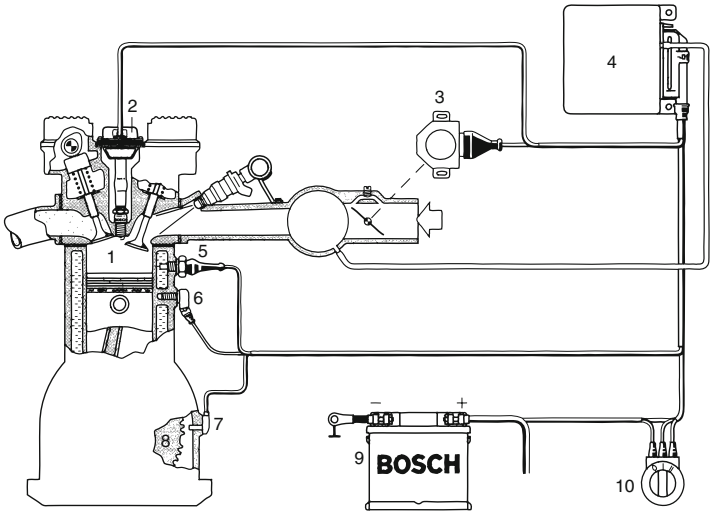


◘ **Abb. 5.57** Klappenflansch des Volkswagen Lupo FSI Motors

Bei Tumblekonzepten wird die variable Beeinflussung ebenfalls über eine schaltbare Teildeaktivierung des Einlasskanals bewirkt. Bei Mehrventilmotoren wird der Einlasskanal durch das Eingießen eines Bleches horizontal geteilt und einer der beiden entstehenden Teilkanäle mittels einer Schaltklappe deaktiviert. Die Tumbleintensität wird dann von der Kanalgeometrie und der Lage der horizontalen Teilungsebene bestimmt. ◘ Abb. 5.57 zeigt die konstruktive Lösung eines derartigen variablen Tumblesystems am Beispiel des Volkswagen Lupo FSI Motors mit 1,4 l Hubraum. Der Klappenflansch ist zwischen Zylinderkopf und Saugrohr angeordnet. Zusätzlich ist in dieses Bauteil die Kraftstoff-Verteilerleiste integriert.

### 5.1.5.3 Zündung

Die Zündanlage stellt die Entflammung des Gemisches im Brennraum über einen Hochspannungsüberschlag an der Zündkerze sicher. Neben dem zum Zündzeitpunkt herrschenden Zustand des Gemisches an der Zündkerze bestimmen die Zün-




1 Zündkerze, 2 Einzelfunken-Zündspule, 3 Drosselklappenschalter, 4 Steuergerät, 5 Motortemperatursensor, 6 Klopfsensor, 7 Drehzahl- und Bezugsmarkensensor, 8 Geberzahnrad, 9 Batterie, 10 Zünd-Start-Schalter

**Abb. 5.58** Schema einer vollelektronischen Zündanlage (Bosch)

denergie und die Funkendauer die Entflammung und damit den weiteren Fortgang der Verbrennung.

Die früher gebräuchliche Spulenzündung mit Unterbrecherkontakten und rotierendem Zündverteiler wird heute nicht mehr verwendet. Diese Bauart wies einerseits Verschleiß am Unterbrecherkontakt auf und erforderte deshalb einen zu hohen Wartungsaufwand. Andererseits waren die Möglichkeiten zur bedarfsgerechten Anpassung des Zündzeitpunktes stark eingeschränkt.

Mit der Transistor-Zündung wurde der Unterbrecherkontakt durch einen kontaktlosen Induktionsgeber oder auch einen Hall-Sensor sowie ein elektronisches Schaltgerät ersetzt, die keinem nennenswerten Verschleiß mehr unterliegen. Die Zündverteilung und -verstellung ist identisch zur Spulenzündung. Die Hochspannungs-Kondensatorzündung (HKZ) oder auch „Thyristorzündung" nutzt anstelle der induktiv in der Zündspule gespeicherten Energie die kapazitiv in einem Kondensator gespeicherte Ladung. Die Funkendauer (0,1 bis 0,3 ms) ist deutlich kürzer als bei der Transistorzündung und garantiert nicht immer eine sichere Entflammung des Gemisches. Diese Bauart wird heute deshalb kaum noch eingesetzt.

Heute werden überwiegend elektronische Zündanlagen mit „ruhender" Hochspannungsverteilung bzw. Einzelfunken-Zündspulen verwendet (Abb. 5.58). Bis auf die Zündkerzen sind derartige Zündanlagen völlig wartungsfrei.

Im Gegensatz zu den früher gebräuchlichen Zündanlagen ist der Zündzeitpunkt bei vollelektronischen Zündanlagen in weiten Bereichen frei programmierbar. Er kann somit an den Lastpunkt und die Motordrehzahl angepasst werden. Abb. 5.59 zeigt dies im Vergleich zu einem typischen Zündkennfeld bei mechanischer Verstellung. Darüber hinaus ermöglichen elektronische Zündanlagen die Adaption des Zündzeitpunktes an besondere Betriebsbedingungen wie Kaltstart und Warmlauf. Beispielsweise wird so durch vorübergehende Spätzündung kurz nach dem Kaltstart das Abgastemperaturniveau zur schnelleren Erwärmung des Katalysators angehoben. Im Bereich hoher Motorlasten führt eine zu frühe Einstellung zum Klopfen, ein zu später Zeitpunkt dagegen zu Drehmomenteinbußen und im Extremfall zu verschleppter Verbrennung. In Kombination mit einer in die Motorsteuerung integrierten Klopfregelung lässt sich der Zündzeitpunkt in Abhängigkeit eines Körperschallsignals mit sicherem Abstand zur Klopfgren-

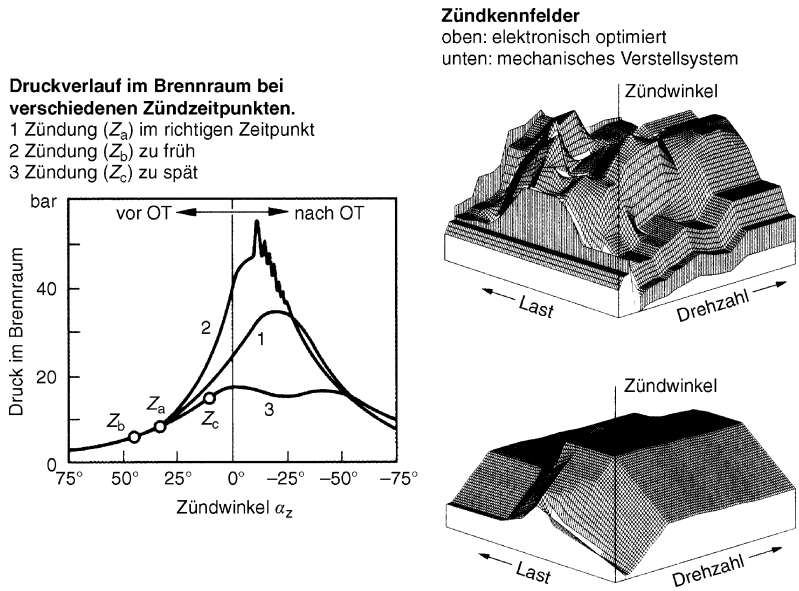



**Abb. 5.59** Druckverlauf im Brennraum bei verschiedenen Zündzeitpunkten, Zündkennfelder

ze möglichst wirkungsgradoptimal einstellen, wobei auch wechselnde Kraftstoffqualitäten adaptiert werden können. Des Weiteren erlaubt der freie Zugriff der Motorsteuerung auf den Zündzeitpunkt auch zusätzliche Regeleingriffe zur Antischlupf- bzw. Fahrdynamikregelung.

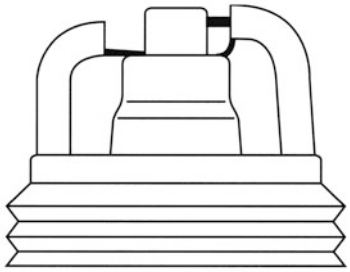
Bei stöchiometrischem Gemisch genügt zur Entflammung eine Energie im Zündfunken von ca. 0,2 mJ. Der Energiebedarf steigt auf über 3 mJ bei fetteren und magereren Gemischen an. In der Praxis wird jedoch eine wesentlich größere Energie (Faktor 20 bis 30) eingesetzt. Hiermit ist sichergestellt, dass unter ungünstigsten Umständen genügend Zündenergie vorhanden ist. Ausreichender Vorstand in den Brennraum, größerer Elektrodenabstand und dünne Elektroden verbessern die Entflammung und führen damit zu ruhigerem Motorlauf und geringeren HC-Emissionen.

Der Hochspannungszündfunke verursacht an den Zündkerzen-Elektroden einen erosiven Verschleiß. Infolgedessen vergrößert sich der Abstand der Elektroden und der Zündspannungsbedarf steigt an. Das kann zu unregelmäßigen Entflammungen bis zu Zündaussetzern führen. Dieses Problem der Funkenerosion ist mit hochverschleißfesten, d. h. hochtemperaturfesten und chemisch resistenten Materialauflagen aus Platin an den Stellen des Funkenüberschlags wesentlich verbessert worden. Zündkerzenwechselintervalle von 60.000 km oder gar 100.000 km können realisiert werden (Abb. 5.60). Eine weitere Innovation stellen die Gleitfunken-Zündkerzen dar; der Zündfunke gleitet zunächst über die Isolatorkappe hinweg und dann zur Masseelektrode (Abb. 5.60). Damit wird ein bei häufigem Kaltstart und Kurzstreckenbetrieb auftretendes Verrußen der Zündkerze verhindert.

Auch der direkte Funkenüberschlag von der Zündkerze auf eine Spitze in der Kolbenmitte (spark to piston STP) ist versucht worden. Dieses Verfahren funktioniert bei Zündzeitpunkten nahe dem OT bei hoher Last. Bei niedrigeren Lasten und größerer Vorzündung wird die Funkenstrecke über eine Masseelektrode an der Zündkerze mit ungewöhnlich großem Elektrodenabstand ausgebildet, was der Entflammung stark verdünnter Gemische zuträglich ist.

Die Zündspule ist sowohl Energiespeicher als auch Transformator, der ein induktiv wirkender Spannungswandler ist. Die Primärwicklung wird aus dem Bordnetz gespeist. Die Sekundärwicklung liefert den Hochspannungsstrom mit der erforder-



Schematische Darstellung der Luftfunken- und Gleit-/Luftfunken-strecken bei der 60 000-km-Kerze (gezeigt an nur zwei Masseelektroden)

**Abb. 5.60** Langzeit-Zündkerze, Prinzip der Gleitfunkenstrecke (Beru)

lichen Energie an die Zündkerze. Die Sekundärspannung liegt bei 20 bis 35 kV, die Funkenenergie beträgt ca. 60 bis 100 mJ, die Funkendauer ca. 2 ms. Folgende Ausführungsformen sind möglich (Abb. 5.61).

a) Eine Zündspule für alle Zylinder des Motors. Ein Hochspannungskabel führt von der Zündspule zum Zündverteiler. Der Verteilerfinger, der mit Nockenwellendrehzahl rotiert, verbindet den zur Zündung anstehenden Zylinder mit der Hochspannungsleitung.
b) Zweifunken-Zündspule mit „ruhender Verteilung". An einer Zündspule sind 2 Hochspannungsausgänge für zwei im Abstand von 360° KW zündende Zylinder (z. B. Zylinder 1 und 4 beim 4-Zylinder-Motor). Es entfällt der rotierende Zündverteiler und damit ein Verschleißteil. Für 4- und 6-Zylinder-Motoren werden oft 2 bzw. 3 Zweifunken-Zündspulen zu einem Paket zusammengefasst.
c) Bei der Einzelfunken-Zündspule wird je Zylinder eine eigene Stecker-Zündspule direkt auf die Zündkerze montiert. Es entfallen die Hochspannungs-Zündkabel. Bei elektronischer Klopferkennung können von der Motorsteuerung für jeden Zylinder individuelle Zündzeitpunkte eingestellt werden. Diese Ausführungsform ist heutiger Standard.

Im Rahmen der Systemintegration werden heute alle zur Zündung gehörenden Komponenten in so genannte Stabzündmodule zusammengefasst [50]. Eine weitere Alternative ist die Wechselspannungszündung (WSZ). Sie ermöglicht die dem Bedarf angepasste Vorgabe der Zündenergie, was die Lebensdauer der Zündkerzen wesentlich erhöht. Als weiterer wichtiger Vorteil kann über die Zündkerzen eine Ionenstrommessung realisiert werden, die eine direkte Zündaussetzerkennung je Zylinder gestattet. Damit lassen sich auch für Motoren mit hohen Zylinderzahlen, bei denen die Aussetzererkennung über den Umweg der Laufunruhebestimmung an der Kurbelwelle erschwert ist, die Anforderungen der On-Board-Diagnose (OBD) erfüllen [51] (▶ Abschn. 5.1.5.8.1). Während in der Spulenzündung beim Laden die maximale Zündenergie inkl. al-

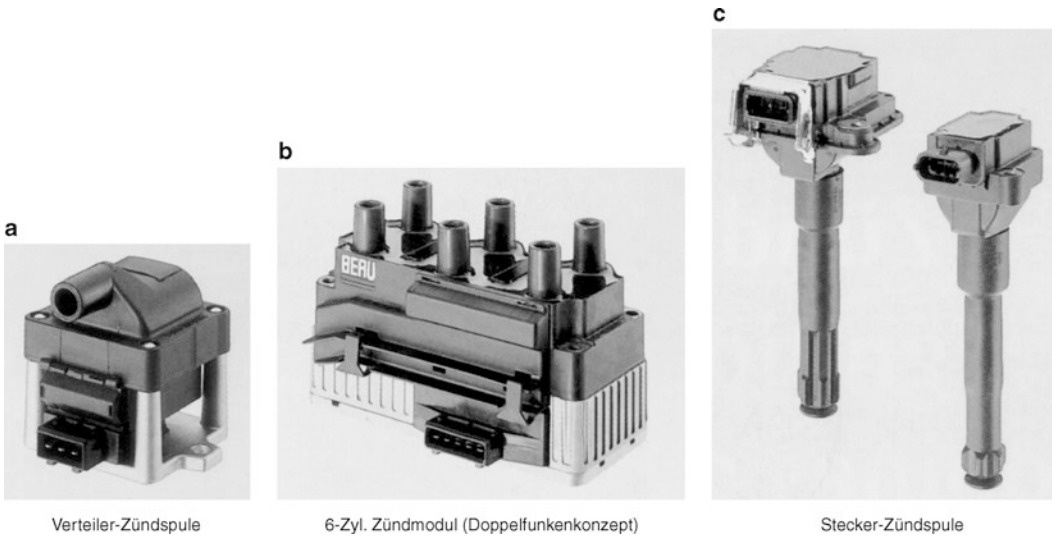



**Abb. 5.61** Bauformen Zündspulen (Beru)

ler Sicherheitszuschläge in die Spule eingespeichert und bei jedem Zündvorgang auch umgesetzt wird, kann mit der WSZ die Energie in Intervallen (Paketen) abgegeben und so die Gesamtenergie geregelt werden. Nach jedem Intervall überprüft die elektronische Steuerung über Ionenstrommessung an der Zündkerze, ob die Entflammung stattgefunden hat oder nicht. Wenn nicht, werden so lange weitere Pakete nachgeschoben, bis Entflammung festgestellt ist. Für jeden Zylinder wird individuell und bedarfsgerecht in allen Betriebspunkten die Zündung geregelt. Die Zündspulen werden wesentlich kleiner, der Abbrand an der Zündkerze ist drastisch reduziert. Aus dem Verlauf des Ionenstromsignals lassen sich auch reguläre von verschleppten oder klopfenden Verbrennungszyklen unterscheiden. Dies eröffnet zusätzliche Möglichkeiten bis hin zu der Idealvorstellung eines geschlossenen Regelkreises zur Optimierung des Verbrennungsprozesses.

Neben der heute üblichen Funkenzündung verfolgen Forschungsvorhaben die Anwendung anderer Funktionsprinzipien wie die Plasmazündung und die Laserzündung [52]. Hiermit wird das Ziel verfolgt, den Zündort unabhängig von der an der Brennraumwand angeordneten Zündkerze in den Brennraum hinein zu verlagern sowie die Wärmeabfuhr aus der einsetzenden Verbrennungszone in die Zündkerze zu vermindern und somit günstigere Voraussetzungen für eine verbesserte Entflammung und Prozessführung zu schaffen. Ein weiteres in einem frühen Entwicklungsstand befindliches Zündverfahren ist die Mikrowellenzündung, mit der eine Raumzündung in größeren Brennraumvolumenanteilen angestrebt wird [72].

Auch für den Ottomotor existieren Konzepte, die eine Selbstzündung des homogenen Gemisches am Ottomotor vorsehen. In Abgrenzung zu den bei Dieselmotoren verfolgten homogenen Brennverfahren (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition) setzen sich für Ottomotoren die Bezeichnungen CAI (Controlled Auto Ignition) und Raumzündung zunehmend durch. Die wesentliche Zielsetzung dieses Brennverfahrens ist eine Verminderung des Kraftstoffverbrauches durch eine Entdrosselung im Teillastbetrieb, die sich durch die sehr große Menge an in den Brennraum rückgeführtem Abgas ergibt. Die Restgasmenge ist einerseits zum Erzielen einer für die Selbstzündung ausreichenden Kompressionsendtemperatur notwendig, andererseits wird durch den hohen Restgasgehalt die Verbrennungsumsatzrate gezielt kontrolliert, um akustische Nachteile durch unzulässig hohen Druckanstiegsgeschwindigkeiten zu vermeiden. Das Ergebnis ist ein thermodynamisch günstiger Hochdruckprozess mit sehr niedrigen $NO_x$-Rohemissionen, welche eine zusätzliche, nur für

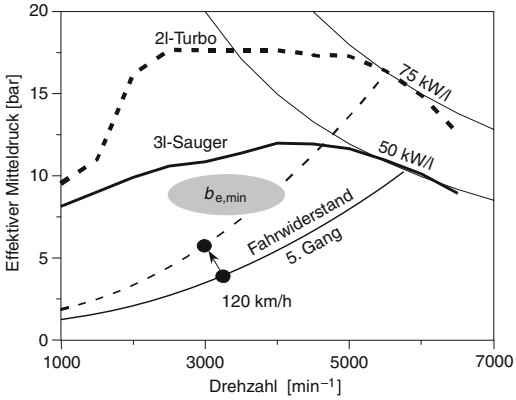
die Teillast erforderliche $NO_x$-Abgasnachbehandlung (siehe ▶ Abschn. 5.1.5.7.2) überflüssig machen. Bei niedrigen und hohen Lasten wird das Brennverfahren konventionell mit Zündkerze gezündet. Die kontrollierte Benzinselbstzündung wird meist mit einer Kombination von Direkteinspritzung und vollvariablem Ventiltrieb dargestellt [73]. Die Firma Daimler AG ergänzt die Technologie zusätzlich mit einer variablen Verdichtung (▶ Abschn. 5.1.5.4.2) und hat dieses Brennverfahren im Forschungsfahrzeug F700 unter dem Namen „Diesotto" realisiert.

### 5.1.5.4 Downsizing und Aufladung

Während die Aufladung bei modernen Pkw-Dieselmotoren eine weite Verbreitung gefunden hat, war sie bei Ottomotoren bis vor kurzem auf wenige Nischenprodukte beschränkt. Bei den meisten dieser ottomotorischen Anwendungen der Aufladung steht die Darstellung möglichst hoher Leistungsdaten im Vordergrund. Daneben bietet die Aufladung die Möglichkeit, die vorgegebene Leistung mit einem möglichst kleinen Triebwerk zu realisieren. Dieses als Downsizing bezeichnete Konzept bietet deutliche Verbrauchsvorteile, die primär auf die Verlagerung des Betriebspunktes im Motorkennfeld zurückzuführen sind.

#### 5.1.5.4.1 Betriebspunktverlagerung

Der zur Darstellung einer bestimmten Fahrleistung gehörige Betriebspunkt bestimmt sich bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit im Motorkennfeld aus der der Fahrgeschwindigkeit entsprechenden Motordrehzahl und dem zur Überwindung der Fahrwiderstände (Luftwiderstand und Rollreibung) notwendigen Drehmoment. Dieser Zusammenhang wird durch die Fahrwiderstandslinie im Motorkennfeld wiedergegeben. Das in ◘ Abb. 5.62 gezeigte Beispiel des Saugmotors zeigt, dass die Fahrwiderstandslinie in Bereichen des Motorkennfeldes verläuft, wo der spezifische Kraftstoffverbrauch weit über dem optimalen Niveau liegt. Die Gründe hierfür sind, dass der Motor im Teillastbereich gedrosselt betrieben wird, und dass bei niedriger Belastung die Reibungsverluste einen relativ hohen Anteil an der abgegebenen Nutzarbeit annehmen.




◘ **Abb. 5.62** Betriebspunktverlagerung

Wie das gezeigte Beispiel deutlich macht, wird durch die Verminderung des Hubvolumens der Betriebspunkt des Motors in einen Bereich des Motorkennfeldes verlagert, in welchem der spezifische Kraftstoffverbrauch günstigere Werte aufweist. Diese Auslegung wird häufig auch als Downsizing bezeichnet.

Alle das Drehmoment, insbesondere bei niedrigen Drehzahlen, verbessernden Maßnahmen wirken sich zusätzlich günstig auf das Verbrauchsverhalten des Motors im Fahrbetrieb aus, weil dies die Möglichkeit einer längeren Achsübersetzung bietet. Hiermit lässt sich eine weitere Betriebspunktverlagerung erreichen.

Bei aufgeladenen Motoren mit entsprechend verkleinertem Hubraum ist dagegen häufig eine Anfahrdrehmomentschwäche (auch als „Turbo-Loch" bezeichnet) festzustellen, die eine Verkürzung der Übersetzung erforderlich macht. Deshalb sind verbrauchsoptimierte aufgeladene Motoren mit insbesondere im Hinblick auf das Drehmomentniveau bei niedrigen Drehzahlen („Low-End-Torque") zu entwickeln.

Bei einer zunehmenden Anzahl von Pkw-Herstellern finden sich unter den angebotenen Motorisierungsvarianten leistungsgleiche aufgeladene Alternativen zu jeweils einem hubraumgrößeren Saugmotor. Die zertifizierten Kraftstoffverbräuche unterstreichen deutlich das mit diesem Konzept verbundene Potenzial. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Aufladung zur Vermeidung klopfender

Verbrennung das geometrische Verdichtungsverhältnis abgesenkt werden muss, was sich nachteilig auf den Wirkungsgrad des Hochdruckprozesses auswirkt. Dennoch zeigt der Trend für aufgeladene Motoren eine stetige Zunahme des Verdichtungsverhältnisses. Der damit verbundenen Klopfproblematik bei Volllast begegnet man durch geeignete Maßnahmen, insbesondere intensive Ladeluftkühlung, reduzierte Ventilüberschneidung zur Verringerung des Restgasanteiles und erhöhte Ladungsbewegungsintensität. Häufig werden auch eine späte Zündung und daraus resultierende Volllastverbrauchsnachteile zugunsten verbesserter Teillastwirkungsgrade in Kauf genommen.

Zusätzlich kann die Klopfneigung auch durch eine Anfettung des Gemisches reduziert werden. Dabei wird mehr Kraftstoff, als für die stöchiometrische Verbrennung notwendig eingespritzt. Durch die zusätzliche Kühlung verringert sich die Klopfneigung. Da der Kraftstoff aufgrund des Luftmangels nicht vollständig verbrannt werden kann, ergeben sich aber auch hier Verbrauchsnachteile.

Im Rahmen einer neuen Gesetzgebung sind auch Zyklen zur Verbrauchsermittlung im Gespräch, die deutliche höhere Volllastanteile enthalten als z. B. der neue europäische Fahrzyklus. Durch den höheren Wirkungsgrad des saugenden Ottomotors an der Volllast ergeben sich hier Nachteile für den turboaufgeladenen Motor. Aus diesem Grund konzentriert sich die Entwicklung momentan stark auf die Verbesserung des Turbomotors an der Volllast und der des Saugmotors in der Teillast.

Die Kombination der Aufladung mit Benzin-Direkteinspritzung führt wegen der mit ihr verbundenen Ladungsabkühlung zu einem attraktiven Motorkonzept (► Abschn. 5.1.5.2.2). Im Jahr 2004 führte die Audi AG unter dem Namen „Turbo FSI“ erstmals einen direkteinspritzenden 2,0 L Ottomotor mit Turboaufladung in die Serie ein [71]. Die mit $\varepsilon = 10{,}5$ für aufgeladene Ottomotoren sehr hohe Verdichtung deutet darauf hin, wie gut sich die innere Gemischbildung mit der Aufladung ergänzt. Gegenüber dem Vorgänger mit Saugrohreinspritzung weist dieser Motor im gesamten Kennfeldbereich auch ohne die Anwendung der Schichtlade-Magerverbrennung Verbrauchsvorteile bis zu 6 % auf. Um das Downsizing-Konzept auch in kleineren Fahrzeugklassen einführen zu können, wird eine Reduktion der Zylinderanzahl notwendig. Eine erste Umsetzung in einem Serienfahrzeug ist der turboaufgeladene 0,9 l Zwei-Zylinder Motor von Fiat [75].

Das Thema Aufladung wird ausführlich in ► Abschn. 5.3 behandelt. Grundsätzlich können folgende Aufladeverfahren zur Anwendung kommen:

- Die Abgasturboaufladung nimmt im Wesentlichen wegen der thermodynamischen Vorteile sowie der relativ niedrigen Systemkosten eine führende Marktstellung ein. Das früher vielen Turbomotoren anhaftende schwache Drehmomentverhalten bei niedrigen Motordrehzahlen sowie der instationäre Drehmomentmangel („Turbo-Loch“) ist bei modernen Varianten kaum noch vorhanden. Maßnahmen hierzu sind die Kombination mit Benzin-Direkteinspritzung [45, 53], der Einsatz kleiner Turbolader mit geringerem Massenträgheitsmoment in Bi-Turbo-Anordnungen [54] sowie der Einsatz von Abgasturboladern mit variabler Turbinengeometrie VTG [54]. Die sequentielle zweistufige Aufladung befindet sich in Entwicklung [76], ist aber für Ottomotoren bislang noch nicht in Serie umgesetzt worden. Durch die Verwendung hochwertiger Turbinen-Werkstoffe sind heute Abgastemperaturen bis zu 1050 °C möglich, wodurch sich der Anfettungsbedarf zum Bauteilschutz deutlich verringern lässt.
- Eine weitere Verbesserung der Drehmomentcharakteristik lässt sich durch eine elektrische oder auch mechanische, das heißt vom Motor direkt angetriebene Zusatzverdichtung zur Unterstützung der Turboaufladung erzielen. In Serie umgesetzt ist die Doppelaufladung am direkteinspritzenden 1,4 l TSI Motor der Volkswagen AG [55].
- Zur mechanischen Aufladung stehen verschiedene Geräte wie Roots-Gebläse, Schraubenverdichter und Spiralkanal-Verdichter (G-Lader) zur Verfügung. Den vergleichsweise höheren Systemkosten steht ein überlegenes Drehmomentverhalten gegenüber.




**Technologien für geringeren Kraftstoffverbrauch und weniger Emissionen** – BorgWarner macht's möglich. Als führender Automobilzulieferer entwickeln wir innovative Powertrain-Lösungen. Unsere Produkte finden Einsatz in besonders effizienten Benzin-, sauberen Diesel-, Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen sowie in Nutzfahrzeugen aller Art. Weil BorgWarner permanent nach neuen Lösungen sucht, können wir unseren Kunden nachhaltige Produkte anbieten, die die Umwelt entlasten und den Fahrkomfort, die Leistung und die Zuverlässigkeit deutlich steigern.

BorgWarner

borgwarner.com

*feel good about driving*



# FUTURE MOBILITY ENGINEERING

## VOM ANTRIEB BIS ZUM VERNETZTEN KOMPLETTFAHRZEUG

Unseren weltweiten Kunden bieten wir das gesamte Engineering-Spektrum von A wie Abgasrückführung über H wie Hybridisierung bis Z wie Zündfolgenoptimierung. Weltweit arbeiten unsere Experten mit Leidenschaft daran, Sie mit zukunftsweisenden Entwicklungen zu unterstützen.

**Profitieren Sie von unseren Kompetenzen:**

- 35 Standorte auf vier Kontinenten
- Mehr als 180 eigene Prüfstände
- Enge Verbindung zu führenden Hochschulen weltweit

- Engineering Services
- Benchmarking und Konzeptstudien
- Design und CAE
- Prototyping und Testing
- Homologation und Zertifizierung
- Motorenentwicklung
- Produktionsplanung
- Consulting
- Software und Testing Solutions

www.fev.com

FEV

#### 5.1.5.4.2 Variable Verdichtung

In vielen Einsatzgebieten wird der Verbrennungsmotors in einem breiten Last- sowie Drehzahlband genutzt. Zur Optimierung des Wirkungsgrades sind bereits heute viele Variabilitäten, wie z. B. variable Ventilsteuerzeiten, im Einsatz. Ein sehr wichtiger Parameter des Verbrennungsmotors ist das geometrische Verdichtungsverhältnis, welches fest gewählt immer nur einen Kompromiss darstellen kann. Beim Ottomotor steigt im Allgemeinen der Wirkungsgrad mit steigender Verdichtung an. Bei hohen Lasten, insbesondere bei aufgeladenen Motoren, steigert eine hohe Verdichtung allerdings die Neigung zu Klopfen. Zum Schutz des Motors wird daher bei hohen Lasten eine Verschiebung des Zündzeitpunktes nach „spät" vorgenommen, womit sich durch eine ungünstige Verschiebung des Verbrennungsschwerpunktes der Verbrauch erhöht. Dem Zielkonflikt – hohe Verdichtung bei niedrigen Lasten und niedrige Verdichtung bei hohen Lasten – kann mit einem variablen Verdichtungsverhältnis (VCR – Variable Compression Ratio) entgegengewirkt werden.

Weitere Potenziale sind im Einsatz mit alternativen Kraftstoffen, Flex-Fuel-Anwendungen sowie in Kombination mit einer kontrollierten Selbstzündung zu finden.

Beim Dieselmotor liegt einer der Hauptvorteile einer variablen Verdichtung in der Reduzierung des Verbrennungsspitzendrucks an der Volllast. So können die hochbelasteten Bauteile günstiger ausgelegt werden: kleinere Lagerdurchmesser verringern die Reibung, was sich wiederum positiv auf den Verbrauch auswirkt. Alternativ kann der Ladedruck erhöht werden, wodurch eine weitere Leistungssteigerung ermöglicht wird.

Derzeit existiert noch kein System zur Veränderung des geometrischen Verdichtungsverhältnisses in einer Serienanwendung. Bei in der Entwicklung befindlichen Systemen wird zwischen vollvariablen sowie 2-stufigen Systemen unterschieden. Das $CO_2$-Einsparungspotential eines 2-stufigen VCR-Systems liegt bei ca. 85 % eines vollvariablen Systems. Dabei ist der Einfluss auf die Motorarchitektur bei vielen bekannten vollvariablen Systemen enorm. Bei 2-stufigen Systemen genügt zum Teil der Austausch weniger Komponenten.

### 5.1.5.5 Verbrennung

Der Ablauf der Verbrennung im Zylinder wird vom Ladungswechsel und der bei ihm erzeugten Ladungsbewegung, der Gemischbildung sowie der Zündung maßgeblich beeinflusst. Er wirkt sich seinerseits auf den Wirkungsgrad des Motors und auf die Abgaszusammensetzung aus. Ziel einer optimal geführten Verbrennung ist es, dem idealen Gleichraumprozess so nahe wie möglich zu kommen. Neben den erwähnten Einflussfaktoren spielen die Gas- und Brennraumwandtemperaturen, der Wärmeübergang an den Brennraumwänden und deren Geometrie eine Rolle. Der Verbrennungsraum sollte für kurze Flammenwege möglichst kompakt sein, sollte keine engen Spalte haben, in denen die Flamme erlischt (flame quenching) und keine heißen Stellen und Ablagerungen aufweisen, von denen aus klopfende Verbrennung oder gar Glühzündungen ausgehen.

Bei einem stöchiometrischen Mischungsverhältnis von Kraftstoff und Verbrennungsluft sollten theoretisch als Verbrennungsprodukte nur Kohlendioxid ($CO_2$) und Wasser ($H_2O$) gebildet werden. In der Realität sind die chemischen Reaktionen aber zusätzlich vom Druck, von der Temperatur, der Konzentration einzelner Reaktionskomponenten und der Zeit abhängig. Während des Expansionstaktes nimmt die Prozesstemperatur rasch ab und die Reaktionen „frieren" teilweise vor Erreichen des chemischen Gleichgewichts ein. Deshalb verbleiben im Motorabgas auch Zwischenreaktionsprodukte. Zusätzlich treten bei insgesamt stöchiometrischem Mischungsverhältnis örtliche Inhomogenitäten auf, die zu erhöhter CO-Bildung führen.

Bei hohen Temperaturen bricht die Bindung der $N_2$-Moleküle auf und unter Anwesenheit überschüssigen Sauerstoffs bildet sich NO. Dieses unerwünschte Nebenprodukt entsteht also insbesondere bei hohen Motorlasten (Temperaturen) und bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$). Mit einem erhöhten Anteil an Inertgas im Brennraum in Form von Abgas (Restgas) sinkt die maximale Verbrennungstemperatur, was der Stickoxidbildung entgegenwirkt. Bei der Abgasrückführung (AGR) wird dieser Effekt gezielt genutzt. Entweder wird beim Ladungswechsel über angepasste Ventilsteuerzeiten der Restgasan-

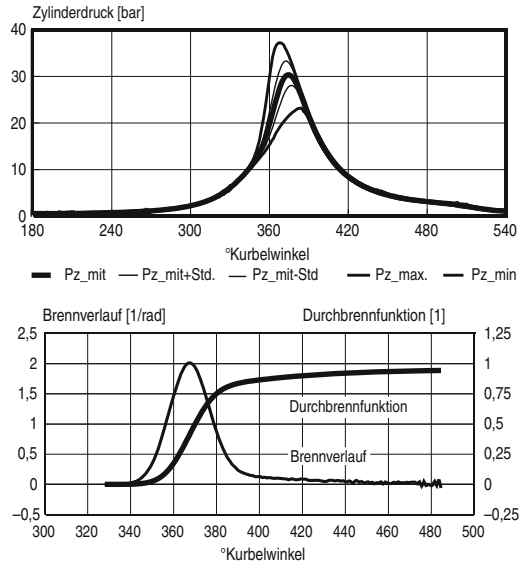
teil beeinflusst (innere AGR) oder es wird Abgas, evtl. auch zwischengekühlt, der Ansaugluft beigemischt (äußere AGR).

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe bleiben übrig, wenn sich Teile des Kraftstoffes an Wänden oder in Ablagerungen im Brennraum bei kaltem Motor niederschlagen oder wenn die Flammenfront nicht den ganzen Brennraum erfassen kann, weil die Flamme die engen Spalten (Kolben-Feuersteg, Zylinderkopfdichtung) nicht erfasst. Die nicht verbrannten und die wieder abdampfenden Kraftstoffanteile werden mit dem Abgas ausgeschoben und als HC-Emission emittiert.

Der Verbrennungsvorgang besteht in der Realität aus einer ganzen Fülle von chemischen Reaktionen, die nebeneinander, nacheinander und sich gegenseitig beeinflussend ablaufen. Bis heute sind immer noch nicht alle Teilprozesse einer mathematischen Beschreibung und Berechnung zugänglich. Dennoch gelingt es durch die Berücksichtigung der wesentlichen Reaktionspfade und die Annahme von Ersatzreaktionsmodellen den Verbrennungsablauf realitätsnah zu beschreiben [59].

Der Druckverlauf im Zylinder kann mithilfe von Piezo-Druckaufnehmern über dem Kurbelwinkel zeitlich aufgelöst gemessen werden. Mit Rechenprogrammen, die ein Verbrennungsmodell abbilden und in die Randbedingungen für den Einströmzustand, den Wärmeübergang etc. eingegeben werden, wird dann der Verbrennungsablauf rechnerisch analysiert. Die Durchbrennfunktion ist der Anteil verbrannten Kraftstoffes im Verhältnis zur insgesamt eingebrachten Kraftstoffmenge. Der Brennverlauf ist die Ableitung davon über dem Kurbelwinkel. Als Erfahrungswert gilt, dass der Brennverlauf sein Maximum etwa 8 bis 12° KW n. OT erreichen soll und ca. 60 bis 65° KW n. OT null erreichen soll. Abweichungen hiervon deuten auf falschen Zündzeitpunkt, klopfende oder verschleppte Verbrennung infolge nicht-optimalem Verdichtungsverhältnis oder auch auf mangelndes Ladungsbewegungsniveau hin.

In ◘ Abb. 5.63 sind reale Zylinderdruckverläufe eines 1,8 l Saugmotors bei einem Betriebspunkt in der unteren Teillast dargestellt. Es ist auffällig, wie stark der Zylinderdruckverlauf von Zyklus zu Zyklus schwankt, obwohl der Gesamtmotor normal und gleichmäßig läuft. Dieses für Ottomotoren typische Verhalten erfordert eine detaillierte Analyse der Zylinderdruckverläufe. Einerseits geschieht dies durch die Mittelung aufeinander folgender Zyklen zu einem gemittelten Druckverlauf, welcher dann Basis für die im unteren Teil des Bildes gezeigte Brennverlaufsanalyse ist. Andererseits werden die Druckverläufe der Einzelzyklen statistisch ausgewertet und die Streuung der Kennwerte für die Höhe und Lage des Maximaldrucks und der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit sowie die Werte des indizierten Mitteldruckes der Einzelzyklen und ihre Standardabweichung vom Mittelwert zur Beurteilung des Arbeitsprozesses herangezogen.




◘ **Abb. 5.63** Beispiel für gemessene Druckverläufe eines Ottomotors und aus dem mittleren Verlauf berechneter Brennverlauf und Durchbrennfunktion

Für den Entwicklungsingenieur sind diese Informationen bei der Optimierung des Motors sehr hilfreich. Moderne Indizier- und Auswertesysteme liefern diese Kenngrößen online am Prüfstand. Zur Begrenzung des Rechenaufwandes kommen dabei häufig vereinfachte Modelle mit Standardrandbedingungen zur Anwendung, die jedoch relative Aussagen zur zielgerichteten Anpassung der verschiedenen Parameter sicher liefern.

Zu den kritischen Störungen bei der ottomotorischen Verbrennung gehören Zündaussetzer, klopfende Verbrennung sowie Vorentflammungen.

Bei Zündaussetzern wird unverbrannter Kraftstoff in das Abgassystem geleitet und führt zu unzulässigen HC-Emissionen. Neben schlechter Gemischbildung bei besonders ungünstigen Randbedingungen können Defekte im Einspritz- oder Zündsystem die Ursache sein. Die Nachreaktion dieser Kohlenwasserstoffe im Katalysator führt zu sehr hohen Temperaturen und kann auf diese Weise die Zerstörung des Katalysators bewirken.

Als klopfende Verbrennung wird die Selbstentzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches vor der Flammenfront bezeichnet. Bevor die Flammenfront den gesamten Brennraum mit der für sie typischen Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 25 bis 35 m/s durchlaufen hat, kommt es im noch unverbrannten Bereich der Gemischladung infolge des Druck- und Temperaturanstiegs zu Reaktionen mit Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von bis zu 500 m/s. Durch diese unkontrollierten Vorgänge kommt es zu Druckwellen hoher Frequenz (Klopf- oder Klingelgeräusche) mit mechanischen und thermischen Überlastungen, die zu Kolben- und Triebwerksschäden führen können. Die Klopfneigung kann durch verschiedene Maßnahmen herabgesetzt werden. Einerseits gilt es kurze Brennwege mit einer mittigen Zündkerzenlage und einem kompakten Brennraum darzustellen, die Flammengeschwindigkeit durch hohe Turbulenz im Brennraum zu steigern, heiße Stellen im Brennraum und zu hohe Ansaugtemperaturen zu vermeiden sowie das Verdichtungsverhältnis angemessen zu wählen. Andererseits unterdrückt die Verwendung von Kraftstoff mit höherer Oktanzahl das Auftreten von Selbstentzündung. Da der Motor zur Darstellung eines optimalen Kraftstoffverbrauchs immer mit möglichst früher Zündung in der Nähe der Klopfgrenze betrieben werden soll, haben elektronische Motorsteuerungen eine Klopfregelung. Ein Klopfsensor registriert an geeigneter Stelle der Motorstruktur die hochfrequenten Schwingungen des Klopfens, der Zündwinkel wird entsprechend einer vorgegebenen Regeltiefe etwas nach spät verstellt und dann wieder schrittweise vorverlegt, bis sich das Erreichen der Klopfgrenze erneut anzeigt.

Insbesondere bei hochaufgeladenen Motoren können Vorentflammungen auftreten, die wie das Klopfen als Verbrennungsanomalien bezeichnet werden. Im Unterschied zur klopfenden Verbrennung kommt es bei Vorentflammungen bereits vor dem Zündzeitpunkt zu einer ungewollten Selbstzündung des Luft-Kraftstoff-Gemisches. Am ehesten treten Vorentflammungsereignisse bei niedrigen Drehzahlen und hohen Mitteldrücken, im sogenannten Low-End-Torque Bereich des Motorkennfeldes auf. Es handelt sich um ein (stark) stochastisches Phänomen der ottomotorischen Verbrennung. Im Gegensatz zur klopfenden Verbrennung, die über einen Zündwinkeleingriff beherrschbar ist, muss ein applikativer Eingriff nicht unbedingt zur Vermeidung von Vorentflammungsereignissen führen.

Vorentflammungen lassen sich anhand ihres Auslösemechanismuses klassifizieren. Kritische thermodynamische Gemischzustände, ähnlich wie beim Klopfen, können zu einer frühen Selbstzündung führen. Die reaktionskinetischen Vorgänge sind hierbei ähnlich derer der klopfenden Verbrennung. Durch hohe Drücke und Temperaturen (örtlich unterschiedlich bedingt durch Gemischinhomogenität und Restgas) beginnen die chemischen Reaktionen bei besonders zündwilligen Komponenten des Kraftstoffs. Ist die Anzahl der gebildeten Radikale groß genug, wird lokal eine Zündung induziert und die Flammenfront breitet sich von dort aus.

Die erforderliche Energie zum Aufbrechen der Moleküle bzw. zur Selbstzündung kann auch von heißen Oberflächen bereitgestellt werden. Dies führt zu sogenannten glühzündungsinduzierten Vorentflammungen. Übersteigt die chemische Wärmeproduktion der Vorreaktionen innerhalb der Temperaturgrenzschicht der Komponente die konvektiv aus der Grenzschicht abgeführte Wärme, kommt es zu einer Selbstentzündung. Diese beginnt sich von der Brennraumkomponente ausgehend auszubreiten. Zu den Bauteilen mit den höchsten Oberflächentemperaturen gehören insbesondere die Auslassventile und die Elektroden der Zündkerze. Als Besonderheit ist hier zu nennen, dass diese Art der Vorentflammung einen selbsterhaltenden Zustand hervorrufen kann, bei dem häufige oder sogar regelmäßige Selbstzündungen mit immer früher beginnender Verbrennungseinleitung erfolgen.

Nicht zuletzt durch Tröpfchen und Partikel (aus dem Öl oder dem Kraftstoff) können Vorentflam-

mungen ausgelöst werden. Die notwendige Aktivierungsenergie ist z. B. bei den langkettigen Molekülen des Öls (deutlich) geringer. Insofern ist ein Eintrag in den Brennraum, beispielsweise durch das Abschleudern von Öltröpfchen vom Kolben und den Kolbenringen, möglichst zu vermeiden.



### 5.1.5.6 Wassereinspritzung

Bereits in der Vergangenheit wurde der positive Einfluss von Wassereinspritzung auf die motorische Verbrennung untersucht. Der Fokus lag dabei überwiegend auf einer dadurch möglichen Leistungssteigerung von Ottomotoren und Strahltriebwerken. Ende der 1970er Jahre brachte Saab mit dem 99 Turbo ein Serienfahrzeug, das optional mit dieser Technologie ausgerüstet werden konnte. Im Jahr 2015 wurde im Safety Car der MotoGP Rennserie die Einspritzung von Wasser in den Sammler (nach dem Ladeluftkühler) bei hohen Drehzahlen eingesetzt. Seit Anfang 2016 ist mit dem BMW M4 GTS das erste Serienfahrzeug mit Wassereinspritzung erhältlich.

Die möglichen Vorteile sind einerseits erhöhte Leistung, andererseits niedrigerer Verbrauch und geringere Stickoxid-Emissionen. Insbesondere in hochaufgeladenen Motoren kann die Ladelufttemperatur bei hohen Leistungsanforderungen weiter abgesenkt werden, indem der Ladeluft Enthalpie für die Verdunstung des Wassers entzogen wird. Durch den Wasseranteil ändern sich auch die Stoffwerte des Gemisches: Die spezifische Wärmekapazität steigt bzw. der Isentropenexponent sinkt, wodurch geringere Spitzentemperaturen im Verbrennungsprozess erreicht werden. Dadurch ergeben sich niedrigere Stickoxid-Emissionen. Der größere Effekt wird allerdings durch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie des Wassers erzielt. Die Kühlung der Zylinderladung reduziert die Klopfneigung, wodurch eine frühere Zündung möglich wird. An der Volllast (insbesondere im Low-End-Torque Bereich) kann so der Wirkungsgrad gesteigert werden. Im Bereich der Nennleistung resultiert der positive Effekt aus den geringeren Abgastemperaturen. Dadurch kann auf eine Anfettung weitgehend verzichtet werden. Um einen höheren Teillastwirkungsgrad zu realisieren, kann ein höheres Verdichtungsverhältnis realisiert werden, wobei der Nachteil der erhöhten Klopfneigung in höheren Lastpunkten durch die Wassereinspritzung ausgeglichen wird.

Ein von Bosch vorgestelltes Einspritzsystem realisiert bei einem Wasserdruck von 10 bar nahe der Nennleistung einen um 13 % reduzierten Kraftstoffverbrauch durch Verzicht auf die Absenkung des Luftverhältnisses. Dazu ist im Betriebspunkt 5000 1/min und 20 bar effektiver Mitteldruck ein Wasseranteil von 35 % (Massenverhältnis Wasser zu Kraftstoff) erforderlich. Durch die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses wird ein Verbrauchsvorteil von 4 % im NEFZ genannt.

Nachteilhaft sind der verlängerte Brennverzug sowie eine langsamere Verbrennung bedingt durch Wassereinspritzung oder Beimischung von Wasser zum Ottokraftstoff. Daraus ergibt sich ein höherer Vorzündbedarf und ein Wirkungsgradnachteil durch die langsamere Brenngeschwindigkeit, der aber durch die vorteilhafte Schwerpunktlage überkompensiert wird.

### 5.1.5.7 Abgasreinigung

Die vollständige Verbrennung des Kraftstoffes soll im Idealfall nur zur Emission von Kohlendioxid ($CO_2$) und Wasser ($H_2O$) unter Abgabe von Wärme führen. In der Realität verläuft die Verbrennung aber nicht bis zu einem vollständigen Reaktionsablauf der gesamten Kraftstoffmenge. Zusätzlich treten Reaktionszwischenprodukte auf. Außerdem reagiert der in der Verbrennungsluft enthaltene Stickstoff in der Luft mit Sauerstoff zu den unerwünschten Stickstoffoxiden ($NO_x$). Eine Reihe von Abgaskomponenten sind als „Schadstoffe" klassifiziert, deren Emissionen gesetzlich limitiert sind, ◘ Abb. 5.64.

**Kohlenmonoxid** (CO) ist unmittelbar giftig. Es tritt hauptsächlich im Leerlauf des Motors auf. Der CO-Ausstoß wird schon lange als Messgröße für die richtige Einstellung der Kraftstoffzumischung herangezogen. CO ist aber nicht stabil und wandelt sich in der Umgebungsluft nach einiger Zeit zu Kohlendioxid ($CO_2$) um.

**Stickstoffmonoxid** (NO) ist ein die Schleimhäute reizendes Gas und nimmt an zahlreichen atmosphärischen Reaktionen teil, unter anderem auch im Zusammenhang mit der Bildung von bodennahem Ozon. NO wandelt sich in der Luft zu Stickstoffdioxid ($NO_2$). Üblicherweise werden die

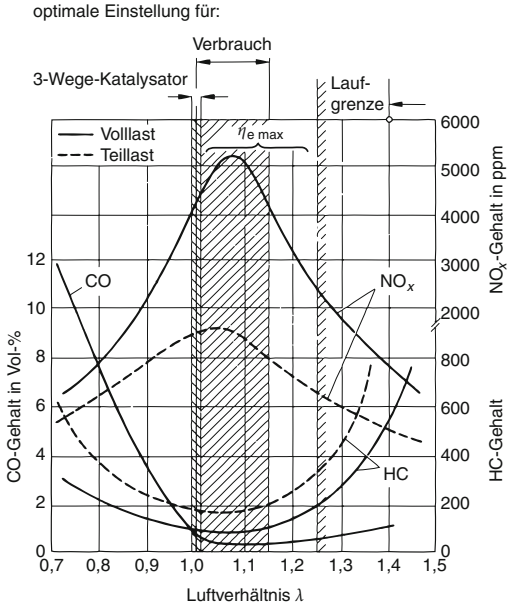



**Abb. 5.64** Einfluss von Luftverhältnis und Motorbelastung auf die Schadstoffemission von Ottomotoren

verschiedenen Stickstoffoxide zusammengefasst bewertet ($NO_x$).

**Kohlenwasserstoffe** (HC) sind in vielen Verbindungen im Abgas enthalten. Teils sind es direkt hochmolekulare Komponenten des Kraftstoffes, aber meistens Teil- und Zwischenreaktionsprodukte der Verbrennung. Ihre Wirkung reicht von der Reizwirkung bis hin zur Kanzerogenität. Auch Kohlenwasserstoffe nehmen an atmosphärischen Reaktionsprozessen teil und üben auf diese Weise sekundäre Einflüsse auf die Luftqualität aus.

**Feststoffe** (engl. particulate matter) umfassen alles Material (außer Wasser), das bei Normalbedingungen als Festkörper (Asche, Ruß) oder Flüssigkeit im Abgas enthalten ist.

Diese Abgaskomponenten sind mit der Gesetzgebung einzeln oder in Gruppen inzwischen praktisch weltweit limitiert. Es gibt jedoch starke Unterschiede in der Strenge der Reglementierung. Die höchsten Anforderungen stellt der USA-Bundesstaat Kalifornien. Die Anforderungen der übrigen US-Staaten sowie die europäische und japanische Abgasgesetzgebung unterscheiden sich in Details, erfordern aber in etwa gleiche Aufwendungen zur innermotorischen und katalytischen Emissionsminderung.

#### 5.1.5.7.1 Drei-Wege-Katalysator

Nachdem in den 60er Jahren für den Markt Kalifornien die zulässigen Abgasemissionen gesetzlich limitiert wurden, war es mit rein motorischen Maßnahmen nicht möglich, die geforderten Grenzwerte für alle limitierten Komponenten CO, HC und $NO_x$ einzuhalten. Dies stellt den Ausgangspunkt der Katalysatortechnik dar. Beim Drei-Wege-Katalysator werden gleichzeitig CO und HC oxidiert sowie $NO_x$ reduziert (Abb. 5.65). Die gleichzeitige Oxidation und Reduktion in einem gemeinsamen Prozess ist aber nur möglich, wenn das Gesamtmischungsverhältnis $\lambda = 1$ mit nur minimalen Abweichungen eingehalten wird. Man spricht deshalb auch vom $\lambda$-1-Konzept. Die Einhaltung des richtigen Mischungsverhältnisses wird durch die Lambdaregelung gewährleistet. Das aktuelle Mischungsverhältnis wird dabei mit Lambdasonden geregelt. Die Sonden reagieren auf den im Abgas noch enthaltenen Sauerstoff und liefern Ausgangsspannungen, anhand derer Rückschlüsse auf das Mischungsverhältnis gezogen werden können. Es wird zwischen sog. Sprungsonden und Breitbandlambdasonden unterschieden. Sprungsonden reagieren mit einem sprungförmigen Spannungssignal auf den Übergang von fettem zu magerem Gemisch. Sie eignen sich daher nur zur Regelung auf ein Luftverhältnis in engen Grenzen um $\lambda = 1$. Beispielhaft ist der Spannungsverlauf einer Sprungsonde in Abhängigkeit vom Luftverhältnis, sowie die Konvertierungsraten der Schadstoffe HC, CO und $NO_x$ in Abb. 5.65 dargestellt. Breitbandlambdasonden messen das Luftverhältnis in einem Lambdabereich zwischen 0,7 und unendlich. Die Breitbandsonden sind aus drei in Schichten angeordneten Zellen aufgebaut. Sie bestehen aus einer sog. Messzelle, einer Konzentrationskammer, die über Diffusionskanäle eine Verbindung zum Abgasmassenstrom herstellt und einer Pumpzelle. Die Pumpzelle besteht aus einer für Sauerstoffionen permeablen Membran. Sie gewährleistet über einen Pumpstrom zur Beförderung von Sauerstoffionen, der mit einer externen Spannungsversorgung geregelt wird, dass in der Konzentrationskammer zu jeder Zeit ein Luftverhältnis von $\lambda = 1$ herrscht. Der Pumpstrom ist

1 Lambda-Sonde, 2 Monolith, 3 Drahtgestricklagerung, 4 wärmegedämmte Doppelschale

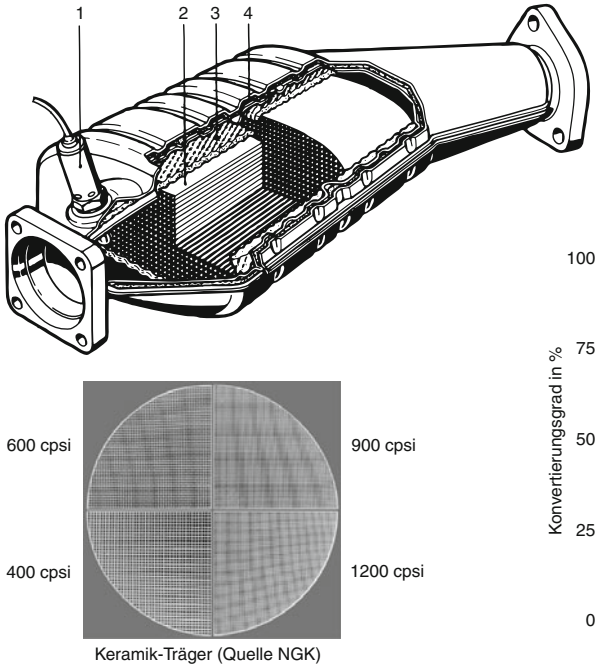



**Abb. 5.65** Aufbau und Wirkungsweise eines Drei-Wege-Katalysators mit λ-Sonde

dabei nahezu proportional zum Sauerstofftransport über die Diffusionskanäle infolge des Potentialunterschiedes zwischen dem Abgas und der Konzentrationskammer. Als Regelgröße dient die Spannung, welche über der Messzelle anliegt. Sie zeigt den Potentialunterschied zwischen der Konzentrationskammer und einem Referenzgas (in der Regel Luft). Für einen Lambdawert von 1 innerhalb der Konzentrationskammer nimmt die Spannung über der Messzelle einen Wert von 450 mV an.

Der Katalysator (Abb. 5.65) besteht aus einem Keramikkörper (Monolith) oder aus einem „Wellblech"-Wickel (Abb. 5.66), der eine möglichst große Oberfläche in vielen kleinen Kanälen bildet. Je größer die Anzahl der Kanäle pro Querschnittfläche ist, desto größer ist einerseits die wirksame Oberfläche, desto größer wird aber andererseits auch der Strömungswiderstand. Deshalb gilt es auch hier einen guten Kompromiss zu finden. Die Zelldichte wird angegeben in cpsi (cells per square inch). Gängige Katalysatoren verfügen über Werte zwischen 400 und 1600 cpsi. Metall-Katalysatoren werden auch aus speziellen Stahlfolien mit gewellter Oberfläche wie in Abb. 5.66 oder mit strukturierten Kanälen gefertigt, die die Abgasströmung durch Turbulenzerzeugung in noch intensiveren Katalytkontakt bringen.

Der Keramik- oder Metallkörper dient nur als Träger für die katalytische Beschichtung. Auf der Trägeroberfläche ist ein Washcoat aufgebracht, der die chemische Reaktionsfläche noch einmal deutlich erhöht. In diesem Washcoat ist dann das eigentliche Katalysatormaterial eingebettet, das die Oxidations- und Reduktionsreaktionen fördert. Als Katalyten werden die Edelmetalle Platin (Pt), Rhodium (Rh) und Palladium (Pd) verwendet, die in unterschiedlichen Mengen und Mischungsanteilen eingesetzt werden. Blei und Bleiverbindungen führen zur Vergiftung des Katalysatormaterials. Sie können die Wirksamkeit des Katalysators schwächen oder die katalytische Reaktion gar vollständig verhindern. Bis zur Einführung der Katalysatortechnik wurden diese Komponenten jedoch als Additive zur Erhöhung der Klopffestigkeit dem Kraft-

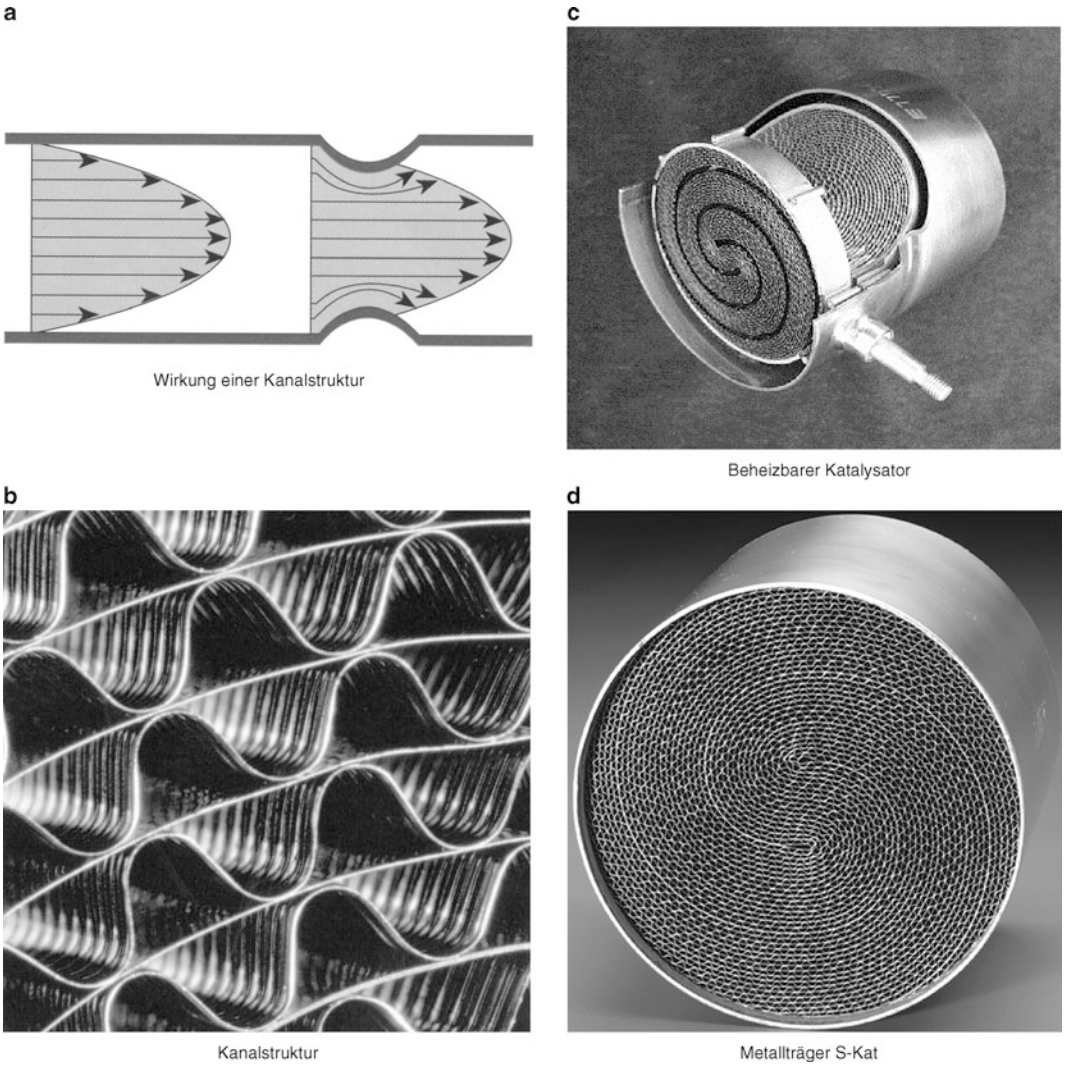



**Abb. 5.66** Metall-Katalysatorträger (Beispiel Emitec)

stoff hinzugefügt. Mit der Katalysatortechnik wurde daher auch das unverbleite Benzin eingeführt.

Die Effektivität eines Katalysators wird als Konvertierungsrate bezeichnet. Sie hängt wesentlich von der Betriebstemperatur ab. Unterhalb 250 °C finden praktisch keine Reaktionen statt. Ideale Bedingungen für gute Umsetzung und lange Lebensdauer sind bei 400 bis 800 °C gegeben. Temperaturen oberhalb 1000 °C führen zu thermischer Alterung und zerstören den Katalysator. Ein Katalysator, der nah am Abgaskrümmer montiert ist, springt infolge rascherer Erwärmung schneller an und kann bereits kurz nach dem Motorkaltstart die Abgasreinigung bewirken. Dieser Effekt wird heute in den meisten Fahrzeugen genutzt, um aktuelle Emissionsvorschriften einhalten zu können. Gleichzeitig besteht in Betriebsbereichen hoher Motorleistung jedoch die Gefahr, dass Temperaturen erreicht werden, die als kritisch für die Stabilität des Katalysatormaterials einzustufen sind.

Zur schnelleren Erwärmung des Katalysators nach dem Motorstart werden diverse Konzepte ver-

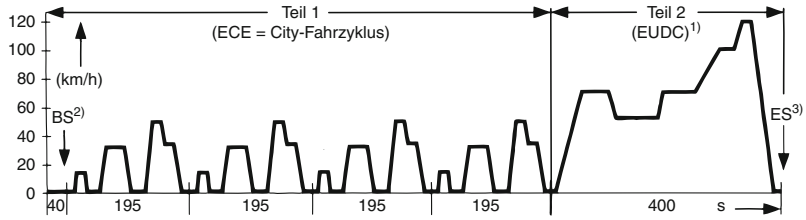
folgt. Üblich ist die vorübergehende Spätzündung, welche über eine verschleppte Verbrennung zu erhöhten Abgastemperaturen führt. Allerdings sind dieser Maßnahme dadurch Grenzen gesetzt, dass einerseits eine Zunahme des Kraftstoffverbrauchs hingenommen werden muss und andererseits auch eine Erhöhung der Rohemissionen mit ihr verbunden sein kann. Eine Alternative besteht im sogenannten Sekundärluftsystem. Hierbei wird der Motor nach dem Kaltstart mit fettem Gemisch betrieben. In das stark mit unvollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen angereicherte, heiße Abgas wird über eine zusätzliche Pumpe Luft eingeblasen. Dies bewirkt exotherme Nachreaktionen im Abgassystem, welche die Abgastemperatur vor Katalysator stark anheben. Infolge des zeitweisen Fettbetriebs ist auch dieses Verfahren mit einem Verbrauchsanstieg verbunden. Eine weitere Option liegt in der Anwendung elektrisch beheizbarer (Metall-)Katalysatoren (◘ Abb. 5.66). Vor dem originären Katalysatorteil ist ein kürzerer Metallträger-Katalysator angeordnet, der beim Start oder schon kurz vorher elektrisch beheizt wird. Die Totzeit bis zum Anspringen des Katalysators wird dabei drastisch reduziert.

Die Emissionsgrenzwerte müssen bei definierten Fahrbedingungen nach einem vorgeschriebenen Testverfahren eingehalten werden. Die Messung der vom Fahrzeug emittierten Schadstoffe wird auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. Der Widerstand der Prüfbankrollen ist dem Gewicht des Fahrzeugs und seinen Fahrwiderständen angepasst. Das Fahrzeug muss eine vorgegebene (simulierte) Strecke mit vorgeschriebener Geschwindigkeit und Gangwahl (bei Handschaltgetrieben) zurücklegen. Der im europäischen Regelwerk definierte Testzyklus „Neuer Europäischer Fahrzyklus" (NEFZ), der in den USA angewandte FTP 75 Testzyklus und die Version 5.3 des Vorschlags der UN-ECE (United Nations Economic Commission for Europe) für den voraussichtlich mit der Grenzwertstufe Euro 6c (09.2017) eingeführten Testzyklus WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure) sind beispielhaft in ◘ Abb. 5.67 gezeigt. Während der gesamten Messzeit wird das Abgas nach der CVS-Methode (Constant Volume Sampling) in Kunststoffbeuteln gesammelt und dann auf HC, CO, $NO_x$, $CO_2$, $O_2$ analysiert. Über eine (ebenfalls vorgeschriebene) Rechenoperation werden dann die Emissionen in g/km (bzw. g/mi) und der Kraftstoffverbrauch in l/100 km (bzw. in mpg – miles per gallon) ausgewiesen.

In ◘ Tab. 5.2 bis ◘ Tab. 5.4 sind die für Pkw mit Ottomotoren in Europa (Stufen II bis VI) und den USA (Federal und Californien) gültigen Grenzwerte wiedergegeben. Die Reduzierungen von Stufe zu Stufe entsprechen den jeweils parallel erzielten Fortschritten im Stand der Technik. In den USA gelten jeweils „Phase-in" Regelungen, wonach die stufenweise Einführung der neuen Grenzwerte in gewissen Stückzahlen bis zur vollständigen Erfüllung der Grenzwerte der neu zugelassenen Fahrzeugflotte innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes erfolgen muss. Die Grenzwerte zur Erfüllung der LEV III Kriterien müssen beispielsweise im Zeitraum zwischen 2015 und 2025 umgesetzt werden. Das gesamte Regelwerk ist sehr umfangreich. Es differenziert zwischen Fahrzeuggruppen (Gewichtsklassen und Nutzart), gibt die Kraftstoffqualität vor und regelt eine Vielzahl von Details.

Die stetige Verschärfung der Emissionsgrenzwerte durch den Gesetzgeber sowie der Kundenwunsch nach leistungsstarken und gleichzeitig verbrauchsgünstigen Fahrzeugen führen zur kontinuierlichen Entwicklung und Implementierung alternativer Technologien. Als Schlüsseltechnologie zur Reduzierung der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs hat sich die Benzindirekteinspritzung, insbesondere in Verbindung mit Abgasturboaufladung zur Leistungssteigerung, durchgesetzt. Neben den thermodynamischen Vorteilen und der Reduktion vieler anderer Schadstoffkomponenten konnte mit Einführung der Benzindirekteinspritzung jedoch auch eine signifikante Zunahme der Partikelemissionen im Abgas festgestellt werden. Die Zunahme der Partikel ist dabei hauptsächlich auf die Entstehung von Ruß zurückzuführen, welcher infolge unvollständiger Verbrennung, also unter Sauerstoffmangel, aber auch bei der Verbrennung von Schmieröl freigesetzt wird. Eine Ursache für die verstärkten Emissionen von Rußteilchen beim direkteinspritzenden Ottomotor gegenüber saugrohr- oder ansaugkanaleingespritzten Motoren sind die erschwerten Bedingungen für die Gemischbildung, wenn der Kraftstoff direkt in den Brennraum injiziert wird. Zum einen

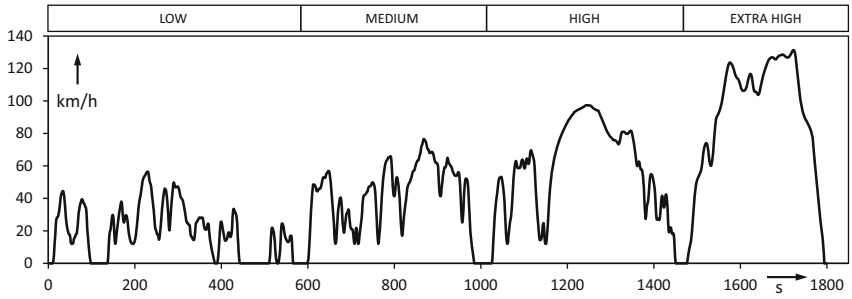
**Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ**




| | |
|---|---|
| Zyklusdauer: | 1220 s<br>1180 s[2)] |
| Zykluslänge: | 11,007 km |
| Zyklenzahl/Test: | 4 + 1 |
| mittlere Zyklusgeschw.: | 33,6 km/h<br>(44,0 km/h)[4)] |
| max. Geschw.: | 120 km/h |

1) EUDC = Extra Urban Driving Cycle = Außerorts-Fahrzyklus
2) Beginn der Probenahme (nach 40 s), ab 1.1.2000 (neue Typen) Probenahme ab Motorstart
3) Ende der Probenahme (1220 s)
4) ohne LL-Phasen (LL-Anteil = 26,2 %)

**Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure WLTP (UNECE version 5.3 proposal)**




| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Zykluslänge: | 23,26 km | Leerlaufzeit: | 12,98 % | $V_{max}$: | 131,3 km/h |
| Zyklusdauer: | 1800 s | Beschleunigung $_{max}$: | 1,58 m/s² | $V_{average}$: | 46,25 km/h |

**USA-Testzyklus (Federal Test Procedure, FTP 75)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Zykluslänge: | 11,115 Meilen | mittlere Geschwindigkeit: | 34,1 km/h |
| Zyklusdauer: | 1877 s + 600 s Pause | maximale Geschwindigkeit: | 91,2 km/h |

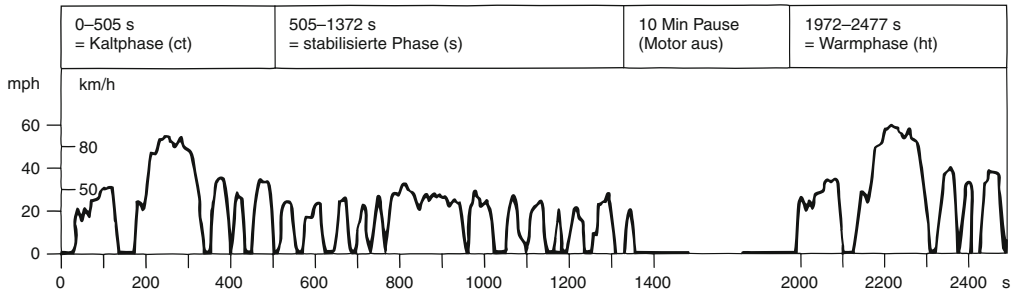



**Abb. 5.67** Abgasemissions-Fahrzyklen: NEFZ und WLTP für Europa, FTP 75 für USA

steht weniger Zeit für die Kraftstoffverdampfung und Gemischbildung zur Verfügung, wenn etwa ein Teil des Brennstoffs erst im Kompressionstakt eingespritzt wird, zum anderen durchströmt das Gemisch nicht die turbulenten Regionen im Bereich der Einlassventile, die ebenfalls eine gute Durchmischung von Luft und Kraftstoff gewährleisten. Beim direkteingespritzten Ottomotor besteht daher die Gefahr, dass Kraftstofftropfen trotz feinster Zerstäubung nicht vollständig verdampfen bzw. dass infolge zu geringer Ladungsbewegung Zonen mit extremem Sauerstoffmangel im Zylinder entstehen und an der Verbrennung teilnehmen. Die Folge ist die Emission von Partikeln, die aufgrund ihrer Grö-

**Tabelle 5.2** Emissionsgrenzwerte in Europa (Auszug)

| EUROPA NEFZ | Emissionsgrenzwerte für Personenkraftwagen (≤ 2,5 t, ≤ 6 Personen) mit Ottomotoren | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Stufe II** | **Stufe III** | **Stufe IV** | **Stufe V** | **Stufe VI** |
| Typzulassung ab | 1.1.1996 | 1.1.2000 | 1.1.2005 | 1.9.2009 | 1.9.2014 |
| Erstzulassung ab | 1.1.1997 | 1.1.2001 | 1.1.2006 | 1.1.2011 | 1.1.2015 |
| CO | 2,2 | 2,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| HC | – | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| davon NMHC* | – | – | – | 0,068 | 0,068 |
| $NO_x$ | – | 0,15 | 0,08 | 0,06 | 0,06 |
| HC + $NO_x$ | 0,5 | – | – | – | – |
| Partikelmasse in g/km | – | – | – | 0,005 | 0,0045 |
| Partikelanzahl in 1/km | – | – | – | – | $6 \cdot 10^{11}$ |

* Non-Methane-Hydrocarbon-Compound

**Tabelle 5.3** Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge (< 8500 lbs, 120.000 miles) mit Ottomotoren (bis 2010) in USA (Auszug)

| US Federal + Californien (bis 2010) | Phase-In | NMHC* [g/mi] | NMOG** [g/mi] | CO [g/mi] | NOx [g/mi] | HCHO*** [g/mi] | Partikel [g/mi] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| US Federal | | | | | | | |
| Tier1, PKW | 1994–1998 | 0,31 | – | 4,2 | 0,6 | – | 0,1 |
| Tier2, Bin 5 | 2004–2010 | – | 0,09 | 4,2 | 0,07 | 0,018 | 0,01 |
| Californien (+ 14 US-Staaten) LEV II | | | | | | | |
| LEV | 2004-2010 | – | 0,09 | 4,2 | 0,07 | 0,018 | 0,01 |
| ULEV | 2004-2010 | – | 0,055 | 2,1 | 0,07 | 0,011 | 0,01 |
| SULEV | 2004-2010 | – | 0,01 | 1,0 | 0,02 | 0,004 | 0,01 |

* Non-Methane-Hydrocarbon-Compound, ** Non-Methane-Organic-Gases, *** Formaldehyd

ße als lungengängig und somit als gesundheitsgefährdend gelten. In den USA und Kalifornien wurden bereits mit Tier 1 und LEV 1 Grenzwerte für die emittierte Partikelmasse je gefahrenen Kilometer, auch für Ottomotoren, vorgeschrieben. In Europa reagierte der Gesetzgeber auf die Zunahme der Partikelemissionen beim Ottomotor erst mit entsprechenden Grenzwerten in der Euro 5 Abgasnorm. Aufgrund der Erkenntnis, dass diejenigen Partikel, die aufgrund ihrer äußerst geringen Größe keinen signifikanten Einfluss auf die je Kilometer emittierte Partikelmasse haben, besonders schädlich für den menschlichen Organismus sind, wurde in der europäischen Abgasgesetzgebung mit Einführung der Euro 6 Emissionsgrenzwerte zusätzlich ein maximal zulässiger Wert für die Anzahl der ausgestoßenen

**Tabelle 5.4** Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge (< 8500 lbs, 150.000 miles) mit Ottomotoren (ab 2010) in USA (Auszug)

| | Phase-In | NMOG+NOx [mg/mi] | CO [g/mi] | HCHO* [mg/mi] | Partikel [mg/mi] |
|---|---|---|---|---|---|
| US Federal | | | | | |
| Tier3, Bin 50 | 2017–2025 | 50 | 1,7 | 4 | 3 |
| Californien LEVIII | | | | | |
| ULEV 70 | 2015–2025 | 70 | 1,7 | 4 | 10 |
| ULEV 50 | 2015–2025 | 50 | 1,7 | 4 | 10 |
| SULEV 30 | 2015–2025 | 30 | 1,0 | 4 | 10 |
| SULEV 20 | 2015–2025 | 20 | 1,0 | 4 | 10 |

* Formaldehyd

Partikel je Kilometer Fahrstrecke festgelegt (particle number: PN). Die hohen Ansprüche insbesondere an die Begrenzung der Partikelanzahl stellen für aktuelle Entwicklungen eine große Herausforderung dar. Um diesen Anforderungen zu genügen und auch künftigen Verschärfungen der Emissionsvorschriften standhalten zu können, werden verschiedene Lösungsansätze erforscht und verfolgt:

- Optimierung von Verbrennung und Gemischbildung durch
  - Ladungsbewegungsdesign (Ansaugkanal- und Brennraumdesign),
  - Injektor-Layout und -Targeting (Injektoren mit Piezoaktuator, Mehrlochinjektoren, …),
  - Erhöhung der Einspritzdrücke,
  - Kombination aus Direkteinspritzung und Port Fuel Injection System,
- Rußpartikelfilter (GPF) ähnlich der Anwendung am Dieselmotor (bis zu 87 % PN-Reduktion),
  - Potential und Auswirkungen etwa auf den Abgasgegendruck werden zur Zeit erprobt,
  - steigende Kosten und Einfluss auf Package durch zusätzliche Hardware,
- Partikel-Reduktion durch geeignete Kalibrierung (bis zu 81 % PN-Reduktion),
  - Startoptimierung,
  - Strategie zum Aufheizen des Katalysators,
  - Einspritzzeiten und -Strategien (Mehrfacheinspritzung),
  - Einlassnockenwellenverstellung,
  - bedarfsgesteuerte Anhebung des Einspritzdruckes.

Eine Begrenzung der Partikelanzahl ähnlich zu Euro VI ist in den USA (incl. Californien) derzeit noch nicht festgelegt. Mit der Einführung künftiger Verschärfungen der Gesetzgebung ist jedoch auch für die USA und Californien eine entsprechende Änderung zu erwarten.

#### 5.1.5.7.2 $DeNO_x$-Katalysator

Die am konventionellen Ottomotor bewährten Edelmetallkatalysatoren realisieren auch an mager betriebenen Direkteinspritz-Ottomotoren die oxidative Nachbehandlung der Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxidemission mit hohen Konvertierungsraten. Dagegen ist der reduktive, die Stickoxidemissionen betreffende Reaktionspfad im sauerstoffhaltigen Abgas praktisch unwirksam. Der Betrieb eines direkteinspritzenden Ottomotors mit magerem Gemisch erfordert deshalb alternative Lösungen für die Reduktion der vom Motor emittierten Stickstoffoxide. Viele dieser Systeme sind auch am Dieselmotor einsetzbar und werden mittlerweile überwiegend zur Abgasnachbehandlung der Selbstzünder genutzt, da der mager betriebene Ottomotor bei nahezu allen Herstellern durch homogen betriebene, aufgeladene Downsizing-Motoren ersetzt wurde.

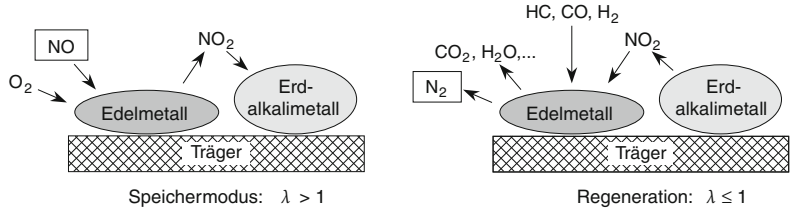



**Abb. 5.68** $NO_x$-Adsorption

Nach anfänglichen Bemühungen, durch die Verwendung alternativer Katalyten die $NO_x$-Selektivität des Konverters zu steigern, hat sich zwischenzeitlich die $NO_x$-Speichertechnologie durchgesetzt. Dabei werden die während des Magerbetriebs emittierten Stickstoffoxide chemisch zwischengespeichert, um dann in Betriebsphasen mit unterstöchiometrischem Gemisch wieder desorbiert und nach dem vom konventionellen Ottomotor bekannten 3-Wege-Prinzip reduziert zu werden [60]. Dies erfordert einen intermitterenden Betrieb des Motors, so dass nach Phasen der $NO_x$-Einspeicherung immer wieder die Regeneration des Speichers erfolgt. Das Funktionsprinzip ist schematisch in Abb. 5.68 wiedergegeben. In einem ersten Schritt werden die im Abgas vorwiegend als NO vorliegenden Stickoxide an einem Edelmetallkatalysator zu $NO_2$ aufoxidiert. Das $NO_2$ kann dann anschließend an ein Speicherelement als Nitratverbindung angelagert (adsorbiert) werden. Als Speicherelemente haben sich die Alkali- und Erdalkalimetalle als besonders wirkungsvoll erwiesen.

Dieses Funktionsprinzip ist temperaturabhängig, wobei neuere Entwicklungen hohe $NO_x$-Konvertierungsraten in einem ausreichend weiten Temperaturbereich aufweisen. Bei zu niedrigen Temperaturen wird die Wirkung im Wesentlichen dadurch begrenzt, dass die katalytisch unterstützte $NO_2$-Bildung ausbleibt. Bei zu hohen Temperaturen zerfällt das $NO_2$ wieder zu NO und kann dann nicht mehr als Nitrat eingespeichert werden. Außerdem nimmt mit zunehmender Temperatur die Stabilität des Nitrats ab und das gespeicherte Stickoxid wird wieder desorbiert. Daneben sind zu hohe Temperaturen des Konverters zu vermeiden, weil es ansonsten zur thermischen Alterung kommt. Diese führt infolge einer Verringerung der Dispersion der Edelmetallkomponenten und wegen chemischer Reaktionen des Adsorbermaterials mit der oxidischen Trägermasse zum dauerhaften Aktivitätsverlust [61]. Aus diesem Grund kommt für den Adsorberkatalysator vorzugsweise eine motorferne Einbauposition in Betracht. Besonders vorteilhaft ist in diesem Zusammenhang die Kombination mit einem motornah eingebauten Oxidationskatalysator, der bereits bei niedrigen Abgastemperaturen und kurz nach dem Kaltstart die Oxidation von NO zu $NO_2$ unterstützt.

Kritisch im Hinblick auf die erreichbaren Verbrauchsvorteile ist der Betrieb bei höherer Teillast, wenn seitens des Brennverfahrens zwar noch thermodynamische Vorteile des Magerbetriebs vorliegen, das Abgasnachbehandlungssystem jedoch aufgrund zu hoher Abgastemperatur nicht mehr in der Lage ist, die $NO_x$-Emission ausreichend zu begrenzen. Zur Auflösung dieses Konfliktes sind spezielle Einrichtungen zur Absenkung der Abgastemperatur mittels Fahrtwindkühlung der Abgasführung bis zum $NO_x$-Speicherkatalysator entwickelt worden. Die in Serie gelangten Ausführungen reichen vom mehrflutig gestalteten Abgasrohr zwischen Vorkatalysator und Speicherkatalysator über die Kühlluftführung auf den motornahen Vorkatalysator (beides erstmals realisiert im VW Lupo FSI [62]) bis hin zur Schaltklappe in der Abgasführung (Mercedes CGI [63]), welche bei höherer Last das Abgas auf einem längeren Weg und durch eine größere Querschnittsfläche zum $NO_x$-Speicherkatalysator leitet.

Wenn der Adsorber seine Speicherkapazität erreicht, muss er regeneriert werden. Hierzu wird der Motor kurzzeitig, typischerweise nur für Sekunden, mit unterstöchiometrischem Gemisch betrieben. Dabei kommt es zur spontanen Desorption des eingespeicherten $NO_2$, und unter Anwesenheit von

Fettkomponenten im Abgas findet der vom 3-Wege-Katalysator bekannte Abbaumechanismus statt. Die Dauer und die Häufigkeit dieses Regenerationsprozesses haben direkten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Als typische Werte für den darauf zurückzuführenden Mehrverbrauch im europäischen Testzyklus können 1 bis 2 % genannt werden.

Die Effektivität des Regenerationsprozesses hängt unter anderem auch davon ab, ob die Fettkomponenten des Abgases unmittelbar für die Desorption und die nachfolgende 3-Wege-Reaktion bereitstehen. Infolge der Sauerstoff-Speicherfähigkeit des katalytischen Konverters wird nämlich zunächst ein Teil der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids oxidiert, ohne dass eine Einbindung in den Regenerationsprozess erfolgt. Die Beschichtung des vorgeschalteten Oxidationskatalysators ist deshalb im Hinblick auf eine geringe Sauerstoff-Speicherfähigkeit auszulegen.

Die als $NO_x$-Speicher verwendeten Alkali- und Erdalkalimetalle adsorbieren auch Schwefeloxide in Form von Sulfaten, die bei der motorischen Verbrennung aus dem im Kraftstoff enthaltenen Schwefel entstehen können. Die thermische Stabilität der Sulfate ist dabei deutlich größer als die der Nitratverbindungen. Eine Schwefel-Regeneration findet deshalb erst bei höheren Temperaturen statt, als sie bei der beschriebenen Speicherregeneration erreicht werden. Deshalb kommt es mit fortschreitender Zeit zu einer Blockade der Speicherelemente, so dass die $NO_x$-Speicherfähigkeit empfindlich abnimmt. Aus diesem Umstand leitet sich die Forderung nach minimalem Schwefelgehalt des Kraftstoffes ab. Der Gesetzgeber hat hierzu eine Begrenzung auf 50 ppm vorgenommen. Wie Untersuchungen von Quissek et al. gezeigt haben, führen jedoch auch kleinste Schwefelkonzentrationen auf Dauer zur Deaktivierung des $NO_x$-Adsorbers [64]. Deshalb hat sich zwischenzeitlich eine Limitierung des Schwefelgehaltes zumindest der Kraftstoffqualität „Super Plus“ auf ein Niveau unter 10 ppm eingestellt.

Auf jeden Fall müssen spezielle Regenerationsstrategien für die Entschwefelung des Adsorbers vorgesehen werden. Die üblichen Regenerationsprozeduren erfordern einen Betrieb mit unterstöchiometrischem Gemisch und hoher Abgastemperatur über einen längeren, in Minuten anzugebenden Zeitraum. Dabei stellt sich die Frage, wie diese Bedingungen in jeder vorkommenden Fahrsituation dargestellt werden können. Im Übrigen entsteht daraus ein weiterer Kraftstoffmehrverbrauch, der die Vorteile eines mager betriebenen Direkteinspritzmotors teilweise aufzehrt. Der insgesamt zulasten der Abgasreinigung entstehende Mehrverbrauch ist mit 2 bis 3 %-Punkten anzunehmen. Damit verringert sich das mit Benzin-Direkteinspritzung in Kundenhand realisierbare Verbrauchspotenzial auf eine Bandbreite von 8 bis 12 %.

Eine weitere Möglichkeit der $NO_x$-Reduktion im sauerstoffreichen Abgas besteht in der Verwendung eines zusätzlichen, selektiv wirkenden Reduktionsmittels. Das in Großkraftwerken sowie an stationär betriebenen Verbrennungsmotoren in Blockheizkraftwerken großtechnisch eingesetzte SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction) arbeitet vorzugsweise mit Ammoniak als Reduktionsmittel. Für den Pkw-Einsatz dieser Technologie wurde dagegen eine 32,5-prozentige Harnstoff-Wasser-Lösung etabliert, die allgemein als AdBlue bezeichnet wird. Das Verfahren ist für sein hohes Potenzial zur $NO_x$-Reduktion bekannt und hat als weiteren Vorteil eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Katalysatorvergiftungen, wie sie aus dem im Kraftstoff enthaltenen Schwefel resultieren können. Problematisch ist dagegen das Harnstoff-Handling sowie die Notwendigkeit, Harnstoff als zusätzlichen Betriebsstoff mit an Bord zu führen.

#### 5.1.5.8 Motormanagement

Die Fortschritte in der Mikroelektronik und der elektro-mechanischen Sensorik einerseits und die zunehmenden gesetzlichen Anforderungen an die Einschränkung der Schadstoff-Emissionen und der Überwachung aller emissionsrelevanten Systeme andererseits haben zu immer leistungsfähigeren Systemen der Motorsteuerung und -überwachung geführt. Die elektronische Motorsteuerung erlaubt ein umfassendes Motormanagement mit gezielten und bewussten Eingriffen in den Betriebsablauf des Motors unter Berücksichtigung einer Vielzahl von physikalischen und mechanischen Größen sowie automatischer Eingriffe bei nicht vorhergesehenen Ereignissen.

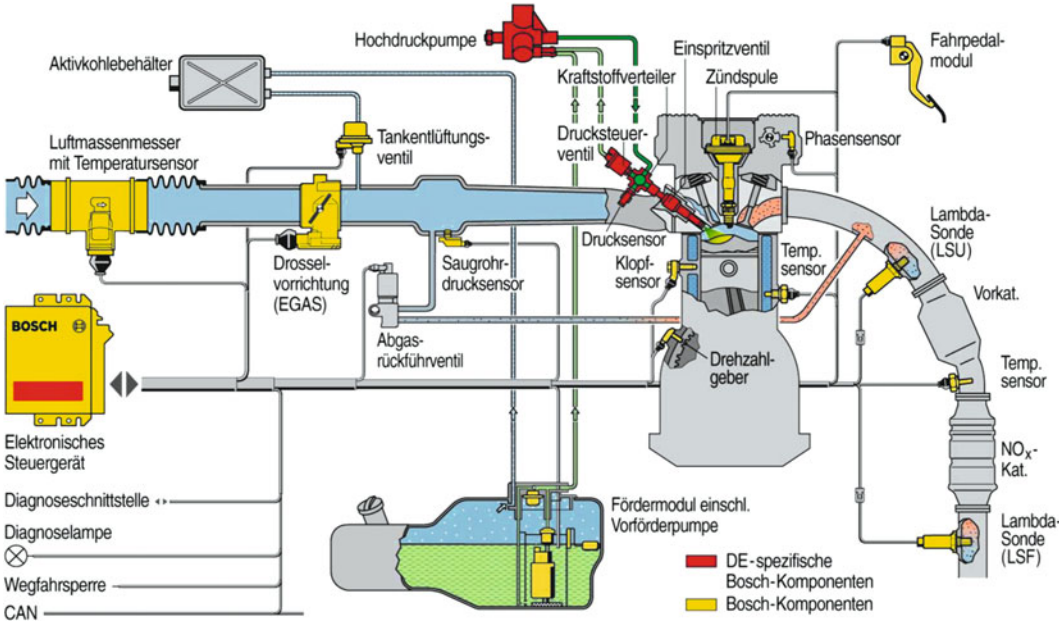



**Abb. 5.69** Motormanagement-Systemkomponenten (Bosch)

### 5.1.5.8.1 Motorsteuerung

Im Steuergerät, der ECU (Electronic Control Unit), werden alle eingehenden Daten aus Sensoren verarbeitet und es werden daraus Stellbefehle für Aktuatoren abgeleitet. In Abb. 5.69 ist ein Abbild des physischen Aufbaus eines Motors mit seinen angeschlossenen Komponenten dargestellt, die zum Umfang der Motorsteuerung gehören. In Abb. 5.70 ist ein Blockschaltbild einer Motorsteuerung gezeigt, in dem die Funktionsgruppen mit ihren Eingangsgrößen und Ausgabefunktionen zu erkennen sind. Die Steuergeräte sind heute typischerweise mit 32-bit-Prozessoren (teilweise noch mit 16-bit-Prozessoren) bestückt, damit die Menge der notwendigen Informationen bei hohen Drehzahlen und dynamischen Vorgängen zeitgerecht verarbeitet werden kann. Dafür stehen bei einem 6-Zylinder-Motor zwischen zwei Zündungen bei Maximaldrehzahl nur ca. 3 ms zur Verfügung.

Je nach Ausstattung des Fahrzeugs sind weitere Interaktionen mit anderen elektronischen Steuerungen, z. B. mit Automatikgetrieben, automatisch schaltenden Stufengetrieben, mit Bremssystemen oder mit Klimaanlagen zu berücksichtigen. Dabei kommen sowohl zentrale Architekturen, bei denen alle Systeme von einer gemeinsamen Steuerung kontrolliert werden, als auch dezentrale Kombinationen mehrerer miteinander vernetzter Systeme zur Anwendung.

Die Sensorsignale werden über Eingangsschaltungen aufbereitet und in einen einheitlichen Spannungsbereich gelegt. Über Analog-Digital-Wandler werden die aufbereiteten Signale in Zahlenwerte transformiert, die dann vom Mikrocomputer verarbeitet werden können. Die in digitaler Form ermittelten Ausgangsgrößen müssen dann wieder rücktransformiert und auf die an den Stellgliedern erforderlichen Leistungspegel angehoben werden. In einem Halbleiterspeicher werden alle Programme (Verknüpfungen und Algorithmen) und Kennfelder (Applikationsdaten) abgelegt.

Neben den in den vorhergehenden Kapiteln behandelten Systemen Einspritzung (Zeitpunkt, Zeitdauer), Zündung (Zeitpunkt), Emissionen ($\lambda$-Regelung, Abgasrückführung) kommen noch hinzu:

- Klopfregelung, d. h. die Rücknahme des Zündwinkels, wenn Klopfen auftritt.
- Leerlaufdrehzahlregelung, abhängig von Zündung und Einspritzung, evtl. noch unterschiedlich bei erhöhter Last, z. B. durch

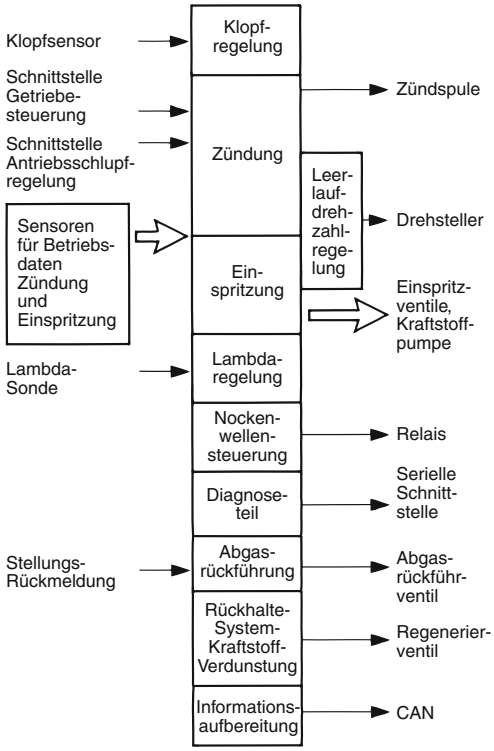



**Abb. 5.70** Blockschaltbild einer Motorsteuerung (Bosch)

Klimakompressor, Generator oder Lenkhilfepumpe.
- Tankentlüftung, d. h. „entladen" des Aktivkohle-Kraftstoffdampfabscheiders.
- Nockenwellensteuerung in Abhängigkeit von der Motordrehzahl und evtl. Motorlast.
- Ladedruckregelung bei aufgeladenen Motoren, etc.

Im Zuge der Ausweitung der x-by-wire-Technologie ist die mechanische Kopplung zwischen Gaspedal und Drosselklappe durch einen Fahrpedalgeber und eine elektronische Drosselklappe (E-GAS) ersetzt worden. Damit ist der unmittelbare Zugriff des Fahrers auf die Drosselklappe aufgehoben. Der mittels Fahrpedalbetätigung übermittelte Wunsch des Fahrers wird gemeinsam mit den Lastanforderungen anderer Systeme (Klimaanlage, elektrische Verbraucher, etc.) analysiert und mit den Möglichkeiten (z. B. Momentenreserve, Boost-Funktion) und Restriktionen (z. B. Traktionskontrolle, Regenerationsfunktionen) abgeglichen und ausgewertet. Aus der resultierenden Drehmomentanforderung werden daraufhin Vorgaben etwa für die Drosselklappenstellung oder ggf. die Ladedruckregelung abgeleitet.

Ein wichtiges Element moderner Motorsteuerungen ist die Fähigkeit des Systems zur Adaption [66]. Innerhalb vorgebbarer Grenzen können die Toleranzen einiger Bauteile ausgeregelt werden. Beispiele sind das Lambda-Kennfeld, die Grundluft im Leerlauf und der Drosselklappenwinkel. So können in der Produktion und im Kundendienst aufwendige Einstell- und Kalibrierarbeiten reduziert werden. Ein anderes Beispiel ist die Adaption des Zündwinkelkennfeldes über den Klopfsensor in Abhängigkeit von der Kraftstoffqualität bzw. Oktanzahl.

Eine weitere Eigenschaft moderner Motorsteuerungen besteht in der integrierten Eigendiagnose. Neben klassischen Fehlerdiagnosemethoden kommen heute auch modellbasierte Vorgehensweisen bis hin zu dynamischen neuronalen Netzen zur Anwendung [67]. Dabei werden aufgetretene Fehler und Störungen erfasst und hinsichtlich ihrer möglichen Ursachen und Auswirkungen analysiert:
- Überwachung aller Komponenten und Systeme mittels logischer und sinnvoller Werte, deren Grenzen festgelegt werden können und deren Einhaltung überprüft wird. Auf diese Weise können Fehlerursachen selbst in komplexen Systemen eingegrenzt und ihre Diagnose erleichtert werden.
- Schutz empfindlicher Komponenten bei Fehlern. So gefährden z. B. Zündaussetzer den Katalysator durch Überhitzung; werden an einem Zylinder mehrere Verbrennungsaussetzer erkannt, so wird die Einspritzung für diesen Zylinder abgeschaltet.
- Sicherstellen eines Notlaufes. Gibt es einen Ausfall bei Sensoren oder Aktoren, so werden Ersatzwerte definiert, damit ein Notfahrbetrieb aufrechterhalten werden kann. Fällt z. B. das Lastsignal aus (Luftmasse, Saugrohrdruck), so wird aus der Drehzahl und dem Drosselklappenwinkel eine Ersatzgröße gebildet, die einen

Notbetrieb bis zum Aufsuchen der Werkstatt ermöglicht.
- Speicherung detaillierter Informationen. Erkennt das Diagnosesystem einen Fehler, so werden die Daten in einem fehlerspezifischen Code in einem Fehlerspeicher des Steuergerätes abgelegt. Dazu werden auch die Umgebungs- und Betriebsbedingungen des Motors mit gespeichert.
- On-Board-Diagnose emissionsrelevanter Systeme. Vom Fahrer unbemerkbare Ausfälle oder Fehlfunktion werden erkannt und, sofern damit ein Versagen der Abgasreinigungseinrichtung verbunden sein kann, dem Fahrer über eine Signallampe (MIL) angezeigt. Er muss dann schnellstmöglich eine Werkstatt aufsuchen. Dem Vorbild der amerikanischen OBD-Regelung folgend gelten ähnliche Regelungen seit 2000 (Stufe III) auch für Europa und werden hier EOBD genannt (European On Bord Diagnosis).
- Abfrage der gespeicherten Informationen über genormte Schnittstellen durch die Werkstatt. Anhand der Meldungen kann die Ursache der Störung eingegrenzt werden. Für die hochkomplexen Systeme ist nur so eine effektive Fehlersuche überhaupt möglich.

Während der Einführung eines neuen Fahrzeugmodells kommt es immer wieder vor, dass aus Erfahrungen und Beanstandungen aus dem Kundenfeld heraus Änderungen an den Kennfeldern oder gar an den Prozessroutinen vorgenommen werden müssen. In den ersten Entwicklungsstufen der elektronischen Motorsteuerungen war dies praktisch nur möglich, indem das Steuergerät komplett ausgewechselt wurde. Die heute eingesetzten elektronischen Datenspeicher (Flash-EPROM's) gestatten dagegen ein Überschreiben der Daten. Auf diese Weise können beispielsweise im Rahmen der regelmäßigen Wartungsarbeiten kurzfristige Anpassungen an den letzten Entwicklungsstand der Motorapplikation vorgenommen werden. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser flexiblen Datenspeicher ist, dass in der Fahrzeugproduktion mit einer einzigen Steuergeräte-Hardware am Bandende des Fahrzeugherstellers mehrere Motor- und Applikationsvarianten mit individuellen Steuergerätedaten geladen werden können.

Der damit mögliche Zugang zu den Applikationsdaten wird auch im Rahmen des sogenannten Chiptuning genutzt. Vor unqualifizierten Eingriffen in die Motorsteuerung ist jedoch zu warnen, weil dabei die Gefahr einer Bauteilüberlastung oder einer Überschreitung der Emissionsgrenzwerte gegeben sein kann. Außerdem erlischt bei einer Veränderung der vom Hersteller genehmigten und zertifizierten Betriebsweise die allgemeine Betriebserlaubnis.

#### 5.1.5.8.2 Betriebsstrategie und Motormanagement bei Benzin-Direkteinspritzung

Im Teillastbetrieb ist es möglich, den Direkteinspritz-Ottomotor mit geschichteter Zylinderladung zu betreiben. Hierzu wird der Kraftstoff erst während des Verdichtungstaktes eingespritzt. Bei höherer Last entstehen bei geschichteter Ladung ausgedehnte Zonen überfetteten Gemisches, und es muss deshalb auf den Betrieb mit homogener Zylinderladung übergegangen werden, was eine frühe Einspritzung während des Saugtaktes erfordert. Gleichzeitig muss dann die vom Motor angesaugte Luftmenge der Motorlast und der entsprechenden Kraftstoffmenge angepasst werden. Hieraus folgen funktionale Anforderungen an das Motormanagement, die weit über den von konventionellen Ottomotoren bekannten Umfang hinausgehen.

Zusätzlich zu diesen beiden Basis-Betriebsarten können weitere Betriebsmoden sinnvoll sein. Abb. 5.71 zeigt beispielhaft mögliche Betriebsstrategien eines Direkteinspritz-Ottomotors im Motorkennfeld. Bei sehr niedrigen Lasten und im Leerlaufbetrieb ist üblicherweise eine Teildrosselung des Motors erforderlich, um die Abgastemperaturen auf einem Niveau zu halten, welches die katalytische Abgasnachbehandlung ermöglicht. Im Übergangsbereich zwischen Schichtlade-Magerbetrieb und homogenem $\lambda$-1-Betrieb kann es vorteilhaft sein, den Motor mit homogenem, magerem Gemisch zu betreiben, um die Vorteile des Magerbetriebs in weiteren Kennfeldbereichen zu nutzen. Darüber hinaus ist an der Volllast das Gemisch häu-

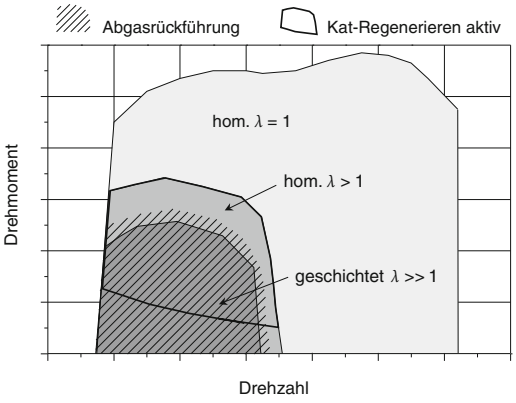



**Abb. 5.71** Betriebsstrategien eines Direkteinspritz-Ottomotors

fig zur Limitierung der Abgastemperaturen (Bauteilschutz) anzufetten. Daneben hat das Motormanagement auch die Anpassung der Betriebsstrategie im Fahrbetrieb zu bewältigen. Hierzu zählt zunächst die Realisierung von Hysteresefunktionen für den Übergang zwischen den jeweiligen Betriebsmoden sowie die Anpassung der Betriebsweise an die Betriebsrandbedingungen, zum Beispiel im Kaltstart- und Warmlaufbetrieb.

Eine weitere Steigerung der Komplexität folgt aus der Integration des Motors in das Gesamtsystem Fahrzeug, wobei insbesondere die Abgasreinigungseinrichtungen Rückwirkungen auf die Motorsteuerung ausüben. So erfordert beispielsweise die Anwendung eines Adsorber-Katalysators (▶ Abschn. 5.1.5.7.2) während des Magerbetriebs zur Regeneration den kurzzeitigen Wechsel zu einer leicht unterstöchiometrischen Betriebsweise. Die Häufigkeit dieses Regenerationsprozesses hängt von der $NO_x$-Speicherfähigkeit des Adsorbers und von der $NO_x$-Emission des Motors ab. Aufgabe des Motormanagements ist dabei, die $NO_x$-Speicherung in einem Modell zu bilanzieren und auf dieser Basis die Regeneration bedarfsgerecht zu initiieren [68]. In Serienkonzepten wurde die Regeneration des $NO_x$-Adsorbers üblicherweise mithilfe einer $NO_x$-Messsonde im Abgas gesteuert. In Verbindung mit einem $NO_x$-Speichermodell kann der Alterungs- und Schwefelvergiftungszustand des Adsorbers kontinuierlich überwacht werden. Auf dieser Grundlage erfolgt eine bedarfsgerechte Auslösung der Desulfatisierungsprozedur, welche eine Betriebsphase mit unterstöchiometrischem Gemisch bei hohen Abgastemperaturen darstellt. Alle diese dynamischen Vorgänge sind idealerweise so zu applizieren, dass sie von den Fahrzeuginsassen nicht wahrgenommen werden können. Dies erfordert schnelle Eingriffe der Motorsteuerung in die Laststeuerung, die über eine elektrisch betätigte Drosselklappe (E-Gas) sowie über Zündwinkeleingriffe erfolgen.

Der Einsatz der Direkteinspritzung im Ottomotor erfordert für einige Betriebsmodi ein Steuerungskonzept, welches sowohl einen Homogen- als auch einen Schichtbetrieb ermöglicht. Während des Homogenbetriebs wird der Kraftstoff so eingespritzt, dass sich eine homogene Gemischverteilung mit einem Luftverhältnis von Lambda $= 1$ ergibt. Im Homogenbetrieb ist daher das Gesamtmotormoment äquivalent zur Zylinderfüllung und es kann direkt über die Luftmenge gesteuert werden. Bei den in Abb. 5.71 dargestellten Betriebsarten eines Direkteinspritz-Ottomotors oder bei einem modernen, aufgeladenen Direkteinspritz-Ottomotor mit realisierbarem Scavenging (Ventilöffnungsüberschneidung bei positivem Spüldruckgefälle) besteht jedoch nicht immer ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Luftmenge und der Motorlast. Die Steuerung solcher Systeme erfordert eine momentenbasierte Funktionsstruktur. Diese erlaubt die Darstellung des Fahrerwunschmoments in den unterschiedlichen Betriebsmoden [69]. Abb. 5.72 zeigt in schematischer Form diese Funktionsstruktur. Als Führungsgröße wird das vom Motor bereitzustellende Moment aus dem Fahrerwunsch unter Berücksichtigung der Triebstrang- und Nebenaggregateinflüsse berechnet. Auch dynamische Regeleingriffe der Antischlupf- oder Fahrdynamikregelung oder anderer fahrzeugseitiger Systeme fließen in die Berechnung des Momentenbedarfs ein. Innerhalb des Steuergerätes wird dann die Bereitstellung dieses Momentenbedarfs je nach der augenblicklich einzustellenden Betriebsart des Motors individuell durch die Anpassung verschiedener Stellgrößen realisiert. Die aus dem Momentenbedarf und der gewählten Betriebsstrategie resultierende Luftmenge wird über eine vom Motormanagement betätigte Drosselklappe (E-Gas) und (bei aufgeladenen Motoren) die An-

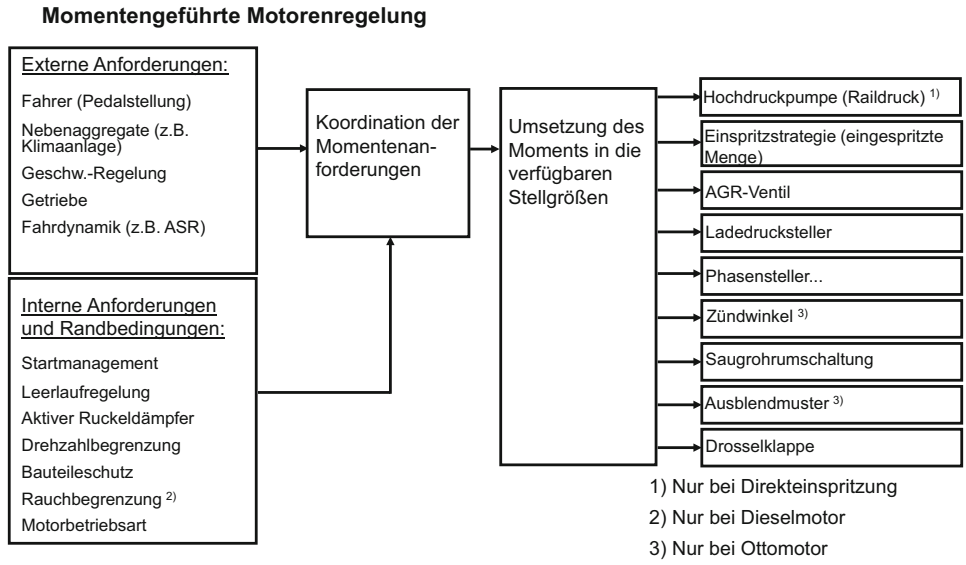



**Abb. 5.72** Momentenbasierte Funktionsstruktur [72]

passung des Ladedruckes z. B. durch die Aktuierung von Wastegates eingestellt. Weitere Stellgrößen für die Justierung des Motormoments sind der Rail- oder Einspritzdruck, die Einspritzstrategie (Kraftstoffmenge), Abgasrückführung, Nockenwellenpositionen und der Zündwinkel.

## 5.2 Dieselmotor

### 5.2.1 Definitionen

#### 5.2.1.1 Verbrennungsmotor

Wärmekraftmaschinen, die durch diskontinuierliche Verbrennung von Kraftstoffen in einem Arbeitsraum, dessen Volumen durch Bewegung von Kolben oder Läufern verändert wird, nutzbare Energie abgeben, werden Verbrennungsmotoren genannt. Dabei wird ein brennbares Luft-Kraftstoff-Gemisch im Inneren eines Arbeitszylinders entzündet und verbrannt. Die frei werdende Verbrennungswärme erhöht den Druck der vorverdichteten Gase. Dieser liefert über den Kolben und die Kurbelwelle mechanische Arbeit. Nach jedem Arbeitshub werden die verbrannten Gase gegen frisches Luft-Kraftstoff-Gemisch ausgewechselt.

#### 5.2.1.2 Dieselmotor

Ein Verbrennungsmotor, bei dem der in den Verbrennungsraum eingespritzte flüssige Kraftstoff sich in der Luftladung entzündet, nachdem diese durch die Verdichtung auf eine für die Einleitung der Zündung hinreichend hohe Temperatur gebracht worden ist, wird als Dieselmotor bezeichnet.

Die Idee von Rudolf Diesel galt der Konzeption einer besonders ökonomischen Verbrennungsmaschine, wobei der größere Teil der Wärmeverluste auf ein Minimum verringert werden sollte: einmal durch die Abkühlung des verbrannten Gases auf Umgebungstemperatur, zum anderen über die Begrenzung der maximalen Verbrennungstemperatur durch allmähliches Zuführen von Kraftstoff. Zur möglichst effektiven Kraftstoffausnutzung trägt auch die hohe Verdichtung bei, was zwangsläufig zur Selbstzündung führt. „Der Zweck der hohen Verdichtung ist nicht die Selbstzündung, wie vielfach behauptet wird“, stellte R. Diesel fest. „Ich suchte einen Prozess mit höchster Wärmeausnutzung und dieser Zweck verlangte die hoch verdichtete Luft“. Der Erfinder wollte bei seiner Maschine einen möglichst hohen Kompressionsdruck er-

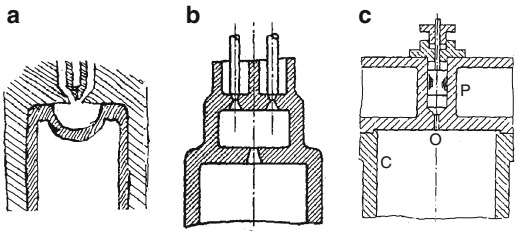



**Abb. 5.73** Vorschläge R. Diesesl zum Verbrennungssystem **a** Kolben mit Kolbenmulde (1892), **b** Nebenkammer (1893), **c** Pumpe-Düse-Einspritzsystem (1905)

zielen und diesen maximalen Druck dann durch Zugeben von Kraftstoff während des Arbeitshubes beibehalten. Ziel war eine besonders gleichmäßige Leistungscharakteristik.

## 5.2.2 Historie des Dieselmotors

„Der Diesel duftet nach Zukunft" – dieser Ausspruch hätte auch bei Rudolf Diesel's Vision stehen können, denn im Blickfeld hatte er, dass die Abgase seines Motors rauch- und geruchlos sind.

Geboren am 18. März 1857 in Paris als Sohn deutscher Eltern meldet der Ingenieur Rudolf Diesel beim Kaiserlichen Patentamt zu Berlin ein Patent auf „Neue rationelle Wärmekraftmaschinen" an, worauf ihm am 23. Februar 1893 das DRP 67207 über „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen" datiert auf den 28. Februar 1892 erteilt wird.

Rudolf Diesel schreibt selbst in seinem Buch „Die Entstehung des Dieselmotors": „Eine Erfindung besteht aus 2 Teilen, der Idee und ihrer Ausführung." Seine überdurchschnittliche Intelligenz, seine außergewöhnliche technische Begabung und seine Kraft, eine einmal gefasste Idee konsequent in die Tat umzusetzen, waren die notwendigen Komponenten, dass der Dieselmotor geboren wurde. Noch ein Detail zum technischen Einfühlungsvermögen von Rudolf Diesel: Obgleich nach dem „Stand der Technik" niemand genau wissen konnte, welcher Kraftstoff sich am besten eignen würde, machte er Vorschläge zum Verbrennungssystem (Abb. 5.73).

Die Wegmarken (Tab. 5.5) zur Entwicklung des Dieselmotors, sowohl als leistungsstarker Großdieselmotor als auch als schnell laufender Fahrzeug-Dieselmotor, konnte R. Diesel nur anfänglich miterleben, da er im September 1913 den Freitod wählte. Die Gründe hierfür waren Irrtümer, Fehlspekulationen und Erfinderstolz.

## 5.2.3 Motortechnische Grundlagen

### 5.2.3.1 Einleitung

Verbrennungsmotoren sind prinzipiell Energiewandler, die die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie in mechanische Energie, d. h. Nutzarbeit wandeln. Dabei wird die im Motor bei der Verbrennung freigesetzte Energie einem thermodynamischen Kreisprozess zugeführt und als Druck-Volumen-Arbeit genutzt. Die Energiebilanz des Wandlers lautet somit (Abb. 5.74):

$$E_{\text{Kraftstoff}} + E_{\text{Verbrennungsluft}} + W_{\text{Nutzarbeit}} + \sum E_{\text{Verluste}} = 0.$$

Aus ökonomischer Sicht sind die Energieverluste zu minimieren. Dies genügt heute aber nicht mehr dem ökologischen Anspruch, wonach jede Wandlung von Materie und Energie mit maximalem Wirkungsgradbei minimaler Umweltbelastung zu erfolgen hat. Diese Forderung hatte und hat aufwändige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Folge, die den einfachen Motor des Rudolf Diesel in ein komplexeres System überführt haben (Abb. 5.75). Im Bild nicht enthalten sind die Subsysteme Abgasrückführung und Ladeluftkühlung. Wesentlich dabei ist die verstärkte Nutzung elektrischer und elektronischer Bauelemente sowie der Übergang von offenen Steuerungen zu geschlossenen Regelkreisen. Weiterhin sind aus Wettbewerbsgründen Materialeinsatz und Fertigungsaufwand zu minimieren.

### 5.2.3.2 Vergleich motorischer Verbrennungsverfahren

Vor einer Zündung und Verbrennung ist der meist flüssige Kraftstoff aufzubereiten. Es muss ein zündfähiges Gemisch aus gasförmigem Kraftstoffdampf und Luft hergestellt werden. Diese Abläufe sind bei Diesel- und Ottomotoren verschieden (Tab. 5.6).

**Tabelle 5.5** Einige Meilensteine des Dieselmotors

| Jahr | Meilenstein |
|---|---|
| 1897 | Erster Lauf eines Dieselmotors mit einem maximalen Wirkungsgrad von $\eta_e = 26{,}2\,\%$ bei der Maschinenfabrik Augsburg |
| 1898 | Auslieferung des ersten Zweizylinder-Dieselmotors mit $2 \times 30$ PS bei 180 $min^{-1}$ an die Vereinigten Zündholzfabriken AG in Kempten |
| 1905 | ALFRED BÜCHI schlägt die Nutzung der Abgasenergie zur Aufladung vor |
| 1905 | Versuchsmotor von Rudolf Diesel auf Basis eines Vierzylinder-Saurer-Ottomotors mit Luftkompressor und direkter Einspritzung (nicht marktfähig) |
| 1906 | DRP 196514 für die Firma Deutz auf Einspritzung in Nebenkammer |
| 1909 | Grundpatent DRP 230517 von L'ORANGE auf Vorkammer |
| 1924 | Erste Nutzfahrzeug-Dieselmotoren der MAN Nürnberg (direkte Einspritzung) bzw. der Daimler-Benz AG (indirekte Einspritzung in Vorkammer) vorgestellt |
| 1927 | Beginn der Serienfertigung von Dieseleinspritzanlagen bei Bosch |
| 1936 | Erste Pkw-Dieselmotoren mit Vorkammer der Daimler-Benz AG (Pkw Typ 260 D) und Hanomag in Serie |
| 1953 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Wirbelkammer von Borgward bzw. Fiat |
| 1976 | 1. schnelllaufender Pkw-Dieselmotor mit kleinem Hubraum bei VW |
| 1978 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Abgasturboaufladung in Serie (Daimler-Benz AG) |
| 1987 | Größte dieselelektrische Antriebsanlage mit neuen MAN-B & W-Viertakt-Dieselmotoren und einer Gesamtleistung von 95.600 kW zum Antrieb der „Queen Elisabeth 2" wird in Dienst gestellt |
| 1987 | Erste elektronisch geregelte Einspritzung (BMW) |
| 1988 | Erster Pkw-Dieselmotor mit direkter Einspritzung in Serie (Fiat) |
| 1989 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Abgasturboaufladung und direkter Einspritzung bei Audi in Serie (Pkw Audi 100 TDI) |
| 1991/92 | Zweitakt- und Viertakt-Experimentiermotoren von Sulzer (RTX54 mit $p_{Zmax} = 180$ bar, $P_A = 8{,}5$ W/mm$^2$) und MAN B & W (4T50MX mit $p_{Zmax} = 180$ bar, $P_A = 9{,}45$ W/mm$^2$) |
| 1990/91 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Katalysator in Serie (VW/BMW) |
| 1992 | Erster Pkw-Dieselmotor mit direkter Einspritzung und variabler Turbinengeometrie in Serie (VW) |
| 1997 | Erster aufgeladener Pkw-Dieselmotor mit direkter Common-Rail-Hochdruckeinspritzung und variabler Turbinengeometrie (Fiat) |
| 1998 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Pumpe-Düse-Einspritzsystem (VW) |
| 1998 | Erster Pkw-Dieselmotor mit weniger als 3 l/100 km Verbrauch in Serie (VW) |
| 1998 | Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse |
| 2000 | Vierventiltechnik beim Pkw-Dieselmotor |
| 2000 | Partikelfilter (Peugeot) |
| 2002 | NFZ: Common Rail Einspritzung bis zu 1600 bar zur Verbrennungsverlaufsformung (MAN) |
| 2003 | NFZ mit gekühlter Abgasrückführung |
| 2003 | Beschichteter Partikelfilter (DC) |

**Tabelle 5.5** (Fortsetzung)

| Jahr | Meilenstein |
|---|---|
| 2004 | NFZ mit Partikelfilter mit DOC |
| 2004 | Erster Pkw-Dieselmotor mit Stufenaufladung (BMW, Opel) |
| 2005 | Einführung der SCR-Technologien bei NFZ |
| 2006 | $NO_x$-Sensor für NFZ OBD II |
| 2006 | Erste Stickoxidnachbehandlung beim PKW (bluetec in USA) |
| 2007 | NFZ: Zweistufige Aufladung mit Zwischenkühlung in Verbindung mit AGR (Navistar) |
| 2008 | Einspritzdruckerhöhung auf bis zu 2500 bar bei NFZ |
| 2008 | Kraftstoffgeschmierte Einspritzpumpe für NFZ (MAN) |
| 2008 | Erster Speicherkatalysator in Serie (VW in USA) |
| 2009 | Erste SCR-Anwendungen im Pkw (BMW, Daimler, VW) |
| 2009 | Vermehrter Einsatz von Maßnahmen zur $CO_2$-Minderung (Efficient Dynamics, Blue Motion) |
| 2010 | NFZ VTG in Verbindung mit Turbo-Compound (Detroit Diesel) |
| 2010 | Kombination von Niederdruck- und Hochdruck-EGR sowie zylinderindividueller Regelung |

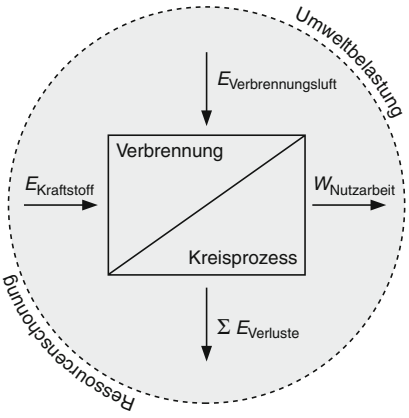



**Abb. 5.74** Zur Energieumsetzung des Verbrennungsmotors

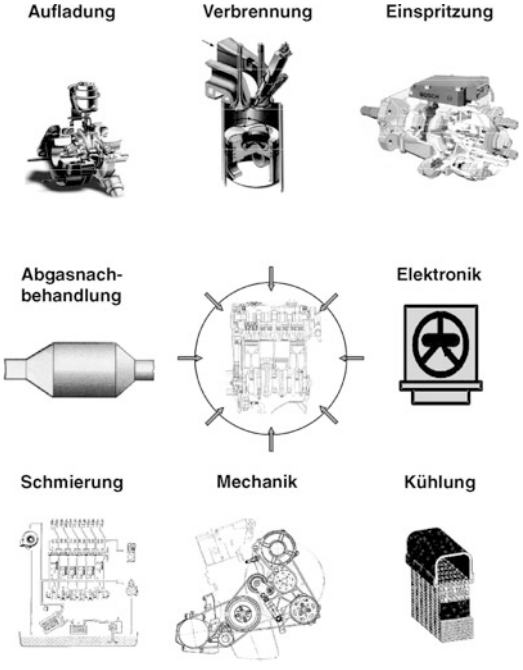



**Abb. 5.75** Zur Komplexität des modernen Dieselmotors

**Tabelle 5.6** Vergleich der Merkmale von Diesel- und Ottomotoren

| Merkmale | Dieselmotor | klassischer Ottomotor |
|---|---|---|
| Gemischbildung | innerhalb des Zylinders | außerhalb des Zylinders |
| Gemisch | heterogen | homogen |
| Zündung | Selbstzündung bei Luftüberschuss | Fremdzündung innerhalb der Zündgrenzen |
| Luftverhältnis | $\lambda_V \geq \lambda_{min} > 1$ | $0{,}6 < \lambda_V < 1{,}3$ |
| Verbrennung | Diffusionsflamme | Vormischflamme |
| Drehmoment-Änderung durch | Änderungen von $\lambda_V$ (Qualitätsänderung) | Gemischdrosselung (Quantitätsänderung) |
| Kraftstoff | zündwillig | zündunwillig |

Beim Dieselmotor wird kurz vor OT der Kraftstoff in die hoch verdichtete und erwärmte Luft eingespritzt (innere Gemischbildung). Der klassische Ottomotor hingegen arbeitet mit einer äußeren Gemischbildung: außerhalb des Arbeitsraumes wird der Kraftstoff mittels Vergaser oder Einspritzung in das Saugrohr über einen langen Zeitraum eingebracht.

Nach der Einspritzung liegt beim Dieselmotor ein heterogenes Gemisch aus Luft, Kraftstoffdampf und -tröpfchen vor. Demgegenüber wird der Zylinder des Ottomotors mit einem homogenen Gemisch aus Kraftstoff und Luft gefüllt.

Die Zündung wird beim Ottomotor durch eine elektrische Entladung an der Zündkerze ausgelöst, sofern das homogene Gemisch innerhalb der Zündgrenzen liegt (Vormischflamme). Beim Dieselmotor tritt eine Selbstzündung ein. Dabei muss nur in einem begrenzten Bereich ein zündfähiges Gemisch vorliegen (Diffusionsflamme).

Da der Ottomotor ein homogenes zündfähiges Gemisch voraussetzt, kann seine Leistung nur über die Ladungsmenge (Quantitätssteuerung) geregelt werden. Der Dieselmotor arbeitet aber mit Luftüberschuss. Somit wird der Lastpunkt über die Einspritzmenge, also das Luftverhältnis (Qualitätssteuerung) eingestellt. Ein verlustreiches Drosseln wie beim Ottomotor ist nicht erforderlich.

Aus diesen unterschiedlichen Abläufen leiten sich verschiedene Anforderungen an die Kraftstoffe ab: Dieselkraftstoff muss zündwillig sein (hohe Cetanzahl). Der Otto-Kraftstoff soll unkontrollierte Selbstzündungen vermeiden helfen, d. h. zündunwillig sein (hohe Oktanzahlen).

### 5.2.3.3 Die Thermodynamik des Dieselmotors

**Ideale Zustandsänderungen von Gasen** Es werden abgeschlossene Systeme betrachtet, d. h. es gibt keine Wechselwirkung mit irgendwelchen anderen Körpern. Thermodynamische Größen beschreiben makroskopische Zustände der Körper. Der Gleichgewichtszustand einer homogenen Gasmasse $m$ wird durch Angabe zweier thermodynamischer Größen (z. B. Druck, Volumen, Temperatur, innere Energie) bestimmt.

Die allgemeine Zustandsgleichung beschreibt ideale Gase:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

mit $p$ = absoluter Druck in Pa, $T$ = Temperatur in K, $V$ = Volumen in $m^3$ und $R$ = Gaskonstante in J/(kg · K).

Der Zustand eines Gases kann also in einem $p$-$V$-Diagramm dargestellt werden. Besondere Übergänge lassen sich durch Konstanthalten einer Zustandsgröße berechnen. Gleichungen existieren für Isobaren ($p$ = konst), Isothermen ($T$ = konst) und Isochoren ($V$ = konst).

Wenn ein Körper thermisch isoliert ist (also kein Wärmeaustausch zwischen Gas und Umge-

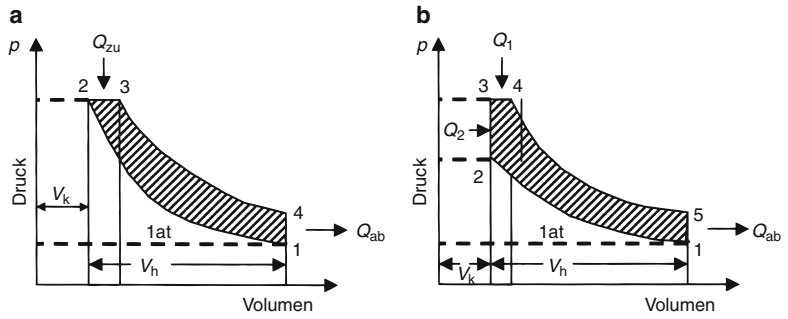



**Abb. 5.76** **a** Gleichdruck-Prozess; **b** kombinierter Gleichraum-Gleichdruck-Prozess

bung auftritt) und die äußeren Bedingungen, in denen er sich befindet, hinreichend langsam geändert werden, wird der Prozess adiabatisch genannt. Die Entropie bleibt ungeändert, d. h. der adiabatische Prozess ist reversibel. Es gilt die Poissonsche Gleichung

$$p \cdot V^{\kappa} = \text{konst.}$$

Der Isotropenexponent $\kappa$ ist das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck ($c_p$) zu der bei konstantem Volumen ($c_v$).

**Idealer Kreisprozess und Vergleichsprozess** Bei einem idealen Kreisprozess erfährt das Gas eine in sich geschlossene Zustandsänderung, so dass es nach Durchlaufen des quasistatischen Prozesses den Anfangszustand wieder erreicht. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Erhaltung der Energie: Die Änderung der inneren Energie $\Delta U$ ist gleich der Summe der von außen zugeführten Wärmemenge $\Delta Q$ und Arbeit $\Delta A$) folgt damit, dass die im Verlauf des Kreisprozesses umgesetzte Wärme als mechanische Arbeit anfällt,

$$0 = \Delta U = \Delta Q + \Delta A$$

d. h. die Druck-Volumenänderung entspricht der theoretisch nutzbaren Arbeit des idealen Prozesses:

$$-\mathrm{d}A = p_a \cdot \mathrm{d}V$$

Die Unterscheidung des äußeren Druckes $p_a$ vom inneren Druck $p_i$ des Systems kann bei idealen Gasen entfallen. Der Prozess läuft dann quasistatisch ab. Dabei muss aber auch die Temperatur des Wärmespeichers $T_a$ bis auf eine verschwindend kleine Differenz gleich der Systemtemperatur $T_i$ sein.

Rudolf Diesel dachte bei seiner Erfindung an einen Motor, der nach dem Gleichdruckprozess arbeitet (Abb. 5.76a). Der Zylinderinhalt wird zunächst adiabat entlang der Linie $1 \rightarrow 2$ verdichtet. Die nachfolgende Verbrennung erfolgt bei konstantem Druck und zunehmendem Volumen ($2 \rightarrow 3$). Anschließend expandiert die erhitzte Luft adiabat ($3 \rightarrow 4$). Die ungenutzte Wärme wird danach abgeführt.

Im $p$-$V$-Diagramm des Diesel-Prozesses ist die Verbrennungsphase ($2 \rightarrow 3$) eine Isobare, denn die Wärme $Q$ wird hier bei konstantem Druck zugeführt.

Werden diese Abläufe für eine Wärmekraftmaschine den Realitäten angepasst, wird aus dem idealen Kreisprozess ein kombinierter Gleichraum-Gleichdruck-Prozess oder Grenzdruck-Prozess (Seiliger-Prozess). Hier (Abb. 5.76b) erfolgt die Verdichtung entlang der Linie $1 \rightarrow 2$, die Wärmezufuhr teils bei konstantem Volumen ($2 \rightarrow 3$), teils bei konstantem Druck ($3 \rightarrow 4$). Die Expansion entlang der Linie $4 \rightarrow 5$ reicht nicht bis zum Umgebungsdruck. Dieser würde einen unrealistisch langen Kolbenhub voraussetzen. Der Seiliger-Prozess entspricht dem allgemeinsten Fall eines Vergleichsprozesses, da er dem realen Motorprozess angepasst werden kann. Er umfasst sowohl die Grenzfälle Gleichdruckprozess beim Diesel als auch den Gleichraumprozess für den idealen Ottomotor.

Die Annahmen dabei sind:

- die Ladung entspricht einem idealen Gas,
- die Verbrennung folgt einer Gesetzmäßigkeit,

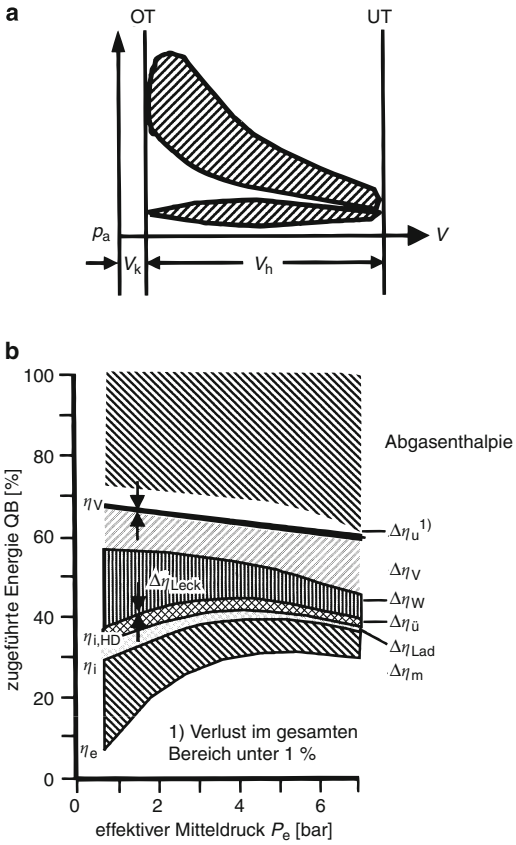



**Abb. 5.77** **a** Realer Viertaktprozess; **b** Verlustaufteilung

- adiabatische Prozessführung (wärmedichte Wandungen),
- keine Reibung im Zylinder,
- keine Strömungsverluste.

Beim realen Viertaktprozess (Abb. 5.77a) entstehen zwei Schleifen, von denen die Hochdruckschleife normalerweise positiv und die Ladungswechselschleife meist negativ ist. Bei aufgeladenen Motoren kann die Ladungswechselschleife aber auch positiv werden.

Der Wirkungsgrad des vollkommenen Motors $\eta_v$ und der effektive Wirkungsgrad des wirklichen Motors $\eta_e$ unterscheiden sich durch die Summe der Einzelverluste des Letzteren. Die Erfassung dieser Einzelverluste ist Zweck der Verlustteilung. Sie werden im Einzelnen verursacht durch:

- unvollkommene Kraftstoffumsetzung (Umsetzungsverlust),
- nicht idealen Brennverlauf,
- Wärmeabfuhr an Brennraumwände,
- Leckage undichter Kolbenringe,
- Überströmen zwischen Haupt- und Nebenbrennraum bei Kammermotoren,
- Ladungswechsel,
- mechanische Reibung.

In Abb. 5.77b sind die Verluste für einen 1,5 l Dieselmotor mit Wirbelkammer bei 3000 $\text{min}^{-1}$ in Abhängigkeit von der Last ($p_e$) dargestellt. Es bedeuten $\eta_e$ den effektiven Wirkungsgrad, $\eta_i$ den Innenwirkungsgrad für den ganzen Prozess, $\eta_{i\,HD}$ den Innenwirkungsgrad ohne Ladungswechselverluste, $\eta_v$ den Wirkungsgrad des idealen Vergleichsprozesses, $\Delta\eta_m$ den Wirkungsgradverlust durch mechanische Reibung, $\Delta\eta_{Lad}$ den Wirkungsgradverlust durch den Ladungswechsel, $\Delta\eta_ü$ den Wirkungsgradverlust durch das Überströmen bei Kammermotoren, $\Delta\eta_{Leck}$ den Verlust durch Leckage, $\Delta\eta_w$ den Wirkungsgradverlust durch den Wärmeübergang, $\Delta\eta_v$ den Verbrennungsverlust und $\Delta\eta_u$ den Umsetzungsverlust. Alle genannten Wirkungsgrade bzw. Wirkungsgradverluste sind auf die zugeführte Kraftstoffenergie $Q_B$ bezogen. Es gilt damit:

$$\eta_e = \eta_v - \Delta\eta_u - \Delta\eta_v - \Delta\eta_w - \Delta\eta_{Leck} - \Delta\eta_ü - \Delta\eta_{Lad} - \Delta\eta_m$$

Die einzelnen Verluste weisen eine unterschiedliche Lastabhängigkeit auf, wobei die Wirkungsgradeinbußen durch Verbrennung, Wärmeübergang und Reibung weit größer sind als jene durch Ladungswechsel, Überströmvorgänge, Leckage und unvollkommene Kraftstoffumsetzung.

**Grenzen der Modellrechnung** Bei Betrachtung von idealen Prozessen werden Annahmen getroffen, die aus Sicht der Physik auf reale Vorgänge nicht zu übertragen sind. Tab. 5.7 zeigt, welche thermodynamischen Einzelmodelle formuliert werden müssen, um zumindest zu Relativaussagen (z. B. bei Parameterstudien) kommen zu können. Die Genauigkeitsansprüche sind hier weniger hoch als bei

**Tabelle 5.7** Vergleich der Teilmodelle im Ideal- und Realprozess

| Teilmodell | Idealprozess | Realprozess |
|---|---|---|
| Stoffwerte | ideales Gas | reales Gas; Zusammensetzung ändert sich während des Prozesses |
| | $c_p, c_V, \kappa$ = konstant | Stoffwerte abhängig von Druck, Temperatur und Zusammensetzung |
| Ladungswechsel | Ladungswechsel als Wärmeabfuhr | Massenaustausch durch die Ventile; Restgas bleibt im Zylinder |
| Verbrennung | vollständige Verbrennung nach idealisierter Gesetzmäßigkeit | unterschiedliche Brennverläufe sind möglich je nach Gemischbildung und Verbrennungsverfahren; Kraftstoff verbrennt teilweise nur unvollständig |
| Wandwärmeverluste | keine Wandwärmeverluste | Wandwärmeverluste vorhanden, werden berücksichtigt |
| Undichtigkeiten | keine Undichtigkeiten | vorhanden, werden teilweise berücksichtigt |

Auslegungsrechnungen für eine Aufladung oder ein Kühlsystem.

## 5.2.4 Die dieselmotorische Verbrennung

### 5.2.4.1 Allgemeines

In Verbrennungskraftmaschinen wird die im zugeführten Kraftstoff gebundene Energie durch Oxidation mit dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Sauerstoff freigesetzt. Die reale Verbrennung erfolgt allerdings unvollständig und verlustbehaftet. So entstehen außer Kohlendioxid ($CO_2$) und Wasserdampf ($H_2O$) auch Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide ($NO_x$) und Rußpartikel (PM).

Der Ablauf der dieselmotorischen Verbrennung wird üblicherweise unterteilt in Kraftstoffeinspritzung, Gemischbildung, Selbstzündung und Verbrennung mit Abgasbildung.

### 5.2.4.2 Einspritzung und Gemischbildung

**Luftbewegung** Für die Gemischbildung spielen die Strömungsvorgänge eine entscheidende Rolle. Sie beeinflussen den Zündverzug, die Menge des auf die Brennraumwand treffenden Kraftstoffes und den Verbrennungsablauf, in dem sie zur Luftausnutzung sowie zum Durchbrennen der Ladung beitragen. Verteilung und Bewegung von Luft und Kraftstoff müssen im Brennraum im gesamten Betriebsbereich des Motors aufeinander abgestimmt sein. Besonders wichtig ist dies bei direkteinspritzenden Dieselmotoren. Hier fehlt der Austrittsimpuls, der bei Vorkammer- und Wirbelkammermotoren eine intensive Vermischung der aus der Nebenkammer austretenden Brenngase und unverbrannten Ladung fördert.

Erzeugt wird der Luftdrall im Zylinder eines direkteinspritzenden Dieselmotors durch die Geometrie des Einlasskanals und der Einlassventilsitze. Gebräuchlich sind vornehmlich Spiral- und Tangentialkanal, auch Füll- und Drallkanal genannt (Abb. 5.78). Der dem Motor zugeführte Luftstrom wird in eine Rotation um die Zylinderachse versetzt. Der Luftdrall steigt mit zunehmender Motordrehzahl an – bei schnelllaufenden Dieselmotoren für eine effektive Gemischbildung zu schnell. Akzeptable Kompromisse sind möglich.

Bei Annährung des Kolbens an den Zylinderkopf wird die rotierende Luftbewegung von einer Quetschströmung überlagert. Dabei strömt die Luft aus dem Spalt zwischen Zylinderkopf und Kolben in die Kolbenmulde. Mit Beginn des Expansionstaktes kehrt sich die Strömungsrichtung um. Diese turbulente Luftbewegung unterstützt die Gemischbildung kurz vor und nach der Zündung. Mithilfe moderner Laser-Doppler-Techniken lassen sich heute die Strömungsverhältnisse auch lokal vermessen [81, 82].

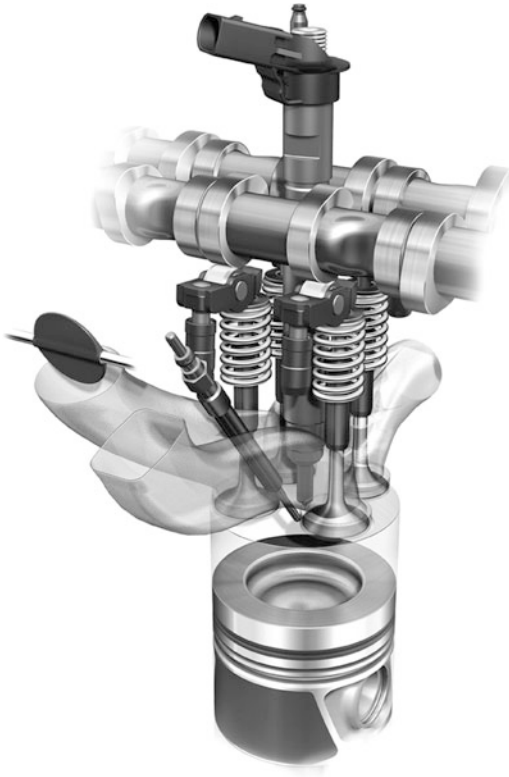


**Abb. 5.78** 4V-Dieseldirekteinspritzer mit Drallkanal und senkrecht stehendem Injektor

**Einspritzung und Strahlausbreitung** Die Einspritzung des Kraftstoffes erfolgt gegen Ende des Kompressionstaktes. Die Luft ist hochverdichtet und entsprechend erhitzt (30 … 60 bar, 300 … 400 °C). Der zeitliche Verlauf des Einspritzvorganges hängt dabei ganz entscheidend von der konstruktiven Ausführung der Einspritzanlage ab. Wesentliche Faktoren sind die Abmessungen des Pumpenelementes, die konstruktive Ausführung der Einspritzdüse sowie die geometrischen Verhältnisse von Einspritzleitung und Entlastungsventil. Durch Veränderung eines oder mehrerer der genannten Parameter kann der Einspritzverlauf und damit auch der Verbrennungsablauf gezielt beeinflusst werden.

Die Luft bietet bereits zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns Zündbedingungen. Der Dieselkraftstoff tritt aus der Einspritzdüse im Wesentlichen als kompakter Flüssigkeitsstrahl aus. Der Anteil dampfförmigen Kraftstoffs ist in dieser Phase relativ gering.

Die Kavitation an der Düsenspitze, innere Kräfte im Strahlkern sowie eine äußere Wellenbildung des Strahlmantels infolge Luftreibung führen zur Tröpfchenbildung. Die einzelnen Kraftstofftröpfchen verformen und teilen sich auf ihrem Weg durch den Brennraum mehrmals (Wechselwirkung mit der Luft). Es können aber auch Wechselwirkungen der Tröpfchen untereinander auftreten: Zusammenstöße, die zur Teilung, aber auch Vereinigung führen. Des Weiteren kann Kraftstoff auf die Brennraumwand treffen. Damit nun in dem heterogenen Gemisch aus Luft und Kraftstofftröpfchen unterschiedlicher Größe und Verteilung örtlich Zündbedingungen entstehen, muss der Kraftstoff durch die verdichtete Luft zunächst erhitzt werden.

Infolge Wärmetransport von der erhitzten Luft zum flüssigen Kraftstoff bildet sich um das einzelne Tröpfchen eine Kraftstoffdampfschicht, die sich mit der umgebenden Luft vermischt. Das Gemisch ist zündfähig, sobald das Luftverhältnis über etwa 0,7 ansteigt. Dieses erklärt den physikalischen Zündverzug.

### 5.2.4.3 Selbstzündung und Zündverzug

Eines der wichtigsten Merkmale für den dieselmotorischen Verbrennungsvorgang ist die Zeitspanne von Einspritzbeginn bis zum Zündbeginn: der Zündverzug (Abb. 5.79). Dabei ist zwischen dem physikalischen und dem chemischen Anteil zu unterscheiden. Letzterer ist derjenige Zeitraum, in dem die Vorreaktionen stattfinden. Der Zündverzug beträgt etwa 1 bis 2 ms. In dieser Zeitspanne werden die ersten Weichen bezüglich Kraftstoffverbrauch und Emissionen gestellt.

Man unterscheidet zwischen kraftstoff- und luftseitigen Maßnahmen zur Beeinflussung des Zündverzuges. Die wichtigsten kraftstoffseitigen Maßnahmen sind: Kraftstoffqualität, Einspritzdruck, Kraftstofftemperatur, Geometrie der Einspritzdüse und Einspritzzeitpunkt. Luftseitig sind von Bedeutung: Druck und Temperatur der Luft im Brennraum, die Ladungsbewegung (Strömungsfeld) sowie die Minderung von Luft, Kraftstoff und Restgas. Konstruktiv können die Faktoren beeinflusst werden durch:

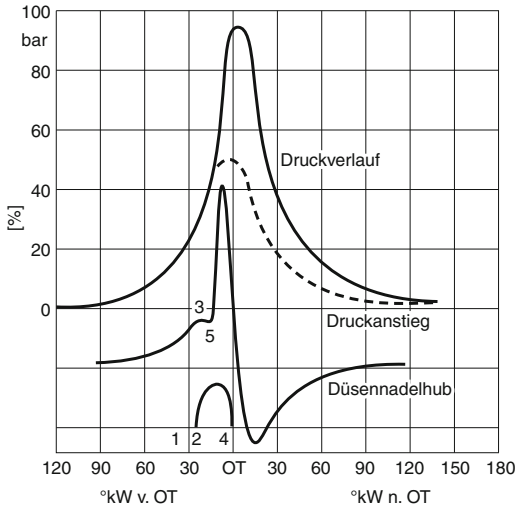



**Abb. 5.79** Dieselmotorischer Zündverzug bei direkter Einspritzung (1. Förderbeginn, 2. Einspritzbeginn, 3. Zündbeginn, 4. Einspritzende, 5. Zündverzug)

- die Einlasskanalgestaltung,
- die Ventilsteuerzeiten,
- die Brennraumgestaltung,
- das Verdichtungsverhältnis,
- die Kühlmitteltemperatur,
- die Aufladung und
- die Kaltstartmaßnahmen.

So wird sich ein kürzerer Zündverzug einstellen bei Zunahme

- der Cetanzahl der Kraftstoffe,
- der Kraftstofftemperatur,
- des Einspritzdruckes,
- des Brennraumdruckes und
- der Brennraumtemperatur.

Außerdem wird der Zündverzug verkürzt durch

- Verlegen des Einspritzzeitpunktes nach spät (im Bereich vor OT),
- gleichmäßige und feine Verteilung des Kraftstoffes,
- hohe Relativbewegung zwischen Kraftstoff und Luft.

Ein kurzer Zündverzug infolge der geringeren, in dieser Zeit eingespritzten Kraftstoffmenge hat zur Folge (Abb. 5.80):

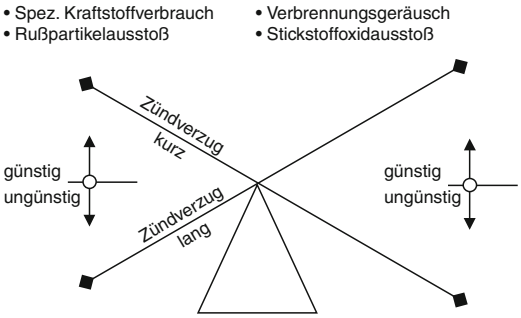



**Abb. 5.80** Zielkonflikt Zündverzug bei dieselmotorischen Verbrennungsverfahren

- geringer Druckanstieg → niedriges Verbrennungsgeräusch,
- geringer Spitzendruck → niedriges Verbrennungsgeräusch und reduzierte Triebwerkbelastung,
- geringe Spitzentemperatur → wenig Stickoxide.

Bei längerem Zündverzug kommt es so zu hohem Verbrennungsgeräusch und Stickstoffoxidgehalt.

Einige der Einflussgrößen hängen auch vom Betriebspunkt ab. Eine zentrale Aufgabe bei der Optimierung des Verbrennungsverfahrens besteht in der Suche nach einem akzeptablen Kompromiss im gesamten Betriebsbereich.

### 5.2.4.4 Verbrennung und Brennverlauf

Die dieselmotorische Verbrennung ist diffusionskontrolliert. Die Einspritzung erstreckt sich oftmals über die Zündung hinaus, siehe Abb. 5.81. So bleiben die gebildeten Inhomogenitäten auch weiterhin bestehen. Außer den Ladungs- gibt es auch Temperaturinhomogenitäten. Um immer ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung zu haben, muss der Dieselprozess bei Luftüberschuss betrieben werden.

Der zeitliche Verlauf der Energieumsetzung (Brennverlauf) kann in drei Phasen unterteilt werden (Abb. 5.82):

1. Das bereits zündfähige Gemisch wird thermisch entflammt. Am Ende dieser Phase ist der Hauptteil des während des Zündverzuges eingespritzten Kraftstoffes verbrannt. Bestimmend ist die chemische Energie des Kraftstoffes.

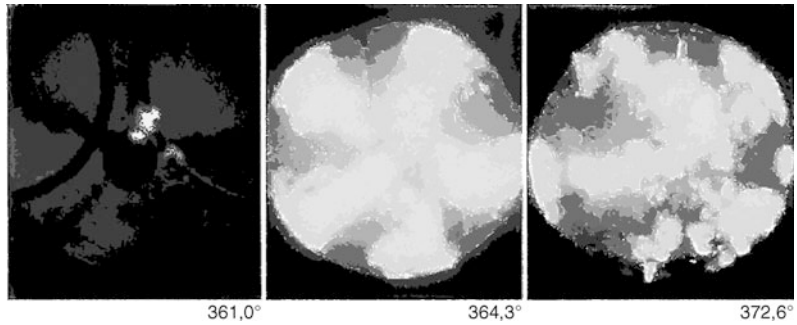



**Abb. 5.81** Selbstzündung und Verbrennung im 1,9 l VW TDI-Motor

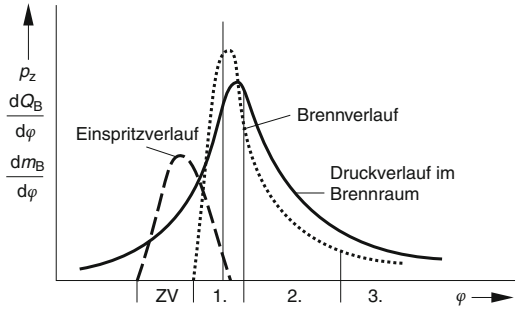



**Abb. 5.82** Zündverzug bei Dieselmotoren mit direkter Einspritzung

2. Der eingespritzte Kraftstoff wird aufbereitet und verbrannt. Der Brennverlauf wird durch die Geschwindigkeit der Gemischbildung bestimmt. Dabei ist neben dem Geschwindigkeitsfeld auch das Temperaturfeld wichtig.
3. Die letzte Phase des Brennverlaufs ist durch die vergleichsweise langsame Umsetzung des zuletzt aufbereiteten Kraftstoffs gekennzeichnet. Es nehmen Luftbewegung, Temperatur und Luftüberschuss ab.

Die erste Phase des Brennverlaufs ist von entscheidender Bedeutung für das Geräusch und die $NO_x$-Emissionen der dieselmotorischen Verbrennung. Einen großen Spielraum zur Gestaltung der Gemischbildung und Verbrennung bieten mehrstufige Einspritzsysteme, mit denen u. a. eine abgesetzte Voreinspritzung möglich ist.

Die dritte Phase beeinflusst den Kraftstoffverbrauch und die Emissionsbildung, insbesondere der Partikel. Es ist somit notwendig, auch in dieser Phase eine ausreichende Verbrennungsenergie zur Verfügung zu haben. Damit sollte ein frühes, möglichst schnelles Brennende realisiert werden.

Die beschriebenen Vorgänge der dieselmotorischen Verbrennung sind in schematischer Form in Abb. 5.83 zusammengefasst.

### 5.2.4.5 Abgasemissionen

Die vollständige Verbrennung des schwefelhaltigen Dieselkraftstoffes führt zu den Endprodukten Kohlendioxid ($CO_2$), Wasser ($H_2O$) und Schwefeldioxid ($SO_2$). Durch den zeitlich kurzen Verbrennungsablauf kommt es lokal zu unvollständiger Verbrennung aufgrund der verschiedenen Gemischbildungen, Temperaturverteilungen und Luftverhältnisse.

In Abb. 5.84a ist der Bereich der Rußbildung im $T$-$\lambda$-Diagramm den Zuständen von Gemisch und Verbranntem nahe dem OT gegenübergestellt. Verbranntes mit Luftverhältnissen unter $\lambda = 0{,}5$ muss Ruß enthalten. Zusätzlich sind die innerhalb 0,5 ms gebildeten NO-Anteile dargestellt. Die typische Schere zwischen Ruß- und $NO_x$-Emission wird erkennbar. Wenn bei der Verbrennung die Bildung von $NO_x$ und Ruß vermieden werden soll, müsste das Gemisch im Bereich von $\lambda = 0{,}6$ bis 0,9 liegen.

In der ersten Verbrennungsphase (vorgemischte Verbrennung) ist aufgrund der Inhomogenität der Gemischbildung mit der Bildung von primärem Ruß und Stickoxiden zu rechnen [83]. Im Interesse einer schadstoffarmen Verbrennung sollte in der ersten Phase nur wenig Gemisch und dieses möglichst mit $\lambda = 0{,}6 \ldots 0{,}9$ verbrannt werden. Der Bereich der Rußbildung kann zu größeren $\lambda$ hin

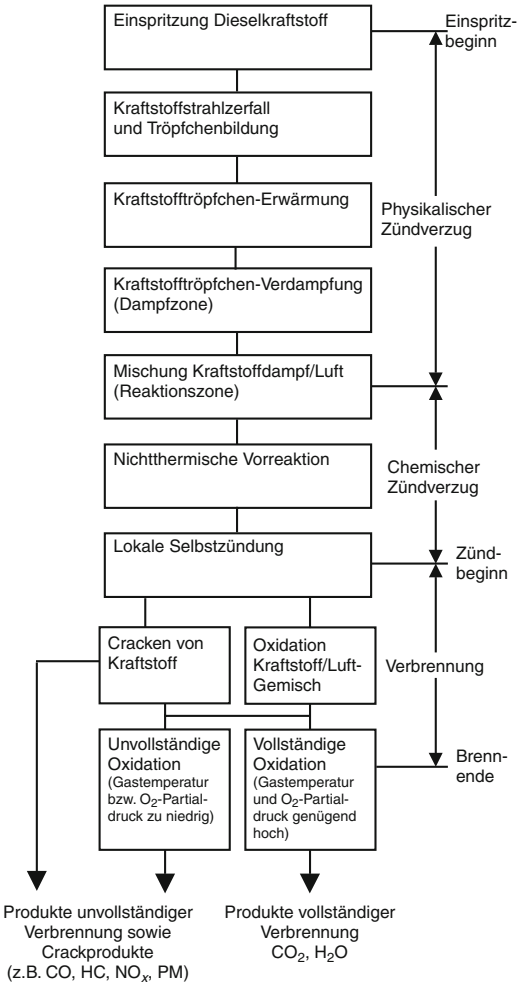



**Abb. 5.83** Sequentielle Darstellung der dieselmotorischen Gemischbildung und Verbrennung [83]

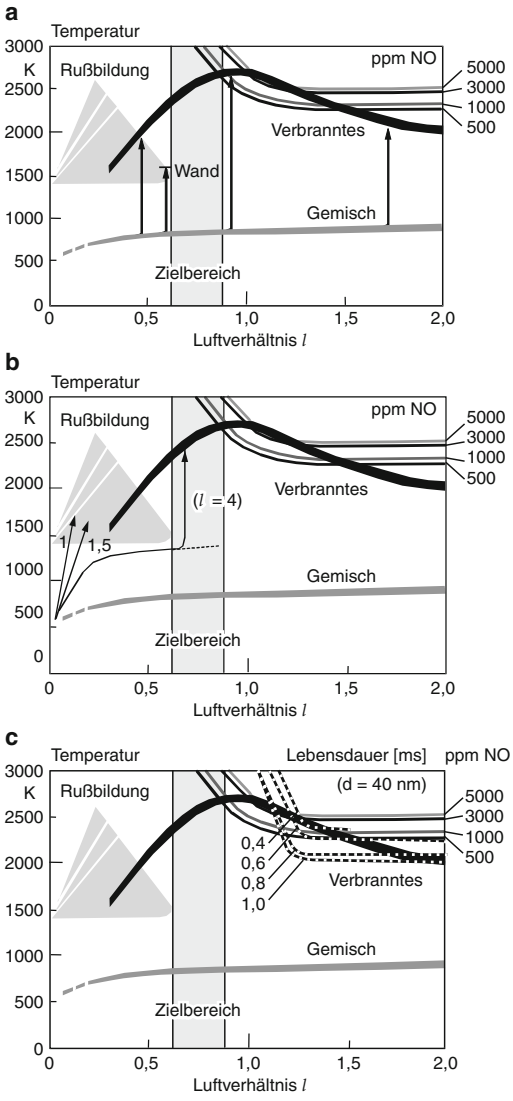



**Abb. 5.84** **a** Erste Phase der Dieselverbrennung (Vormischverbrennung); **b** Zweite Phase der Dieselverbrennung; **c** Dritte Phase der Dieselverbrennung

verschoben werden, wenn z. B. durch Abkühlung an der Zylinderwand die Temperatur so weit erniedrigt wird, dass das Rußbildungsgebiet erreicht wird.

Während der zweiten Verbrennungsphase wird der eingespritzte Kraftstoff mit Luft und Verbrennungsgas vermischt (Abb. 5.84b). Dabei ergeben sich unterschiedlichste Zusammensetzungen ($\lambda$). Mischungen mit Verbrennungsgasen und niedrigem $\lambda$ können zur Bildung von sekundärem Ruß führen. Eine Vermischung des Kraftstoffs mit heißen, sauerstoffarmen Abgasen sollte vermieden werden. Reichlich frische Luft muss zugeführt werden.

In der dritten Phase (Abb. 5.84c) nach Ende der Einspritzung magern die Brenngase ab. Der Bereich, in dem die Rußteilchen mit Sauerstoff verbrennen, überdeckt sich teilweise mit dem Bereich der intensiven $NO_x$-Bildung. Es empfiehlt sich des-

halb, die Bildung von primärem und sekundärem Ruß gering zu halten und nicht auf die Oxidation gegen Ende der Verbrennung zu setzen.

**Entstehung von Stickoxiden** Stickstoff ist der vorherrschende Bestandteil der Luft. Die Bildung von Stickoxid läuft während der Verbrennung bei hohen Temperaturen ab (endotherme Reaktion) und kann vereinfacht durch den Zeldovich-Mechanismus dargestellt werden:

$$\begin{aligned} N_2 + O &\rightleftarrows NO + N \\ O_2 + N &\rightleftarrows NO + O \\ OH + N &\rightleftarrows NO + H \end{aligned}$$

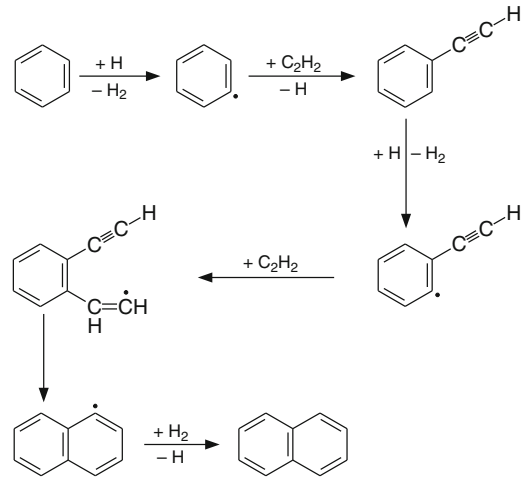
Die Reaktionen laufen verhältnismäßig langsam ab. Die Temperatur-, Druck- und Konzentrationsfelder ändern sich aber während der Verbrennung schnell und stark. Dies führt zu Stickoxidkonzentrationen, die unterhalb der Werte liegen, die sich im thermischen Gleichgewicht einstellen würden.

Stickoxidemissionen lassen sich bei der Dieselverbrennung minimieren, wenn die Verbrennungstemperatur begrenzt (spätes Einspritzen, Ladeluftkühlung) und die Sauerstoffkonzentration gesenkt (Abgasrückführung) wird.

**Rußbildung und Partikelemission** Ruß entsteht aus molekularen Prozessen während der Verbrennung.

Die Brennstoffmoleküle werden zunächst oxidativ abgebaut. Dabei entsteht Ethin (Azetylen), das den Ausgangspunkt für die Bildung höherer Kohlenwasserstoffe und Aromaten bildet. Letztere wachsen planar durch einen H-Abstraktions-Ethin-Additionsmechanismus (◘ Abb. 5.85). Das räumliche Wachstum erfolgt durch die Zusammenlagerung größerer polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe.

Das Volumen der entstehenden Aggregate nimmt durch weitere Koagulation und durch Oberflächenwachstum zu. Für Letzteres wird oft ein Mechanismus analog zum planaren Wachstum angeführt. Im Weiteren wird die Entwicklung der Teilchengrößen im Wesentlichen durch Koagulation der Rußteilchen bestimmt. Die Oxidation ist der maßgebliche Prozess für die letzte Phase der dieselmotorischen Verbrennung, in der die gebildeten Rußteilchen durch die Vermischung




◘ **Abb. 5.85** H-Abstraktion-Ethin-Addition-Mechanismus für das planare Wachstum von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen

der Verbrennungsprodukte mit Verbrennungsluft in sauerstoffreiche Umgebung gelangen. Zusammengefasst müssen bei der Rußbildung folgende Vorgänge betrachtet werden:

$$\begin{aligned} (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{text}} = {} & (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{Wachstum}} \\ & + (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{Koagulation}} \\ & + (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{Kondensation}} \\ & + (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{Oberflächenwachstum}} \\ & + (\mathrm{d}N/\mathrm{d}t)_{\text{Oxidation}} \\ N = {} & \text{Anzahl der Teilchen} \end{aligned}$$

Die analytische Beschreibung gelingt heute noch nicht vollständig, da einige der Prozesse grundsätzlich verstanden, andere nur phänomenologisch erfasst sind [84]. Hauptschwierigkeiten sind dabei: die hohe Anzahl der chemischen Reaktionen sowie die Abhängigkeiten von dem hohen Druck, der hohen Temperatur sowie dem Strömungs- und Mischungsfeld. Die zugehörigen Zeiten sind in ◘ Tab. 5.8 aufgeführt. Während des dieselmotorischen Zyklus steht nicht genügend Zeit zur Verfügung, um alle größeren Partikel zu bilden. Die größeren Partikel entstehen auch noch nach Verlassen des Brennraumes.

Wie beschrieben entstehen Rußteilchen aus molekularen Prozessen (bis ca. 10 nm), die sich

**Tabelle 5.8** Typische Zeiten der Rußbildung

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dieselverbrennung | | | |
| Nukleation | | 0,001 | ms |
| Koagulation | | 0,05 | ms |
| Kettenbildung | | einige | ms |
| Kondensation | | einige | ms |
| Oxidation | | 4 | ms |
| Turbulenzlänge | | 1 | ms |
| laminare Flamme | | | |
| vorgemischt | Nukleation | 2–3 | ms |
| | gesamter Bildungsprozess | 10–30 | ms |
| Diffusion | Oxidation > 10 ms > Bildung | | |

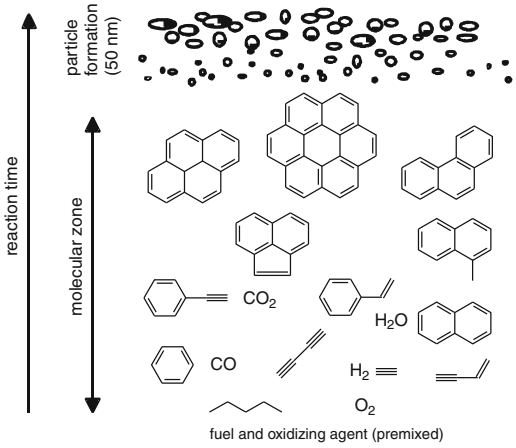



**Abb. 5.86** Reaktionsschema der Rußbildung

zu Primärpartikeln (10–50 nm) vereinigen (Abb. 5.86).

Dieselpartikel im Sinne der Abgasgesetzgebung sind Abgasbestandteile, die auf einem Filter gesammelt werden. Am Rußkern werden organisch lösliche unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Sulfate, Metalloxide und andere Rückstände adsorbiert. Der Rußkern samt der Anlagerungen wird als Partikel bezeichnet. Die Partikel aus der dieselmotorischen Verbrennung stellen nur einen Teil der gesamten Partikelimmission dar (Abb. 5.87). Der gesamte Straßenverkehr ist in Deutschland mit ca. 20 % an den Feinstaubemissionen beteiligt (UBA/TU Wien).

Partikelemissionen von Dieselmotoren können gemindert werden durch:

- Verbesserung der innermotorischen Verbrennung,
- Verbesserung der Kraftstoffqualität,
- Abgasnachbehandlung (z. B. Filterung).

**Nicht limitierte Emissionen** Gesetzlich sind die Abgasemissionen der Kohlenwasserstoffe (HC), des Kohlenmonoxids (CO), der Stickoxide ($NO_x$) und der Partikel limitiert. Es handelt sich dabei – mit Ausnahme des CO – um summarische Messgrößen (siehe ▶ Abschn. 2.2).

Die differenzierte Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe wurde zum ersten Mal für Modelljahr 1994 in den USA mit einem Pkw-Grenzwert für Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) berücksichtigt. Es wurde dabei der Sonderstellung von Methan, das luftchemisch wenig reaktiv und nicht toxisch ist, Rechnung getragen. Neben der methanfreien Kohlenwasserstoffmessung wurde für die sogenannten *Clean Fuel Vehicles* ein Formaldehyd-Grenzwert eingeführt.

Die kalifornische PKW-Gesetzgebung, die insbesondere auf die Verringerung der Ozon-Vorläufersubstanzen hinzielt, geht noch einen Schritt weiter und bewertet die Summe der NMHC nach ihrer Reaktivität. Als Kriterium für die Bewertung wird das so genannte maximale Ozonbildungspotenzial der differenzierten Kohlenwasserstoffe herangezogen. Der bewertete summarische NMHC-Wert wird als Emission methanfreier organischer Gase (NMOG – non-methane organic gases) für die Zertifizierung herangezogen.

Für alle anderen im Abgas von Verbrennungskraftmaschinen vorkommenden Substanzen sind nach wie vor weder konkrete Emissionsgrenzwerte noch die anzuwendenden Verfahren zur Ermittlung der Emissionsdaten festgelegt. Alle diese Abgasbestandteile können mit dem allgemeinem Begriff *nicht limitierte Abgaskomponenten* umschrieben werden. Unter diese Definition fallen auch diejenigen Komponenten, die z. B. durch die gesetzlich vorgeschriebene Kraftstoffzusammensetzung indirekt in ihrer Emissionshöhe begrenzt sind.

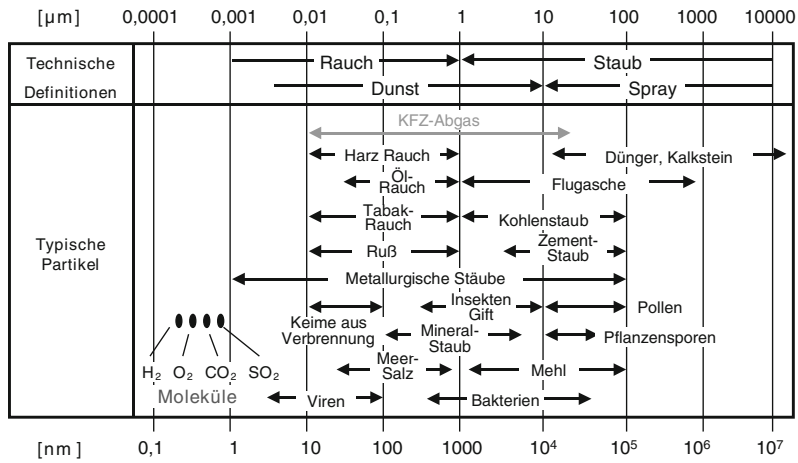



**Abb. 5.87** Quellen und Größenordnungen der Partikel in der Atmosphäre [89]. Feinstaub bedeutet Partikel < 10 µm

## 5.2.5 Die dieselmotorischen Verbrennungsverfahren

Die Anforderungen an moderne Dieselmotoren hinsichtlich Leistung, Kraftstoffverbrauch, Abgas- und Geräuschemissionen werden immer höher. Beim Pkw steht wegen der hohen Motordrehzahl nur ein sehr kurzer Zeitraum für den Verbrennungsablauf zur Verfügung. Die Voraussetzung, um diese Anforderungen zu erfüllen, ist eine gute Gemischaufbereitung. Dazu benötigen die Motoren leistungsfähige Einspritzsysteme, die hohe Einspritzdrücke für eine sehr feine Kraftstoffzerstäubung erzeugen und den Einspritzbeginn und die Einspritzmenge präzise steuern, sowie eine geeignete Brennraumgestaltung. Zwar finden die klassischen Systeme der dieselmotorischen Verbrennung nach dem Prinzip der indirekten (Abb. 5.88a,b) und der direkten (Abb. 5.88c,d) Einspritzung Verwendung, doch weisen Pkw-Motoren eigenständige Merkmale auf.

### 5.2.5.1 Ausführungsformen

**Dieselmotor mit unterteiltem Brennraum** Beim *Vorkammer-Dieselmotor* (Abb. 5.88a) wird der Kraftstoff in eine mit dem Arbeitszylinder über eine oder mehrere verhältnismäßig enge Öffnungen in Verbindung stehende Kammer (Vorkammer) eingespritzt. Eine gerichtete Luftbewegung in der Vorkammer ist nicht erforderlich. Der *Wirbelkammer-Dieselmotor* (Abb. 5.88b) ist ein Motor mit unterteiltem Verbrennungsraum, bei dem der Kraftstoff in eine mit dem Arbeitszylinder durch eine verhältnismäßig weite Öffnung in Verbindung stehende Kammer eingespritzt wird. Beim Verdichtungstakt wird eine gerichtete Luftbewegung in der Vorkammer erzeugt.

**Dieselmotor mit direkter Einspritzung** Ein Dieselmotor, bei dem der flüssige Kraftstoff direkt in den Hauptbrennraum (eine Vorkammer gibt es nicht) eingespritzt wird, wird als *Dieseldirekteinspritzer* bezeichnet (Abb. 5.88c).

Eine besondere Ausbildung des Verbrennungsraumes findet man beim *MAN-M-Verfahren* (Abb. 5.88d). Der in den kugelförmigen Brennraum eingespritzte Kraftstoff wird nur zu ca. 5 % fein zerstäubt und 95 % treffen als Strahl auf die Brennraumwand.

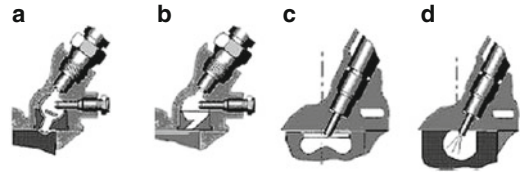



**Abb. 5.88** Diesel-Verbrennungsverfahren: **a** Vorkammer; **b** Wirbelkammer; **c** Direkteinspritzer; **d** MAN-M-Verfahren

### 5.2.5.2 Vorkammerverfahren

Der Umweg über die Lufteinblasung des Kraftstoffs verhalf dem Dieselmotor zu Beginn seiner Entwicklung zu wachsender Popularität. Gleichzeitig traten aber auch die Nachteile dieses umständlichen, wenig ökonomischen Verfahrens immer mehr in den Vordergrund. Statt den Kraftstoff mittels eingeblasener Luft zu vermischen, wurde dann versucht, die Verbrennungsluft auf andere Weise zu verwirbeln, sodass ein zündfähiges Gemisch entstand.

Beim Vorkammerverfahren (◘ Abb. 5.88a) wird der Kraftstoff mit einer Schrägflächenzapfendüse unter relativ niedrigem Druck in eine konzentrisch zur Zylinderachse angeordnete, rotationssymmetrische Vorkammer eingespritzt, in der eine Vorverbrennung beginnt. Die Vorkammer hat einen Volumenanteil von ca. 40 % des Kompressionsvolumens. Durch die Vorverbrennung wird der Druck in der Vorkammer so stark gesteigert, dass die nur teilweise verbrannte Ladung mit hoher Geschwindigkeit durch den Schusskanal in den Hauptbrennraum strömt.

Ein in der Kammermitte angeordneter Prallkörper zerteilt den hier auftreffenden Strahl und vermischt ihn intensiv mit Luft. Er dient außerdem dazu, der Luft, die beim Verdichten aus dem Zylinder in die Vorkammer strömt, einen mäßigen Drall zu geben.

Durch den relativ sanften Druckanstieg ist das Vorkammerverfahren prinzipiell interessant für den Pkw.

### 5.2.5.3 Wirbelkammerverfahren

Das Wirbelkammerverfahren (◘ Abb. 5.88b) ist wie das Vorkammerverfahren ein Dieselverfahren mit unterteiltem Brennraum. Noch vor wenigen Jahren wurde es bei Pkw-Dieselmotoren am häufigsten angewandt. Seine Vorzüge lagen in den erzielbaren hohen Betriebsdrehzahlen bis 5000 $min^{-1}$, im relativ günstigen Emissionsverhalten und in dem für die Geräuschemissionen bedeutsamen geringen Drucksteigerungsverhältnis.

Die Kraftstoffeinspritzung erfolgt mit einer Drosselzapfendüse bei relativ niedrigem Druck in die kugelförmig ausgeführte Kammer. Die Lage der Düse wird so gewählt, dass der Kraftstoffstrahl den während des Verdichtungshubs gebildeten Wirbel senkrecht zu seiner Achse durchdringt und auf der gegenüberliegenden Kammerseite in einer heißen Wandzone auftrifft. Um eine vollständige Gemischaufbereitung in der Wirbelkammer bei allen Drehzahlen und Lastzuständen zu erreichen, müssen Gestaltung und Anordnung von Wirbelkammer und Düse wie auch die Lage der Glühkerze sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Nach heutigem Kenntnis- und Erfahrungsstand beträgt der optimale Kammeranteil ca. 50 % des Kompressionsvolumens, wobei Veränderungen im Wirbelkammervolumen gegenläufige Effekte bei $NO_x$-Emission und Geräusch einerseits sowie bei HC-, CO- und Partikelemission andererseits bewirken.

Der im Kolben angeordnete Hauptbrennraum ist flach oder brillenförmig. Die eng begrenzt auf den Kolbenboden auftreffenden Verbrennungsgase sorgen für eine hohe thermische Belastung des Kolbens.

Mit diesem Wirbelkammerverfahren wird ein effektiver Wirkungsgrad von ca. 36 % erreicht. Für den praktischen Fahrbetrieb sind die häufig vorkommenden Fahrzustände im Teillastbereich für den Kraftstoffverbrauch entscheidend. Innerhalb eines großen Lastbereiches ist der Kraftstoffverbrauch der Wirbelkammermotoren ungewohnt niedrig.

### 5.2.5.4 Direkte Einspritzung

Das Direkteinspritzverfahren (◘ Abb. 5.88c) wurde ursprünglich bei Stationär- und Nutzfahrzeugmotoren aller Größen angewandt. Seit 1988 hat es auch in der Pkw-Dieseltechnik Einzug gehalten (◘ Tab. 5.5). Heute hat der direkteinspritzende Dieselmotor die Konzepte mit geteiltem Brennraum verdrängt.

Die DI-Motoren tragen den Forderungen nach Pkw mit geringem Kraftstoffverbrauch Rechnung. Direkteinspritzer sind aufgrund ihrer geringen Wärmeverluste die wirtschaftlichsten Dieselmotoren. Sie übertreffen auch jede andere Verbrennungskraftmaschine.

Um den günstigsten thermodynamischen Wirkungsgrad zu erzielen, sind hohe Anforderungen an die Kraftstoff- und Luftzuführung bei diesem Verbrennungsverfahren gestellt. Sie müssen so erfüllt werden, dass die in einer kurzen zeitlichen Folge ablaufenden Einzelvorgänge wie Kraftstoffzerstäubung, -erwärmung, -verdampfung und -vermischung mit der Luft rechtzeitig zum Abschluss

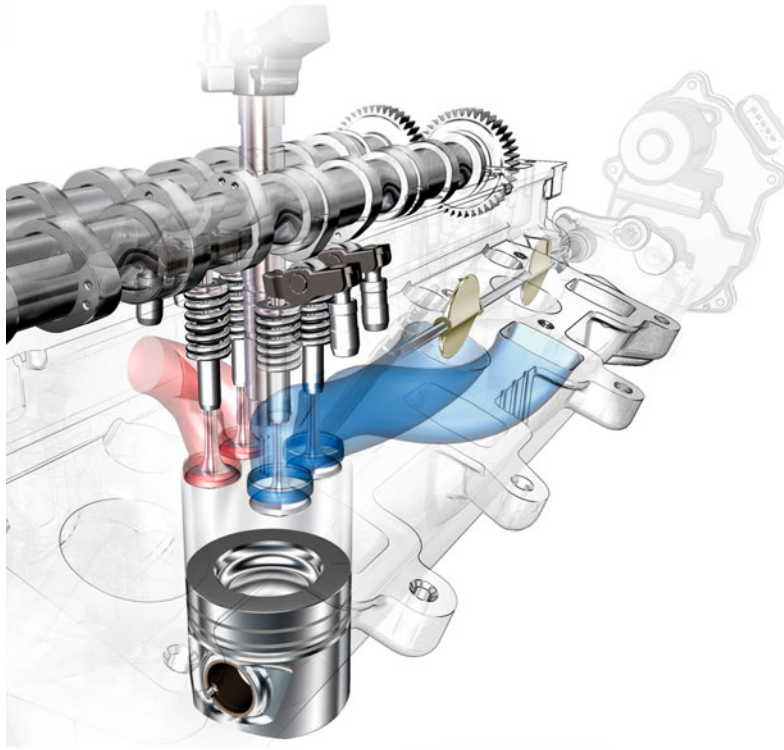


**Abb. 5.89** Vierventiltechnik: Mittiger Brennraum mit Einlass- und Auslasskanälen und zentraler Anordnung des Injektors

kommen. Um diese Aufgabe bewältigen zu können, benötigt man

- hohe Einspritzdrücke über 2000 bar zur Verwirklichung kurzer Einspritzdauern,
- eine hohe Zerstäubungsgüte durch kleinen Spritzlochdurchmesser unter 0,12 mm zur besseren Zerstäubung und damit Mischung des Kraftstoffes mit der Luft,
- eine Mehrlochdüse zur räumlich gleichmäßigen Verteilung des Kraftstoffes auf die Luft im Brennraum,
- eine gezielte, während des Ansaugungs- und Verdichtungstaktes erzeugte Luftbewegung (Drall) zur Unterstützung der Gemischaufbereitung,
- eine tiefe Mulde im Kolben als Brennraum sowie
- eine in den Brennraum hineinragende Glühkerze als Starthilfe.

Heutige Motoren mit Direkteinspritzverfahren haben eine Nenndrehzahl bis 5500 $min^{-1}$. Ihr effektiver Wirkungsgrad weist im Bestpunkt einen Wert von 43 % auf. Mit zusätzlichem Technikaufwand wie

- Hochdruckeinspritzausrüstung,
- geregelte und gekühlte Abgasrückführung,
- Oxidationskatalysator und
- weiterer Abgasnachbehandlung für $NO_x$ und Partikel

lassen sich Abgasemission und Verbrennungsgeräusch auf ein geringes Niveau bringen. Das Weiterentwicklungspotenzial bzgl. der motorischen Verbesserungen ist noch keineswegs ausgeschöpft, z. B. durch Einsatz der Vierventiltechnik.

Bei der Vierventiltechnik (Abb. 5.89) werden die beiden Einlasskanäle meist unterschiedlich ausgelegt. Ein Kanal ist spiralförmig ausgebildet und

erzeugt bei Teillast einen großen Drall. Der andere Kanal hat eine Form, die eine starke Tangentialströmung bewirkt. Es besteht dabei die Möglichkeit, abhängig vom Betriebspunkt, einen Einlasskanal abzuschalten, was eine höhere Luftströmung und damit Absenkung der Rauchwerte bedeutet.

Das Verbrennungsgeräusch, das bei Beschleunigungen durch den harten Gang der Verbrennung deutlich wahrnehmbar ist, lässt sich dadurch weitgehend mildern, dass ein kleiner Teil der Kraftstoffmasse vor der Haupteinspritzung fein zerstäubt in den Brennraum vorgelagert wird.

Ein Verbesserungspotenzial besteht auch in der Gestaltung des Einlasskanals zur Drallerzeugung. Da der Intensitätsbedarf der Drehbewegung der Frischladung in Abhängigkeit der Motorendrehzahl unterschiedlich ist, wird einem Einlasskanal mit variablem Drall Bedeutung beigemessen.

Nach einem ganz anderen Prinzip arbeitet das von MAN in Augsburg entwickelte M-Verfahren (◘ Abb. 5.88d). Hierbei soll nur ein möglichst kleiner Teil des eingespritzten Kraftstoffes sich von selbst entzünden. Die größere Menge (95 %) sollte auf die Brennraumwand gespritzt werden.

Die Verbrennung wird mit der Selbstzündung des luftverteilten Kraftstoffes eingeleitet, der mit der heißen, im Brennraum rotierenden Luft den Kraftstoff in Schichten von der Brennraumwand ablöst und sozusagen fremd zündet.

Die weiche, lange hinausgezögerte Verbrennung führt zu einer geringen Ruß- und Geräuschemission. Leichtsiedende Kraftstoffe mit schlechten Selbstzündungseigenschaften können eingesetzt werden (Vielstoff-Motoren).

Die starke Verwirbelung im Brennraum führt zu im Vergleich mit anderen Direkteinspritzern größeren Strömungsverlusten, was sich in Verbrauchsnachteilen ausdrückt. Zudem sind die Kolben thermisch hoch belastet.

Im Pkw findet das M-Verfahren keine Anwendung.

### 5.2.5.5 Qualitative Bewertung von Verbrennungsverfahren

Aufgrund der Unterschiede in den Brennraumgeometrien, der Einspritzung und der Gemischbildung sowie der Lastanpassung stellen sich verschiedene Verbrennungsabläufe ein (◘ Tab. 5.9).

Beim Vergleich der Dieselmotoren mit direkter bzw. indirekter Einspritzung überzeugt der Direkteinspritzer durch einen bis zu 15 % geringeren Kraftstoffverbrauch. Dies folgt aus dem höheren Gleichraumanteil (▶ Abschn. 5.2.4.3), den geringeren Wärmeverlusten und dem Entfall der Strömungsverluste zwischen Neben- und Hauptbrennraum.

Nebenkammer-Dieselmotoren weisen andere Vorzüge auf. Der kürzere Zündverzug sowie die gestufte Verbrennung mindern das Verbrennungsgeräusch, den Ausstoß limitierter Schadstoffe im Abgas sowie die Geruchsstoffemissionen.

Im Vergleich zum Ottomotor bietet der Diesel deutliche Vorteile im spezifischen Kraftstoffverbrauch, insbesondere bei Teillast, sowie bezüglich der Rohemission von CO, HC und beim Einsatz von AGR auch das $NO_x$. Der bessere Wirkungsgrad resultiert aus der höheren Verdichtung, dem vor allem bei Teillast herrschenden hohen Luftüberschuss und dem Verzicht auf Drosselung der angesaugten Luft. Die relativ geringe dieselmotorische Rohemission von Schadstoffen ist auf das hohe Luftverhältnis (CO, $NO_x$) und die infolgedessen niedrigere Spitzentemperatur der Verbrennung ($NO_x$), aber auch den Wegfall der Kraftstoffkondensation während des Ansaugens von Ladung, Zündaussetzer und starken zyklischen Schwankungen im Verbrennungsablauf sowie Flammlöscheffekte in engen Spalten des Brennraums (HC) zurückzuführen.

Der Ottomotor hat gegenüber dem Dieselmotor Vorteile bei spezifischer Leistung, Verbrennungsgeräusch und Partikelausstoß sowie bessere Voraussetzungen für eine Abgasnachbehandlung. Durch Einsatz der direkteinspritzenden Technik bei Ottomotoren wird der Dieselvorteil geringer.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass Dieselmotoren infolge ihres geringen und von keiner anderen Verbrennungskraftmaschine erreichten Kraftstoffverbrauchs ganz wesentlich zur Schonung der Erdölvorräte sowie zur Verringerung des Treibhauseffektes beitragen. Hinsichtlich der Abgas- und Geräuschemission existiert infolge der inneren Gemischbildung ein daraus resultierender thermodynamischer Zielkonflikt, der trotz aller Bemühungen durch innermotorische Maßnahmen allein ohne Abgasnachbehandlung nicht lösbar zu sein scheint.

**Tabelle 5.9** Qualitative Bewertung verschiedener Verbrennungsverfahren am Beispiel von Fahrzeugmotoren

| Eigenschaft | Art des Verbrennungsverfahrens | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Dieselmotor mit | | | Ottomotor (homogenes Gemisch) |
| | Vorkammer | Wirbelkammer | Direkteinspr. | |
| spez. Drehmoment | Bezugswerte | – | + + | 0 |
| spez. Kraftstoffverbrauch | | – | + + + | – – |
| Schadstoffe, Rohemissionen | | | | |
| Kohlenmonoxid | | 0 | + | + |
| Kohlenwasserstoffe | | 0 | + | + |
| Stickstoffoxide | | 0 | – | ++ |
| Rußpartikel | | + | + + + (mit DPF) | + + + |
| Verbrennungsgeräusch | | – | + | + + |
| Abgasgeruch | | – | 0 | + + |

0 etwa gleichwertig
+ geringfügig besser; + + besser; + + + deutlich besser
– geringfügig schlechter; – – schlecher; – – – deutlich schlechter

### 5.2.5.6 Simulation der dieselmotorischen Verbrennung

Die einfachsten Berechnungsmodelle für die instationären diffusions-kontrollierten Verbrennungsprozesse bei der Dieselverbrennung sind nulldimensionale Ein-Zonen-Modelle. Der Brennraum wird dabei mit dem thermodynamischen Modell einer idealen Mischung beschrieben. Es existiert keine räumliche Auflösung von Druck, Temperatur und Zusammensetzung. Aussagen über Schadstoffbildung sind nicht möglich.

Beim Mehr-Zonen-Modell wird das nulldimensionale Modell für jede Zone getrennt berechnet. Damit können die zeitlichen Verläufe von Temperatur und Zusammensetzung für jede Zone bestimmt werden.

Anstatt die Wärmefreisetzung wie bei den nulldimensionalen Modellen mithilfe von experimentell ermittelten Ersatzbrennverläufen vorzugeben, gelangt man durch Modellierung der Strahlausbreitung, Verdampfung, Gemischbildung (Abb. 5.90), Zündung und Verbrennung zu den quasidimensionalen oder phänomenologischen Mehr-Zonen-Modellen. Damit ist eine Vorausberechnung der Verbrennung aus dem Einspritzverlauf möglich.

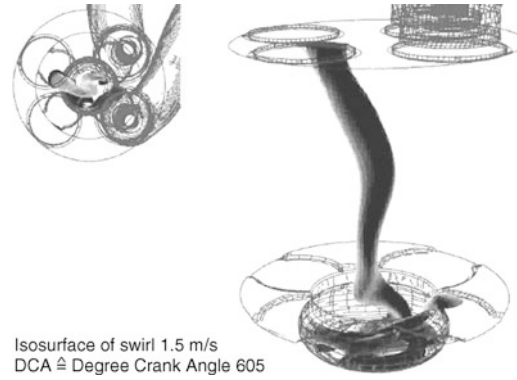



**Abb. 5.90** Simulation der Einlassströmung: Darstellung der Drallachse

Die Grundlage der Berechnung der innermotorischen Prozesse mit dreidimensionalen Modellen sind die Erhaltungsgleichungen für den Impuls, die Masse, die Stoffe, die Enthalpie der turbulenten Energie und die Dissipation. Die Modellierung des Kraftstoffstrahles beginnt schon bei den Vorgängen im Düsenloch, da die Kavitation in der Düse eine wichtige Rolle für die Strahleinschnürung und damit Strahlaustrittsgeschwindigkeit spielt. Für die

Simulation des Kraftstoffstrahls hat sich das Modell der „diskreten Tropfen" etabliert. Dabei wird der Einspritzstrahl durch statistische Tropfenpakete approximiert, die jeweils eine Gruppe von Tropfen gleicher thermodynamischer Eigenschaften und Zustände repräsentieren. Erst durch diese Vereinfachung wird der Einspritzvorgang berechenbar. Die Tropfenpakete durchlaufen alle physikalischen Prozesse, die die Tropfen auch im Motor durchlaufen.

Zerstäubungsmodelle beschreiben das Abscheren der Primärtropfen vom optisch dichten flüssigen Strahlkern nach dem Austreten des Strahls aus dem Düsenloch. „Break-up"-Modelle behandeln das Aufbrechen der Primärtropfen in kleine Sekundärtröpfchen. Weitere Modelle liefern Informationen über die Wechselwirkungen (Tropfen-Tropfen, Tropfen-Gasphase, Tropfen-Brennraumwand). Sobald Kraftstoff verdampft ist und sich der gasförmige Kraftstoff mit dem Oxidator mischt, beginnen die Reaktionen des Selbstzündungsprozesses. Die Zündung wird lokal (in jeder Gitterzelle) über eine reduzierte chemische Kinetik berechnet, die in Abhängigkeit von den Ausgangskonzentrationen des Oxidators, des Kraftstoffes, der Radikale und der lokalen Gastemperatur den Reaktionsfortschritt bestimmt. Sobald die Zündung erfolgt ist, wird der weitere Reaktionsablauf durch ein einfacheres Verbrennungsmodell simuliert.

Die Stickoxidbildung bei Verbrennungsprozessen entsteht auf drei Wegen: Neben der thermischen NO-Bildung kann es in der Flammenfront bei lokalen Temperaturen bis zu 2800 K zur schnellen Bildung von Prompt-NO kommen. Zusätzlich kann im Brennstoff enthaltener Stickstoff zu NO oxidiert werden. Im Dieselmotor entstehen etwa 90–95 % der Stickoxide über das thermische NO, 5–10 % über Prompt-NO und weniger als 1 % über Brennstoff-NO. Die Modellierung des thermischen NO, das bei Temperaturen über 2000 K gebildet wird, lässt sich mit dem Zeldovich-Mechanismus beschreiben:

$$\begin{aligned} N_2 + O &\leftrightarrow NO + N_2 \\ O_2 + N &\leftrightarrow NO + O_2 \\ OH + N &\leftrightarrow NO + H \end{aligned}$$

Die wesentlichen Einflussgrößen sind: lokales Temperaturfeld, lokales Mischungsfeld und lokales Strömungsfeld (Verweilzeit des betrachteten Massenelements im betrachteten Volumenelement).

Der detallierte Mechanismus der Rußbildung ist noch nicht vollständig geklärt. Deshalb werden zur Simulation der Rußbildung halbempirische Modelle eingesetzt, die abhängig von dem verdampften Kraftstoff, dem Oxidator, dem Druckfeld und dem Temperaturfeld sind. Der heutige Stand der Modellierung ist noch unbefriedigend.

Eine hinreichend exakte Modellierung der dieselmotorischen Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsbildung ist heute noch nicht möglich, da wichtige Teilprozesse nicht hinreichend detailliert verstanden beziehungsweise modelliert sind. Daher sind die phänomenologischen Modelle weiterhin von Bedeutung. Doch langfristig haben die CRFD-Codes (computational reactive fluid dynamics) das größere Potenzial.

## 5.2.6 Konstruktive und funktionale Merkmale des Dieselmotors

### 5.2.6.1 Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse

Im Triebwerk (◘ Abb. 5.91) werden die bei der Verbrennung frei werdenden Kräfte in nutzbares Drehmoment umgesetzt. Die wesentlichen Elemente sind Kolben, Pleuel und Kurbelwelle. Im Gegensatz zum Ottomotor, der mit Drehzahlen bis zu 7000 $\text{min}^{-1}$ und mehr betrieben werden kann, muss der Kurbeltrieb eines Dieselmotors heute nur maximal 5500 $\text{min}^{-1}$ beherrschen. Dafür treten aber beträchtlich höhere Verbrennungsdrücke und höhere Temperaturen auf. So müssen die Bauteile, die an der Übertragung wesentlich beteiligt sind (Kolbenbolzen, Pleuel, Kurbelzapfen und die Lager), entsprechend kräftig ausgelegt und der erhöhte Wärmeanfall abgeleitet werden.

Der Kolben (◘ Abb. 5.92) ist also für die höheren Temperaturen und Drücke auszulegen. An die Kolbenringe werden hohe Anforderungen bzgl. der Abdichtung zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse gestellt. Außerdem müssen die Ölabstreifringe den Schmierölverbrauch kontrollieren. Der Feuersteg, das Zwischenstück zwischen dem Kolbenboden und dem ersten Kolbenring, ist besonders sorgfältig auszubilden, damit ein Koksaufbau in

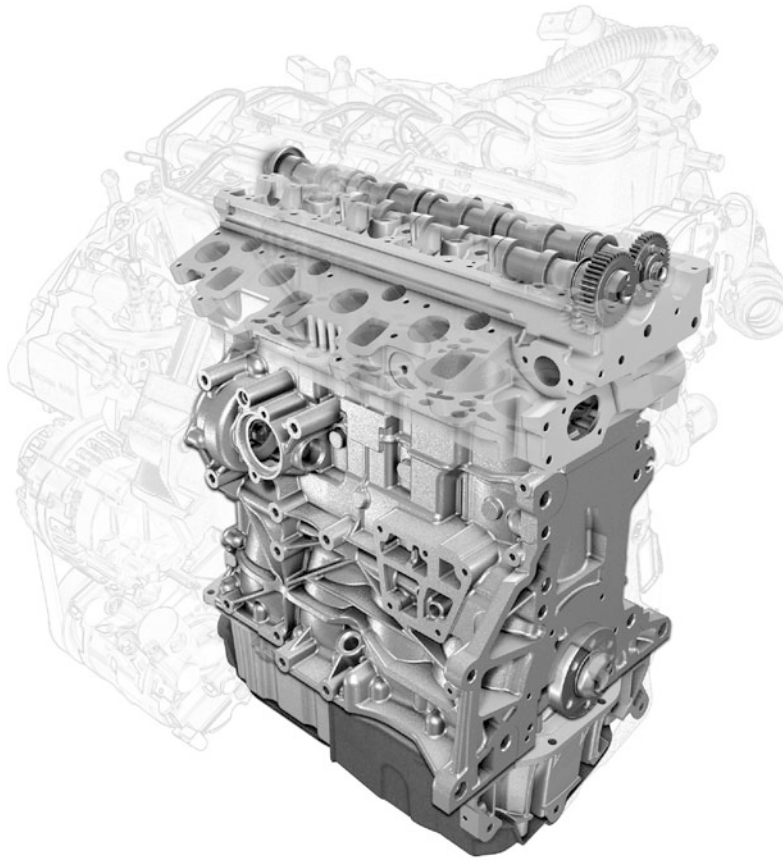


**Abb. 5.91** Zylinderkopf und Zylinderkurbelgehäuse des VW 1,6 l Dieselmotors

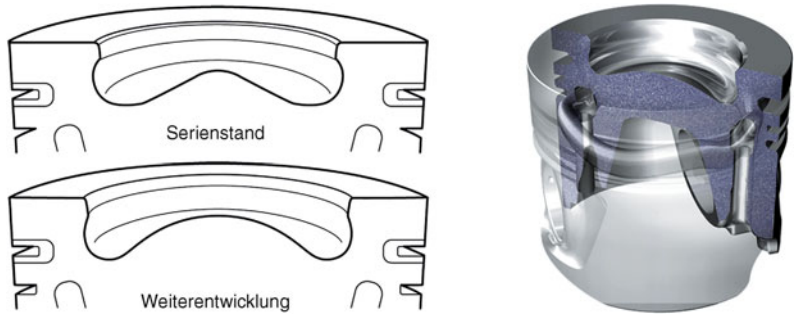



**Abb. 5.92** Weiterentwicklung eines Kolbens (VW 1,6 l, 4 Zylinder, CR-Einspritzung): An die höheren Einspritzdrücke angepasste Mulde

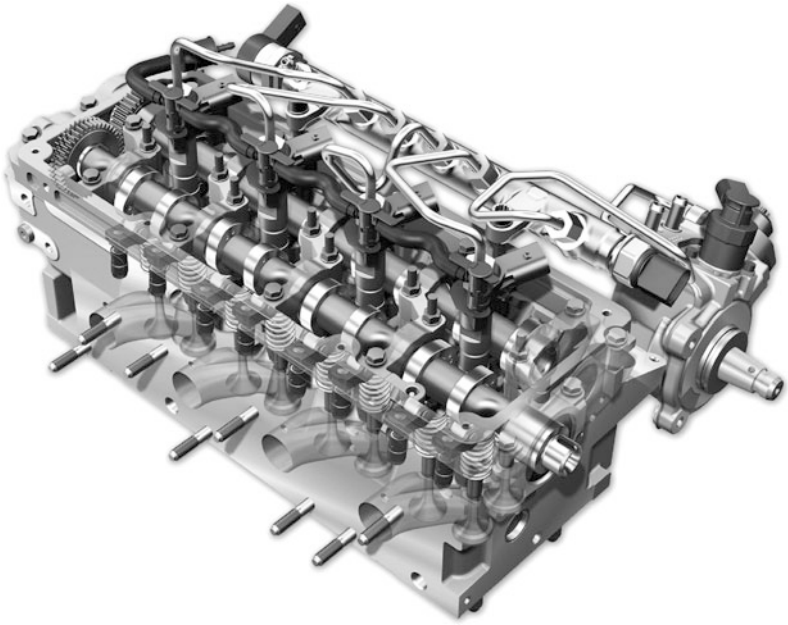


**Abb. 5.93** Zylinderkopf eines Dieselmotors (VW 1,6 l, 4 Zylinder, CR-Einspritzung)

den Ringnuten verhindert wird. Das Verkoken des Schmieröls kann zum Festbacken der Kolbenringe führen. Um dies zu verhindern, kommt den Kolbenringen auch die Aufgabe zu, die Abwärme möglichst schnell an den Zylinder und damit an das Kühlwasser abzuführen.

Typisch für den Dieselmotor sind die im Vergleich zum Ottomotor längeren Hübe. Bei dem viel geringeren Kompressionsvolumen über dem Kolben (etwa 1/3 des Ottomotors) gehen Schwankungen in den Abmessungen der Triebwerkbauteile stärker ein, d. h. sie beeinflussen stark das Verdichtungsverhältnis. Dies verschärft die Forderung enger Fertigungstoleranzen beim Dieselmotor.

Weiterhin spricht für langhubige Motoren mit kleiner Bohrung, dass die zwangsläufig kleinere Oberfläche des Brennraums die Wärmeverluste verringert und eine Annäherung an das optimale Verdichtungsverhältnis ermöglicht. Langhuber gewährleisten einen einwandfreien Kaltstart und Leerlauf schon bei niedrigerer Verdichtung als Kurzhuber, deren Verdichtung zu diesem Zweck unökonomisch erhöht werden muss.

Die Unterschiede zum Zylinderkopf eines Ottomotors sind vielfältig. Bei Vor- und Wirbelkammermotoren sind Brennräume im Zylinderkopf untergebracht. Dadurch entstehen außerordentlich hohe thermische Belastungen (Temperaturen bis zu 900 °C), die besonders hohe Anforderungen an die Konstruktion des Zylinderkopfes (Abb. 5.93) stellen. Durch die Anordnung der Brennkammern können ungleiche Wärmedehnungen und als Folge ein Verziehen des Zylinderkopfes auftreten. Außerdem ist das Heranführen des Kühlwassers an die Brennkammern konstruktiv anspruchsvoll.

Des Weiteren ist in einem Dieselzylinderkopf noch Einbauraum für die Einspritzdüsen und die Kaltstartglühkerzen bereitzustellen.

### 5.2.6.2 Einspritzsysteme

**Anforderungen und Prinzip** Die Voraussetzung für eine effiziente Verbrennung ist eine gute Gemischbildung. Dabei spielt das Einspritzsystem eine zentrale Rolle. Der Kraftstoff muss in der richtigen Menge, zum richtigen Zeitpunkt und mit einem hohen Druck eingespritzt werden. Schon bei geringfügigen Abweichungen sind ansteigende Schadstoffemissionen, laute Verbrennungsgeräusche oder hoher Kraftstoffverbrauch die Folge. Wichtig für den Verbrennungsablauf eines Dieselmotors ist ein ge-

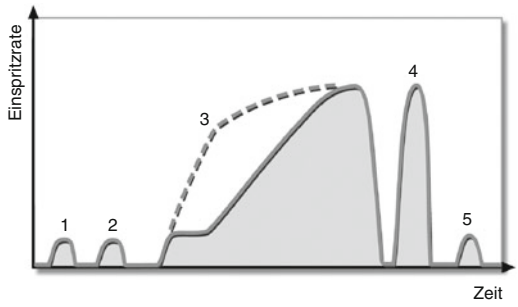



**Abb. 5.94** Optimierte Einspritzverlaufsformung bei Einspritzsystemen für hohe Drücke: 1, 2 Voreinspritzungen; 3 Haupteinspritzung; 4, 5 Nacheinspritzungen

ringer Zündverzug. Der Zündverzug ist die Zeit zwischen Einspritzbeginn und dem Beginn des Druckanstieges im Brennraum. Wird während dieser Zeit eine große Kraftstoffmenge eingespritzt, führt dies zu einem schlagartigen Druckanstieg und dadurch zu lauten Verbrennungsgeräuschen.

Um einen möglichst sanften Verbrennungsablauf zu erreichen, wird vor Beginn der Haupteinspritzung eine kleine Kraftstoffmenge mit geringem Druck eingespritzt (Abb. 5.94). Diese Einspritzung wird als *Voreinspritzung* bezeichnet. Durch die Verbrennung dieser kleinen Kraftstoffmenge steigen Druck und Temperatur im Brennraum.

Dies schafft die Voraussetzung für eine schnelle Zündung der Haupteinspritzmenge und verringert dadurch den Zündverzug der Hauptmenge. Die Voreinspritzung und eine „Spritzpause" zwischen Vor- und Haupteinspritzung bewirken, dass die Druckanstiege im Brennraum nicht schlagartig auftreten, sondern die Drücke moderat zunehmen. Die Folge sind geringe Verbrennungsgeräusche und weniger Stickoxid-Emissionen.

Bei der *Haupteinspritzung* kommt es auf eine gute Gemischbildung an, damit der Kraftstoff möglichst vollständig verbrennt. Durch einen hohen Einspritzdruck wird der Kraftstoff sehr fein zerstäubt, sodass sich Kraftstoff und Luft gut miteinander vermischen können. Eine vollständige Verbrennung führt zur Reduzierung der Schadstoffemissionen und hoher Leistungsausbeute.

Am *Ende der Einspritzung* ist es wichtig, dass der Einspritzdruck schnell abfällt und die Düsennadel schnell schließt. Dadurch wird verhindert, dass Kraftstoff mit geringem Einspritzdruck und großem Tropfendurchmesser in den Brennraum gelangt. Er verbrennt nur noch unvollständig und führt dadurch zu erhöhten Schadstoffemissionen.

Die heutigen Einspritzanlagen sollen wegen der Abgasnachbehandlung (zum Beispiel aktive Regeneration des Partikelfilters) auch Nacheinspritzungen ermöglichen [85].

Die Einspritzanlage hat die Aufgabe, den Kraftstoff vom Tank zum Motor zu fördern und unter hohem Druck zeitgerecht, wie hier beschrieben, in den Brennraum zu fördern. Sie besteht prinzipiell aus den Elementen Vorförderpumpe mit Kraftstofffilter, Einspritzpumpe zur Hochdruckerzeugung, Einspritzdüsen (oder Einspritzventilen) und der Einspritzleitung zur Verbindung von Pumpe und Düse. Exemplarisch sind die Ausführungsformen Verteilereinspritzpumpe, Pumpe-Düse-Element und Common-Rail-System in Abb. 5.95 dargestellt.

**Verteilereinspritzpumpe** Für kleine, schnelllaufende Dieselmotoren wurde die Verteilereinspritzpumpe (VE-Pumpe) [86], entwickelt. Mit dieser kompakten Pumpe steht eine anpassungsfähige, leistungsstarke Einspritzanlage mit geringem Gewicht und geringem Einbauvolumen zur Verfügung. Die Zylinderzahl ist in der Regel auf 6 begrenzt.

Üblicherweise besteht die VE-Pumpe aus folgenden Baugruppen:

- Hochdruckpumpe mit Verteiler,
- Drehzahl/Mengen-Regler,
- Spritzversteller,
- Niederdruck-Förderpumpe,
- Elektrische Abstellvorrichtung,
- Aufschaltgruppen für verschiedene Funktionen.

Es gibt zwei Arbeitsweisen: Axialkolbenpumpen und Radialkolbenpumpen. Bei den Axialkolbenpumpen wird die Drehbewegung der Antriebswelle in eine Dreh- und Hubbewegung des Verteilerkolbens übersetzt. Die Hubbewegung sorgt für die



**Abb. 5.95** Ausführungsformen von Einspritzsystemen: Verteilereinspritzpumpe, Pumpe-Düse-Element und Common-Rail-System

Druckerzeugung und Mengenförderung, wobei die Drehbewegung die Verteilung des Kraftstoffes auf die einzelnen Motorzylinder bewirkt. Somit wird nur ein Kolben benötigt, im Gegensatz zu den Radialkolbenpumpen, bei denen jedem Motorzylinder oder einem Paar je ein Kolben zugeordnet wird. Diese Bauart ist durch die Funktionstrennung von Hochdruckerzeugung durch die Radialkolben und Verteilung durch die axial zugeordnete Verteilerwelle gekennzeichnet. Die Schmierung der Pumpe erfolgt mithilfe des Kraftstoffs.

In der nächsten Generation der VE-Pumpen wurde eine elektronische Regelung eingeführt. Damit wurden die verschiedenen, individuell ausgelegten Aufschaltgruppen überflüssig. Mithilfe von Sensoren und im Steuergerät abgelegten Informationen und Kennfeldern werden Einspritzmenge und -beginn geregelt.

Die neueste Generation der Verteilereinspritzpumpen arbeitet mit elektronischer Mengen- und Spritzbeginnregelung und erzeugt in der Axialkolbenversion düsenseitige Drücke bis zu 1400 bar.

Neue magnetventilgesteuerte Radialkolbenpumpen erreichen düsenseitige Drücke bis etwa 1600 bar mit einem Potenzial von über 1800 bar. Der Kraftstoff wird in dieser Pumpenversion über zwei bis vier Kolben komprimiert, bewegt durch einen sehr steifen Nockenring. Diese Pumpe ist bis zu maximal sechs Zylindern einsetzbar. Eine abgesetzte Voreinspritzung im unteren Drehzalbereich, die bisher nur durch Einsatz eines Zweifeder-Düsenhalters erreicht wurde, ist mithilfe des Magnetventiles möglich. Eine Nacheinspritzung erlaubt dieses System aber nicht. Die besonderen Vorteile liegen in einer

- hohen Mengendynamik (Zylinder-individuelle Mengenzumessung),
- hohen Genauigkeit,
- Förderratenbeeinflussung durch variablen Förderbeginn,
- Voreinspritzung (abgesetzt nur bei niedrigen Drehzahlen).

**Reihenpumpe** Ähnlich einem Reihenmotor ist für jeden Motorzylinder ein eigenes Pumpenelement in einem gemeinsamen Gehäuse in Reihe angeordnet. Die Wirkungsweise ist im Prinzip:

- Der von einer besonderen Förderpumpe aus dem Tank gesaugte Kraftstoff gelangt am unteren Totpunkt des Pumpenkolbens durch seitliche Bohrungen in den Zylinder des Pumpenelements und wird komprimiert.
- Die Fördermenge wird durch Einstellung des Nutzhubes bewirkt.
- Der von der Nockenwelle angetriebene Kolben befördert dann den Kraftstoff durch ein Druckventil am oberen Ende des Pumpenzylinders in die Druckleitung zum Motor.
- Dort gelangt der Kraftstoff durch die Einspritzdüse in Form eines fein zerstäubten Strahls in den Brennraum.
- Danach wird der Pumpenkolben von einer Feder wieder in seine Ausgangsstellung zurückgeschoben und das ebenfalls fe-

derbelastete Druckventil verschließt die Einspritzleitung.

Zu der Reihenpumpe [87] gehören ein Regler für die Mengenzumessung, eine Förderpumpe zur Vorförderung des Kraftstoffes und ein Spritzversteller zur drehzahlabhängigen Verstellung des Förderbeginns.

Die Schmierung von Einspritzpumpe und Drehzahlregler wird durch Anschluss an den Motorschmierölkreislauf gewährleistet.

**Einspritzdüsen und Düsenhalter** Die Einspritzdüse nimmt beim Dieselmotor zweifellos eine Schlüsselrolle ein. Sie zerstäubt und verteilt den Kraftstoff im Brennraum des Dieselmotors und wirkt an der Formung des Einspritzverlaufs mit. So bestimmt sie mit, wie gründlich der von der Einspritzpumpe bereitgestellte Kraftstoff verbrennt und folglich auch wie wirkungsvoll die Energie im Kraftstoff ausgenutzt wird. Diese Aufgabe ist keineswegs einfach, vor allem wenn man bedenkt, dass die Düse pro Minute maximal bis zu 2500mal öffnen und dabei den Kraftstoff mit Drücken bei Direkteinspritzern bis zu 2500 bar in den Brennraum verteilen muss.

Grundsätzlich handelt es sich bei allen heute gebräuchlichen Diesel-Einspritzdüsen um hydraulisch gesteuerte Nadelventile. Sie bestehen aus einem Düsenhalter und einem Düsenkörper, in den eine federbelastete Düsennadel auf weniger als ein tausendstel Millimeter genau eingepasst ist. Die Düsennadel verfügt in ihrem mittleren Teil über eine Druckschulter, auf die der Druck des durch den Düsenkörper zulaufenden Kraftstoffs wirkt. Übersteigt die Druckkraft die Vorspannung der Druckfeder, wird die Düsennadel angehoben und öffnet an ihrem unteren Ende die Düsenöffnung zum Brennraum. Der an der Düsennadel vorbei nach oben entweichende Kraftstoff wird über einen Leckölanschluss am Düsenhalter und eine gesonderte Kraftstoffleitung in den Tank zurückgeführt. Entscheidend für die Qualitäten einer Einspritzdüse ist die Düsenöffnung.

Man unterscheidet zwischen Zapfendüsen (Abb. 5.96a) und Lochdüsen (Abb. 5.96b), wobei für die im Personenwagen eingesetzten Vor- und Wirbelkammerdieselmotoren vor allem die Zapfen-Varianten geeignet sind. An ihrem Ende

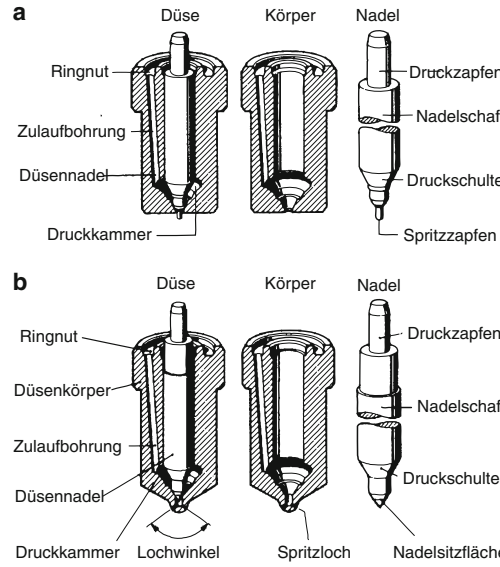



**Abb. 5.96** **a** Zapfendüsen für Vor- und Wirbelkammermotoren; **b** Lochdüsen für Dieseldirekteinspritzer

befindet sich ein Zapfen, der in das Spritzloch hineinragt und für einen vergleichsweise gebündelten Einspritzstrahl sorgt. Eine Zapfendüse mit besonderen Zapfenabmessungen ist die Drosselzapfendüse. Über die Form des Zapfens kann dabei der Einspritzstrahl den Erfordernissen des Motors angepasst werden. Der Spritzquerschnitt wird bei kleinem Nadelhub (also zu Beginn der Einspritzung) verkleinert. Der so erzeugte Einspritzverlauf (Vorstrahleffekt) verlangsamt den Verbrennungsdruckanstieg und mindert das Verbrennungsgeräusch.

Lochdüsen eignen sich dagegen hauptsächlich für Dieselmotoren mit direkter Einspritzung. Der eingespritzte Kraftstoffstrahl ist hier breiter gefächert als bei einer Zapfendüse, was für eine feine Zerstäubung und eine gründliche Vermischung mit der Verbrennungsluft sorgt – eine Aufgabe, die beim Vor- und Wirbelkammermotor die stärkere Verwirbelung der Luft übernimmt. Die Einspritzöffnungen sind bei der Lochdüse an einem Kegel untergebracht, der sich am unteren Ende der Düse befindet. Man unterscheidet zwischen Einloch- und Mehrlochdüsen, wobei die Letzteren in den meisten Serienanwendungen über 5 bis 8 Löcher verfügen. Zukünftige Entwicklungen werden

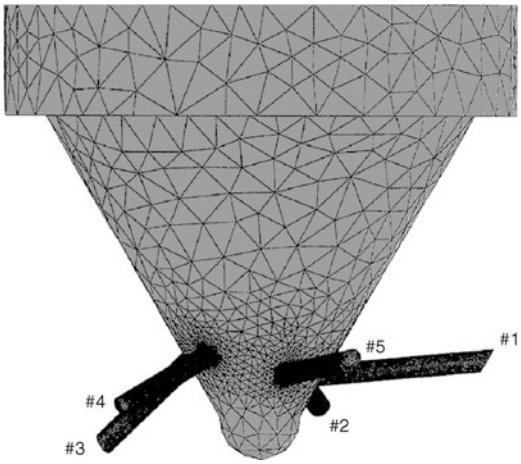



**Abb. 5.97** 3-D-FEM-Modell zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse in der Düsenspitze

aufgrund verbesserter Fertigungsverfahren deutlich mehr Löcher haben. Heute können Lochdurchmesser $< 0{,}12$ mm hergestellt werden. Für eine geringe Kohlenwasserstoffemission ist es wichtig, dass das vom Kraftstoff ausgefüllte Volumen zwischen Sitzkante und brennraumseitiger Düsenmündung möglichst klein gehalten wird. Dafür verwendet man Sitzlochdüsen, bei denen die Düsennadel die Düsenlöcher im geschlossenen Zustand abdeckt.

Bei den Optimierungen der Gestalt und der Anordnung der Düsenlöcher kommt es heute auf höchste Präzision an. Diese Strömungsverhältnisse und Druckverteilungen werden mit dreidimensionalen Strömungsberechnungen untersucht (Abb. 5.97 und Abb. 5.98). Für die Düsengeometrie sind besonders wichtig: Zahl der Löcher, Einlaufform in diese (scharfkantig oder gerundet) und Verhältnis von Lochdurchmesser zu Länge. Durch neue Bearbeitungsmethoden (z. B. durch das hydroerosive Runden) der Düsen wird der Durchfluss durch das Loch erhöht, die Toleranz in Bezug auf den Durchfluss eingeengt und der abrasive Verschleiß der Spritzlocheinlaufkante vorweggenommen. Wird der Einlauf in das Düsenloch gerundet, so erhöht sich die Einspritzenergie und damit Kraftstoffaufbereitungsqualität.

Die Düse sitzt im Düsenhalter, der zum Einbau der Düse in den Motorzylinderkopf dient, und bildet mit ihm die Düsenhalterkombination. Düsenhalter enthalten im Allgemeinen eine Düsenfeder und eine Hubbegrenzung. Beim Zweifederhalter werden zwei Düsenfedern verwendet. Die erste Druckfeder begrenzt den Nadelhub zunächst auf den Vorhub $H_1$ (Voreinspritzung). Beim Überschreiten eines über die zweite Druckfeder eingestellten Druckes wird die Düsennadel weiter angehoben, maximal bis zum

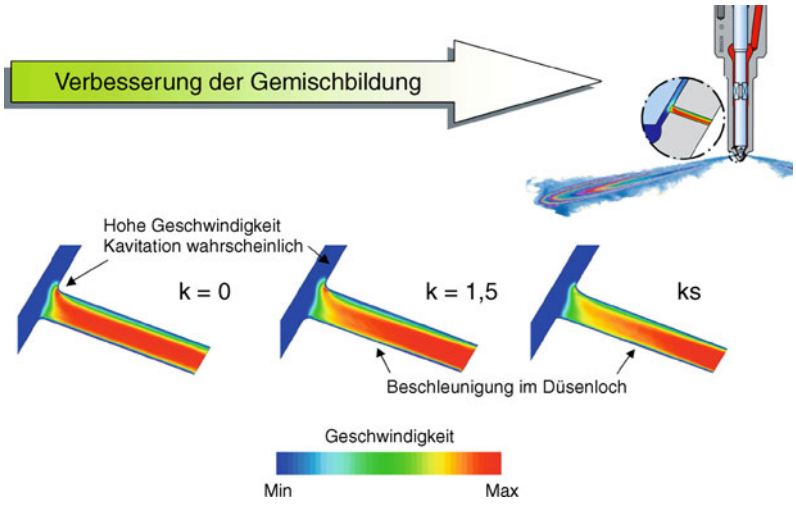



**Abb. 5.98** Optimierung der Strömungsverhältnisse in Düsenlöchern

Hub $H_2$ (Haupteinspritzung). Der mit einem solchen Zweifederhalter erreichte Einspritzverlauf führt zu einem verminderten Verbrennungsgeräusch.

**Pumpe-Düse** Ein System, das hohe Anforderungen erfüllt, ist das Pumpe-Düse-Einspritzsystem.

Schon Rudolf Diesel hatte den Gedanken, Einspritzpumpe und Einspritzdüse zu einer Einheit zusammenzufassen, um auf die Hochdruckleitungen verzichten zu können und dadurch einen hohen Einspritzdruck zu erzielen. Es fehlte ihm aber an den technischen Möglichkeiten, diese Idee zu verwirklichen. Seit den 50er Jahren werden Dieselmotoren mit einem mechanisch gesteuerten Pumpe-Düse-Einspritzsystem als Lkw- und Schiffsmotoren eingesetzt.

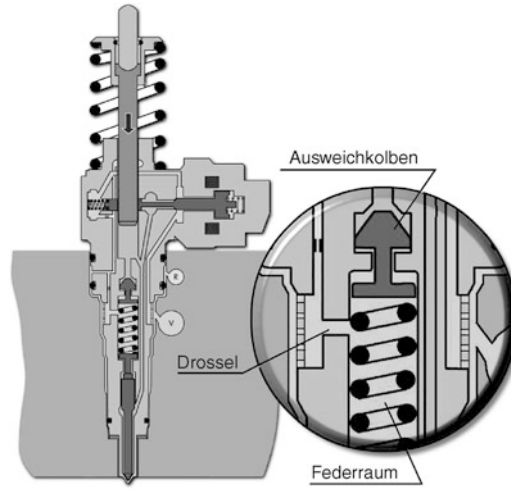
Volkswagen ist es zusammen mit der Robert Bosch GmbH gelungen, einen Dieselmotor mit einem magnetventilgesteuerten Pumpe-Düse-Einspritzsystem zu entwickeln, der im PKW zur Anwendung kam.

Eine Pumpe-Düse-Einheit ist eine Einspritzpumpe mit Steuereinheit und Einspritzdüse zu einem Bauteil zusammengefasst (◘ Abb. 5.99). Jeder Zylinder des Motors hat eine Pumpe-Düse-Einheit. Dadurch entfallen die Hochdruckleitungen wie bei einer Verteiler(Reihen)einspritzpumpe und es entsteht ein deutlich kleineres zu verdichtendes Hochdruckvolumen.

Genau wie eine Verteiler(Reihen)einspritzpumpe mit Einspritzdüsen hat das Pumpe-Düse-Einspritzsystem folgende Aufgaben:

- den Hochdruck für die Einspritzung zu erzeugen,
- den Kraftstoff in der richtigen Menge zur richtigen Zeit einzuspritzen.

Die Nockenwelle hat zum Antrieb der Pumpe-Düse-Einheiten je Zylinder einen zusätzlichen Nocken. Sie betätigen über Rollenkipphebel die Pumpenkolben der Pumpe-Düse-Einheiten. Der Einspritznocken hat eine steile auflaufende Flanke und eine flache ablaufende Flanke. Dadurch wird der Pumpenkolben mit einer hohen Geschwindigkeit nach unten gedrückt und somit sehr schnell ein hoher Einspritzdruck erreicht. Dann bewegt sich der Pumpenkolben langsam und gleichmäßig nach oben




◘ **Abb. 5.99** Funktionsschema einer Pumpe-Düse mit Ausweichkolben [92]

und der Kraftstoff kann blasenfrei in den Hochdruckraum der Pumpe-Düse-Einheit nachfließen.

Im Vergleich zu der Verteilereinspritzpumpe hat der Dieselmotor mit dem Pumpe-Düse-Einspritzsystem folgende Vorteile:

- Begrenzung der Verbrennungsgeräusche durch abgesetzte Voreinspritzung,
- geringen Kraftstoffverbrauch,
- wenig Schadstoffemissionen und
- hohe Leistungsausbeute.

Diese Vorteile werden erreicht durch:

- einen hohen Einspritzdruck von maximal 2200 bar an der Düse,
- einer präzisen Steuerung des Einspritzvorganges und
- einer Voreinspritzung.

Damit können spezifische Leistungen von mehr als 60 kW/l erreicht werden. Die neueste Variante des Pumpe-Düse-Einspritzsystems ist mit Piezo-Halter ausgerüstet. Gegenüber dem magnetisch angesteuerten Ventil ist dieses System deutlich schneller und ermöglicht bis zu fünf einzelne Einspritzungen während eines Einspritzzyklusses.

**Speichereinspritzsystem** Ein heute allgemein bei Pkw und NFZ eingesetztes Hochdruck-Einspritzsystem ist das Speichereinspritz- oder Common

Rail System (◘ Abb. 5.100a). Dabei sind Druckerzeugung und Einspritzung entkoppelt. Der Kraftstoff für die einzelnen Zylinder kommt aus einem gemeinsamen Speicher, der ständig auf hohem Druck gehalten wird.

Der Speicherdruck wird von einer Hochdruck-Radialkolbenpumpe erzeugt und lässt sich abhängig von den Betriebsbedingungen verändern.

Jeder Zylinder ist mit einem Injektor ausgerüstet, der über ein Magnet- oder Piezoventil gesteuert wird. Die Einspritzmenge wird durch den Ausflussquerschnitt des Injektors, die Öffnungsdauer des Magnet- bzw. Piezoventils und den Speicherdruck bestimmt. Heute werden bis zu 2200 bar Systemdruck erreicht. Die Entwicklung zukünftiger Systeme hat Drücke von mehr als 2500 bar zum Ziel. Kraftstoffmenge, Einspritzbeginn sowie die Vor- und Nacheinspritzung werden durch extrem schnelle Magnetventile [88] oder durch Piezoelemente [89], mit denen extrem kurze Schaltzeiten von $< 100\,\mu s$ realisierbar sind, gesteuert. Einspritzmengen deutlich unter 1 $mm^3$ sind das Resultat [90].

Die Ausführung eines Common-Rail-Einspritzsystems für einen Dieselmotor ist in ◘ Abb. 5.100b) für einen Injektor mit Pumpe-Düse und einen Piezoinjektor (◘ Abb. 5.100c) dargestellt.

Die funktionale Trennung der Druckerzeugung und der Einspritzung erlaubt eine bessere Gestaltung des Einspritz- und damit des Brennverlaufs. Der Einspritzdruck kann frei im Kennfeld gewählt werden. Voreinspritzungen sind möglich. Vorteilhaft ist, dass Common Rail Systeme sich auch an vorhandenen Motoren ohne Änderung des Zylinderkopfes anbauen lassen.

Beide Systeme (Pumpe/Düse und Speichereinspritzung) sind durch die im ◘ Abb. 5.101 gezeigten Größen charakterisiert.

Die funktionalen Vorteile des Common Rail Systems sind:

- Hohe Flexibilität durch nahezu frei wählbare Gestaltung des Einspritzverlaufs (wählbare Lage und Menge der Vor-, Haupt- und Nacheinspritzungen),
- Verbesserung des Komfortverhaltens des Dieselmotors durch bis zu drei Voreinspritzungen,
- Kontrolle der Rohemissionen durch flexible Einstellung der Einspritzzeitpunkte und -mengen und
- effektive Regeneration der Abgasnachbehandlungseinrichtungen durch bis zu vier Nacheinspritzungen.

**Simulation von Einspritzsystemen** Die Beherrschung der hochbelasteten Einspritzsysteme erfordert neben der traditionellen Simulation der Einspritzhydraulik eine gründliche Analyse des Kraftstoffverhaltens und des Gesamtenergieumsatzes.

Der theoretische Aufwand ist die dem Kolben zugeführte Arbeit. Als Nutzen ist die Energie des Einspritzstrahles anzusehen. Die wesentlichen Verluste treten bei der Absteuerung auf. Bei den hohen Drücken im Einspritzsystem müssen Änderungen der Dichte, Schallgeschwindigkeit, Kompressibilität und Viskosität berücksichtigt werden. Weiterhin müssen die durch die hohen Temperaturen verursachten unterschiedlichen Ausdehnungen der Bauteile des Einspritzsystems mit betrachtet werden [91].

Die numerische Lösung wird für Entwicklungsarbeiten im Wesentlichen mit eindimensionalen Programmen auf Basis der Stromfadentheorie (► Abschn. 11.3) durchgeführt. Dabei werden 3D-Effekte mit empirischen Ansätzen und Koeffizienten, so z. B. für die Reibung in den Einspritzleitungen oder die Stoßverluste an Querschnittsänderungen, berücksichtigt. So können die instationären Vorgänge in kompletten Systemen so effektiv simuliert werden, dass der Aufwand auch bei Untersuchung mehrerer Varianten wirtschaftlich bleibt.

### 5.2.6.3 Aufladung

Die Idee, den Dieselmotor mit vorverdichteter Luft zu füllen, wurde schon von R. Diesel versuchsweise umgesetzt. Der Durchbruch für die Aufladung wurde erst von A. Büchi (1905) erreicht, der auf die Idee kam, die im Abgas vorhandene Energie zu nutzen. Büchi hat auch schon zu Beginn seiner Arbeiten einen Ladeluftkühler zur Verbesserung des Wirkungsgrades vorgeschlagen.

Bis zu 5500 $min^{-1}$ ist auch für moderne Dieselmotoren das Drehvermögen begrenzt. Eine Erhöhung der Leistung (eine größere Luftmenge erlaubt eine höhere Einspritzmenge) ist nur durch Hubraumvergrößerung oder durch Turboaufladung möglich. Außerdem führt die Aufladung zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, denn der Abgas-

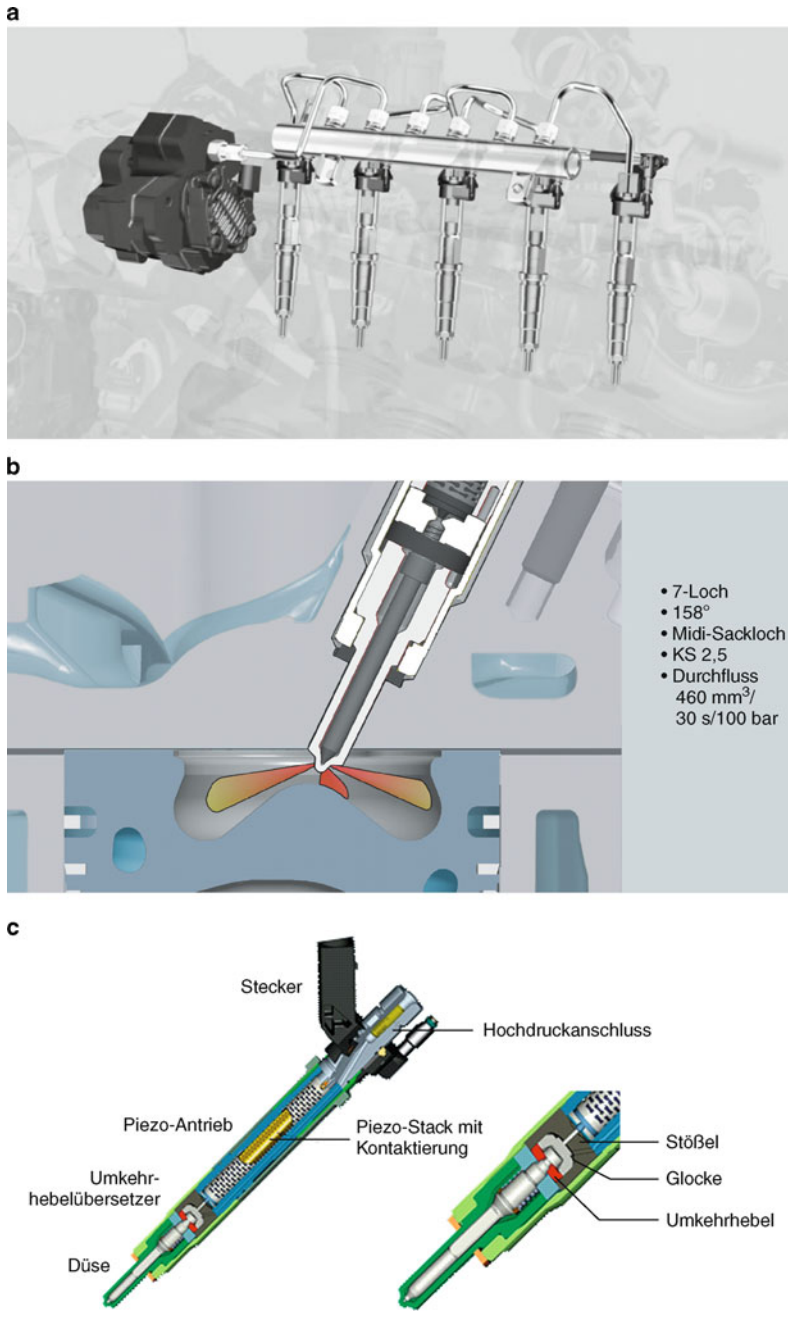



**Abb. 5.100** **a** Schematischer Aufbau des Common-Rail-Einspritzsystems für einen 5-Zylindermotor; **b** 7-Loch-Injektor mit Magnetventil; **c** Piezo-Injektor (Continental AG)

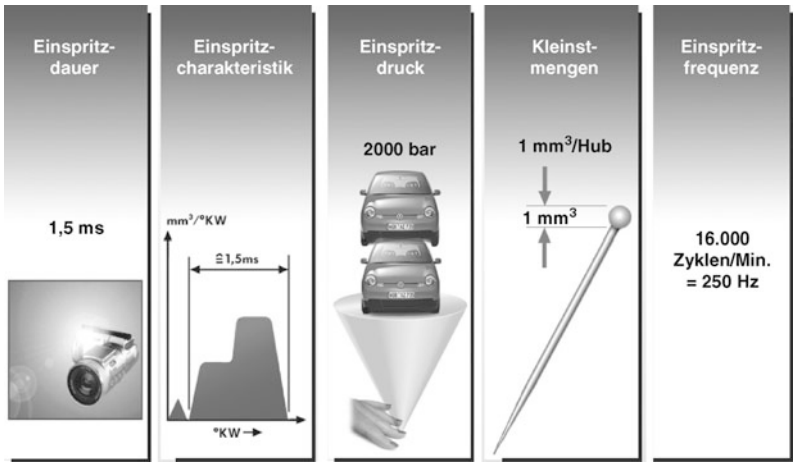



**Abb. 5.101** Charakteristika der Dieselhochdruckeinspritzung

turbolader nutzt das auf der Auslassseite gegenüber der Atmosphäre herrschende Druck- und Temperaturgefälle zur Vorverdichtung der Verbrennungsluft. Die sogenannte Gaswechselarbeit (der Arbeitsschritt, bei dem der Motor seine Arbeitsluft gegen die vor dem Zylinder liegenden Strömungswiderstände ansaugen muss) entfällt.

Der Wirkungsgrad einer Verbundmaschine aus Abgasturbolader und Kolbenmotor ist also aus verschiedenen Gründen besser. Zum einen steigt durch die höheren Arbeitsdrücke die Ausnutzung der Abgasenergie und durch den Wegfall der negativen Pumpleistung der innere Wirkungsgrad, der Aufschluss über die wärmetechnische Ausnutzung der zugeführten Energie gibt. Zum anderen wird das Verhältnis von mechanischer Verlustleistung (im Wesentlichen Reibungsverluste) im Verhältnis zur Gesamtleistung günstiger, was zu einer Verbesserung des mechanischen Wirkungsgrades führt.

Wie alle Strömungsmaschinen ist auch der Abgasturbolader für einen bestimmten Betriebspunkt des Motors optimal ausgelegt. Aufgrund der großen zu überdeckenden Drehzahlspanne des Pkw-Dieselmotors steigt der Volllast-Ladedruck besonders hoch an, was zu einer nicht erwünschten Belastung des Triebwerkes führt. Deshalb ist der Ladedruck zu begrenzen, was mit einem Waste-Gate (Bypass-Ventil) erreicht wird.

Eine Annäherung des Luftangebots des Turboladers an den betriebspunktabhängigen Luftbedarf des Motors wird heute fast ausschließlich über eine variable Turbinengeometrie (VTG) erreicht (Abb. 5.102). Um den Anforderungen (hohes Anfahrdrehmoment bei niedrigen Drehzahlen und hoher spezifischer Leistung bei hohen Drehzahlen) im gesamten Kennfeld besser gerecht zu werden, wurde die Zweistufenaufladung entwickelt. Dabei werden zwei Turbolader in Reihe geschaltet.

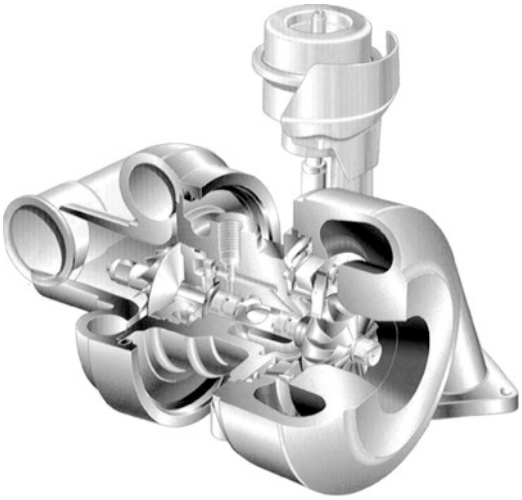


**Abb. 5.102** VTG-Lader

Als weitere Möglichkeiten bieten sich eine Registeraufladung (Parallelschaltung von mehreren Turboladern), eine Druckwellenaufladung (COM-

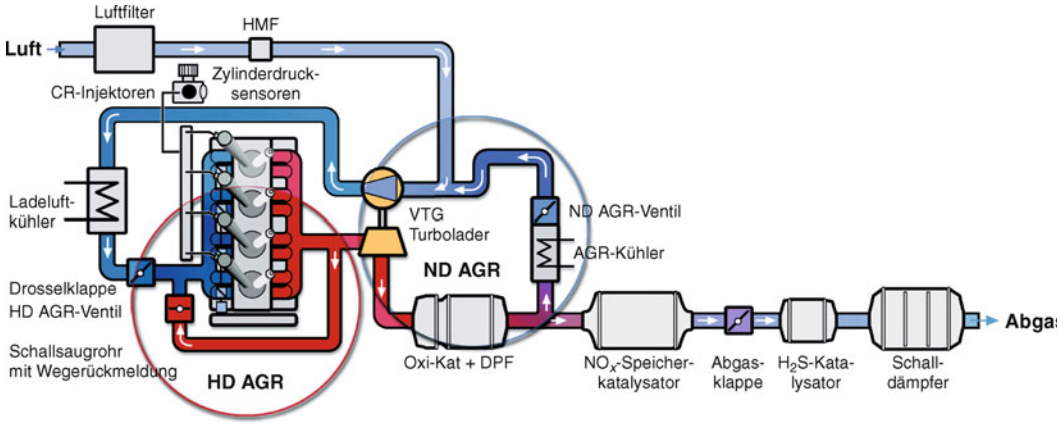



**Abb. 5.103** Schema einer Abgasrückführung (AGR) mit Umschaltung zwischen Hochdruck (HD) und Niederdruck (ND)

PREX) und mechanische Lader an, siehe ▶ Abschn. 5.3.

Die Aufladung, eigentlich beim Diesel schon sehr lange ein „Standard", bietet in Verbindung mit neuen Ansätzen beim AGR-Management und der Hochaufladung noch erhebliches Potential zur Verbesserung von Performance, Verbrauch und Emissionsreduzierung [92].

### 5.2.6.4 Abgasrückführung

Den größten Einfluss auf die $NO_x$-Reduktion hat die Abgasrückführung (AGR). Abb. 5.103 zeigt das Schema einer AGR, Abb. 5.104 eine Ausführungsform. In Abhängigkeit vom Kennfeldpunkt und der Temperatur wird ein Teil des Abgasstromes mit der angesaugten Frischluft gemischt und den Zylindern wieder zugeführt. Dadurch wird der Sauerstoffanteil während der Verbrennung reduziert und so die Verbrennungstemperatur verringert, was eine verminderte $NO_x$-Emission zur Folge hat.

Während zur Steuerung der Abgasmenge anfangs nur Ein/Aus-Ventile eingesetzt wurden, werden heute ausnahmslos pneumatisch oder elektrisch geregelte Systeme verwendet. Zur Optimierung der Effektivität werden zusätzlich Kühler mit zunehmend höherer Kühlleistung verbaut. Mit speziell entwickelten Niedertemperaturkühlkreisläufen können die Wirkungsgrade der AGR nochmals verbessert werden.

Heute eingesetzte Hochdruck-AGR-Systeme, bei denen das Abgas vor dem Turbolader entnommen wird, stoßen zunehmend an technische Grenzen hinsichtlich der Rückführmengen und der erforderlichen Kühlleistung.

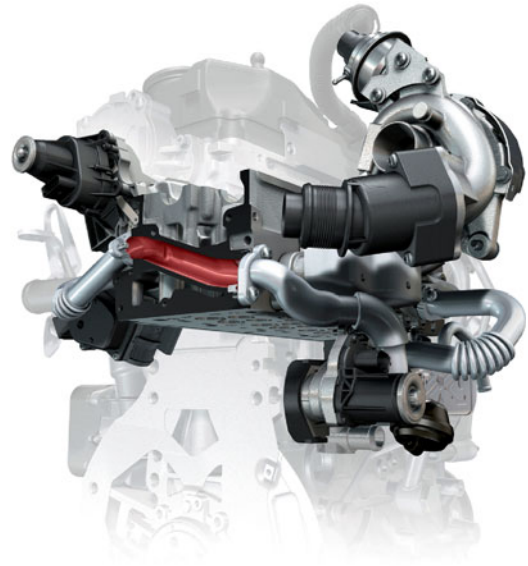


**Abb. 5.104** Ansicht Abgasrückführung (Hochdruck-AGR)

Eine konsequente technische Lösung stellt hierfür das nachfolgend beschriebene Niederdruck-Abgasrückführsystem (ND-AGR-System) dar. Die Anordnung des gesamten AGR-Systems ist in Abb. 5.103 dargestellt.

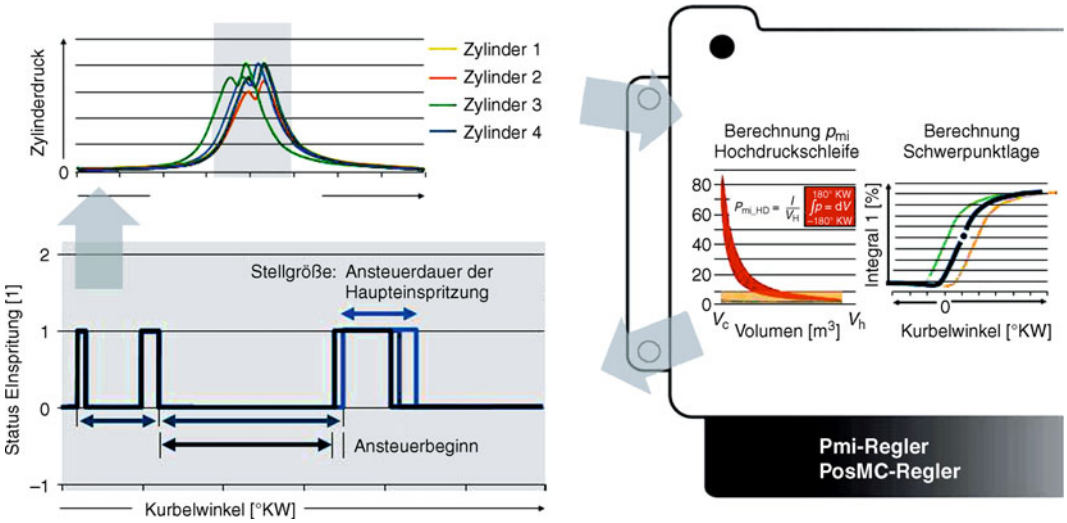



**Abb. 5.105** Funktionsweise einer Zylinderdruckregelung

Im ND-AGR-System wird das Abgas erst hinter dem motornahen Diesel-Partikelfilter (DPF) entnommen. Das katalytisch gereinigte und von Rußpartikeln befreite Abgas wird zunächst einem AGR-Kühler zugeführt. Bei Ansteuerung des elektrisch geregelten AGR-Ventils wird das Abgas über ein kurzes Verbindungsrohr direkt vor dem Verdichter des Abgasturboladers in den Ansaugluftstrom eingeleitet. Nach der Verdichtung wird der eingeregelte Abgas- und Luftmassenstrom in einem Ladeluftkühler heruntergekühlt und dem Saugtrakt des Motors zugeführt.

Mit einem Zweikreis-AGR-System bestehend aus Hochdruck- und Niederdruck-EGR lassen sich in jedem Motorbetriebszustand beinahe beliebige Abgasrückführraten und möglichst wählbare Mengenanteile von HD- und ND-AGR einstellen.

### 5.2.6.5 Luftmanagement

Das Luftführungssystem eines Dieselmotors bestehend aus Turbolader, AGR-Systemen, Ladeluftkühlern und Ladeluftrohren erfordert ein aufwendiges Luftmanagement. Aus den Signalen der Druck- und Temperatursensoren sowie mittels modellbasierter Informationen werden Daten für ein schnelles Einregeln des Kraftstoff-Luft-Gemisches generiert. Neben der Optimierung der Bauteile ist eine exakte Regelung besonders im transienten Verhalten bei modernen Motoren erforderlich.

### 5.2.6.6 Brennverfahren

Zur Erreichung hoher Emissionsziele ist es notwendig, die Systemtoleranzen auf ein Minimum zu reduzieren. Einen Beitrag hierzu liefert ein verbrennungsdruckgeregeltes Motormanagement. Dabei handelt es sich um eine zylinderdruckbasierte Verbrennungsregelung, die eine schnelle, zylinderindividuelle Regelung des indizierten Moments und der Verbrennungsschwerpunktlage erlaubt (Abb. 5.105).

Ein wichtiger Bestandteil der Verbrennungsregelung ist der Zylinderdrucksensor, der im Glühstift integriert ist. Dieser misst den Verbrennungsdruck zylinderselektiv und liefert das Signal an das Motorsteuergerät, welches aus dem gemessenen Signal die benötigten Zylinderdruckmerkmale berechnet.

### 5.2.6.7 Downsizing und Downspeeding

Die wachsenden Anforderungen an die Reduktion der $CO_2$-Emissionen erfordert u. a. eine Reduktion der Fahrzeugmasse. Dies kann durch einen leichteren Motor und ein Downsizing dargestellt werden. Der Vorteil des Downsizing (Abb. 5.106) resultiert im Wesentlichen aus der Lastpunktverschie-

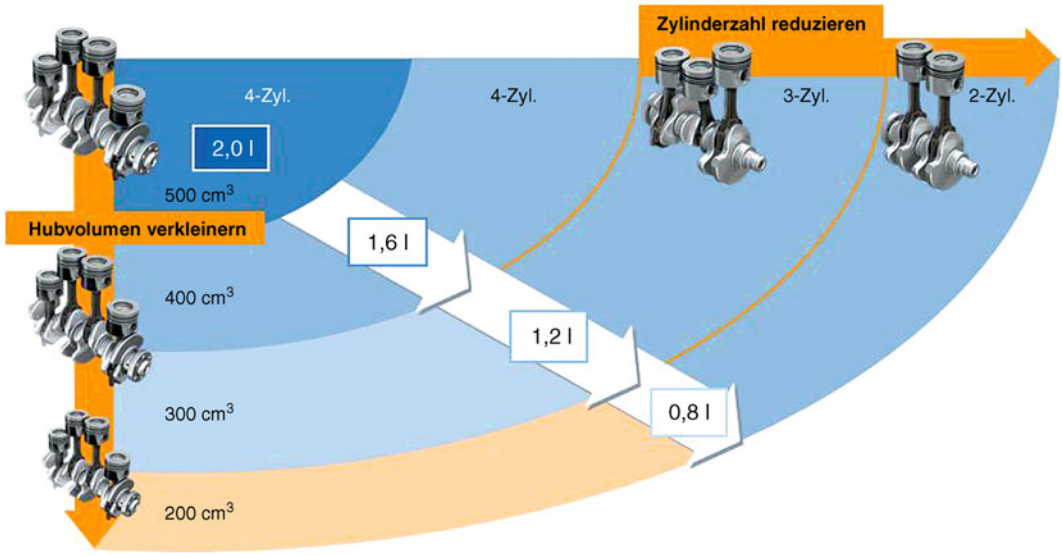



**Abb. 5.106** Downsizing (Reduktion von Zylinderanzahl und Hubvolumen)

bung. Der kleinere Motor wird aufgrund des geringeren Hubraumes spezifisch höher belastet (höherer effektiver Mitteldruck).

Eine weitere $CO_2$-Absenkung lässt sich durch eine längere Getriebeabstufung, also Reduktion der Drehzahl realisieren.

Beide Maßnahmen führen einerseits zu einer $CO_2$-Reduktion, andererseits aber zu einer $NO_x$-Erhöhung. Deshalb ist abzuwägen, wo ein Downsizing bzw. -speeding im $NO_x$-$CO_2$-Trade-off sinnvoll ist.

## 5.2.7 Abgasnachbehandlung

Die immer strenger werdenden Abgasgrenzwerte und die Forderung nach emissionsarmen Fahrzeugantrieben führen zur Entwicklung von Abgasreinigungsanlagen, die dem Motor nachgeschaltet werden [112].

### 5.2.7.1 Oxidationskatalysator (DOC)

Die Möglichkeit, CO-, HC- und PM-Emissionen durch Oxidationskatalysatoren zu verringern, wird erstmals beim Diesel-Pkw seit 1990 genutzt. Sobald die sogenannte Light-Off-Temperatur des Oxidationskatalysators, bei der der Katalysator ausreichend wirksam ist, erreicht ist, lassen sich Konversionsraten oberhalb 80 % erzielen. Neben den Minderungen von gasförmigen CO- und HC-Emissionen werden auch an Rußpartikeln adsorbierte Kohlenwasserstoffe konvertiert. Allerdings besteht bei hohen Temperaturen die Gefahr, dass aus dem im Kraftstoff gebundenen Schwefel Sulfate gebildet werden, die bei der Partikelmessung zur Bildung von Säurekondensat führen, was als Partikelmasse bewertet wird. Abhängig von der Beschichtung, der Katalysatorlage und damit vom Temperaturniveau am Katalysator sind folgende Minderungen in typischer Fahrweise erreichbar:

- HC bis 85 %,
- CO bis 90 %,
- $NO_x$ bis 10 %,
- Partikel bis 35 %.

Die Maßnahmen zur NOx-Reduzierung besonders auch die homogene Verbrennung führen in der Regel zu höheren HC- und CO-Emissionen, wodurch die Anforderung an den Wirkungsgrad des Katalysators erhöht wird. Zusätzlich wird für zukünftige Auslegungen das Light-Off-Verhalten bei noch niedrigeren Abgastemperaturen relevant, um künftige $CO_2$-Emissionen einzuhalten. Einige wichtige Entwicklungsschritte sind deshalb:

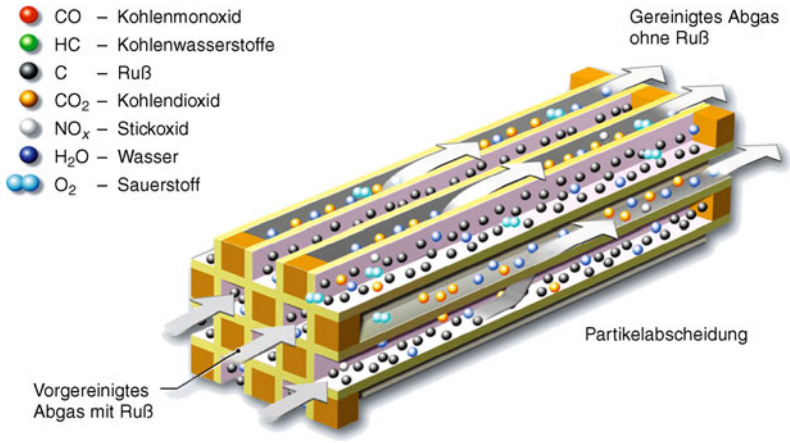



**Abb. 5.107** Funktion eines geschlossenen Dieselpartikelfilters [116]

- motornahe Anordnung,
- optimale Auslegung der Beschichtung,
- verbesserte Geometrie,
- Wanddicke, Zellenstruktur.

### 5.2.7.2 Dieselpartikelfilter (DPF)

Neue Dieselmotoren emittieren bedeutend weniger Rußmasse als ältere Konzepte, dies ist insbesondere der besseren Gemischaufbereitung zu verdanken. Um die Partikelemissionen noch weiter zu senken, werden Dieselpartikelfilter mit hoher Abscheideleistung von über 90 % eingesetzt. Die Funktionsweise ist in Abb. 5.107 dargestellt. Ein Großteil der Dieselfahrzeuge ist schon heute serienmäßig mit Partikelfiltern ausgerüstet.

Die Hauptmerkmale zur Unterscheidung der Systeme sind:

- Trägermaterial (Siliziumcarbid, Sintermetall, Aluminium-Titanat),
- Vorhandensein und Beschichtungsart des Trägermaterials,
- Additivunterstützung des Rußabbrands,
- Einbauposition als motornahes oder Unterboden-System.

Die Kanäle des Dieselpartikelfilters sind wechselseitig verschlossen. Die Abgase durchströmen die Wände, während die Partikel abgeschieden werden.

Für eine Serienapplikation ist die Filterung der Partikel nicht das Kernproblem. Es gilt die gesammelte Rußmenge unter allen Betriebsbedingungen des Motors zu oxidieren und somit eine Regeneration des Partikelfilters zu erreichen. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt:

- kontinuierliche Oxidation mit $NO_2$ (CRT-Effekt),
- thermische Oxidation mit $O_2$.

Beim CRT-System (continuously regenerating trap) wird ein kontinuierlicher Abbrand des Rußes sichergestellt (Abb. 5.108a). Es besteht aus einer Katalysator-Rußfilter-Einheit. Die Fahrzeugabgase durchströmen zuerst den Oxidationskatalysator. Im Temperaturbereich von 200–600 °C werden CO und HC fast vollständig oxidiert. NO wird zu $NO_2$ umgewandelt. Dieses $NO_2$ reagiert im DPF mit dem Kohlenstoff zu $CO_2$. Für eine einwandfreie Funktion muss hinreichend viel $NO_2$ ($NO_2$/Partikel-Verhältnis) zur Verfügung stehen. $NO_2$ wird dadurch wiederum zu NO reduziert. Diese Reaktionen laufen zwischen 200 und 500 °C ab. In diesem Bereich befindet sich das System im Gleichgewicht. So entstehen keine Temperaturspitzen.

Neben dem CRT-Effekt arbeiten alle heutigen Serienlösungen mit der thermischen Regeneration (Abb. 5.108b). Diese wird je nach eingelagerter Rußmenge eingeleitet. Die erforderlichen Abgastemperaturen werden über eine Vielfach-Einspritzung dargestellt (Abb. 5.109).

Im DPF-Regenerationsbetrieb erfolgen die Voreinspritzungen (VE) mit einer möglichst großen

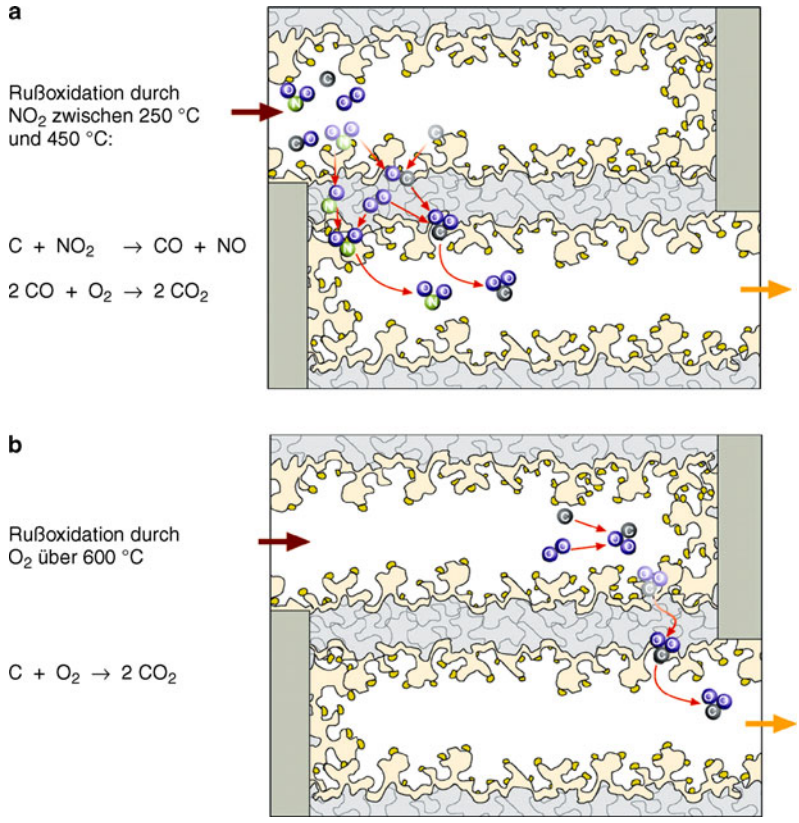



**Abb. 5.108** **a** Wirkungsweise der Regeneration durch CRT-Effekt; **b** Wirkungsweise der thermischen Regeneration [116]

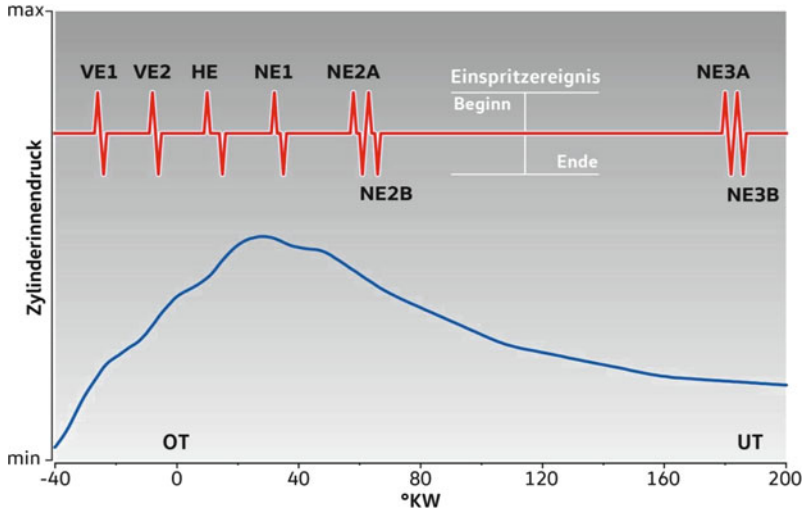



**Abb. 5.109** Zylinderdruckverlauf und Einspritzereignis über eine Kurbelwellenumdrehung

Spreizung und Spätstellung, um den Brennraum für eine Haupteinspritzung (HE) nach dem oberen Totpunkt des Kolbens (OT) ausreichend zu konditionieren. Im Anschluss daran wird die erste Nacheinspritzung (NE1) abgesetzt, die zur Rußoxidation und zur Brennraumkonditionierung für die zweite Nacheinspritzung (NE2) dient.

Mit der NE2 wird die Temperatur nach Auslassventil geregelt. Zur Reduzierung von Ölverdünnung wird die Einspritzung bei großen Mengen gesplittet (NE2A, NE2B) abgesetzt, um ein Auftreffen des Einspritzstrahls an die Zylinderwandung zu vermeiden. Die NE2 wird verwendet, um ein möglichst hohes Temperaturniveau vor Oxidationskatalysator (DOC) zu erhalten. Die dritte Nacheinspritzung (NE3) wird im Bereich des unteren Totpunktes des Kolbens (UT) abgesetzt. Die entstehenden HC-Emissionen erzeugen eine Exothermie auf dem mit Edelmetall beschichteten DOC. Auch hier wird das Einspritzereignis bei großen Mengen gesplittet durchgeführt. Mit dem Zusammenspiel aus später HE, angehängter NE1, hoher Temperatur nach Auslassventil mittels NE2 und einer exothermen Temperaturerhöhung durch die NE3, wird eine ausreichend hohe Temperatur im DPF bereit gestellt, um den eingelagerten Ruß zu oxidieren (regenerieren).

Mittels Temperatur-, Druck-, und Lambda-Sensoren werden die erforderlichen Zündbedingungen des eingelagerten Rußes vom Motorsteuergerät eingestellt und überwacht.

Mit den aktiven Abgasnachbehandlungssystemen steigen die Qualitätsanforderungen an die Betriebsstoffe. Bei der Verbrennung metallhaltiger Additivkomponenten des Motoröls entsteht Asche, die zu irreversiblen Ablagerungen im DPF führen und dessen Lebensdauer verkürzen.

### 5.2.7.3 Entstickung

Zur Reduzierung der Stickoxidemissionen haben sich zwei Abgasnachbehandlungssysteme für Dieselfahrzeuge auf dem Markt durchgesetzt. $NO_x$-Speicherkatalysatoren und SCR-Systeme (Selective Catalytic Reduction) werden bereits vielfach zum Erreichen der EU6-Grenzwerte eingesetzt. Einige Fahrzeughersteller bieten je nach Fahrzeugkonzept oder Abgasvorschrift beide Systeme an [112].

**NOx-Speicherkatalysator (NSK)** Neben den für die Oxidation und Reduktion notwendigen Edelmetallen (z. B. Pt, Pd, Rd) werden die Katalysatoren zur $NO_x$-Speicherung mit Erdalkalimetallen (Barium) und seltenen Erden (z. B. Cer) beschichtet, die in Form von Carbonat oder Oxid vorliegen. Diese Speicherkomponenten sind in der Lage, die im Abgas enthaltenen Stickoxide im Magerbetrieb durch Nitratbildung zu adsorbieren (◘ Abb. 5.110a). Stößt die NOx-Speicherkapazität an ihre Grenze, ist ein kurzzeitiger unterstöchiometrischer Motorbetrieb (Lambda $< 1$) notwendig. Das Abgas enthält dann hohe Konzentrationen an Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Wasserstoff ($H_2$). Durch die reduzierenden Abgasbedingungen werden zunächst die im Speicherkatalysator eingelagerten Stickoxide desorbiert und stellen auf diese Weise den ursprünglichen Zustand der $NO_x$-Speicherkomponenten wieder her. Gleichzeitig wird auch der gespeicherte Sauerstoff von den entsprechenden Speicherkomponenten freigegeben. Durch die vom 3-Wege-Katalysator bekannten chemischen Reaktionen werden dann an den Edelmetallkomponenten die Stickoxide zu $N_2$ reduziert sowie die Kohlenwasserstoffe und das Kohlenmonoxid zu $H_2O$ und $CO_2$ oxidiert.

Nachteilig am $NO_x$-Speicherkatalysator ist seine Empfindlichkeit gegenüber dem im Kraftstoff vorhandenen Schwefel, der mit der $NO_x$-Speicherkomponente stabile Sulfate bildet und dadurch für die Speicherung der Stickoxide blockiert (◘ Abb. 5.110b). Daher ist ein Entschwefelungsvorgang bei deutlich höheren Temperaturen (ab ca. 600 °C) im Vergleich zur Entstickung notwendig sowie längere Fettbetriebsphasen. In diesem Temperaturbereich, der auch unter Volllast sowie während der Partikelfilterregeneration erreicht werden kann, setzt eine nennenswerte thermische Alterung ein. Die erreichbaren $NO_x$-Umsatzraten sind durch die Abgastemperatur (ca. 150–450 °C) und die Raumgeschwindigkeit begrenzt.

In ◘ Abb. 5.111 ist ein motornahes Abgasreinigungsmodul bestehend aus einem $NO_x$-Speicherkatalysator (NSK) und einem nachgeschalteten beschichteten Partikelfilter eines EU6-Motors dargestellt.

Die Abgasanlage besitzt zwei Lambdasonden. Die Lambdasonde vor dem NSK übernimmt die Re-

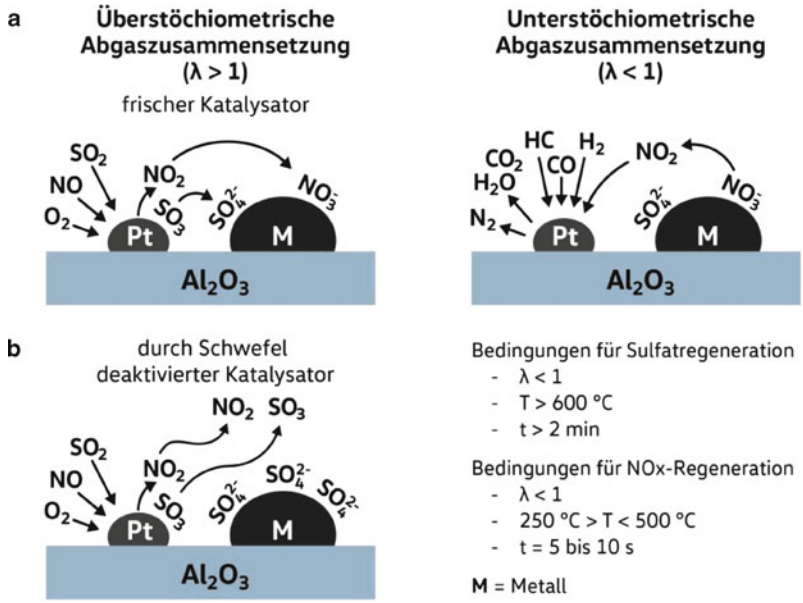



**Abb. 5.110** **a** Funktion der $NO_x$-Speichertechnologie und **b** Einfluss des Schwefels im Kraftstoff [118]

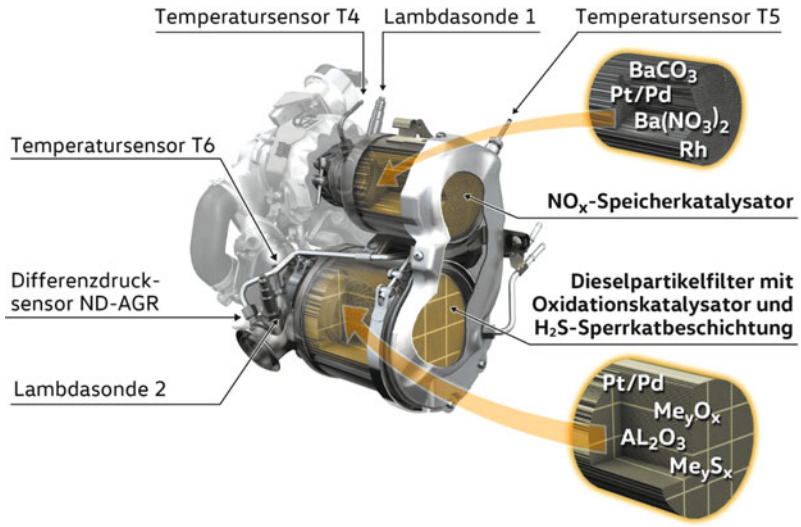



**Abb. 5.111** Aufbau der Abgasanlage mit $NO_x$-Speicherkatalysator [114]

gelung der luftreduzierten Betriebsarten für den Regenerationsbetrieb des $NO_x$-Speicherkatalysators. Sie bildet zudem die Eingangsgröße für das im Motorsteuergerät hinterlegte Modell zur Bestimmung der $NO_x$- und Rußemissionen des Motors. Mit Hilfe der zweiten Lambdasonde wird ein Reduktionsmittelüberschuss in der Regenerationsphase erkannt, woraus der Beladungs- und Alterungszustand des $NO_x$-Speicherkatalysators bestimmt wird.

Die drei in die Abgasanlage integrierten Temperatursensoren bilden die Eingangsgrößen für die

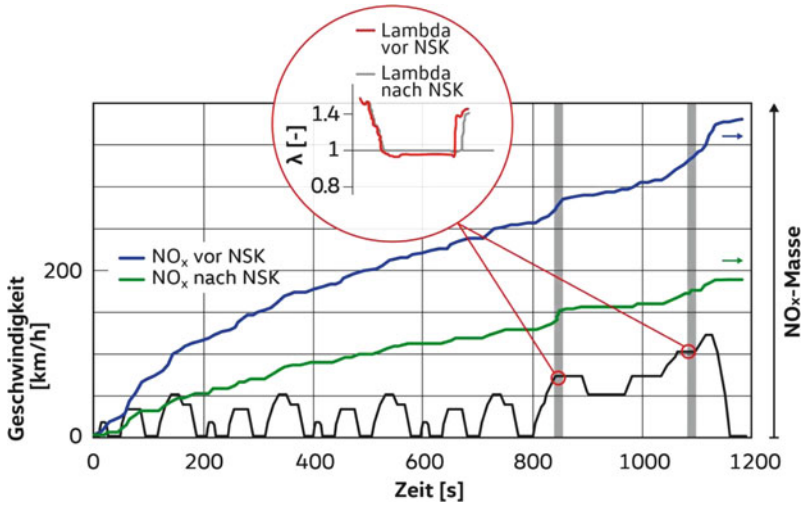



**Abb. 5.112** DeNO$_x$-Strategie [114]

Regelung der Regenerationsbetriebsarten und des Abgastemperaturmodells.

**Regenerationsbetriebsarten** Die Ergänzung des Abgasnachbehandlungssystems durch einen NO$_x$-Speicherkatalysator bedeutet die Einführung zusätzlicher Regenerationsbetriebsarten, um die NO$_x$-Konvertierung sicherzustellen.

**DeNO$_x$-Strategie** Zur Regeneration des NO$_x$-Speicherkatalysators (DeNO$_x$-Betrieb) ist eine unterstöchiometrische Abgaszusammensetzung notwendig. Im $\lambda < 1$-Betrieb werden die während des Magerbetriebs eingelagerten Stickoxide durch die im Abgas angereicherten Reduktionsmittel bestehend aus HC, CO und $H_2$ umgesetzt.

Der DeNO$_x$-Betrieb stellt hohe Anforderungen an die Motorapplikation. Trotz der stark angedrosselten Frischluftmasse und der gleichzeitigen Erhöhung der Einspritzmenge mittels mehrerer Nacheinspritzungen muss der Motorbetrieb in allen Fahrsituationen drehmomentenneutral und akustisch unauffällig bleiben. Die Sauerstoffkonzentration und die Abgaskomponenten, die zur Reduzierung der eingespeicherten NO$_x$-Masse nötig sind, werden in der DeNO$_x$-Phase mittels eines Lambda-Reglers eingeregelt. Mittels eines Modells zur Bestimmung der Oberflächentemperatur auf dem NO$_x$-Speicherkatalysator wird sichergestellt, dass dieser während der DeNO$_x$-Phase im optimalen Wirkbereich arbeitet.

Die Auslösung der DeNO$_x$-Regeneration wird über ein im Motorsteuergerät berechnetes Be- und Entladungsmodell gesteuert. Anhand der hinterlegten NO$_x$-Speicherkurven, der berechneten Katalysatoroberflächentemperatur und der NO$_x$-Massenströme wird die Beladung des NSK simuliert. Eine Korrektur in Abhängigkeit von der thermischen Alterung garantiert einen effizienten Betrieb des NO$_x$-Speicherkatalysators über die gesamte Fahrzeuglebensdauer. Alternativ kann die NO$_x$-Speicherfähigkeit auch über NO$_x$-Sensoren bestimmt werden. Für die Bestimmung des Regenerationsendes wird die Entladung des NO$_x$-Speicherkatalysators mit Hilfe des Reduktionsmittelmassenstromes modelliert.

Die DeNO$_x$-Häufigkeit und -Dauer kann je nach Katalysatorvolumen und NO$_x$-Rohemissionen stark variieren. Die Magerphasen liegen in der Größenordnung von 5–15 Minuten, die Fettbetriebsphasen bei ca. 5–15 Sekunden. Abb. 5.112 zeigt ein Beispiel eines NEFZ mit zwei DeNO$_x$-Phasen.

**DeSO$_x$-Strategie** Der im Dieselkraftstoff enthaltene Schwefel führt durch Sulfatbildung kontinuierlich zu einer Deaktivierung des NO$_x$-Speicherkatalysators. Das Motorsteuergerät berechnet die verringer-

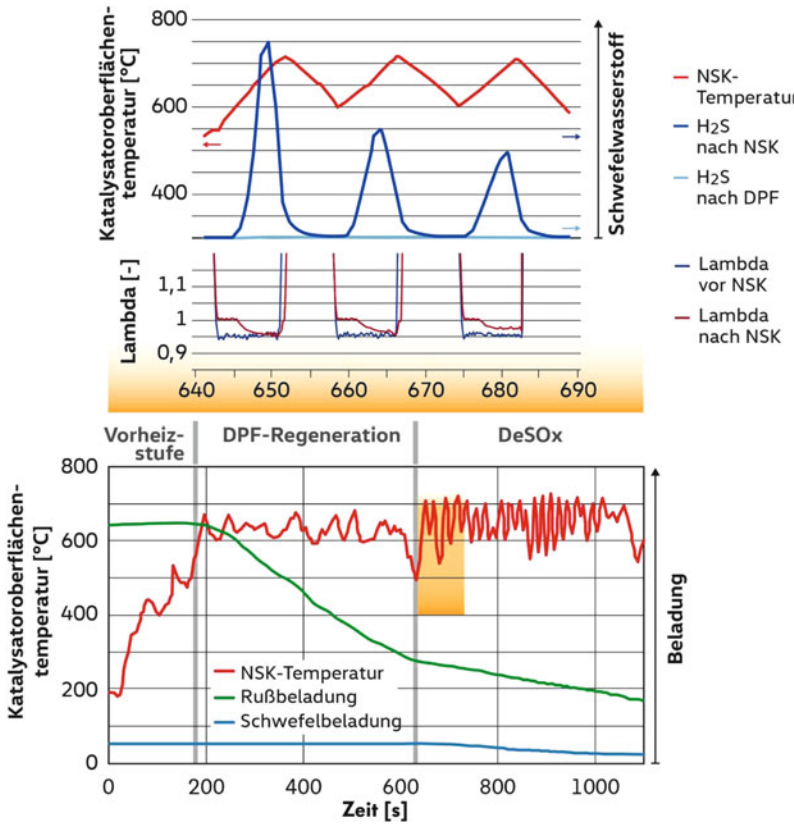



**Abb. 5.113** $DeSO_x$-Strategie [114]

te Speicherfähigkeit und berücksichtigt sie bei der $DeNO_x$-Anforderung.

Bei sinkenden $NO_x$-Umsätzen und Überschreitung einer kritischen Schwefelbeladung erfolgt zur Reaktivierung des NSK eine Desulfatisierung ($DeSO_x$-Betrieb). Aufgrund der hohen thermischen Stabilität der Sulfate ist eine signifikante Entschwefelung in reduzierender Atmosphäre erst bei Temperaturen oberhalb von ca. 600 °C möglich. Das Motorsteuergerät berechnet die Schwefelbeladung über ein Modell und bestimmt daraus den Zeitpunkt der Entschwefelung. Bei dem in Europa vorgeschriebenen Schwefelgehalt von maximal 10 ppm ergibt sich ein $DeSO_x$-Intervall von ca. 500–2000 km. Um das notwendige Aufheizen der Abgasanlage zu verkürzen, kann der $DeSO_x$-Betrieb vorteilhafterweise mit der Partikelfilterregeneration gekoppelt werden.

Abb. 5.113 zeigt den Ablauf einer kombinierten DPF-Regeneration mit einer Entschwefelung. Ist die Rußbeladung auf eine unkritische Menge abgesunken, beginnt die Entschwefelung. Während der Magerphasen wird die Rußbeladung weiter abgebaut, so dass am Ende des $DeSO_x$-Betriebs auch die Partikelfilterregeneration beendet ist.

Für die Entschwefelung wird der Motor alternierend im Fett-/Magerbetrieb betrieben. Während der Schwefelaustrag nur unter Luftmangel stattfindet, dient der Magerbetrieb zur Konditionierung. Je nach Katalysatoranordnung (motornah/motorfern) kann er überwiegend zum Kühlen oder Heizen verwendet werden.

Die Dauer der Fettphasen wird bei motornaher Anordnung im Wesentlichen durch die Katalysatortemperatur begrenzt. Im Fettbetrieb wird die Exothermie durch den zur Verfügung stehen-

den Restsauerstoff sowie durch den Sauerstoffspeicher limitiert. Auf Grundlage dieser Größen, der Katalysator-Eingangstemperatur und des Massenstroms modelliert das Motorsteuergerät die Katalysatoroberflächentemperatur. Die Dauer der Fettphasen ist so ausgelegt, dass eine Temperatur von 750 °C nicht überschritten wird. Somit ist eine höchst effiziente Entschwefelung gewährleistet und eine irreversible thermische Schädigung des Speichermaterials wird vermindert.

Wie in ◘ Abb. 5.113 ersichtlich, wird der Großteil des Schwefels erst nach dem Fettdurchbruch in Form von Schwefelwasserstoff ($H_2S$) freigesetzt. Um eine $H_2S$-Bildung zu vermeiden, müsste der unterstöchiometrische Betrieb unmittelbar nach dem Fettdurchbruch beendet werden. Dies würde jedoch die Dauer der Entschwefelung und damit auch die thermische Alterung deutlich erhöhen. Daher wird zumeist ein Sperrkatalysator, im hier eingesetzten System auf dem Partikelfilter integriert, der das $H_2S$ während der Magerphasen komplett zu $SO_2$ umsetzt. Je nach Fahrsituation ist die $NO_x$-Speicherkapazität nach einer Dauer von etwa 10 bis 15 Minuten wiederhergestellt.

**SCR-Abgasnachbehandlung** Die selektive katalytische Reduktion (SCR) mit Ammoniak als Reduktionsmittel über einen Katalysator ist bereits seit Jahren aus der Entstickung stationärer Großfeuerungsanlagen bekannt. Die Grundreaktion basiert auf der Umsetzung von Stickoxidemissionen ($NO_x$) mit Ammoniak ($NH_3$) zu Stickstoff ($N_2$) und Wasser ($H_2O$). Die Reaktionswahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit zur Temperatur und Gaszusammensetzung sowie des Katalysatormaterials bestimmt. Vereinfacht gilt:

$$4\,NO + 4\,NH_3 + O_2 \rightleftharpoons 4\,N_2 + 6\,H_2O$$

als „Standard-SCR-Gleichung“,

$$2\,NO + 2\,NO_2 + 4\,NH_3 \rightleftharpoons 4\,N_2 + 6\,H_2O$$

als „Schnelle-SCR-Gleichung“ und

$$6\,NO_2 + 8\,NH_3 \rightleftharpoons 7\,N_2 + 12\,H_2O$$

als „Langsame-SCR-Gleichung“.

Mitführung und Handling von Ammoniak als Direktsubstanz sind bei dynamischer Anwendung im automobilen Bereich aufgrund des hohen Gefahrenpotentials nur mit hohem technischem Aufwand möglich, was zum Einsatz von Reduktionsmittelträgerstoffen wie z. B. Harnstoff führt [115]. Die wässrige Harnstofflösung mit dem Handelsnamen AdBlue hat sich als Ammoniakvorläufersubstanz durchgesetzt und ist genormt. Das Reduktionsmittel Ammoniak wird aus Harnstoff $(NH_2)_2CO$ durch einen zweistufigen Prozess der Thermolyse und Hydrolyse gebildet:

$$(NH_2)_2CO + H_2O \rightleftharpoons 2\,NH_3 + CO_2$$

Das SCR-System in der Fahrzeuganwendung lässt sich einteilen in abgas- und fluidführenden Bauteilkomponenten, Gasmischstrecke, Katalysator sowie Software- und Regelungseinheit.

In ◘ Abb. 5.114 wird das SCR-System als Schema dargestellt.

Das Fluidsystem beinhaltet einen Reduktionsmittelbehälter, ein Fördersystem aus Pumpe sowie Leitung und einer Dosiereinrichtung. Der Reduktionsmittelbehälter wird im Allgemeinen dem vorhandenen Fahrzeugbauraum angepasst, so dass ebenfalls geteilte Systeme Verwendung finden können. In ◘ Abb. 5.115 ist der Tankbehälter beispielsweise im Bereich des Radlaufs untergebracht. Ein integrierter Tankfüllstandsgeber sowie ein AdBluequalitätssensor dienen dabei der Sicherstellung der SCR-Funktion und erfüllen damit auch Aspekte der Überwachungsvorschrift abgasrelevanter Bauteile. Das AdBlue friert bei Temperaturen unter −11 °C ein, was die Installation von Heizelementen in den Tank erfordert. Die Heizstrategie ist so abgestimmt, dass auch bei gefrorenem Tank nach Kaltstart immer eine ausreichende Menge Flüssigkeit aufgetaut wird. Das AdBlue wird mittels einer Förderpumpe über eine beheizte Dosierleitung zu einer Dosiervorrichtung befördert. Die Förderpumpe kann beidseitig ausgelegt sein und baut den notwendigen Systemdruck auf oder entleert durch Rücksaugen die Dosierleitung. Die Beheizung der Dosierleitung erfolgt über Heizwendeln und kann ebenfalls über eine Heizstrategie geregelt sein, so dass ein Einfrieren im Fahrbetrieb verhindert wird. Die Dosiereinrichtung ist beim Pkw überwiegend ohne Druckluftunterstützung im Gegensatz zu einigen Systemen im Nutzfahrzeugbereich ausgestattet. In Abhängigkeit der Anbauposition kann das Do-

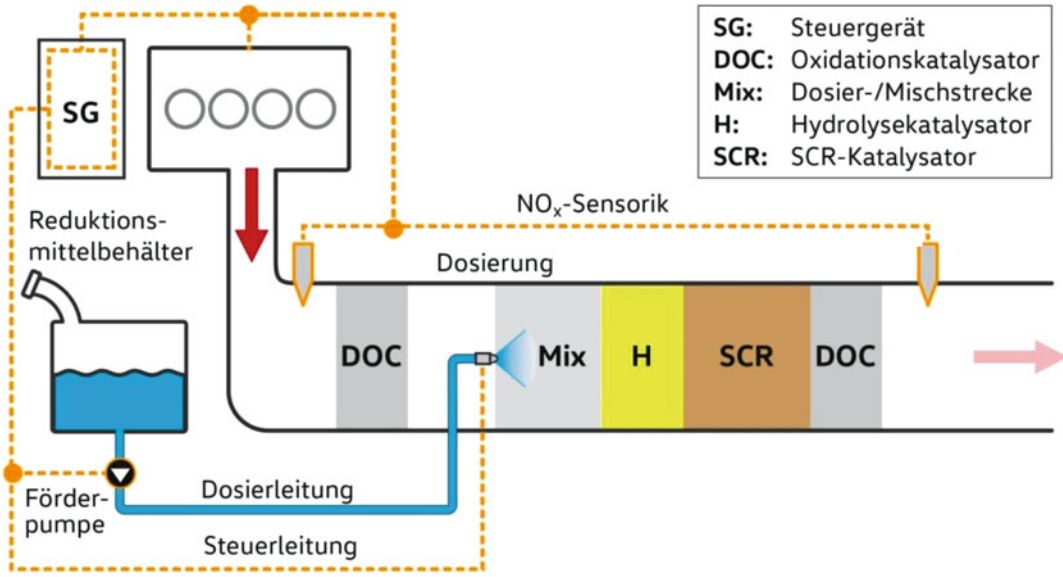



**Abb. 5.114** Schema eines SCR-Systems mit wässriger Harnstofflösung als Reduktionsmittelträger [117]

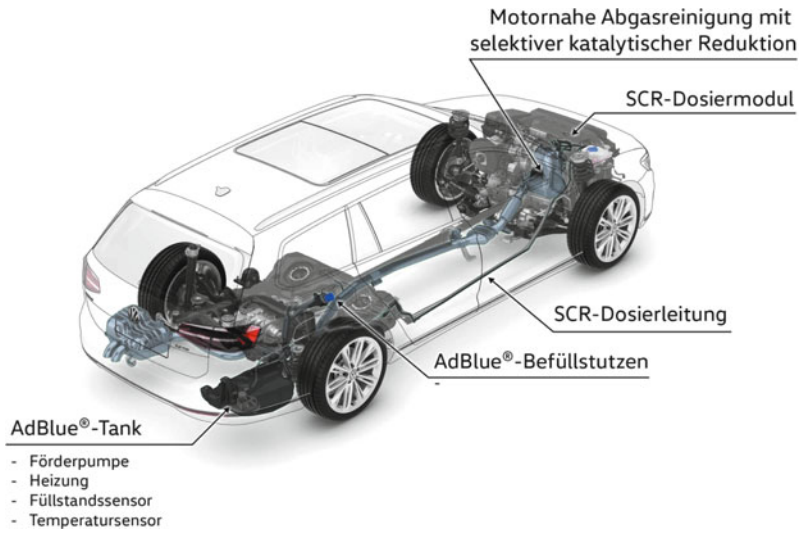



**Abb. 5.115** Integration eines SCR-Systems im Volkswagen Passat [118]

siermodul sowohl passiv über Kühlrippen als auch aktiv über eine Fluidzirkulation der Motorkühlflüssigkeit oder des Reduktionsmittels ausgeführt sein.

Das Abgassystem der SCR-Abgasnachbehandlung kann im Unterboden [Abb. 5.116] oder motornah im Motorraum angeordnet sein.

Motornahe Konzepte [Abb. 5.117] zeichnen sich durch höhere Abgastemperaturen aus und führen somit zum frühen Erreichen des SCR-Aktivitätsfensters.

Ein vorgeschalteter Oxidationskatalysator, der neben der CO- und HC-Oxidation zusätzlich zur Bildung des $NO_2$ dient, kann dabei den Wirkungs-

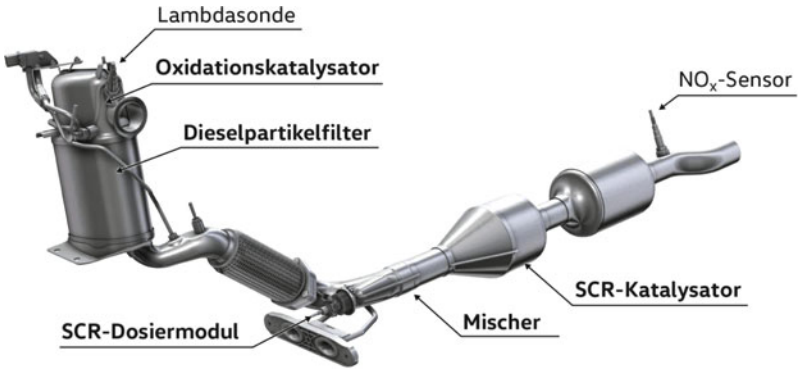



**Abb. 5.116** SCR-Abgasreinigung im Unterboden [115]

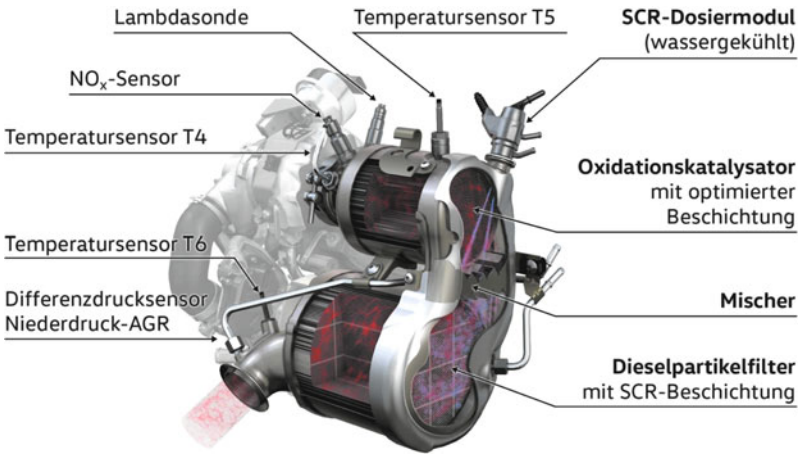



**Abb. 5.117** Motornahe SCR-Abgasreinigung [113]

grad der SCR-Reaktion weiter erhöhen. Die Optimierung der $NO_2$-Bildung des Oxidationskatalysators erfolgt in der Regel durch die Anpassung der Beschichtungsart, der Edelmetallmenge und des Verhältnisses.

Die Reduktionsmitteleinbringung kann direkt vor dem SCR-Katalysator erfolgen oder über Vorkammersysteme realisiert werden. Die Verwendung eines Mischers zur besseren Homogenisierung ist insbesondere bei kurzen Mischstrecken notwendig. Die Ausgestaltung des Mischers erfolgt bauraumspezifisch und steht im Zielkonflikt guter Gleichverteilung, geringem Abgasgegendruck, hoher Robustheit gegenüber Bauteiltoleranzen und geringer Ablagerungsneigung [113].

Nach der Mischstrecke folgt der SCR-Katalysator, in dem die eigentliche $NO_x$-Minderung des Abgases stattfindet. Die Beschichtung des SCR-Katalysators kann auf einem Durchflusssubstrat oder einem Partikelfilter aufgebracht sein.

Generell kommen zwei Arten von SCR-Katalysatoren zum Einsatz. Im Nutzfahrzeug werden primär Vanadiumpentoxidhaltige Beschichtungen eingesetzt. Diese Katalysatoren weisen nur eine thermische Stabilität bis 600 °C auf, daher werden bei der Pkw-Anwendung mit aktiver Partikelfilterregeneration thermisch stabilere Metallzeolithen wie Cu- oder Fe-Zeolithe verwendet. Bei der Auswahl des Katalysators ist ein wichtiges Kriterium eine ausgeprägte Katalysatoraktivität gegenüber

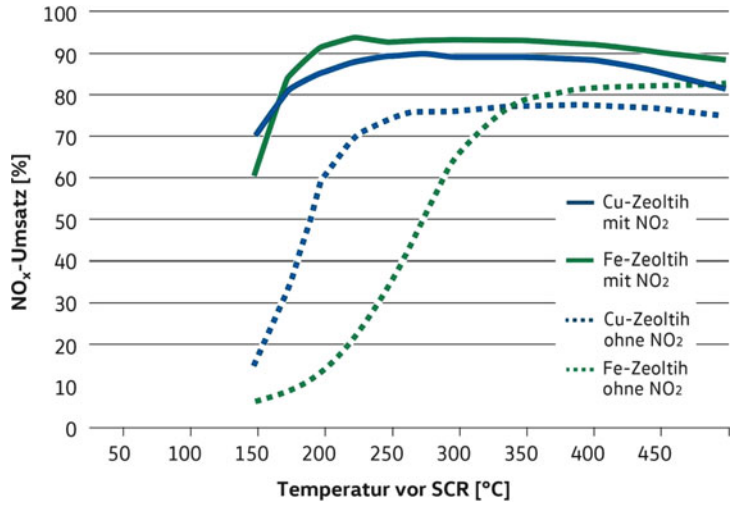



**Abb. 5.118** Arbeitsfenster verschiedener Metallzeolithe in Abhängigkeit der $NO_2$-Konzentration [115]

NOx unterhalb von 250 °C Abgastemperatur. In Abb. 5.118 ist der NOx-Umsatz von einer typischen Eisen (Fe)- und Kupfer (Cu)-Zeolithbeschichtung als Funktion der Abgastemperatur mit und ohne $NO_2$ im Abgas dargestellt. Gegenüber dem Fe-Zeolith weist der Cu-Zeolith hier Vorteile in der Aktivität auf, da er unabhängiger von der $NO_2$-Bildung des Oxidationskatalysators ist. Beim Einsatz von Cu-Zeolithen kommen in der Regel keine zusätzlichen vorgeschalteten Hydrolysekatalysatoren zum Einsatz. Da der Katalysator bereits selbst durch seine große katalytische Oberfläche die Hydrolyse der Harnstofflösung beschleunigt.

Die Metallzeolithen besitzen eine gewisse $NH_3$-Speicherkapazität, die mit zunehmender Temperatur abnimmt. Bei sehr dynamischer Fahrweise, inhomogener $NH_3$-Verteilung auf dem SCR-Katalysator bzw. durch starke Alterungseffekten kann es je nach Katalysatorauslegung zu einem unerwünschten $NH_3$-Schlupf kommen. Um den Austrag von $NH_3$ an die Umwelt zu verhindern, kann nach dem SCR-Katalysator ein $NH_3$-Sperrkatalysator eingebaut werden. Der Sperrkatalysator besitzt eine Edelmetallbeschichtung die selektiv $NH_3$ zu Stickstoff oxidiert. Zusätzlich übernimmt er die Aufgabe das bei der Rußregeneration entstehende CO durch die edelmetallhaltige Beschichtung zu $CO_2$ zu oxidieren.

Der Reduktionsmittelverbrauch steht in Abhängigkeit der Fahrwiderstände und der Fahrweise. Typische Verbräuche ergeben sich mit 1,0 l–1,8 l/1000 km beim Pkw und SUV sowie 1,5–4,0 l bei leichten Nutzfahrzeugen. Die Befüllöffnung des AdBlue-Tanks kann sich fahrzeugspezifisch im Innenraum, z. B. Kofferraum, im Motorraum oder hinter der Tankklappe befinden. Die Befüllrohre sind fahrzeugspezifisch ausgelegt und zunehmend für eine Befüllung mit hohen Volumenströmen per Zapfpistole geeignet. Grundsätzlich wird AdBlue in verschiedenen Gebindeeinheiten nach Abb. 5.119 vertrieben.

Die Befüllung mit den dargestellten Flaschen und Kanister-/Schlauch-Lösungen erfolgt tropffrei und geruchsneutral über einen Drehverschluss mit Gaspendelverfahren. Im Service wird in der Regel mittels Fassware betankt. Der Ausbau der AdBlue-Infrastruktur ist seit 2005 mit Einführung der SCR-Technologie im Nfz-Segment stetig gewachsen. An großen Tankstellen befinden sich insbesondere für Nfz bereits einige fest installierte Tanksäulen mit AdBlue.

### 5.2.7.4 Real Driving Emissions

Die derzeitige Emissionsgesetzgebung soll durch eine Überprüfung der Real-Driving-Emissions (RDE) ergänzt werden. Der hierbei durchzu-




**Abb. 5.119** Übersicht von AdBlue-Betankungsmöglichkeiten [118]

führende Emissionstest erfolgt nicht mehr unter Laborbedingungen auf einem Rollenprüfstand sondern direkt im freien Verkehr auf der Straße. Es liegen damit sowohl kein festes Fahrprofil als auch keine festen Testrandbedingungen (z. B. Dauer, Streckenaufteilung, Dynamik, etc.) mehr vor. Vielmehr beschreiben die im Gesetz definierten sogenannten Boundary Conditions zulässige Gültigkeitsbereiche, welche die Bandbreite einer Normalfahrt (normal condition of use) charakterisieren sollen. Die Schadstoffmengen können nicht mehr mit einer stationären Anlage vermessen werden, sondern die Erfassung erfolgt mit Hilfe einer PEMS-Anlage (Portable Emission Measurement System), bei der die Abgaskonzentrationen und der -massenstrom am Auspuffende kontinuierlich gemessen werden. Die daraus berechnete jeweilige sekündliche Abgasmenge wird integriert und am Ende durch die absolvierte Fahrstrecke geteilt. Zum Abschluss der Messfahrt werden sowohl die Gültigkeit der Messung über Normalisierungstools validiert als auch die Einhaltung der Boundary Conditions überprüft.

Die RDE-Gesetzgebung soll in drei Stufen eingeführt werden:

- Monitoring-Phase ab 2016 ohne Emissionsgrenzwerte,
- Stufe 1 ab 09/2017 mit Interim-Grenzwerten,
- Stufe 2 ab 01/2020 mit finalen Grenzwerten.

Die letztlich finale Version zum RDE-Gesetzestext liegt zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags noch nicht vor.

## 5.2.8 Dieselkraftstoffe

Die Qualität der Dieselkraftstoffe beeinflusst verschiedene Komponenten der Dieselfahrzeuge (Abb. 5.120). Gegenwärtig ist weltweit aber ein Trend zur Diversifikation der Dieselkraftstoffe zu beobachten. Verursacht wird dies auch durch den Versuch, mineralbasierte Kraftstoffe durch Biokraftstoffe zu ersetzen. Da sich die Kraftstoffe in ihren Spezifikationen (Abb. 5.121) wesentlich unterscheiden, stellt dies zusätzliche Herausforderungen an die Materialien und Abstimmung der Konzepte dar.

Die Forderungen der weltweiten Verbände der Automobilindustrie [102] sind in der Worldwide Fuel Charter WWFC zusammengefasst. Die wichtigsten Aussagen sind:

1. Cetanzahl
   Eine Anhebung der Cetanzahl auf mind. 58 und des Cetanindex auf mind. 54 ist wegen

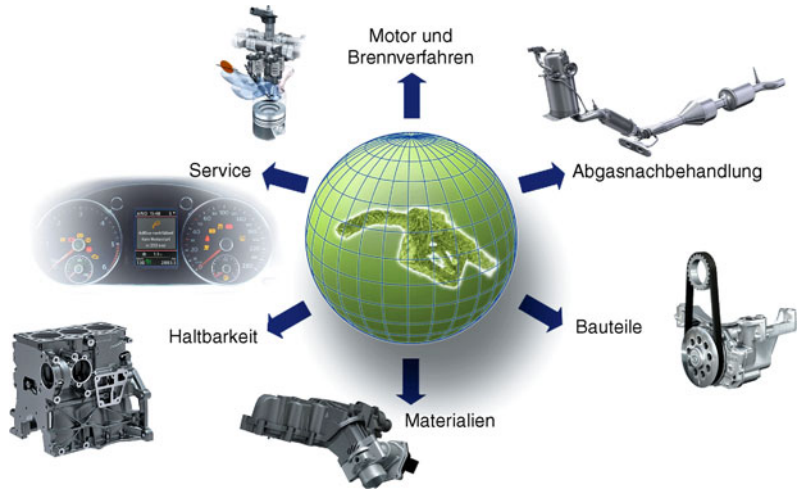



**Abb. 5.120** Einfluss des Kraftstoffes auf die verschiedenen Komponenten des Dieselmotors

| | Diesel | Biodiesel | Hydriertes Pflanzenöl | BTL |
|---|---|---|---|---|
| Energie [MJ/kg] | 41–42 | 37 | 42 | 43 |
| CZ | > 51 | > 51 | > 70 | > 70 |
| S [mg/kg] | < 50 | < 10 | < 10 | < 5 |
| Aschebildner [mg/kg] | 1–2 | 1–20 | < 1 | < 1 |
| Chemie | Paraffin, Aromat<br>Kohlenwasser-stoffgemisch | Methanol, Fettsäure<br>Ester | Paraffin<br>Paraffin | Paraffin<br>Paraffin |
| Siedeverhalten | % °C | % 330 °C °C | % °C | % °C |

**Abb. 5.121** Eigenschaften verschiedener Dieselkraftstoffe

der Verbesserung der Zündwilligkeit und damit des Kaltstarts und der Verbrennung erforderlich (Abb. 5.122).

2. Dichte
   Eine Eingrenzung (Minimal- und Maximalwert) ist für die Abstimmung der Motoren wichtig. Die Dichte hat einen direkten Einfluss auf die Abgasemissionen. Der Bereich von 820–840 kg/m$^3$ wird für notwendig gehalten.
3. Aromaten
   Die mehrkernigen aromatischen Kohlenwasserstoffe haben einen großen Einfluss auf die Bildung von Dieselpartikeln. Deshalb sollten die polyzyklischen Aromaten auf max. 1 Gew. % und die Gesamtaromaten auf max. 10 Gew. % begrenzt werden (Abb. 5.123 und Abb. 5.124).
4. Schwefel
   Schwefel im Kraftstoff trägt zur Partikelbildung bei. Durch Verwendung schwefelarmer Qualitäten können die Emissionen aller im Betrieb befindlichen Fahrzeuge reduziert werden. Der Schwefel beeinflusst auch das Anspringverhalten der Oxidationskatalysatoren: Zum Erreichen der vollen Wirksamkeit werden höhere Abgastemperaturen benötigt, d. h. die Kaltstartphase wird verlängert und die Kaltstartemissionen werden damit erhöht [103].

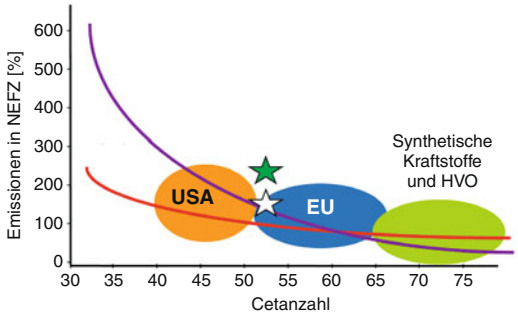



**Abb. 5.122** Abhängigkeit der Abgasemissionen von der Cetanzahl

5. Siedeende
   Das Siedeende ist ein Hinweis auf den Gehalt schwersiedender Kohlenwasserstoffe (hauptsächlich PAH's), die sich schwer verbrennen lassen und wesentlich zur Partikelbildung beitragen. Deshalb sollte das Siedeende auf 350 °C herabgesetzt werden.

Mit einer Verbesserung der Kraftstoffqualität kann eine sofortige Emissionsminderung aller im Bestand betriebenen Fahrzeuge erreicht werden.

Neben diesen die heutige Technologie beeinflussenden Effekten, ist die Schwefelminderung unbedingte Voraussetzung für die Einführung zukünftiger Abgasnachbehandlungstechnologien wie z. B. für den DeNO$_x$-Katalysator. Schwefel vergiftet diese Speichersysteme. Deshalb ist eine Begrenzung auf max. 15 ppm (schwefelarmer Kraftstoff) erforderlich. Diese Forderung wurde bereits in der Europäischen Union umgesetzt. Eine weitere Durchdringung in anderen Teilen der Welt, in denen anspruchsvolle Abgasgesetzgebungen eingeführt werden, ist zwingend erforderlich.

Die vier wesentlichen Forderungen an einen zukünftigen Kraftstoff (siehe auch ► Abschn. 5.9):

- sichere Versorgung,
- gesamtwirtschaftliche Tragfähigkeit,
- Berücksichtigung von Umwelt- und Klimaschutzanforderungen,
- hohe Energiedichte

kann heute kein singulärer Energieträger, auch Wasserstoff nicht, erfüllen.

Dies ist die Begründung für die zu beobachtende Diversifikation der Kraftstoffe. Das parallele Angebot im Markt von Diesel, Ottokraftstoff, Methanol, Ethanol, Erdgas und anderen Kraftstoffen kann aber keine wirtschaftliche Lösung darstellen, da für jeden dieser Kraftstoffe ein eigenständiger Antrieb entwickelt werden müsste.

Es sollte daher nach einer Möglichkeit, die Primärenergien zu diversifizieren und dabei gleichzeitig die zum Einsatz kommenden Energieträger für den mobilen Einsatz auf möglichst wenige Varianten zu konzentrieren, der Vorzug gegeben werden.

In den nächsten Jahren wird insbesondere ein verstärkter Einsatz von Erdgas erfolgen, was auch für die spezifischen $CO_2$-Emissionen von Vorteil ist. Erdgas kann und wird direkt zum Fahrzeugantrieb genutzt werden. Allerdings ist wegen der bekannten Nachteile bezüglich Reichweite und Platzbedarf für den Tank, die für alle gasförmigen Kraftstoffe gelten, und des zunehmenden Aufwandes für die Abgasnachbehandlung zur Erfüllung strenger Abgasgrenzwerte, kein Ersatz der heutigen Kraftstoffe durch Erdgas zu erwarten, sondern nur eine begrenzte Ergänzung. Aus Erdgas können aber auch mit bekannten und großtechnisch erprobten Verfahren wie der Shell-Mittel-Destillat-Synthese (SMDS) andere Sekundärenergieträger hergestellt werden [104].

Erdgas wird dazu in einer ersten Verfahrensstufe mittels einer Dampfreformierung in ein Synthesegas, eine Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Aus diesem Synthesegas kann über eine Fischer-Tropsch-Synthese konventioneller Kraftstoff, insbesondere Dieselkraftstoff hoher Qualität, ohne Schwefel- und Aromatengehalt, hergestellt werden. Diese so genannte Gas-To-Liquid Technologie (GTL) ist beim heutigen Rohölpreis-Niveau in vielen Regionen der Erde, in denen kostengünstig Erdgas oder Erdölbegleitgas anfällt, höchst wirtschaftlich. Diese synthetischen Kraftstoffe (SynFuels) besitzen ein hohes Potenzial zur Verbesserung der motorischen Brennverfahren. Die Spezifikation eines synthetischen Dieselkraftstoffs besticht vor allem durch die hohe Cetanzahl und die Aromaten- und Schwefelfreiheit. Als Beispiel sind aus einem Flottenversuch in Abb. 5.124 einige Werte beim Einsatz eines synthetischen Kraftstoffes

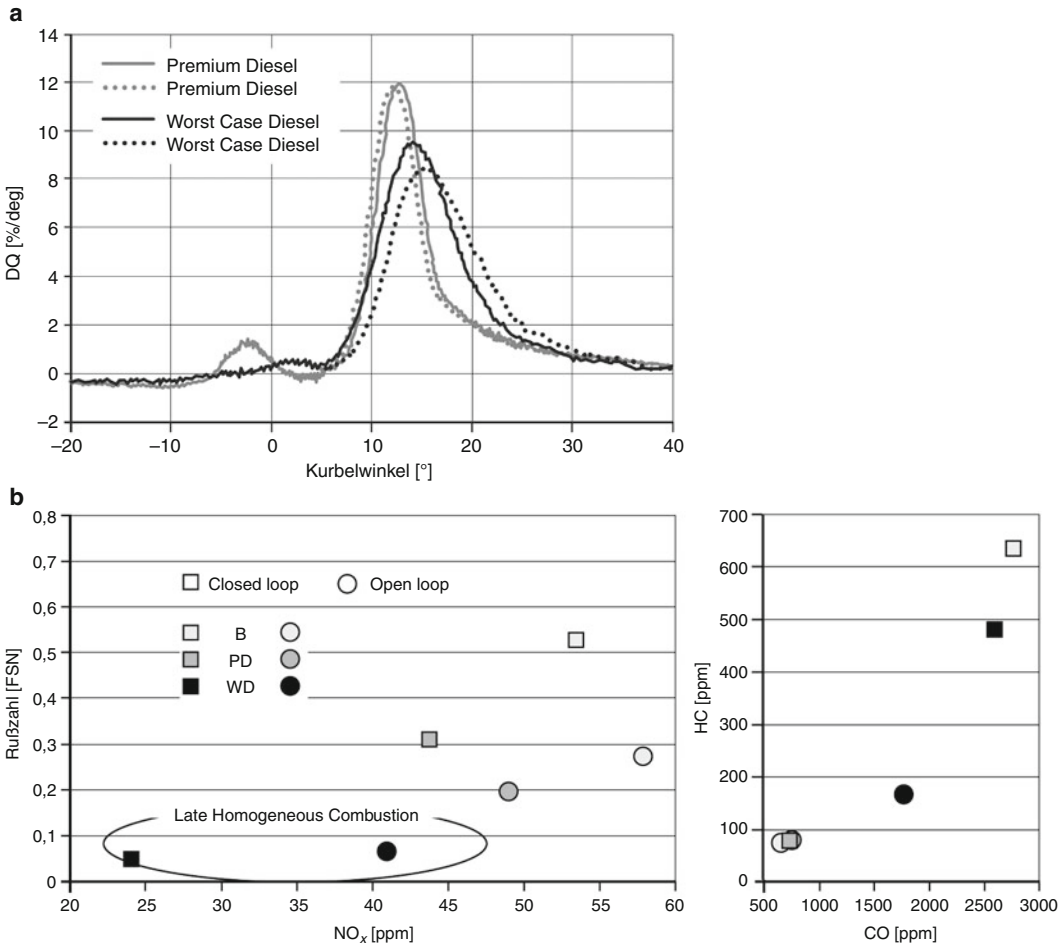



**Abb. 5.123** **a** Bandbreite des Einflusses der Kraftstoffqualitäten auf den Verbrennungsverlauf; **b** Bandbreite des Einflusses der Kraftstoffqualitäten auf die Abgasemissionen (exemplarisch dargestellt für Ruß und HC; B = Basis, PD = Premium Diesel, WD = Worst Case Diesel)

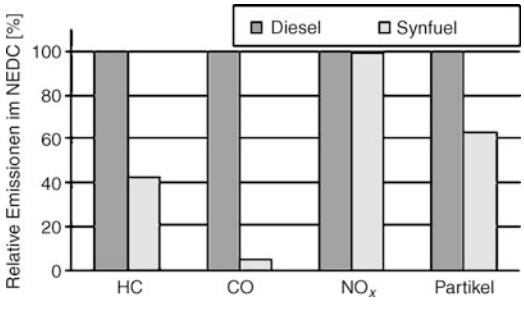



**Abb. 5.124** Emissionsminderung bei Verwendung eines SynFuels in einem Dieselfahrzeug mit Euro4-Technologie

in einem Dieselmotor mit Euro4-Technologie dargestellt. Die Bezugsbasis stellt ein heutiger Standard Dieselkraftstoff. Wie zu erkennen ist, ermöglichen synthetische Kraftstoffe die gleichzeitige Reduzierung der $NO_x$- und der Partikelemissionen. Setzt man die Kraftstoffe in einem Fahrzeug ein und passt die Kalibrierung an, ermöglichen sie dem Automobilhersteller eine Weiterentwicklung seiner Produkte zu verringertem Verbrauch und, insbesondere bei Dieselmotoren, zu weiter verbesserten Emissionen [105].

Die Zwischenstufe Synthesegas ermöglicht in einer weiteren Stufe zusätzlich den Einsatz auch re-

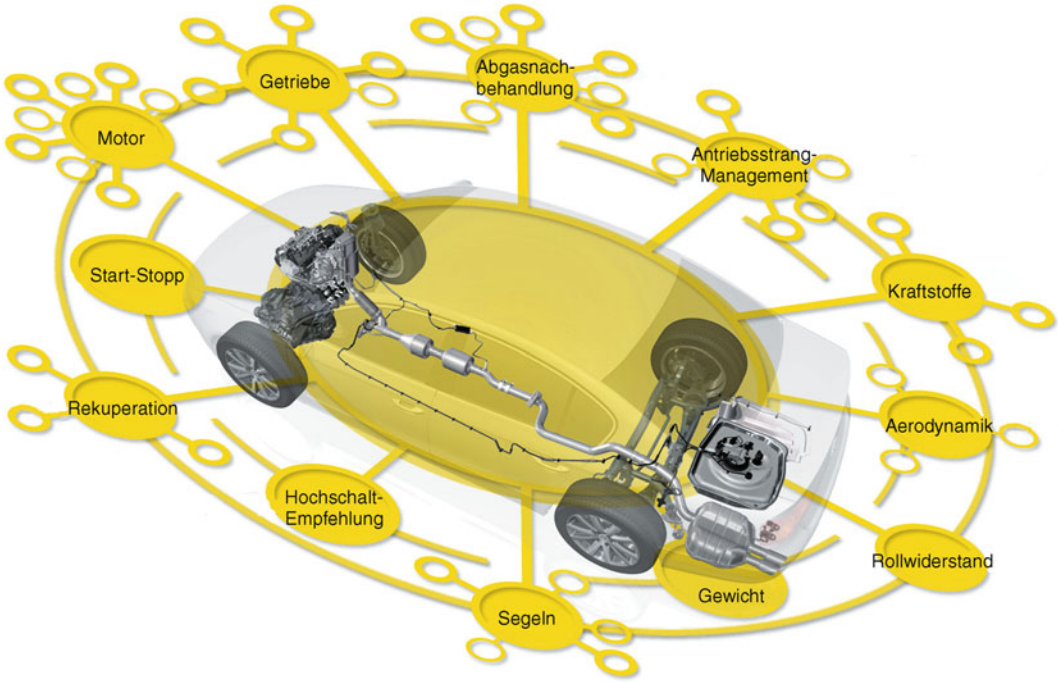



**Abb. 5.125** Regelkreis Automobil

generativer Energieträger, wie Restholz, Reststroh, Energiepflanzen oder Biomüll. Entscheidend ist, dass dabei die Qualität des Endproduktes nicht von der Beschaffenheit der eingesetzten Primärenergie abhängig ist. Mit dieser Lösung werden die endliche Verfügbarkeit und die $CO_2$-Emission der synthetischen Kraftstoffe beseitigt. Die $CO_2$-Emission wird damit lokal nicht zu Null, aber es wird ein $CO_2$-neutraler Kreislauf geschaffen, dessen Antriebsenergie die Sonne liefert. Dieser Lösungsansatz eines biomassebasierten SunFuels® kann als mittelfristig bezeichnet werden, da er heute noch nicht wirtschaftlich tragbar ist. Der große Vorteil dieser Route liegt darin, dass auch in dieser Phase die heutige Kraftstoff-Infrastruktur erhalten bleiben kann.

## 5.2.9 Regelung

Die zunehmende Elektrifizierung auch des Dieselfahrzeuges macht eine Vernetzung der verschiedenen installierten Regelkreise erforderlich (Abb. 5.125). Allein die Einführung der Dieselabgasnachbehandlungssysteme erfordert eine Vielzahl unterschiedlicher Brennverfahren und Motorbetriebsarten. Um die Anforderungen und Potentiale nutzen zu können, ist die Entwicklung entsprechender Regelalgorithmen und Systemmodelle erforderlich [106–108].

Jede Betriebsart, ob Normalbetrieb oder Regenerationsbetrieb für Dieselpartikelfilter oder DeNO$_x$-Einrichtung basiert auf einer Vielzahl von Eingangsgrößen, die im Steuergerät verarbeitet und als Stellbefehle an die zugehörigen Aktuatoren gesendet werden. Die verschiedenen Betriebsarten bestehen aus Modulen, die von einem Betriebsartenkoordinator gesteuert werden (Abb. 5.126). Bespiele sind die Dieselverbrennungsregelung Abb. 5.127 und die Partikelfilterregeneration (Abb. 5.128).

## 5.2.10 Die Zukunft des Dieselmotors

**Anforderungen** Die konventionellen Verbrennungsmotoren (Otto und Diesel) werden auch

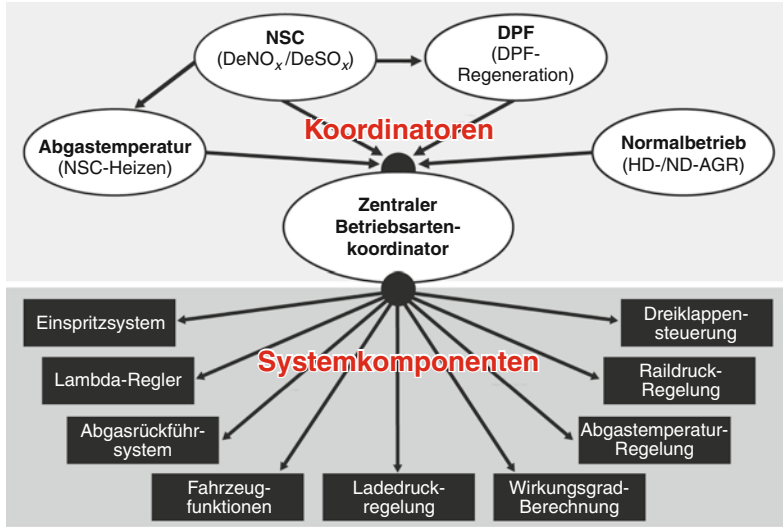



**Abb. 5.126** Regelungstechnik für den zentralen Betriebskoordinator

noch während der nächsten 10 bis 20 Jahre die vorherrschenden Konzepte sein. Der schnelllaufende Hochleistungsdiesel hat dabei heute einen hohen Entwicklungsstand erreicht und kann sich mit dem Ottomotor messen lassen. Die Entwicklungen der letzten Jahre waren geprägt durch:

- Emissionsvorschriften,
- Verbrauchsminderung,
- Geräuschvorschriften,
- politische Diskussionen und
- Kostenreduzierung.

Daneben spielen Aspekte wie Rohstoffpreise, marktspezifische Kundenwünsche, Wettbewerbssituation in den weltweiten Märkten und Unternehmensziele eine Rolle (Abb. 5.129).

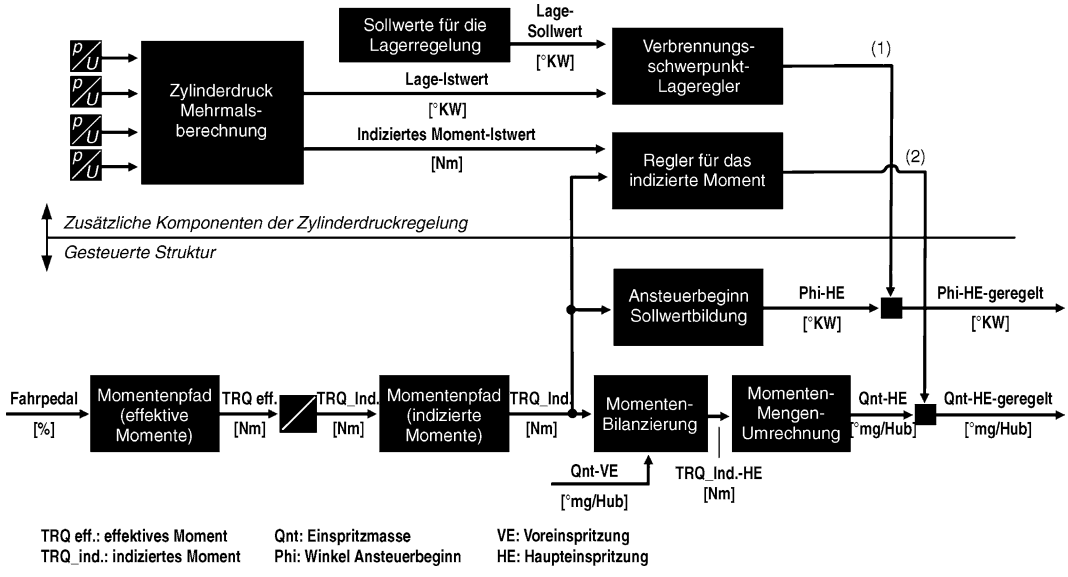



**Abb. 5.127** Modellberechnung für die Zylinderdruckregelung

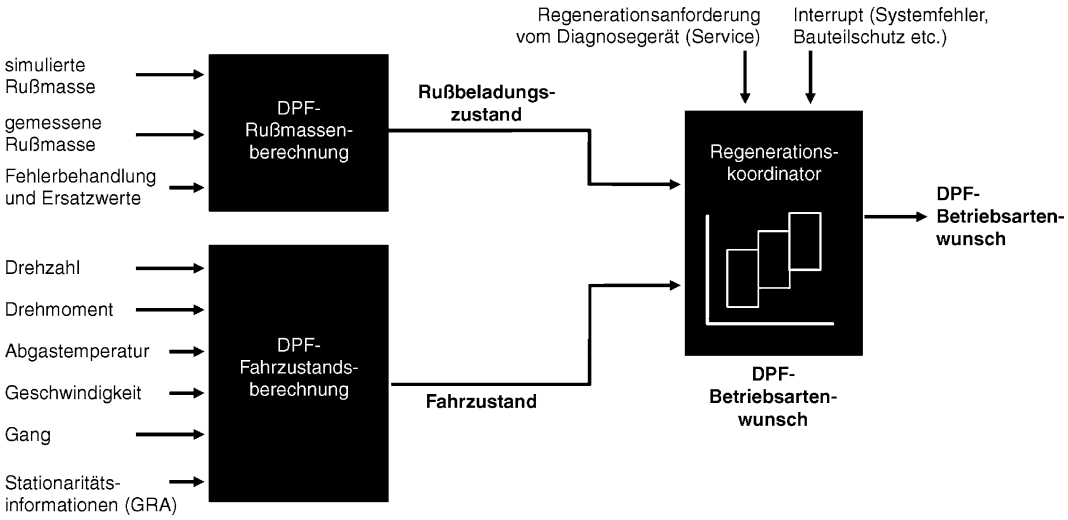



**Abb. 5.128** Berechnung der Rußmasse auf einem DPF mit einem Simulationsmodell




**Abb. 5.129** Anforderungen an zukünftige Dieselfahrzeuge

**Diesel oder Otto?** Der Dieselmotor hat gegenüber dem Ottomotor unbestritten Vorteile im Verbrauch (und damit auch bei den $CO_2$-Emissionen) und verfügt über ein höheres Drehmoment, insbesondere im Bereich niedriger Drehzahlen. Voll gebrauchsfähige Fahrzeuge mit einer $CO_2$-Emission unter 90 g/km sind nach Meinung aller Experten nur mit Dieselmotoren darstellbar. In anderen Merkmalen war der Dieselmotor dem Ottomotor, der bei höheren Nenndrehzahlen betrieben wird, unterlegen: beim Leistungsgewicht, beim Verbrennungsgeräusch und bei der Abgasnachbehandlung (3-Wege Katalysator).

Diese Positionen sind durch das Potenzial des direkteinspritzenden Ottomotors in Diskussion geraten.

Der Verbrauchsvorteil des Dieselmotors wird gegenüber dem Ottomotor kleiner werden. Das Otto-DI-Prinzip führt dazu, dass nun der alte Abstand wie zwischen Dieselvorkammer- und Ottomotor wieder hergestellt ist, da beide Konzepte durch Einführung der DI-Technik etwa denselben Reduktionssprung vollführt haben. Aber: Extrem sparsame Fahrzeuge werden auch in Zukunft mit einem Dieselmotor ausgerüstet sein.

Bei der Abgasminderung kommen auf den DI-Ottomotor vergleichbare Probleme wie auf den Dieselmotor zu, da beide DI-Konzepte mit noch in der Entwicklung befindlichen komplexen Katalysatoren ausgerüstet werden müssen.

Die Verbrennungsgeräusche sind bei den Diesel-DI-Motoren im unteren Drehzahlbereich noch höher als die der Ottomoren: In der Gesamtfahrzeugbetrachtung nähern sich die Geräusche immer mehr an.

Zusammenfassend kann die Frage, welches der innermotorischen Brennverfahren im Pkw auch in Zukunft eine Daseinsberechtigung hat und welches nicht, eindeutig beantwortet werden: Beide Konzepte. Der DI-Ottomotor wird den DI-Dieselmotor nicht ersetzen. Vielmehr ist bei beiden mit weiteren Fortschritten im Spannungsfeld von Verbrauchs- und Abgasminderung zu rechnen.

**Das weitere Potenzial des Dieselmotors** Die Entwicklung des direkteinspritzenden Dieselmotors wird weitergeführt werden. Die Reduzierung der Abgasemissionen und deren Sicherstellung bei Alterung des Fahrzeugs wird neben sich verschärfenden Verbrauchsszenarien der wesentliche Schwerpunkt sein.

Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Anforderungen aufgrund unterschiedlicher gesetzlicher Anforderungen zu erfüllen sind. Insbesondere sind zu erwähnen die sich weltweit immer weiter verschärfende Abgasgesetzgebung (◘ Abb. 5.130a) und die weltweite Anforderungen an geringe $CO_2$-Emissionen, die in ◘ Abb. 5.130b exemplarisch für die EU dargestellt sind. Daneben ist ein Trend zur einer größeren Diversifikation der Kraftstoffqualitäten, die nicht notwendigerweise zu einer Verbesserung führt, zu beobachten (◘ Abb. 5.130c). Die einzelnen Anforderungen können nicht isoliert betrachtet werden. So führt z. B. eine Reduktion der $NO_x$-Emissionen, die durch die Abgasgesetzgebung vorgegeben ist, zu einer Erhöhung der $CO_2$-Emissionen, die durch andere Maßnahmen aufzufangen ist (◘ Abb. 5.131). Daraus leiten sich die technischen Anforderungen an den Dieselmotor ab (◘ Abb. 5.132).

Die modernen Dieselmotoren zeichnen sich durch Mehrventiltechnik, variable Hochdruckeinspritzung, Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie, Mehrstufenaufladung, geregelte Abgasrückführung, Oxidationskatalysator und vollelektronisches Motormangement sowie Partikelfilter und Entstickung aus. Einige Größen, die die Entwicklung exemplarisch kennzeichnen sind [109]:

- Einspritzdruck 2200 bar bei bis zu 7 Vorgängen und Mengen bis 0,3 $mm^3$,
- Ladedruck bis 2,5 bar bei bis zu 240.000 1/min und einer Hitzebeständigkeit bis zu 830 °C,
- Speicherkapazität des Motorsteuergeräts (Indikator für Komplexität) von 4 kB (1980) auf 4 MB heute,
- Motordrehzahlentwicklung von 4000 auf 5500 1/min,
- spezifische Leistung von 24,6 (1976) auf 66,0 kW/l heute,
- spezifischer Verbrauch von 6,3 (1977) auf 2,9 l/100 km/t heute,
- Geräusch eines Dieselmotors mit Common Rail-Einspritzung vergleichbar mit dem Geräusch eines Ottomotors.

Aus heutiger Sicht stellen die Abgasemissionen von $NO_x$ und der Partikel das größte Problem für den Diesel dar. Dabei sind die unterschiedlichen Abgasgesetzgebungen in der Triade zu berücksichtigen.

Um der zukünftigen Abgasgesetzgebung und weiteren Anforderungen wie Minderung des Kraftstoffverbrauchs genügen zu können, sind große Anstrengungen bei der Motorenentwicklung, Abgasnachbehandlung, Fahrzeugmassenreduzierung und Kraftstoffqualitätsverbesserung erforderlich.

Prinzipiell sind hierbei die motorischen Maßnahmen einer Abgasnachbehandlung vorzuziehen. Das größte Potenzial kommt der Mehrventiltechnik und der Weiterentwicklung der Hochdruckeinspritzung zu. Neben diesen Optimierungen sind Verbesserungen bei der Brennraumform, dem Drall und Reibungsminderung an allen Motorbauteilen wie Kolben und Kolbenringe, Kurbelwellen- und Pleuellager, Ölpumpe, Ventiltrieb und Nebenaggregate erforderlich. Durch innermotorische Verbesserungen ist es gelungen, die meisten Motoren für leichtere Pkw soweit zu ertüchtigen, dass sie die Abgasnorm Euro4 ohne Abgasnachbehandlung erfüllen können. Aufgrund der definierten *Emissions*grenzwerte Euro5, aber auch durch die *Immis-*

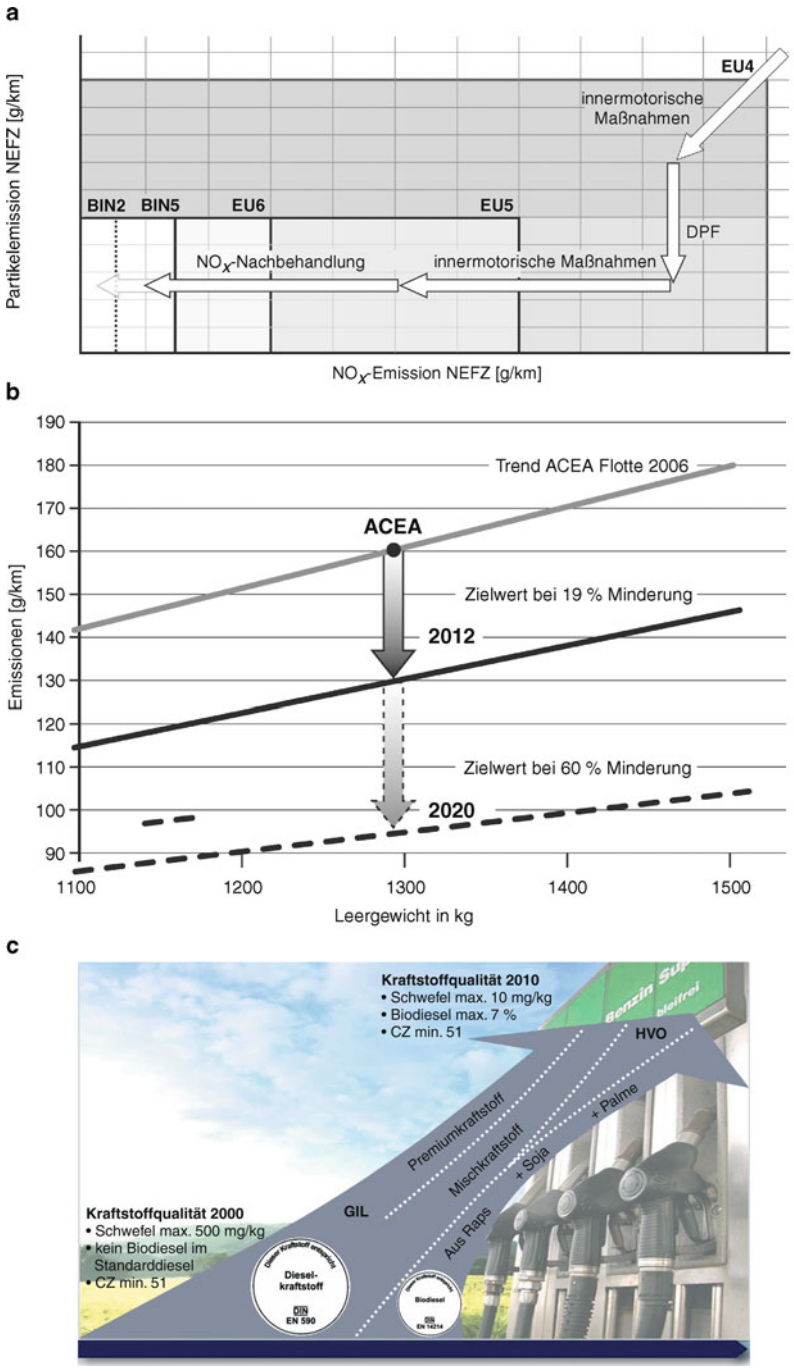



**Abb. 5.130** **a** Stetig steigende Anforderungen an die Dieselmotorentechnologie durch die Weiterentwicklung der Abgasgesetzgebung; **b** Anforderungen durch die $CO_2$ -Gesetzgebung in der EU (ACEA = europäischer Verband der Automobilhersteller); **c** Anforderungen durch die wachsende Anzahl von verschiedenen Kraftstoffen

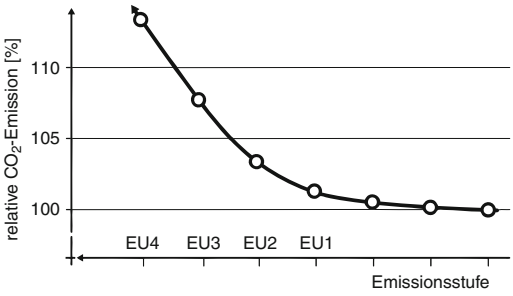



**Abb. 5.131** Zusammenhang zwischen den verschärften Emissionsanforderungen (hier $NO_x$) und den $CO_2$-Emissionen der Fahrzeugflotte

*sions*vorgaben für Partikel und die dadurch ausgelöste Feinstaubdiskussion wurde aus politischen Gründen mit Euro4 der Partikelfilter in vielen Modellen freiwillig eingeführt. Ab Euro5 ist er auch technisch erforderlich. Damit gehört die Diskussion um den Dieselpartikelfilter der Vergangenheit an.

Die Entstickung setzt bei einigen Fahrzeugen mit Euro5 ein, für Euro6 wird sie der Standard sein.

Dazu beigetragen hat auch die verbesserte Kraftstoffqualität, die zu einer effektiveren Verbrennung führte. Aus der Reduzierung des Schwefelgehalts folgte wesentlich eine Stabilisierung des Alterungsverhaltens des Oxidationskatalysators. Die Maßnahmen zur $NO_x$-Reduzierung (höhere Abgasrückführraten und späterer Förderbeginn) haben aber eine CO-Erhöhung zur Folge.

Doch durch optimierte Beschichtungsverfahren, höhere Edelmetallbeladung, dünnere Wände (besseres thermisches Anspringverhalten) und günstigere Einbaulage (motornah) konnte die Effizienz des Oxidationskatalysators erhöht und damit die gasförmigen Emissionen trotzdem nochmals reduziert werden.

Auch wenn die $NO_x$-Emission in den letzten Jahren über 90 % gesenkt werden konnte, wird die weitere Reduktion neben der $CO_2$-Minderung die wesentliche Aufgabe der nächsten Jahre sein. Unter Berücksichtigung eines kostenoptimierten Systems – aber auch unter Beibehaltung der dieseltypischen Vorteile (geringer Kraftstoffverbrauch, hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen) – ist aus den Komponenten Motor, Oxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter, $NO_x$-Nachbehandlung und Kraftstoff die geeignete Strategie zu bilden. Natürlich muss auch das Fahrzeug (insbesondere das Gewicht) und das Triebstrangmanagement den zukünftigen Herausforderungen angepasst werden.

Unter Einbeziehung all dieser Aspekte lassen sich unterschiedliche Strategien der weiteren Dieselentwicklung aufstellen, um die Emissionen weiter zu senken.

Aus heutiger Sicht ist Potential zur weiteren Reduzierung der Abgasemissionen und des Kraftstoff-

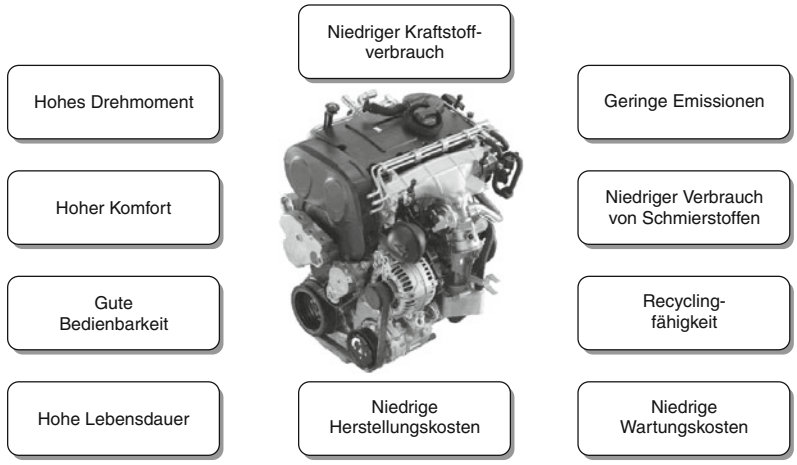



**Abb. 5.132** Technische Anforderungen an zukünftige Dieselmotoren

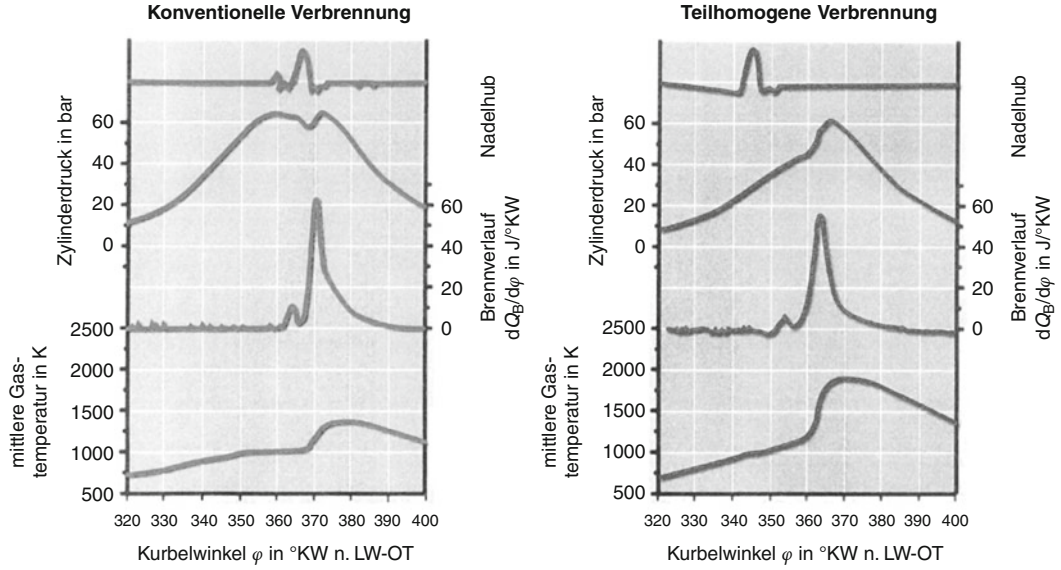



**Abb. 5.133** Vergleich der konventionellen und teilhomogenen Verbrennung bei $n = 2000\,\mathrm{min}^{-1}$ und $p_{\mathrm{me}} = 2\,\mathrm{bar}$

verbrauchs vorhanden. Die weitere Verbesserung der Kraftstoffqualität spielt dabei speziell hinsichtlich Cetan-Zahl-Erhöhung (höher als 55), Reduzierung der Polyaromaten (kleiner als 0,5 Gew. %), Schwefelgehalt (max. 10 ppm) und Metallgehalt (max. 1 ppm) eine wichtige Rolle bzw. ist Voraussetzung für eine saubere Funktion der zukünftigen Technik. Mit erster Priorität wird auch in Hinblick auf eine Verschärfung der Gesetzgebung durch Euro6 weiterhin an der Optimierung des Motors gearbeitet. Wichtige Themen sind dabei:

- nochmals verbesserte Einspritzsysteme mit variablen Einspritzdrücken für Teillast und Volllast – aber auch für Vor-, Haupt- und Nacheinspritzung,
- neue Abgasrückführsysteme mit Rückführraten größer als 50 %,
- Aufladesysteme zur Ladedruckerhöhung nicht nur zur Drehmoment- und Leistungssteigerung, sondern speziell auch zur Steigerung der AGR-Verträglichkeit in der Teillast,
- abgesenkte bzw. variable Verdichtung bis auf ein Verhältnis von unter 16:1,
- teilhomogene zylinderdruckgeführte Verbrennung (Abb. 5.133) mit dem Ziel, überfettete Gemischzonen (Rußbildung) und Temperaturspitzen ($NO_x$-Bildung) zu vermeiden (Abb. 5.134),
- Triebwerksmaßnahmen an innermotorischen Bauteilen (Reibung) und an Nebenaggregaten müssen die Verbrennungsoptimierung unterstützen.

Denkt man an die weitere Absenkung der Schadstoffemissionen oder an eine Reduzierung des beträchtlichen Aufwandes der Abgasnachbehandlung, so wird beides nur dann zu erfüllen sein, wenn vor allem die $NO_x$-Rohemissionen der geschichteten Brennverfahren herabgesetzt werden können. Das heißt, eine $NO_x$-Produktion muss während der Verbrennung unterdrückt werden, ohne die Effizienz der Motoren zu verschlechtern, wozu man die Qualitätsregelung mit Direkteinspritzung (DI-, TDI- oder FSI-Verfahren) beibehalten muss. Es gilt daher die jeweiligen Vorteile von Otto- und Dieselmotor in einem neuen Verfahren zu vereinen.

Mit der Einführung der Direkteinspritzung auch bei den Ottomotoren näherten sich die Brennverfahren beider Motorkonzepte bereits deutlich an. Die nächsten Stufen der Brennverfahrensentwicklung verstärken diesen Trend. Die Entwicklung einer „teilhomogenisierten Dieselverbrennung

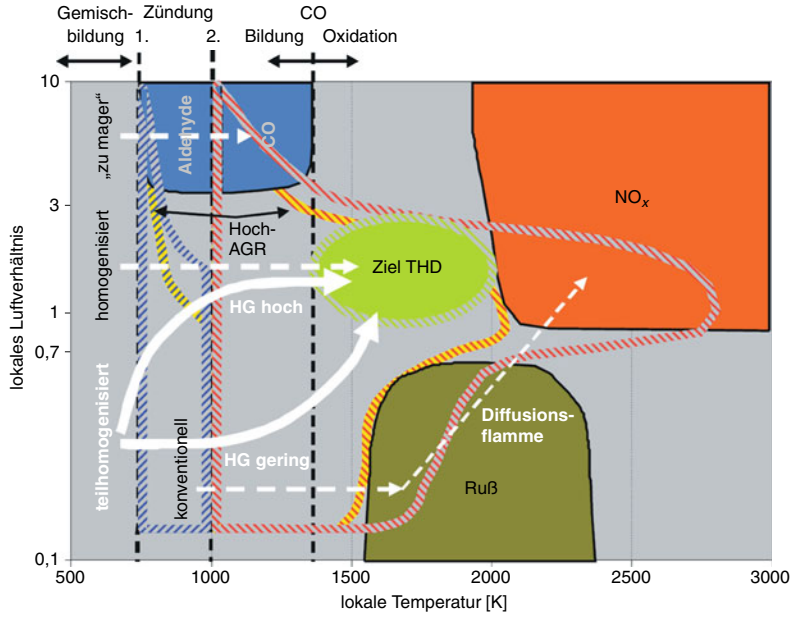



**Abb. 5.134** Strategie der homogenen Verbrennung im Dieselmotor (THD = Teilhomogene Dieselverbrennung)

mit/ohne Fremdzündung" und die in den Forschungs- und Entwicklungslabors ebenfalls aktuelle Entwicklungsstufe „selbstzündender Ottomotor" basieren bereits auf einer im Kern vergleichbaren Hardware. So ist es nur konsequent, über die Entwicklung eines neuen kombinierten Brennverfahrens nachzudenken, das die wesentlichen Merkmale beider Verfahren zusammenfasst.

Grundlage eines solchen neuen „kombinierten Verfahrens" ist ein neuer synthetischer Kraftstoff. Soweit heute zu übersehen, ist im Wesentlichen das Verdampfungs- und Zündverhalten, also dessen Komposition von entscheidender Bedeutung. Soll eine stärkere Homogenisierung der Gemischwolke erreicht werden, ohne dass die Selbstzündung zu früh beginnt, benötigt man einen Kraftstoff mit „frühem Siedebeginn und -ende" sowie „reduzierten Selbstzündungseigenschaften". Diese Eigenschaften steigen an in der Reihenfolge Diesel > Kerosin > Naphtha > Ottokraftstoff. In Versuchen wurde die $NO_x$-reduzierende Wirkung dieser Eigenschaften eindeutig nachgewiesen (Abb. 5.135).

Zur Realisierung des kombinierten Verfahrens sind noch zahlreiche Hürden zu bewältigen. Im stationären Betrieb konnte das Verfahren bereits sehr stabil dargestellt werden. Der dynamische Betrieb setzt aber die Entwicklung völlig neuer Regelkonzepte, Sensoren und Aktuatoren voraus [107, 108]. Mit einer Markteinführung ist daher in diesem Jahrzehnt nicht mehr zu rechnen.

Die Umweltverträglichkeit des Dieselantriebes wird immer mehr ganzheitlich beurteilt. Die Analyse kann verschieden breit angelegt werden. Zur ganzheitlichen Bewertung des Einflusses von Antriebskonzepten und Kraftstoffen auf die Umwelt durch Energieverbrauch und zugehöriger Treibhausgas-Emissionen muss die gesamte Prozesskette von der Förderung über die Herstellung bis hin zur Verwendung der Kraftstoffe im Fahrzeug betrachtet werden (Abb. 5.136). Die alleinige Betrachtung der Emissionen im Fahrzeugbetrieb wird dem Umweltgedanken nicht gerecht.

So werden normalerweise zwei Schritte betrachtet:

- Well-to-Tank (Kraftstoff): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Kraftstoffpfad von der Quelle bis zur Zapfsäule.

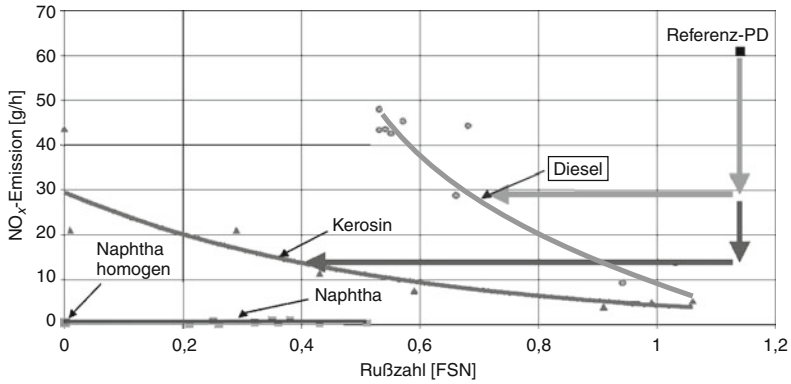



**Abb. 5.135** Potential der Emissionsminderung bei der homogenen Verbrennung durch die Verwendung besonderer Kraftstoffe

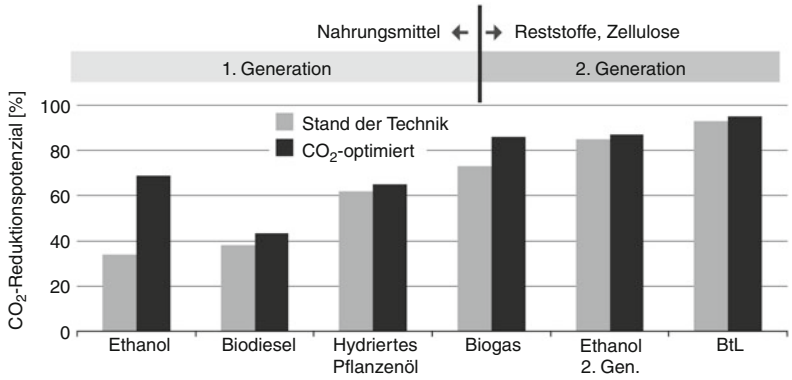



**Abb. 5.136** $CO_2$-Reduktionspotential durch Kraftstoffe

- Tank-to-Wheel (Fahrzeug): Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen bei Nutzung des Fahrzeugs.
- Die Kombination beider Elemente, also des Kraftstoffanteils und des Fahrzeuganteils, wird als Well-to-Wheel bezeichnet.

Das Abb. 5.137 zeigt eine Analyse verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe für das Jahr 2020 im Vergleich zu einem heutigen ottomotorischen Antrieb [110]. Es zeigt sich, dass der Dieselmotor im Vergleich zur Brennstoffzelle bezüglich der Treibhausgasemissionen nicht schlechter gestellt ist, insbesondere wenn er als Hybridlösung dargestellt wird.

Betrachtet man den Material- und Energieeinsatz während der Produktion und des Betriebes eines Dieselmotors, so lässt sich feststellen, dass der Dieselmotor über seine Lebensdauer gesehen ein relativ umweltfreundliches Aggregat ist. Dies zeigt sich allgemein, insbesondere bei der Sachbilanz nach ISO 14040/41 des ersten „3 Liter Autos“. Dieser VW Lupo 3l war mit einem 45 kW Pumpe-Düse-Motor ausgerüstet, der als erster die EU-Abgasstandards für 2005 unterschritten hatte und nur 2,99 l/100 km (entsprechend einer Emission von 81 g/km $CO_2$) verbraucht [111].

Der Energieaufwand ergibt sich aus dem Kraftstoffverbrauch, der Kraftstoffherstellung und der Herstellung und Bearbeitung der Werkstoffe (Abb. 5.138). Die $CO_2$-Emission ist im Wesentlichen durch die Energiegewinnung bestimmt, in der Nutzungsphase (150.000 km, 10 Jahre) durch die Verbrennung von Kraftstoff. Die Koh-

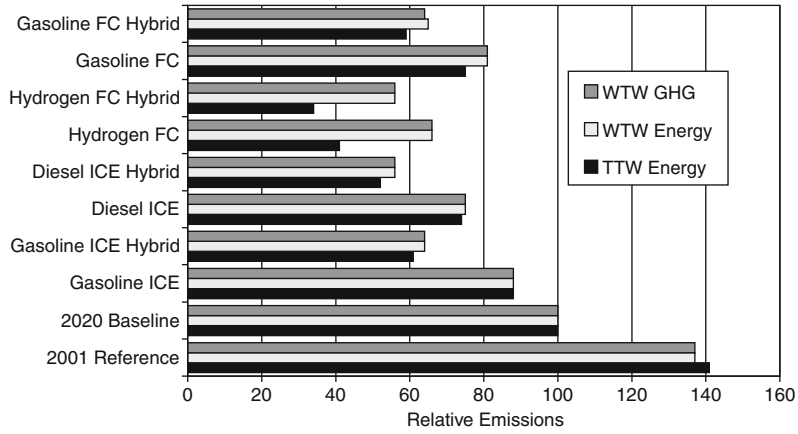
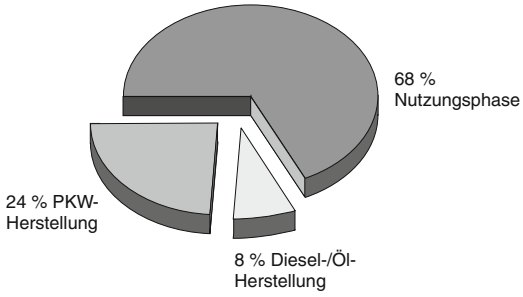



**Abb. 5.137** Vergleich der Energieverbräuche im Fahrzeug (TTW) und der gesamten Kette (WTW) und zugehöriger Treibhausgas-Emissionen nach der MIT-Studie [104]




Gesamter Primär-Energiebedarf = 256 GJ = 71 MWh
für 150.000 km, 10 Jahre 3,0 l/100 km

**Abb. 5.138** Energiekuchen des „3 Liter Autos" [111]

lenwasserstoffe stammen größtenteils aus der Erdölverarbeitung. Der große Anteil der Nutzungsphase an der $NO_x$-Emission ist typisch für den Dieselmotor. Die $SO_2$-Emission der Nutzungsphase stammt ca. zur Hälfte aus dem Motorabgas; zugrunde gelegt wurde ein Schwefelgehalt von 100 ppm im Kraftstoff. Bei den Partikeln wurden die unterschiedlichen Stäube der Herstellung und des Betriebs zusammengefasst. Der Reifenabrieb wird in dieser Sachbilanz nicht erfasst. Die Emissionen im Wasser stammen aus der Fahrzeugwäsche und der Herstellung von Ersatzteilen. Bezogen auf die zugehörige Abwassermenge sind diese Emissionen sehr gering.

Die gute Sachbilanz ist ein Ergebnis:

- der Verarbeitung von unbedenklichen Werkstoffen (Eisen, Stahl, Aluminium),
- der Fertigungsverfahren,
- der beherrschbaren Umweltbelange,
- des hohen recyclingfähigen Materialanteils,
- der langen Lebensdauer,
- des hohen thermischen Wirkungsgrades.

Ein Maßnahmenpaket wie das des 3 l-Lupo ließ sich aufgrund der höheren Kosten am Markt nicht breit durchsetzen. Wegen der großen Herausforderung, die $CO_2$-Emissionen des Straßenverkehrs stark zu minimieren, muss allerdings auch auf diese Ansätze zurückgegriffen werden. Derzeit werden von verschiedenen Herstellern verbrauchssparende Konzepte angeboten, die einen Zwischenschritt darstellen. So lässt sich der Verbrauch eines Polo 1,4 l 55 kW TDI mit 4,4 l/100 km auf 3,9 l/100 km reduzieren (siehe Tab. 5.10). Der Dieselmotor ist wesentlicher Baustein des Konzepts.

So kann als Fazit festgestellt werden, dass der moderne Dieselmotor leistungsfähig, wirtschaftlich, umweltfreundlich und ressourcenschonend ist und damit eine Reihe von Möglichkeiten eröffnet, die im 21. Jahrhundert von Bedeutung sind sowohl ökonomisch als auch ökologisch. Der Dieselmotor hat auf jeden Fall neben dem Ottomotor seine Zukunftsberechtigung.

**Tabelle 5.10** Maßnahmen zur Verbrauchssenkung am Beispiel des VW Polo Blue Motion

| Maßnahme | Wert (l/100 km) |
|---|---|
| Ausgang (1,4 l 55 kW TDI) | 4,4 |
| 4 + E Getriebe | −0,2 |
| Aerodynamik Generator | −0,1 |
| Rollwiderstand Reifen | −0,1 |
| Motormaßnahmen | −0,3 |
| Dieselpartikelfilter | +0,2 |
| Ziel: 1,4 l 59 kW TDI Euro 4/DPF | 3,9 |

## 5.3 Aufladung

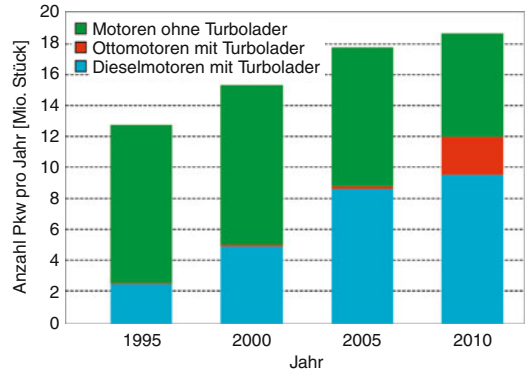
### 5.3.1 Hintergrund

Die Bedeutung der Aufladung hat in der Motorentechnik in der aktuellen Vergangenheit sehr stark zugenommen. Der Einsatz von Turboladern war ein Grund für den Erfolg von Dieselmotoren in den letzten Jahren. Heute hat nahezu jeder Dieselmotor einen Turbolader, der Anteil aufgeladener Ottomotoren wächst stetig. Genauso wie davon ausgegangen werden kann, dass Verbrennungsmotoren noch mehrere Jahrzehnte die Antriebssysteme dominieren, wird die Bedeutung der Systeme zur Aufladung solcher Motore weiter auf hohem Niveau bleiben bzw. zunehmen. Im Jahr 2010 wurden weltweit etwa 19 Millionen Turbolader gefertigt. Die Technologien zur Erfüllung gleichzeitig steigender Anforderungen hinsichtlich Verbrauch, Emissionen und Leistung werden auf verschiedenen Ebenen intensiv weiterentwickelt. Die Aufladung spielt dabei stets eine zentrale Rolle. Hierzu werden bei der Mehrzahl der Verbrennungsmotoren unterschiedliche Abgasturbolader eingesetzt. Dies hat seinen Grund insbesondere darin, dass gegenüber anderen Aufladesystemen höhere Aufladegrade bei besseren Wirkungsgraden und verhältnismäßig geringem konstruktiven Aufwand am Motor erreicht werden. Turbolader sind die technische Voraussetzung, um durch Verkleinerung von Motoren bei gleicher Leistung den Kraftstoffverbrauch dadurch zu senken, dass die Reibung reduziert, die Gemischbildung verbessert und der Betriebsbereich in verbrauchsgünstigere Bereiche verschoben wird („Downsizing“). Dabei sind die Grenzen des Turboladers ähnlich denen des Verbrennungsmotors, wenn sich beide Maschinenarten auch in der Umsetzung thermodynamischer Prozesse generell unterscheiden. Die thermodynamisch ähnlichen Prozesse der Verdichtung und Entspannung von Verbrennungsmotor und Turbolader sind im oszillierenden Verbrennungsmotor naturgemäß vollkommen anders technisch realisiert als im rotierenden Turbolader. Der Abgasturbolader entspricht in Bauart und Energieumsetzung prinzipiell einer Gasturbine. Der Arbeitsbereich von Turboladern ist eingegrenzt durch Temperaturen (Abgas), Drehzahlen (Laufräder und Lager), Strömungsverhalten (z. B. Verdichterpumpen), Dynamik („Turboloch“) und Wirkungsgrade (Verdichter, Turbine, Lager).

Prinzipiell lässt sich sagen, dass die Aufladung von Verbrennungsmotoren dazu dient, die Luftmenge, die für den Verbrennungsprozess im Motor zur Verfügung steht, zu steigern, um bei bestimmten Vorgaben für das Mengenverhältnis aus Kraftstoff und Luft („Luftverhältnis“) die Menge an zugeführtem Kraftstoff steigern zu können, um wiederum die Leistung des Motors zu steigern. Diese Ideen sind so alt wie die Idee des Verbrennungsmotors selbst und wurden von Daimler und Diesel früh untersucht. Der Ansatz der Ausnutzung der Abgasenergie wie beim Abgasturbolader geht zurück auf ein Patent des Schweizers Alfred Büchi aus dem Jahr 1905. Ein erster Meilenstein bei der Umsetzung war ein Höhenrekord eines Doppeldecker-Flugzeugs, das mit einem durch einen Turbolader aufgeladenen Motor angetrieben war. Nicht nur in den vielfältigen Anwendungsfällen von aufgeladenen Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen auf der Straße, der Schiene, dem Wasser und der Luft sowie Industrieanwendungen sind bedeutende Fortschritte durch die Aufladetechnik erreicht worden. Im Bereich der Landantriebe für Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen setzte sich der Turbolader nach dem zweiten Weltkrieg zunehmend durch, wobei sich in einzelnen Anwendungen auch andere Systeme, besonders nach dem Verdrängerprinzip arbeitende Verdichter (z. B. mechanisch angetriebene Rootslader), durchgesetzt haben. Entscheidende

Veränderungen haben sich durch direkteinspritzende Dieselmotoren ergeben, die sich auf Grund ihres Arbeits- und Brennverfahrens besonders für die Aufladung mit Turboladern eignen. Dies drückt sich auch dadurch aus, dass seit den 80er-Jahren die Erfinderaktivität in Form von Patenten bedeutend zunimmt. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene bedeutende Ideen im Bereich der Turbolader-Regelung marktreif entwickelt, z. B. der variable Düsenring oder die zweistufig geregelte Aufladung. Aktuell wird viel Entwicklungskapazität in weitere Verbesserungen investiert. Gerade die Kombination mehrerer Systeme, z. B. von zwei Turboladern, eines Turboladers mit einem Kompressor oder eines Turboladers mit einem Elektromotor bieten hier viele Möglichkeiten. Aber der Turbolader selbst hat auch weiteres Entwicklungspotential, z. B. durch Werkstoffoptimierungen oder Regelbereicherweiterungen. Die Vergangenheit hat dabei jedoch gezeigt, dass nicht alle scheinbar sinnvollen Überlegungen zum Erfolg führen. Oft sind die Aufwendungen für Verbesserungen im Verhältnis zum erzielten Erfolg nicht vertretbar.

Neben den Verbesserungen hinsichtlich Funktionalität spielt eine Verbesserung der Qualität eine bedeutende Rolle. Bei Kundenbeanstandungen ist der Turbolader stets auf den vorderen Plätzen zu finden. Die Mängel lassen sich in die Bereiche Fertigungsfehler, Funktionseinschränkungen, Lebensdauerprobleme und zunehmend Akustikprobleme einteilen. Begründet liegen diese darin, dass einerseits der Turboladermarkt überproportional gewachsen ist (in Westeuropa stieg der Anteil von aufgeladenen Motoren von 20 % im Jahr 1995 auf 50 % im Jahr 2010, ◘ Abb. 5.139). Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass, auch bedingt durch steigende spezifische Motorleistung, inzwischen fast alle Bauteile und Baugruppen des Turboladers an ihre Belastungsgrenzen gekommen sind. Vergleicht man an einem 100-kW-Dieselmotor die Nutzleistung von Verbrennungsmotor und Turbolader (Motor: Leistung an der Kurbelwelle, Lader: Verdichterleistung) bezogen auf die jeweilige Masse miteinander, so lässt sich feststellen, dass der Abgasturbolader spezifisch (massebezogen) dreifach höher belastet ist als der Motor (◘ Tab. 5.11; Verhältnis von 1,75 kW/kg zu 0,59 kW/kg).




◘ **Abb. 5.139** Entwicklung des europäischen Markts von Pkw-Turboladern

◘ **Tabelle 5.11** Vergleich der Nutzleistung von Motor und Turbolader am Beispiel eines 100 kW-Dieselmotors

| | Nutzleistung im Nennpunkt [kW] | Masse [kg] | Nutzleistung/ Masse [kW/kg] |
|---|---|---|---|
| Verdichter | 14 | 8 | 1,75 |
| Motor | 100 | 170 | 0,59 |

Die Zukunft des Turboladers wird dadurch entschieden werden, wie ein Beitrag zur Verbesserung der motorischen Prozesse bei akzeptablen Kosten und verbesserter Qualität erfolgen kann. Der ganz große Innovationstraum, z. B. durch einen luftgelagerten Turbolader, wird sich dabei an kontinuierlichen Verbesserungen der bestehenden Techniken messen müssen.

## 5.3.2 Aufladeprinzip

Bei den im Kraftfahrzeugbereich üblicherweise verwendeten 4-Takt-Motoren findet der Austausch von Abgas und Frischluft in der sogenannten „Ladungswechselschleife“ statt. Da die Kraftstoffmenge insbesondere bei der Direkteinspritzung variabel und ohne entscheidende Grenze zuführbar ist, ist die Leistungsabgabe durch die zur Verfügung stehende Luftmenge begrenzt. Dabei ist der Druck („Ladedruck“) bzw. eigentlich die Dichte der Frischluft die entscheidende Größe. Freiansaugende Moto-

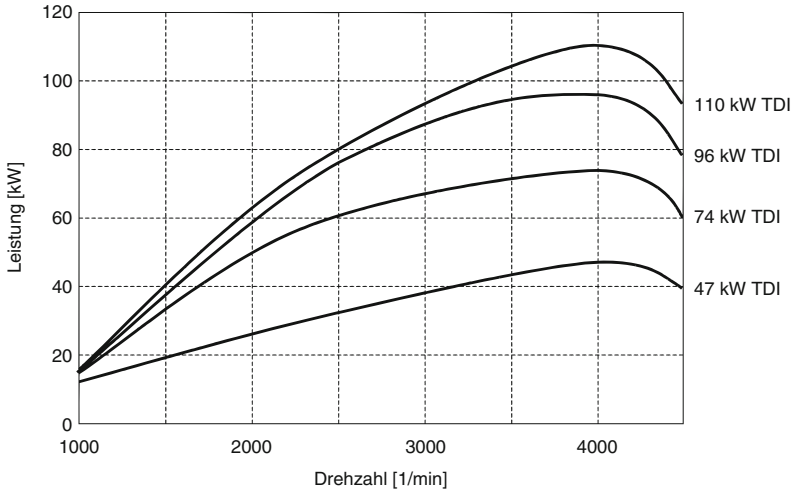



**Abb. 5.140** Leistungsvariation durch Aufladung (Beispiel 1.9 l-Dieselmotor (VW))

ren (ohne Aufladung) kommen somit schnell an natürliche Grenzen, wenn eingespritzter Kraftstoff nicht vollständig verbrannt werden kann. Soll die effektive Leistung $P_e$ des Motors gesteigert werden soll, kann dies entweder durch Steigerung des Zylinderhubvolumens $V_h$, der Zylinderanzahl $z$, der Drehzahl $n$, der Taktzahl $i$ oder des effektiven Mitteldrucks $p_{me}$ erfolgen.

$$P_e = V_h \cdot z \cdot n \cdot i \cdot p_{me}$$

Die Motordrehzahl kann üblicherweise nicht beliebig gesteigert werden, eine Erhöhung von Zylinderhubvolumen oder Zylinderzahl würde größere, schwerere Motoren mit erhöhter innerer Reibung bedeuten. Der effektive Mitteldruck dagegen lässt sich auf Grund der Flexibilität des Einspritzsystems verhältnismäßig einfach steigern, er nimmt linear mit der Dichte der zugeführten Frischluft zu. Hier kommt die Aufladung ins Spiel. In der Praxis lässt sich dieser Zusammenhang am Beispiel des 1.9l-TDI-Motors von Volkswagen besonders deutlich zeigen, da er in vielen Leistungsvarianten existiert (Abb. 5.140). Gegenüber dem nicht aufgeladenen SDI-Motor wurde die Leistung der aufgeladenen TDI-Motoren bei gleichem Grundmotor nahezu beliebig durch Veränderung von Einspritzmenge und Ladedruck variiert.

### 5.3.2.1 Schwingrohraufladung

Zur Aufladung können verschiedene Prinzipien eingesetzt werden. Zunächst sei hier die Schwingrohraufladung (Abb. 5.141a) genannt. Hierbei wird kein aktives Aufladeaggregat eingesetzt. Stattdessen werden gasdynamische Schwingungen der Frischluft im Ansaugtrakt genutzt, um die Ladungsmenge im Motor zu erhöhen. Dabei kann sich bei geeigneter Wahl der Schwingrohrlänge und des Volumens bei einer bestimmten Motordrehzahl eine Resonanz der Luftschwingung einstellen, die zur Erhöhung des Aufladegrads führt. Dieser ist jedoch in der erreichbaren Höhe begrenzt und existiert nur bei einer bestimmten Motordrehzahl, solange die Schwingrohrlänge nicht durch beispielsweise ein Schaltsaugrohr variiert wird.

### 5.3.2.2 Kompressoraufladung

Zur aktiven Aufladung kann alternativ ein Verdichter eingesetzt werden. Zunächst soll der Fall betrachtet werden, dass dieser mechanisch angetrieben wird (Abb. 5.141b). Zur Vermeidung höherer Getriebeübersetzungen wird dabei üblicherweise ein Verdichter eingesetzt, der nach dem Verdrängerprinzip arbeitet und im folgenden als Kompressor bezeichnet wird. Diese Art der motorischen Luftversorgung wird häufig „mechanische Aufladung“ oder „Kompressoraufladung“ genannt. Ein

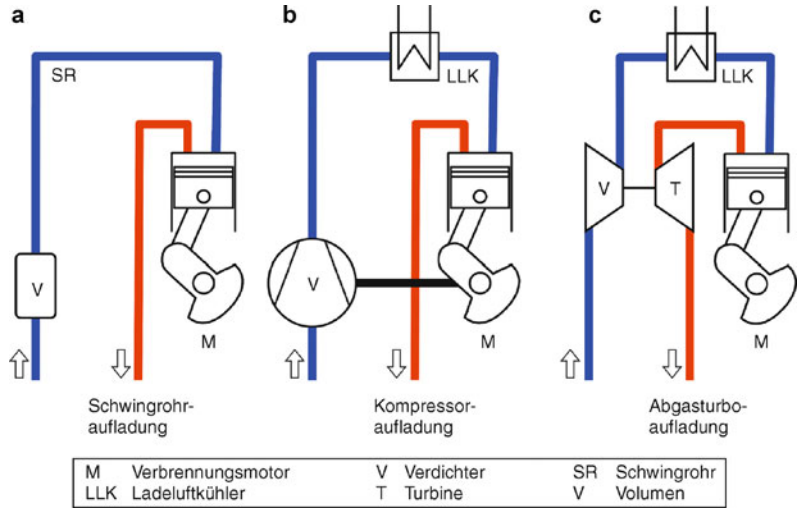



**Abb. 5.141** Aufladeprinzipien

Kompressor führt die Druckerhöhung durch Volumenverringerung durch, wodurch die Antriebsdrehzahl proportional und in der gleichen Größenordnung der des Verbrennungsmotors ist. Dabei haben sich im wesentlichen drei Bauformen durchgesetzt, der Rootslader, der Schraubenlader sowie der Spirallader. Die entsprechenden Arbeitsverfahren zur Druckerhöhung unterscheiden sich in ihrer technischen Umsetzung, wobei es insbesondere Unterschiede hinsichtlich des erreichbaren Ladedrucks und der Herstellungsaufwendungen gibt. Mit dem Begriff „mechanische Aufladung" ist die Art des Antriebs charakterisiert. Dieser erfolgt direkt gekoppelt z. B. über eine Riemenübersetzung von der Kurbelwelle aus. Das Kennfeld weist steile Kennlinien (Linien konstanter Verdichterdrehzahl $n_V$) auf (Abb. 5.142a). Dies bedeutet, dass schon bei kleinen Motordrehzahlen ein hoher Ladedruck bereitgestellt werden kann, was das dynamische Verhalten des Motors positiv beeinflusst. Begrenzt ist diese Art der Aufladung dadurch, dass die aufgewendete Leistung zur Verdichtung der Luft einschließlich der Systemreibungsverluste vollständig der Nutzleistung des Motors entzogen werden muss. Üblicherweise wird der Lader geregelt betrieben. Dies kann mit einem regelbaren Bypass realisiert werden (z. B. DaimlerChrysler-4-Zylinder-Ottomotor, 1,8 l, 120 kW, „Kompressor" (Rootsverdichter)). Zusätzlich kann zur Senkung des Verbrauchs in Bereichen geringen Ladedruckbedarfs eine Abschaltung des Kompressors mit Hilfe eine steuerbaren Kupplung vorgesehen werden. Insgesamt ist der konstruktive Aufwand am Motor bei dieser Art der Aufladung hoch.

### 5.3.2.3 Abgasturboaufladung

Die Abgasturboaufladung (Abb. 5.141c) hat ein thermodynamisches Antriebsprinzip. Die Energie zur Aufladung wird dem Abgas entzogen. Dies hat den Vorteil, dass dabei ein Teil der Wärmeenergie des Abgases genutzt werden kann, was den Wirkungsgrad des Motors verbessert. Dabei erfolgt die Energiebereitstellung durch eine Turbine prinzipiell dadurch, dass Abgas durch die Turbine entspannt wird. Das Abgas wird vor dem Turbinenrad beschleunigt, im Laufrad wird die entsprechende Energie in Form von Drall auf die Welle übertragen. Für einen guten Wirkungsgrad ist eine hohe Leistungsdichte mit großen Umfangsgeschwindigkeiten des Laufrads nötig, was andererseits – verglichen mit den Kompressoren – in kleinem Bauvolumen der Turbolader resultiert. Bei Motoren für Personenkraftwagen werden Turbolader eingesetzt, die Drehzahlen weit oberhalb von 200.000 1/min haben können. Die heute verwendeten Turboverdichter arbeiten verglichen mit der Turbine mit einem

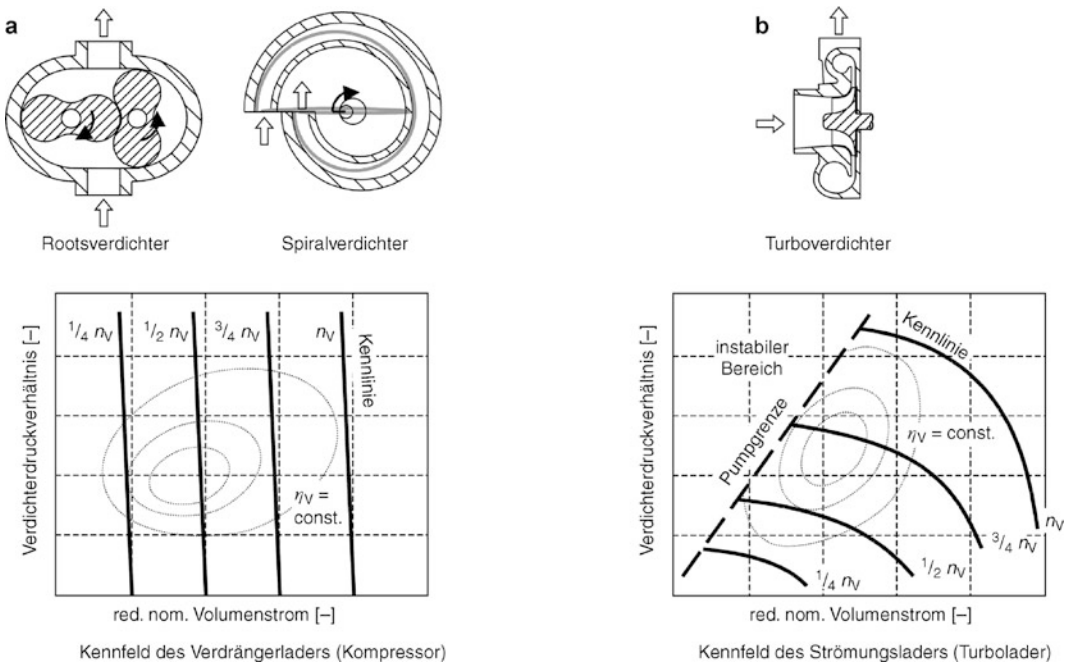



**Abb. 5.142** Verdichter-Prinzipien

umgekehrtem Wirkprinzip. Das Prinzip der Abgasturboaufladung mündet dabei gegenüber der mechanischen Aufladung auch in einer vollkommen anderen Verdichterbauart. Deren Kennfeld unterscheidet sich nicht nur durch eine andere Charakteristik der Linien gleicher Drehzahl (Kennlinien $n_V$) gegenüber dem Kompressor (Abb. 5.142b; Abflachen des Druckaufbaus bei Reduzierung des Volumenstroms; maximale Drehzahl etwa 20fach höher als bei der Kompressoraufladung). Für Turboverdichter ist zudem ein instabiler Strömungsbereich typisch. Hierfür verantwortlich sind Ablösungserscheinungen bei der zum Druckaufbau notwendigen Verzögerung der Strömung, die dazu führen können, dass sich die geförderte Luft entgegen der eigentlichen Strömungsrichtung zurück durch den Verdichter bewegt. Dieser Vorgang vollzieht sich zyklisch und wird auf Grund der Geräuschbildung als „Pumpen" bezeichnet. Den Übergang zwischen dem stabilen und dem instabilen Bereich des Kennfelds nennt man dementsprechend „Pumpgrenze". Bei der Auslegung des Verdichters ist darauf zu achten, dass der Motor nur im stabilen Bereich des Kennfelds betrieben werden kann. Bei Diesel- und Ottomotoren hat dies in Bereichen hoher Drehmomente, d. h. hoher Ladedrücke und niedriger Motordrehzahlen, eine Einschränkung des Betriebsbereichs zur Folge.

### 5.3.2.4 Sonstige Systeme

Neben den drei genannten Arten der Aufladung von Verbrennungsmotoren existieren noch weitere Verfahren, die sich allerdings noch nicht durchsetzen konnten. Dazu zählt zum Beispiel die „Comprex-Aufladung", bei der in einem als Zellenrad ausgeführten Rotor Abgas direkt Energie auf die Frischluft überträgt. Der Rotor hat dabei nicht die Funktion des aktiven, unmittelbaren Druckaufbaus, sondern dient der Synchronisierung von Abgas- und Frischluftdynamik.

Bewertet man die jährlichen Verkaufsvolumina der verschiedenen Aufladesysteme (Turbolader: etwa 15 Mio Einheiten pro Jahr; Kompressoren etwa 0,5 Mio Einheiten pro Jahr), so wird der Erfolg der Turboaufladung offensichtlich. Hierbei kann man wiederum die drei häufigsten Anwendungsfälle bei PKW-Ottomotoren, PKW- und LKW-Dieselmotoren vergleichen und dabei fest-

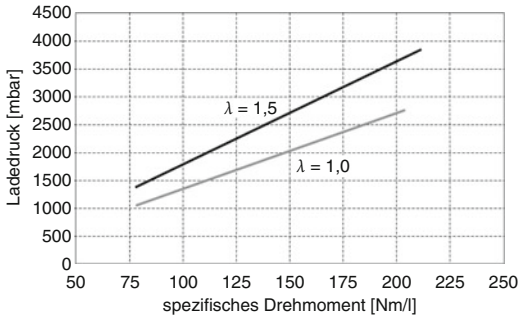



**Abb. 5.143** Ladedruckabhängigkeit

stellen, dass diese entsprechend der unterschiedlichen Ausbildung der thermodynamischen Arbeitsverfahren unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Bei PKW-Ottomotoren sind insbesondere bei externer Gemischbildung die realisierbaren Ladedrücke durch die mit steigendem Aufladegrad zunehmende Klopfneigung auf maximal etwa 1 bar Überdruck begrenzt. Mit der Einführung der Benzindirekteinspritzung wird der Ladedruckbereich zu höheren Werten ausgedehnt. Typische maximale Abgastemperaturen liegen heute bei 950 °C, die Entwicklungen bei Motor- und Turboladerherstellern zielen für die Zukunft auf 1050 °C. PKW-Dieselmotoren erreichen deutlich geringere Abgastemperaturen (selten über 850 °C), dafür höhere Ladedrücke (je nach spezifischem Drehmoment bis etwa 2 bar Überdruck). Der Anwendungsbereich in PKW ist von flexiblem Fahrverhalten geprägt, sodass die Motoren in einem breiten Kennfeld zwischen Pumpgrenze und Nennleistung betrieben werden. LKW-Dieselmotoren werden in einem schmalen Kennfeld betrieben und sind üblicherweise für einen guten Verbrauch optimiert. Ihre Ladedrücke liegen deutlich oberhalb der der PKW-Anwendung (bis etwa 3 bar Überdruck) bei wiederum geringeren Abgastemperaturen. Die genannten Werte für Abgastemperaturen und Ladedrücke sind als grobe Richtwerte angegeben und variieren entsprechend motorischer Applikation. Der Ladedruck wird letztendlich von der spezifischen Belastung des Motors (Drehmoment) und vom Kraftstoff-Luft-Verhältnis bestimmt (Abb. 5.143).

Solange das motorische Brennverfahren nicht bedeutend umgestellt wird, verändert die Verwendung eines Turboladers die Konstruktion des Verbrennungsmotors verhältnismäßig wenig, da er am Abgaskrümmer montiert ist und ansonsten keinen bedeutenden Eingriff an den Bauteilen des Motors erfordert. Bei Ottomotoren ist dies nur entsprechend eingeschränkt gültig, da die Einführung der Benzindirekteinspritzung das Brennverfahren und damit die Bauteile des Motors bedeutend verändert hat. Auf der anderen Seite folgt aus dem Prinzip, dass der Turbolader mit dem Motor nur über das Abgas und nicht über die Kurbelwelle gekoppelt ist, dass das dynamische Verhalten des Motors nicht dem des stationären Verhaltens entspricht. Dies liegt einerseits daran, dass der Rotor mit den beiden Laufrädern eine Masse und damit eine Trägheit aufweist (mechanische Trägheit) und andererseits daran, dass Abgasenergie bei Beschleunigungsvorgängen immer verzögert aufgebaut wird (thermische Trägheit). Dies wird üblicherweise als „Turboloch" bezeichnet.

## 5.3.3 Konstruktiver Aufbau

Bestimmte konstruktive Elemente von Abgasturboladern sind unabhängig vom Anforderungsfall sehr ähnlich (Abb. 5.144). Die Laufräder von Verdichter und Turbine werden in radialer Bauweise ausgeführt. Dies bedeutet, dass die Strömungsrichtung auf der Hochdruckseite (Verdichteraustritt und Turbineneintritt) radial gerichtet ist. Die Strömung auf der Niederdruckseite (Verdichtereintritt und Turbinenaustritt) hingegen ist zur Reduzierung des Bauvolumens meist axial gerichtet. Dies führt zu der typischen, geometrisch komplexen Bauart dieser Laufräder, welche wiederum dazu geführt hat, dass die Räder in der Vergangenheit fast ausschließlich gegossen wurden. Es wird erwartet, dass Verdichterräder zunehmend häufiger vollständig gefräst werden. Dies verbessert gleichzeitig die akustischen Eigenschaften, die Ur-Unwucht sowie die Festigkeitseigenschaften. Um die Laufräder sind jeweils Spiralgehäuse angeordnet. Laufrad und Gehäuse des Verdichters bestehen im allgemeinen aus Aluminiumlegierungen, bei besonders

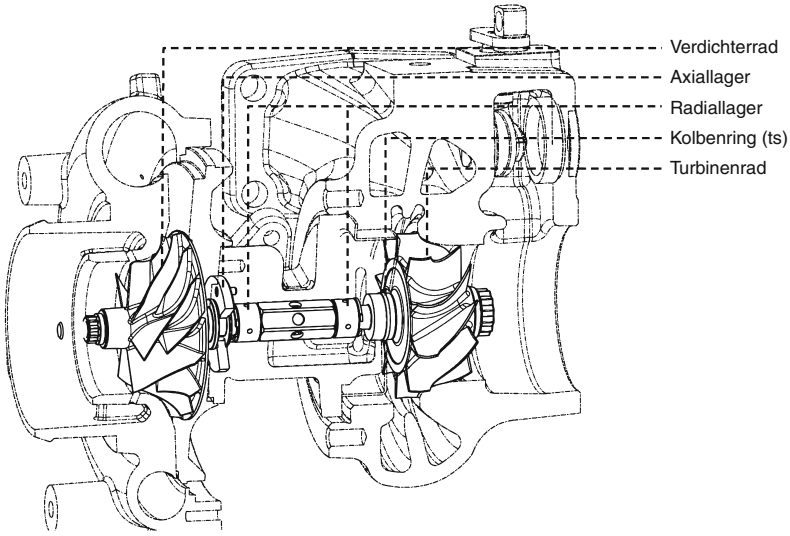



**Abb. 5.144** Turboladerkonstruktion

hoher Umfangsgeschwindigkeit, hoher Temperatur oder hoher Lebensdauer werden für Verdichterräder auch Titanlegierungen verwendet. Das Turbinenlaufrad besteht auf Grund der Abgastemperatur aus Nickel-Basislegierungen. Hier gibt es zur Reduzierung der Massenträgheit Ansätze, als alternativen Werkstoff Titan-Aluminium-Legierungen einzusetzen, die gute Festigkeitseigenschaften bei deutlich geringerer Dichte auch bei typischen Abgastemperaturen aufweisen. Turbinengehäuse bestehen aus verschiedenen hochwarmfesten Gusslegierungen. Die Laufräder werden durch eine Welle miteinander verbunden, sodass ein Rotor entsteht. Welle und Turbinenrad werden verschweißt, das Verdichterrad mit der Welle verschraubt. In Einzelfällen werden Kugellager zur Lagerung des Rotors verwendet, diese haben jedoch Nachteile hinsichtlich Lebensdauer, Kosten und Akustik. Daher hat sich die an dem Motorölkreislauf gekoppelte, hydrodynamische Gleitlagerung durchgesetzt, wobei hier meist Axial- und Radiallager getrennt aufgebaut sind. Das Axiallager nimmt die aerodynamischen Kräfte aus den Laufrädern auf. Die statische Belastung der Axiallagerung ist gegenüber der Belastung der Radiallagerung verhältnismäßig hoch. In der Radiallagerung hat die Funktion der Dämpfung hohe Bedeutung, durch die das Bewegungsverhalten des Rotors im gesamten Betriebsbereich des Laders bestimmt wird. Die Abdichtung des Rotors zwischen Turbinen- bzw. Verdichtergehäuse zum dazwischen liegenden Lagergehäuse erfolgt durch Labyrinthdichtungen, die mit Hilfe von Kolbenringen aufgebaut werden.

Die konstruktive Gestaltung von Kompressoren unterscheidet sich naturgemäß entscheidend von Turboladern, da das Verdichtungsprinzip und dem folgend auch die Drehzahl vollkommen anders sind. Ihre Rotoren sind komplexe Geometrien, häufig verschränkt (Roots- oder Schraubenverdichter) oder nicht rotationssymmetrisch (Spiralverdichter). Da der Druckaufbau durch Verdrängung realisiert wird, spielen Spaltmaße zwischen rotierenden und nicht-rotierenden Bauteilen eine zentrale Rolle.

### 5.3.4 Kopplung von Motor und Verdichter

Ein Fahrzeugmotor wird im allgemeinen nicht nur im Nennpunkt (Punkt mit maximaler Leistung), sondern in einem weiten Last- und Drehzahlbereich eingesetzt. Bei einem aufgeladenen Motor ist insbesondere die Änderung des Momentes und des Luftdurchsatzes in Abhängigkeit der Drehzahl wichtig. Hierfür kann das Motor-Schluckverhalten

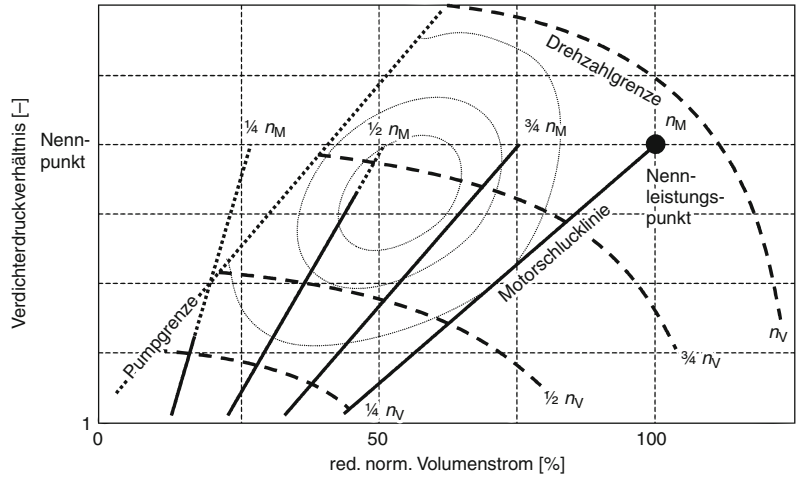



**Abb. 5.145** Motorschlucklinien in einem Turboverdichterkennfeld

und das Verdichterkennfeld betrachtet werden. Die folgenden Betrachtungen werden hier verallgemeinert durchgeführt, ohne dass zwischen Motortypen oder Leistungsklassen unterschieden wird.

Das Zusammenwirken von Motor und Verdichter kann derart verstanden werden, dass der Motor ein „Verbraucher" des Verdichters ist. Dementsprechend lässt er sich als Charakteristik im Verdichterkennfeld darstellen. Es ergeben sich für verschiedene Motordrehzahlen die sogenannten „Schlucklinien" (Abb. 5.145, Beispiel Abgasturbolader-Verdichter, Dieselmotor). Der auf den Eintrittszustand bezogene, vom Motor „geschluckte" Volumenstrom verändert sich nahezu linear mit dem Druckverhältnis. Schnittpunkte zwischen Verdichterkennlinie $n_V$ und Motorschlucklinie $n_M$ stellen Betriebspunkte des Motors dar. Dies ist insbesondere bei der Auslegung von Verdichtern hilfreich, da das Betriebsverhalten im gesamten Kennfeld vorab bewertet werden kann. Bei mechanisch angetriebenen Kompressoren kann so die Übersetzung zwischen Verdichter und Motor bestimmt werden, bei Abgasturboladern helfen diese Schnittpunkte bei der Auswahl eines geeigneten Verdichters und einer geeigneten Turbine.

## 5.3.5 Regelung

Wachsende Anforderungen an das Betriebsverhalten (Leistung, Verbrauch, Emissionen, Dynamik) aufgeladener Motoren haben zu einer kontinuierlichen Entwicklung der Turboladerregelung mit wachsender Komplexität geführt. Ungeregelte Lader spielen in PKW-Anwendungen keine Rolle mehr. Heute sind folgende Regelungsarten von Bedeutung:

### 5.3.5.1 Kompressor

Mechanisch angetriebene Verdichter müssen auf Grund der direkten Kopplung an den Motor vollkommen anders als Turbolader geregelt werden. Die Lastregelung erfolgt mit einem regelbaren Bypass um den Kompressor. Dieser arbeitet bei offener Regelklappe quasi lastfrei (nur beim Rootsverdichter ohne innere Verdichtung möglich). Darüber hinaus kann der Kompressor abgeschaltet werden, um den Verbrauch des Motors zu reduzieren. Dies wird bei Kompressoren mit innerer Verdichtung zwingend notwendig (z. B. Schraubenverdichter), um eine Schädigung des Verdichters zu vermeiden.

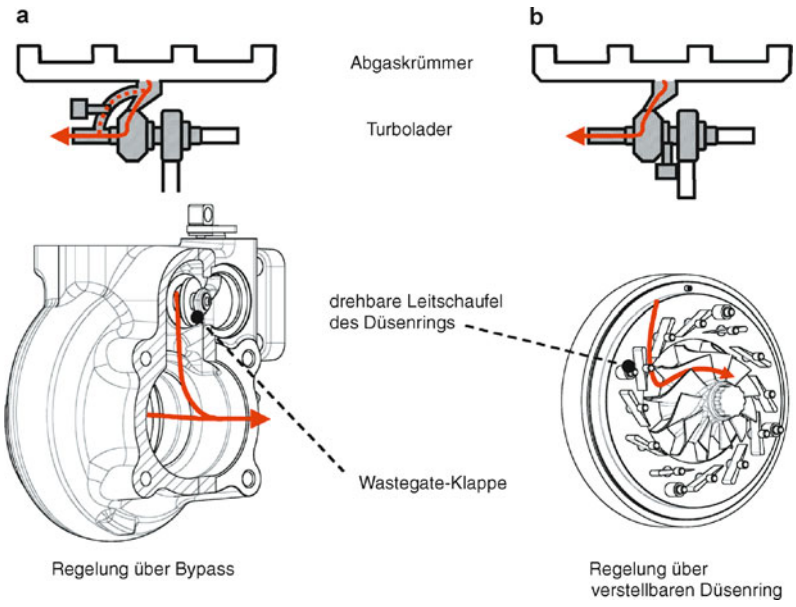



**Abb. 5.146** Regelungsarten einstufiger Turbolader

### 5.3.5.2 Turbolader mit Bypassregelung (Wastegate)

Hierbei kann ein Teil des Abgasmassenstroms um die Turbine herumgeführt werden, sodass dieser Teil nichts zur Verdichterleistung beiträgt (Abb. 5.146a). Damit kann eine kleinere Turbine verwendet werden, die einerseits für höhere Motorleistung bei kleinen Motordrehzahlen und andererseits für eine verbesserte Motordynamik sorgt. Zur Begrenzung des Ladedrucks bzw. Vermeidung von Überdrehzahlen bei Nennleistung wird eine Klappe oder ein Ventil geöffnet. Die Regelung erfolgt üblicherweise selbstregelnd durch einen Überdruck-Aktuator, bei dem der Verdichterdruck an einer Membrane anliegt, die über ein Gestänge die Bypassklappe betätigt. Die Regelung erfolgt je nach Anwendung (Stellkraft, Stellgenauigkeit) selbstregelnd entweder mit einem pneumatischen Aktuator (selbstregelnd oder über ein Taktventil geregelt) oder mit einem elektrischen Aktuator.

### 5.3.5.3 Turbolader mit Regelung über einen verstellbaren Düsenring

Zur Verbesserung der Energieausnutzung und der Regelbarkeit hat sich in anspruchsvollen PKW-Dieselmotoren die Regelung mit dem verstellbaren Düsenring durchgesetzt (Abb. 5.146b; Technologie erstmals bei Dieselmotoren eingesetzt im Jahr 1996 im Audi/VW-4-Zylindermotor, 1,9 l, 81 kW und bei Ottomotoren im Jahr 2006 im Porsche-6-Zylinder-Boxermotor, 3,6 l, 353 kW). Hierbei wird der gesamte Abgasmassenstrom durch die Turbine geführt. Die Leitschaufeln bilden einen Düsenkranz (häufig VTG genannt), mit dem das Druckgefälle über die Turbine entsprechend der verdichterseitigen Anforderungen angepasst werden kann. Dabei steht die Düsenwirkung (Beschleunigung der Strömung) gegenüber der Leitwirkung (Richtung der Strömung) im Vordergrund. Die Nachteile wiederum größerer Turbinenräder können dadurch auch hinsichtlich der Motordynamik überkompensiert werden. Der erweiterte Kennfeldbereich sowie die genauere Regelbarkeit haben sich insbesondere bei höheren Emissionsanforderungen als Vorteil erwiesen. Die Ansteuerung des Verstellmechanismus erfolgt mit Hilfe eines Aktuators, der mittels Unterdruck oder elektrisch angetrieben und gesteuert ist.

Die Düsenring-Technologie wird bei modernen Motoren nicht nur zur Regelung des Ladedrucks, sondern auch zur Regelung der Abgasrückführmengen, im Thermomanagement der Abgasnachbehandlung (Abgastemperaturen nach Turbolader)

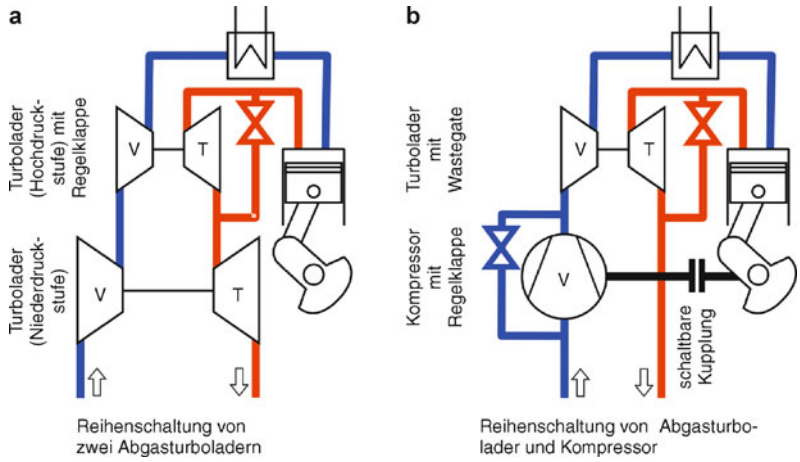



**Abb. 5.147** Zweistufige Aufladung

und zur Unterstützung der Motorbremse (LKW) eingesetzt.

Neben PKW-Dieselmotoren konnte sich diese Regelung bisher noch nicht in gleichem Maße durchsetzen. Bei LKW-Dieselmotoren stellt die deutlich höhere Lebenserwartungsanforderung das zentrale Problem dar. Bei Ottomotoren liegen die Herausforderungen an Konstruktion und Werkstoffe in der Höhe der Abgastemperatur begründet. Hierbei wird im Allgemeinen ein maximaler Grenzwert von 1050 °C am Turbineneintritt angegeben.

### 5.3.5.4 Zweistufig geregelte Aufladung aus zwei Abgasturboladern

Bedingt durch die Einschränkungen der Turbolader mit verstellbarem Düsenring sowie durch wachsende Wünsche an die Höhe des Ladedrucks entwickelte sich der Ansatz, mehrere Turbolader in einer Reihenanordnung aufzubauen und so ein System zu schaffen, dass eine Ladedruckerhöhung in mehreren Stufen realisiert. Sowohl bei Nutzfahrzeugen als auch bei PKW (z. B. BMW-6-Zylinder-Diesel-Reihenmotor, 3,0 l, 210 kW) gibt es Systeme, die aus einer Hochdruck- und einer Niederdruckstufe bestehen (Abb. 5.147a). Im einfachsten Fall wird das System mit Hilfe der Regelklappe geregelt, indem die Hochdruckturbine mit einem Bypass umgangen wird und gerade noch so viel Energie umsetzt, dass der Rotor der Hochdruckstufe nicht zum Stillstand kommt.

Dieser Aufbau kann den Anforderungen entsprechend erweitert werden, z. B. durch Einsatz eines Wastegate-Turboladers als Niederdruckstufe und eines zusätzlichen Bypasses um den Verdichter der Hochdruckstufe. Die Vorteile dieses Systems liegen neben der Erhöhung des erreichbaren Ladedrucks in einer Verbesserung der Motordynamik (da die Hochdruckstufe Ladedruck mit den Vorteilen eines kleinen Laders aufbauen kann) und des Pumpverhaltens (da die einzelnen Verdichter für sich genommen weniger hoch belastet sind und eine unkritische Pumpgrenzlage aufweisen). Außerdem können verhältnismäßig einfache Turbolader verwendet werden. Nachteilig ist das hohe Bauvolumen des Systems. In vielen Anwendungen ist es nicht möglich, den Platz für eine zweistufige Aufladung zu schaffen. Bei der Anordnung kann es dementsprechend auch zu hohen Strömungsverlusten in den Verbindungselementen (Krümmern) der Lader kommen. Außerdem stellen sich durch hohe Drücke auf der Turbinen- und Verdichterseite hohe Anforderungen an die Abdichtung von Gehäuse und Rotor.

### 5.3.5.5 Zweistufig geregelte Aufladung aus Abgasturbolader und Kompressor

Eine Alternative zur Aufladung mit zwei in Reihe geschalteten Turboladern kann die Reihenschaltung von Kompressor und Abgasturbolader sein

(Abb. 5.147b, Prinzip des VW-TSI-4-Zylinderreihenmotor, 1,4 l, 125 kW). Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn der Ladedruck im Nennlastpunkt mit einem Turbolader erreicht werden kann und insbesondere das Fahrverhalten verbessert werden soll. Der Abgasturbolader ist dabei nicht als Hochdruckstufe zu verstehen. Er ermöglicht bei maximaler Motordrehzahl das Erreichen der Nennleistung bei akzeptablem Verbrauch. Geregelt wird er mit Hilfe eines Wastegates. Bei kleinen Motordrehzahlen und hohen Drehmomenten wird der Kompressor (z. B. Rootsverdichter) permanent zugeschaltet, wodurch sich die stationäre und dynamische Leistung der Motors optimieren lassen. Der Kompressor wird mit einer Kombination aus Regelklappe (Bypass) und Magnetkupplung (komplettes Abschalten) geregelt. Der Motor kombiniert somit die Vorteile der Aufladekonzepte „Turbolader" und „Kompressor". Der turboaufgeladene, kleinvolumige Motor sichert einen geringen Kraftstoffverbrauch („Downsizing"), der Kompressor gleicht die entsprechenden Nachteile aus bzw. verbessert das dynamische Verhalten des Motors. Nachteilig ist naturgemäß der hohe konstruktive Aufwand dieser Aufladung. Zwar werden verhältnismäßig einfache Lader eingesetzt, deren Technologie in anderen Anwendungsfällen ausreichend erprobt ist, auf der anderen Seite existieren zwei vollständige Ladersysteme, die neben dem konstruktiven Aufwand hohe Anforderungen an die Lastregelung im dynamischen Betrieb stellen.

## 5.3.6 Motorkomponenten im unmittelbaren Zusammenhang zur Aufladung

### 5.3.6.1 Ladeluftkühlung

Die Mehrheit der aufgeladenen Motoren in Fahrzeuganwendungen ist heute mit Ladeluftkühlern ausgestattet. Diese haben den Zweck, die durch den Verdichtungsprozess erhöhten Temperatur der Frischluft zu senken. Die Lufterwärmung ist nicht zu vermeiden und findet auch bei adiabat isentropen Zustandsänderungen statt. Durch die Erhöhung der Dichte mit der Temperaturabsenkung (ideales Gasgesetz) wird eine höhere Luftmenge im Brennraum des Motors ermöglicht. Dementsprechend dient die Ladeluftkühlung primär der Leistungssteigerung. Zusätzlich ergeben sich auch noch Vorteile hinsichtlich einer geringeren thermischen Bauteilbelastung, geringerer Stickoxidbildung und Verbesserung des Klopfverhaltens (bei aufgeladenen Ottomotoren). Technisch umgesetzt wird diese Kühlung durch Wärmetauscher (Ladeluftkühler in Abb. 5.141), die entweder luft- oder wassergekühlt sind.

### 5.3.6.2 Abgasrückführung

Im Zuge steigender Anforderungen zur Senkung von Abgasemissionen, ist die Abgasrückführung bei Dieselmotoren nicht mehr wegzudenken. Hierbei wird Abgas meist direkt aus dem Abgaskrümmer der aufgeladenen Frischluft zugeführt. Das Abgas wirkt als Inertgas und senkt lokale Temperaturspitzen bei der Verbrennung im Brennraum. Damit wird die Stickoxidbildung reduziert. Die Menge an rückführbarem Abgas ist begrenzt durch den Druckunterschied zwischen dem Abgasdruck vor der Turbine und dem Ladedruck. Für den Turbolader hat dies verschiedene Auswirkungen. Instationär senkt die Abgasrückführung die an der Turbine zum Antrieb des Verdichters anliegende Leistung. Zur Füllung des Brennraums mit dem Gemisch aus Frischluft und zurückgeführtem Abgas muss der Ladedruck gesteigert werden. Solange Abgasrückführung nur im Teillastbereich des Motors realisiert wird, stellt dies kein Problem dar. Die schärfer werdenden Emissionsgesetze erfordern jedoch zunehmend auch Abgasrückführung im Bereich der Volllast, sodass zur Stabilisierung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses ein zusätzlicher Ladedruckbedarf auch im volllastnahen Bereich realisiert werden muss, was wiederum ggf. zu einem zweistufigen System führen kann.

### 5.3.6.3 Schubumluft

Im Ottomotor wird zur Regelung eine Drosselklappe eingesetzt, die zwischen Turboladerverdichter und Saugrohr positioniert wird. Beim Schließen dieser Klappe im Schubbetrieb wird der Verdichter stark gedrosselt. Dies kann zur Folge haben, dass der Verdichterbetriebspunkt in den instabilen Bereich des Pumpens rückt. Zur Vermeidung dieses Effekts wird ein Schubumluftventil verwendet, das

den Verdichter durch einen Bypass zwischen Verdichteraus- und -eintritt entlastet. Die Querschnitte des Schubumluftventils bzw. der Schubumluftleitung sind dabei so zu dimensionieren, dass der Drehzahlabfall des Verdichters bei Schließen der Drosselklappe möglichst gering ist, um ein gutes Transientverhalten des Motors bei erneuter Lastaufschaltung zu erreichen.



## 5.3.7 Sonstige Regelungssysteme

Neben den oben ausführlicher beschriebenen Regelungssystemen gibt es zahlreiche weitere Entwicklungen, die entweder als Nischenlösung verstanden werden können (dort durchaus berechtigt oder erfolgversprechend sein können) oder eine ausreichende Produktreife noch nicht erreicht haben.

### 5.3.7.1 Turbolader mit Regelung über eine verschiebbare Hülse am Turbineneintritt

Auf Grund der Anfälligkeit und der hohen Herstellkosten verdrehbarer Schaufeln als Regeleinheit am Turbineneintritt wurde eine Technologie entwickelt, die häufig als „Schiebehülsen-Turbine" benannt wird. Hier wird die Variabilität der Turbine durch eine reine Querschnittsveränderung am Turbineneintritt realisiert. Obwohl diese Technologie bzgl. ihres Regelbereichs und ihres Wirkungsgrads erfolgversprechend war, hat sie sich im PKW nicht durchsetzen können. Dies ist insbesondere durch eine hohe thermische Belastung des Systems (dadurch resultieren höhere Kosten als erwartet) und Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit der Regelung begründet. Bei Nutzfahrzeugen wiederum hat diese Turbinenreglung auf Grund ihrer Robustheit einen festen Markanteil eingenommen. Bei Nutzfahrzeugen wiederum wurde der Ansatz lange verfolgt, auch weil zusätzlich zur Regelung Potentiale in Kombination mit einer Motorbremsfunktion existieren.

### 5.3.7.2 Elektrisch unterstützte Aufladung

Auf der Suche nach Erweiterungen von Freiheitsgraden beim Betrieb von Turboladern wurde die Zuführung elektrischer Leistung als eine Option entdeckt. Dabei gab bzw. gibt es verschiedene Ansätze. Entweder kann ein Elektromotor auf der Welle des Turboladers integriert werden, der bei Bedarf zusätzliche Energie auf den Verdichter übertragen kann oder es wird ein zusätzlicher, elektrisch angetriebener Turboverdichter in die Luftstrecke des Motors (vor oder hinter Turboladerverdichter) eingebaut, der direkt den Ladedruck erhöht. Die Vorteile liegen insbesondere in einer Verbesserung des dynamischen Ladedruckaufbaus bei angemessener Regelbarkeit. Nachteilig ist der sehr hohe Bedarf an elektrischer Energie. Um einen wirksamen Beitrag zur Ladedrucksteigerung zu bewirken, wird eine elektrische Leistung in ähnlicher Größenordnung der aerodynamischen Verdichterleistung (mehrere kW) über eine bestimmte Zeit (mehrere Sekunden) benötigt. Die üblichen Bordnetze (besonders 12-Volt-Technik) sind damit allerdings überfordert. Elektrische Zwischenspeicher können eine Lösung sein, führen aber zusammen mit dem Ladersystem und der Leistungselektronik zu hohen Kosten. Schließlich ist noch die Temperaturempfindlichkeit (besonders beim Elektromotor auf der Turboladerwelle) zu nennen. Trotz des hohen Potentials der elektrischen Aufladung ist es derzeit nicht absehbar, in welchem Umfang sie sich im Massenmarkt durchsetzen wird.

### 5.3.7.3 Registeraufladung

In Analogie zur Elektrotechnik kann die Schaltung zweier Turbolader statt in Reihenausführung auch in einer Parallelausführung erfolgen (z. B. Peugeot-4-Zylinder-Dieselmotor, 2,2 l, 125 kW). Dies wird als Registeraufladung bezeichnet. Optimal realisierbar ist dieses Prinzip bei Motoren, die ohnehin mit zwei Turboladern ausgerüstet sind (z. B. V-Motoren oder Reihenmotoren mit getrennter Abgasführung). Im Nennleistungsbereich versorgen beide Turbolader den Motor. Bei der geschalteten Parallelanordnung können die Abgasströme beider Turbolader zusammengefasst werden, um einen einzelnen Lader anzutreiben, der dann wiederum den gesamten Motor (bei V-Motoren beide Zylinderbänke) mit Frischluft versorgt. Der andere Lader wird in diesem Fall quasi abgeschaltet. Vorteilhaft ist dabei, dass das einzelne Aufladeaggregat für den Motor als verhältnismäßig kleiner Lader ein gutes dynamisches Verhalten des Motors bewirkt. Im Nennleistungsbereich arbeiten beide Lader gemein-

sam. Nachteilig ist allerdings das große Bauvolumen. Außerdem ist das maximale Ladedruckniveau begrenzt. Schließlich ist anzumerken, dass das volle Potential erst bei Motoren mit mindestens sechs Zylindern ausgeschöpft werden kann, um jeden einzelnen Turbolader mit einer ausreichenden Pulsfolge versorgen zu können. Diese Motoren werden in Fahrzeuganwendungen allerdings häufig mit hydraulischen Wandlern zum Getriebe hin betrieben, was wiederum die Dynamikvorteile der Aufladung schwächt.

#### 5.3.7.4 Turbo-Compound-Verfahren

Als Ergänzung zum Turbolader gibt es Systeme, bei denen das Ziel verfolgt wird, die Abgasenergie auch nach Austritt aus dem Turbolader weiter zu nutzen. Dafür kann z. B. eine zusätzliche Nutzturbine hinter dem Turbolader angeordnet werden, die dem Abgas Leistung entzieht und mechanisch über ein Getriebe auf die Motorwelle überträgt. Dies nennt man Turbo-Compound-Verfahren. Die Verbrauchsvorteile sind jedoch in einem durchschnittlichen Betrieb verhältnismäßig gering, der konstruktive Aufwand am Motor jedoch hoch. Eine Renaissance könnte dieses System dadurch erfahren, dass es ermöglicht, den Druckunterschied zwischen Abgas und Ladedruck ohne zusätzliche Drosselung und dementsprechende Verbrauchsnachteile zu erhöhen. Damit können höhere Mengen bei der Abgasrückführung erzielt werden.

### 5.3.8 Downsizing und Aufladung: Potentiale, Grenzen, Auswirkungen

Eine unumstritten effektive und wirksame Methode zur Verbrauchsabsenkung von Verbrennungsmotoren stellt das Downsizing dar. Das Prinzip ist dabei, die Baugröße des Motors zu reduzieren und dabei die Motorleistung konstant zu halten. Die Hubvolumenreduzierung lässt sich durch eine Verringerung der Zylinderanzahl bei gleichem Zylinderhubvolumen oder durch eine Verringerung des Zylinderhubvolumens bei gleicher Zylinderanzahl reduzieren. Die gesteigerte spezifische Leistung wird eine Erhöhung der Ladeluftdichte ermöglicht. Zunächst einmal hat die Verkleinerung des Motors einen positiven Einfluss auf die Motorreibung und die Wandwärmeverluste. Diese Vorteile können aber insbesondere durch Verbrennungsnachteile und zusätzliche Ladungswechselverluste wieder aufgebraucht werden. Die Einzeleffekte sind auf Grund unterschiedlicher Verfahren und Konstruktionen motorspezifisch. Der Hauptvorteil des Downsizing liegt darin begründet, dass der Betrieb des Motors hin zu höheren Mitteldrücken verlagert wird. Auf einer typischen Fahrwiderstandslinie ergeben sich insbesondere bei kleinen bis mittleren Lastzuständen erhebliche Verbrauchsvorteile (◘ Abb. 5.148), bei Nennleistung kann es zu einem Verbrauchsnachteil kommen. Begründet ist dieser Effekt dadurch, dass mit zunehmendem Mitteldruck die Verlustanteile von Reibung, Wandwärme und Ladungswechsel an der Nutzleistung abnehmen. Dieser Effekt ist allerdings begrenzt, die Wirkungsgrad-Muscheln können sich bei hohen Mitteldrücken allerdings wieder schließen (z. B. durch höhere Verbrennungs- oder Ladungswechselverluste). Motoren mit hohem Volllast-Anteil (z. B. LKW) können demnach den Downsizing-Effekt nur bedingt nutzen.

Allerdings ergeben sich durch das Downsizing steigende Anforderungen an das Aufladesystem. Bei heutigen Basis-Motorisierungen sind Turbolader häufig bereits soweit optimiert, dass Belastungsgrenzen ausgereizt sind. Durch nennenswerte Downsizinggrade (bezogene Hubraumreduzierung bei konstanter Leistung, [142]) in der Größenordnung von ab 30 % ergibt sich ein deutlich steigender Bedarf an Ladedruck (◘ Abb. 5.149, Motorvolllastlinien eines Basis-Motors und eine Downsizing-Motors im Verdichterkennfeld). Der Motorbetrieb übersteigert die Drehzahlgrenze des Verdichters, außerdem würde der Verdichter zunehmend im instabilen Bereich links der Pumpgrenze betrieben werden. Ein weiteres Problem stellt die Variabilität der Turbinenleistung dar; bei spezifischen Leistungen oberhalb von 65 kW/l kommt Regelung mittels variablem Düsenring hinsichtlich einer ausreichenden Leistungsbereitstellung für den Verdichter und einer Kompensation der resultierenden Anfahrschwäche an ihre Grenzen. Hier sind demnach andere Maßnahmen notwendig, z. B. die Einführung einer zweistufigen Aufladung. Diese macht hohe Ladedrücke in einem breiten Kennfeldbe-

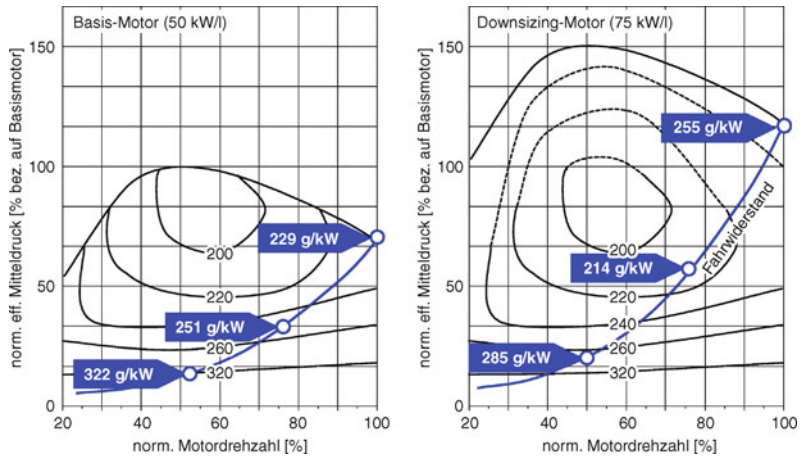



**Abb. 5.148** Verbrauch im Motorkennfeld, Pkw-Motoren

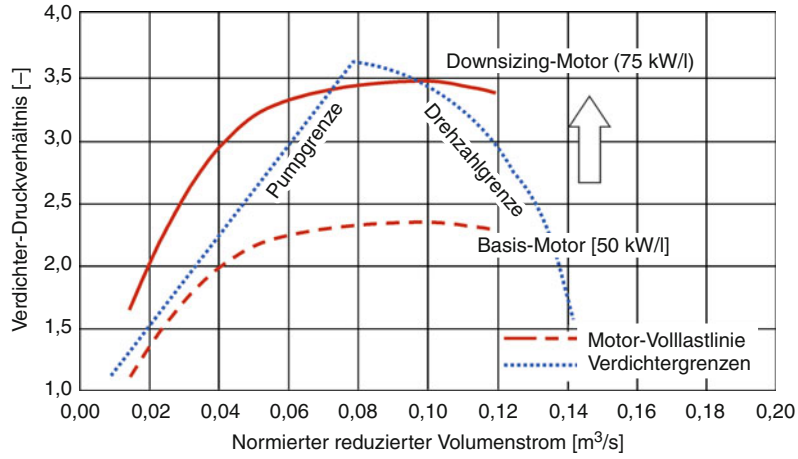



**Abb. 5.149** Anforderung an das Aufladesystem durch Downsizing

reich bei gleichzeitig günstiger Fahrdynamik möglich, hat aber zusätzliche Ladungswechselverluste zur Folge.

Die notwendigerweise steigenden Belastungen des Turboladers wirken sich auf jedes Bauteil des Turboladers aus (Tab. 5.12).

## 5.3.9 Methoden in der Entwicklung

Der Entwicklungsprozess von Turbolader-Systemen ist dem von anderen Motorkomponenten generell ähnlich. Die Turbolader-Entwicklung setzt bereits in der Frühphase der Motor-Entwicklung ein, da der Turbolader einen zentralen Einfluss auf die Leistung, die Dynamik, die Emissionen und den Verbrauch des Motors hat. Üblicherweise wird der Turbolader in der A-Musterphase thermodynamisch definiert und in den B- und C-Musterphasen mechanisch abgesichert.

Die Auslegung erfolgt auf Basis stationär vermessener Kennfelder für Turbine und Verdichter und Ziel-Motordaten entsprechend Lastenheft. Letztere basieren häufig auf Werten, die aus Motoren einer vorherigen Generation abgeleitet wurden. Es kommt heute selten vor, dass ein Motor komplett

**Tabelle 5.12** Anforderung und Auswirkung von Downsizing

| Anforderung durch Downsizing | Betroffenes Turbolader-Bauteil |
|---|---|
| Kennfeldbreite | Verdichter |
| Drehzahlgrenze | Verdichterrad, Turbinenrad, Radiallager |
| Flexibilität der Regelung | Turbine, Aktuator |
| Hohe Wirkungsgrade | Verdichter, Turbine, Lagerung |
| Abgastemperatur | Turbine, Lagerung |
| Zyklenfestigkeit (TMF/LCF/HCF) | Verdichterrad, Turbinenrad, Turbinengehäuse |
| Blowby | Kolbenring-System |
| Dynamik | Turbine, Gesamtsystem |

neu ausgelegt wird, dementsprechend ist die Datenbasis für die Auslegung meist gut. Als Werkzeuge werden dabei meist unternehmenseigene Programme und Datenbanken verwendet, die mit Motorprozess-Simulationstools (z. B. GT-Power, Wave, Boost) unterstützt. Auf Grund verschiedener Effekte muss der ausgelegte Turbolader in verschiedenen Varianten erprobt werden. Dabei werden meist Turbinen mit verschiedenen Durchsatz- oder Wirkungsgrad-Charakteristiken, Verdichter mit Pump- und Drehzahlgrenzen sowie Wirkungsgradvarianten und verschiedene Lagerungs- und Regelungskonzepte erprobt. Hintergrund ist hier, dass sich der reale Betrieb am Motor nur bedingt vorhersagen lässt. Zu den relevanten Einflüssen zählt, dass die Strömung am Turbolader-Prüfstand (bei der Kennfeldvermessung) stationär und am Motor-Prüfstand pulsierend ist, dass die thermischen Randbedingungen (z. B. Wärmestrahlung) abweichen oder das Package unterschiedlich ist. Die versuchsseitigen Aufwendungen sind demnach in der frühen Entwicklungsphase hoch.

Die weitere Absicherung bezieht sich auf stärker mechanische Themen. Rotordynamische Untersuchungen werden mit Hilfe von Weg- und Schwingungssensoren schwerpunktmäßig experimentell durchgeführt und dienen zur Qualifizierung der Lagerung. Die Simulation ist auf Grund der komplexen Vorgänge in der Lagerung möglich aber noch sehr aufwendig. [143]. Ähnlich ist es bei der Untersuchung vom Durchschlagverhalten berstender Räder durch Turbinen- und Verdichtergehäuse (Containment), wo die Simulation zwar vielversprechend ist, der Versuch aber noch dominiert. Gerade bei lebensdauer-relevanten Vorgängen (high cycle fatigue (HCF), low cycle fatigue (LCF), thermo mechanical fatigue (TMF, [144])) sind viele Versuche und Simulationen nötig, um den Turbolader in der Entwicklung abzusichern. Themen zum Verschleiß, zur Verkokung und zur Korrosion bleiben ein mehr oder weniger reines experimentelles Untersuchungsgebiet. Die Klärung der akustischen Eigenschaften des Turboladers rundet die Absicherung ab, hier ist darauf hinzuweisen, dass auf Grund des komplexen Übertragungsverhaltens von Schall eine Prüfung erst im Fahrzeug sinnvoll ist.

Üblicherweise werden Absicherungsmaßnahmen zwischen Motor- und Turbolader-Hersteller abgestimmt und z. B. in einem DVP (design validation plan) dokumentiert; Tab. 5.13 zeigt typische Absicherungsmaßnahmen für Turbolader). Bei erfolgreicher Prüfung aller Maßnahmen erfolgt die Freigabe zur Produktion nach branchenvertrauter Vorgehensweise.

Der Simulation kommt als Teil der Serien-Absicherung offensichtlich zunehmend eine höhere Bedeutung zu. Mit der Weiterentwicklung der Rechner-Leistungen und der Verfeinerung der Software und Ergänzung der Verfahren hat die Simulation heute schon lange keinen rein akademischen Nutzen mehr, sondern wird als ein gleichwertiger Teil der Absicherung verstanden. In bestimmten Bereichen kann die Simulation den Versuch ergänzen, immer häufiger aber auch ersetzten. Häufig leiden die Verfahren darunter, dass noch nicht alle Werkstoffdaten in ausreichendem Umfang vorliegen. Langfristig ist davon auszugehen, dass Versuch und Simulation parallel bei der Absicherung Verwendung finden. Es kann nicht davon ausgegangen werden, den Versuch durch die Simulation vollständig zu ersetzen.

**Tabelle 5.13** Absicherungsmaßnahmen in der Entwicklung (Auszug)

| Absicherungsthema | Typische Musterphase | Art der Untersuchung | S: Simulation<br>HG: Heissgasprüfstand<br>M: Motorprüfstand<br>K: Komponentenp.<br>F: Fahrzeug |
|---|---|---|---|
| Thermodynamik | A, B | Stat. Kennfelder (Turbine, Verdichter, Motor), Dynamik | S (CFD, Prozess), HG, M |
| Höhenreserve | A, C | Berücksichtigung bei Erstauslegung, Überprüfung im Fahrzeug | S (CFD, Prozess), F |
| Rotordynamik | A, B | Lagerstabilität und Drehzahlgrenze | S (Mehrkörpersimulation), HG, M |
| Bersten, Schaufelschwingung (HCF) | A, B | Drehzahlgrenze der Laufräder | S (FEM), HG |
| Lastwechsel (LCF) | B, C | Anwendungsspezifische Lebensdauerbetrachtung | S (FEM), K, HG, M |
| Gehäuserisse (TMF) | C | Prüfung des Rißverhaltens bei thermischen Lastwechseln | S (FEM), HG, M |
| Containment | C | Durchschlagsicherheit der Gehäuse bei Radbersten | S (FEM), HG |
| Verkokung, Blowby, Ölverlust, Korrosion | B, C | Langzeitverhalten; in Kombination mit anderen Dauerläufen | HG, M |
| Haltbarkeit, Verschleiß | B, C | Diverse Dauerläuf-Typen (Zyklen) | K, HG, M, F |
| Akustik | B, C | Prüfung der akustischen Bedeutung des Turboladers | HG, M, F |

## 5.3.10 Ausblick

Die Aufladung von Verbrennungsmotoren hat seit einigen Jahren eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung von Verbrennungsmotoren eingenommen. Mit ihr lassen sich alle relevanten Bereiche eines Motorbetriebs beeinflussen. Solange Kraftstoffe als Energiespeicher für Antriebssysteme heiß verbrannt werden, wird die Bedeutung der Aufladung zunehmen. Sowohl Lader- als auch Motorhersteller arbeiten daher intensiv an neuen Technologien. Obwohl sich der Turbolader seit seiner Erfindung 1905 im grundsätzlichen Aufbau nicht wirklich verändert hat, so gab es doch gerade in den letzten Jahren viele bedeutende Erfindungen rund um die Aufladung. Es ist damit zu rechnen, dass sich in den kommenden Jahren einige neue Technologien durchsetzen werden.

In PKW-Applikationen rückt insbesondere in der Verbesserung des Ansprechverhaltens in den Fokus der Entwicklung, das bei Turbolader-Anwendungen prinzipbedingt Handlungsbedarf besteht. Hier zeigen sich ganz unterschiedliche Technologien. Seit vielen Jahren wird beispielsweise an Wälzlagern gearbeitet, die ein hohen Potential zur Dynamik- und Wirkungsgradverbesserung aufweisen, sich aber nur vereinzelt durchsetzen [146]. Die Herausforderungen liegen in den Kosten, der Haltbarkeit und der Akustik. Als weiteres Beispiel kann das Potential von Titan-Aluminium-Legierungen als neuer Turbinenrad-Werkstoff genannt werden. Die deutlich geringe Dichte dieses Werkstoffs ermöglicht primär eine Verbesserung des Ansprechverhaltens des Motors, stellt aber neue Anforderungen an die Bearbeitung, das Fügen und schließlich ebenfalls die Kosten. Ein anderer Ansatz kann eine konstruktive Reduzierung der Massenträgheit sein, die durch Veränderungen der Laufräder erfolgt, beispielsweise eine Axialturbine [147]. Allerdings ist hier noch unklar, inwieweit Verschlechterungen des Gesamtwirkungsgrads die Vorteile der Dynamik rechtfertigen.

In der Zukunft wird sich zudem eine Vielzahl an erweiterten Ladersystemen etablieren. Zweistufige Systeme aus zwei Turboladern setzen sich zunehmend durch. Treiber dieser Entwicklung sind Dieselmotoren. Inzwischen gibt es sogar Systeme, die aus drei Turboladern aufgebaut sind [5]. Dabei ist allerdings anzumerken, dass bei diesem System nicht drei Stufen wirken, sondern eher die zweistufige Aufladung mit einer Flexibilisierung der Hochdruckstufe ergänzt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil aufgeladener Ottomotoren weiter ansteigen wird, nicht zuletzt um durch deutliche Verbrauchseinsparungen steigenden Kraftstoffpreisen entgegen zu wirken. Dies muss auf Grund der erweiterten Anforderungen am den Betriebsbereich und die Betriebstemperatur zu Weiterentwicklungen der Regelungsansätze vor und auch der Werkstoffe führen. Ottomotorische Turbolader könnten sich so zu Technologie-Treibern entwickeln. Bei allen Anwendungen, Diesel oder Otto, besteht ein hoher Weiterentwicklungsbedarf z. B. hinsichtlich Verschleiß, Zyklenfestigkeit, Rissbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und Festigkeit bei steigenden Temperaturen.

## 5.4 Triebstrang

### 5.4.1 Überblick

#### 5.4.1.1 Einleitung

Getriebe sind im Antriebsstrang eines Fahrzeugs ebenso wichtig wie der Verbrennungsmotor. Erst im richtigen Zusammenspiel beider und unter Berücksichtigung der geeigneten Komponenten kann man Anfahren, Vorwärts- und Rückwärtsfahren sowie unterschiedlichste Fahrwiderstände überwinden. Dabei sind in dem Begriff Triebstrang alle Komponenten im Antriebstrang eines Fahrzeugs zusammengefasst, die die Leistung des Motors zu den Rädern leiten.

Wenn wir den Pkw betrachten, finden wir Handschaltgetriebe und Automatgetriebe je nach geographischer Region unterschiedlich stark vertreten. Die Doppelkupplungsgetriebe und automatisierten Schaltgetriebe haben bisher nur in Westeuropa nennenswerte Stückzahlen erreicht. Die größte Verbreitung stufenloser Getriebe liegt in Japan vor, mit Abstand gefolgt von Deutschland. Das Wandlerautomatgetriebe ist nach wie vor das weltweit dominierende automatische Getriebesystem (siehe ◘ Tab. 5.14).

Die Grundanforderungen an die Komponenten des Triebstrangs sind einfache Bedienung, geringe Verluste, geringes Bauvolumen und niederes Gewicht, hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie geringe Kosten.

#### 5.4.1.2 Aufgaben des Getriebes

Weltweit haben sich Otto- und Diesel-Motor als Fahrzeugantrieb durchgesetzt. Dies wird auf absehbare Zukunft auch so bleiben. Beide Antriebsmaschinen sind durch folgende Charakteristika gekennzeichnet:

- Sie arbeiten nur in einem bestimmten Drehzahlbereich, der durch Leerlauf- und Maximaldrehzahl begrenzt ist. Ein Fahrzeugantrieb aus dem Motor-Stillstand heraus ist nicht möglich.
- Das Motordrehmoment allein reicht für starke Beschleunigung oder zur Überwindung größerer Steigungen nicht aus.
- Die Motoren haben nur eine Laufrichtung. Vorwärts-Rückwärts-Betrieb ist damit nicht möglich.

Das Getriebe kompensiert diese Schwächen des Motors und sorgt mit verschiedenen Übersetzungen (oder auch stufenlos), zusammen mit einem Anfahrelement dafür, dass Zugkraftbedarf und Drehmomentangebot zusammenpassen. Das Getriebe bietet passende Übersetzungen für Beschleunigung, Steigungen und kraftstoffsparendes Fahren an, und ermöglicht auch das Rückwärtsfahren.

Der Fahrzustand eines Fahrzeugs wird durch die so genannte Fahrgleichung beschrieben. Sie stellt das Gleichgewicht her zwischen den zu überwindenden Fahrwiderständen einerseits und dem vom Triebstrang gewandelten Antriebsdrehmoment andererseits. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das statische Drehmoment des Motors bei Änderungen der Drehzahl seiner rotierenden Massen vermindert oder vergrößert wird. Zwischen Getriebeeingang und Rad liegt die Getriebewandlung $(i/r)$ und auch der Übertragungswirkungsgrad $\eta_{ges}$

**Tabelle 5.14** Getriebeart weltweit 2009–2015

| Region | Pkw-Gesamtproduktion [Mio] | | Anteil Handschaltgetriebe | | Anteil Wandlerautomatgetriebe | | Anteil stufenlose Getriebe | | Anteil automatisierte Getriebe | | Anteil Doppelkupplungsgetriebe | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2009 | 2015 | 2009 | 2015 | 2009 | 2015 | 2009 | 2015 | 2009 | 2015 | 2009 | 2015 |
| Welt | 58,2 | 90,6 | 57,7 % | 50,2 % | 33,0 % | 36,9 % | 7,3 % | 7,7 % | 0,9 % | 1,8 % | 1,1 % | 3,4 % |
| Nordamerika | 8,5 | 15,3 | 8,8 % | 7,5 % | 82,8 % | 83,5 % | 7,5 % | 7,0 % | 0 % | 0 % | 0,9 % | 2,0 % |
| Japan | 7,8 | 10,0 | 18,2 % | 18,3 % | 43,8 % | 43,3 % | 37,9 % | 38,1 % | 0 % | <1 % | <1 % | <1 % |
| Westeuropa | 12,9 | 17,7 | 76,0 % | 72,5 % | 15,0 % | 17,1 % | 2,9 % | <1 % | 2,2 % | 2,3 % | 3,9 % | 7,6 % |
| Deutschland | 5,1 | 7,2 | 59,7 % | 54,5 % | 24,7 % | 29,8 % | 6,5 % | <1 % | 2,0 % | <1 % | 8,6 % | 14,8 % |

des gesamten Triebstrangs. Die Fahrgleichung lautet somit:

$$\overbrace{(M_{\mathrm{mot}} - J_{\mathrm{mot}} \cdot \dot{\omega}_{\mathrm{mot}}) i/r \cdot \eta_{\mathrm{ges}}}^{\text{Antriebsmoment}} = F_{\mathrm{w}}$$

$$= \overbrace{m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha}^{\text{Rollwiderstand}} + \underbrace{c_{\mathrm{w}} \cdot (r/2) \cdot A \cdot v^2}_{\text{Luftwiderstand}} + \underbrace{F_{\mathrm{B}}}_{\text{Bremskraft}} + \underbrace{m \cdot g \cdot \sin\alpha}_{\text{Steigungswiderstand}} + \underbrace{m \cdot \varkappa \cdot a}_{\text{Beschleunigungswiderstand}}$$

Die Wandlung $(i/r)$ ist das Verhältnis der Antriebskraft an den Rädern zum Drehmoment am Getriebeeingang. Falls im Triebstrang kein Schlupf auftritt, entspricht $(i/r)$ gleichzeitig der Übersetzung zwischen Winkelgeschwindigkeit am Getriebeeingang und Fahrgeschwindigkeit.

Die Wandlung $(i/r)$ setzt sich zusammen aus den variablen Übersetzungen im Schaltgetriebe und festen Übersetzungen im Antriebsstrang wie zum Beispiel im Achsgetriebe.

Der Beschleunigungswiderstand berücksichtigt nicht nur die Fahrzeugmasse, sondern mit dem Faktor $k$ auch die rotatorisch beschleunigten Massen des Fahrzeugs zwischen Getriebeeingang und Rädern. Dafür gilt

$$\varkappa = 1 + \frac{1}{m} \sum^{n} J_n \cdot (i_n/r)$$

Für die Auslegung der Getriebe ist es notwendig, die Grenzen zu ermitteln, innerhalb derer die Wandlung $(i/r)$ variiert. Die größte Wandlung $(i/r)_{\max}$ wird für das Befahren starker Steigungen, für hohe Beschleunigung und in der Regel auch zum Anfahren benötigt. $(i/r)_{\max}$ kann aus der Fahrgleichung unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes und für guten Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn berechnet werden. Für maximale Steigfähigkeit ist Beschleunigung 0 in die Fahrgleichung einzusetzen, für maximale Beschleunigung dagegen Steigung 0.

Die für beide Kriterien ermittelten Werte von $(i/r)_{\max}$ sind unterschiedlich, da bei max. Beschleunigung die rotierenden Motormassen berücksichtigt werden müssen. Ebenso spielt eine Rolle, ob das Fahrzeug Front-, Heck- oder Allradantrieb hat.

Fragestellungen für die Auslegung der kleinsten Getriebewandlung $(i/r)_{\min}$ sind:

1. Soll das Fahrzeug damit seine Maximalgeschwindigkeit in der Ebene erreichen (Einsatz der maximalen Motorleistung, Steigfähigkeit 0, Beschleunigung 0)?
2. Sind gute Steigfähigkeit und Beschleunigungsreserve im obersten Gang wichtig oder soll der Kraftstoffverbrauch möglichst gering sein?

Mit den in a) genannten Daten lässt sich die Wandlung $(i/r)_0$ für Höchstgeschwindigkeit aus der Fahrgleichung ermitteln.

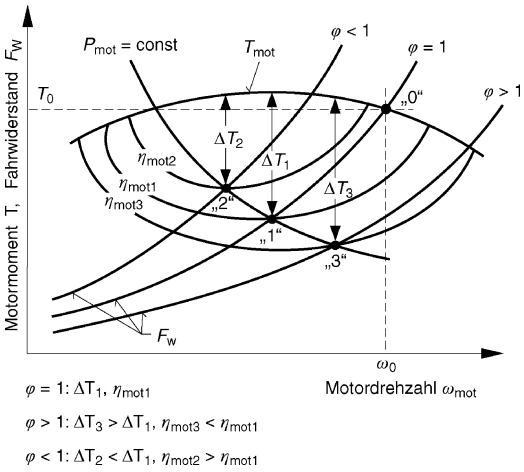



**Abb. 5.150** Motorkennfeld und vom Schnellgangfaktor abhängige Lage der Fahrwiderstandskurve

Abweichungen von $(i/r)_0$ werden durch den so genannten Schnellgangfaktor $\varphi$ definiert.

$$(i/r)_{min} = \varphi \cdot (i/r)_0$$

$\varphi$ kann folgende Werte haben (siehe Abb. 5.150):

- $\varphi = 1$ Endgeschwindigkeit = Maximalgeschwindigkeit, mittlere Steigfähigkeits- und Beschleunigungsreserve, relativ hoher Verbrauch.
- $\varphi > 1$ Steigfähigkeits- und Beschleunigungsreserve wachsen, Kraftstoffver brauch nimmt zu, Getriebewandlungsbereich wird reduziert.
- $\varphi < 1$ Steigfähigkeits- und Beschleunigungsreserve nehmen ab, Kraftstoffverbrauch sinkt, Getriebewandlungsbereich wird vergrößert.

Der Wandlungsbereich eines Getriebes ist definiert durch

$$I = (i/r)_{max}/(i/r)_{min}$$

Dieser Wandlungsbereich wird ideal mit einem stufenlosen Getriebe abgedeckt. Durchgesetzt haben sich aber Zahnrad-Stufengetriebe unterschiedlicher Konzeption mit den Vorteilen kompakte Bauweise, günstiges Gewicht, hoher Wirkungsgrad und beherrschbare Technologie. Pkw-Handschaltgetriebe sind heute überwiegend mit 5 oder 6 Gängen ausgeführt. Pkw-Automatgetriebe findet man heute mit 4 bis 8 Gängen. Die Gangstufung ist in der Regel progressiv, das heißt, dass im Bereich der unteren Gänge (hohe Übersetzungen) größere Gangsprünge vorhanden sind. In den oberen Gängen, die einen höheren Fahranteil haben, sind die Gangsprünge dagegen deutlich kleiner. Abb. 5.151 zeigt die Zusammenarbeit von Motor und Fahrzeug in Verbindung mit einem progressiv gestuften 6-Gang-Automatgetriebe.

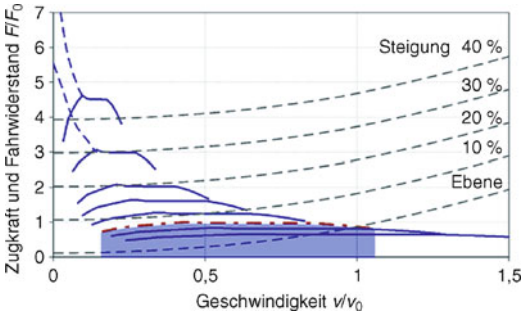



**Abb. 5.151** Fahrkennfeld mit 6-Gang-Automatgetriebe

Bei Getrieben in Gruppenbauweise, welche vorwiegend in Nutzfahrzeugen eingesetzt werden, ist bauartbedingt eine geometrische Stufung mit identischen Gangsprüngen vorzufinden.

### 5.4.1.3 Aufbau und Elemente des Triebstrangs

Zur Übertragung des Drehmoments der Antriebsmaschine zu den Fahrzeugrädern sind folgende Komponenten erforderlich:

- mechanische Anfahr- und Trennkupplung oder hydrodynamischer Wandler,
- Stufen- oder stufenloses Getriebe,
- Achsgetriebe mit fester Übersetzung,
- Differenziale für Antriebsachsen und evtl. Allradantrieb,
- Wellen und Gelenke zur Leistungsübertragung im Antriebsstrang bis hin zu den Rädern,
- Bedienungselemente für Kupplung, Getriebe und eventuelle Allradaktivierung.

Tab. 5.15 zeigt die möglichen Anordnungsvarianten des Triebstrangs im Pkw.

**Tabelle 5.15** Anordnungsvarianten Triebstrang

| Antrieb | Motorlage | Angetriebene Achse |
|---|---|---|
| Standard | Front längs | hinten |
| Front | Front längs oder quer | vorn |
| Mittel | Mitte | hinten |
| Heck | Heck | hinten |
| Allrad | Front längs oder quer | vorn und hinten |

### 5.4.1.4 Achsantrieb

Achsgetriebe haben die Aufgabe, das unterschiedliche Drehzahlniveau von Motor und Rad anzupassen. Die Ausführung des Achsgetriebes hängt von der Motoranordnung ab. Bei quer eingebautem Motor ist es ein Stirnradsatz, bei Längsanordnung des Motors ein Kegelradsatz mit Hypoidverzahnung.

Die feste Übersetzung $i_a$ des Achsgetriebes berechnet sich zu

$$i_a = (i/r)_{min}/(i_g)_{min}$$

mit $(i_g)_{min}$ als kleinste Übersetzung des Schalt- oder stufenlosen Getriebes.

Praxiswerte für die Übersetzung des Achsgetriebes liegen zwischen ca. 2,6 bis 4,5.

### 5.4.1.5 Differenzialgetriebe

Differenzialgetriebe werden eingesetzt, um die bei Kurvenfahrt auftretenden oder durch unterschiedlichen dynamischen Reifenradius (Fertigungstoleranzen, unterschiedlicher Reifenluftdruck) bedingten Drehzahldifferenzen der Räder angetriebener Achsen auszugleichen. So wird Zwangsschlupf vermieden und gleichzeitig Drehmoment übertragen.

Differenzial und Achsantrieb bilden das Achsgetriebe. Abb. 5.152 zeigt ein Hinterachsgetriebe mit Kegelradsatz (Ritzel und Tellerrad), Kegelrad-Differenzial, Gehäuse sowie An- und Abtriebsflanschen.

Achs-Differenziale in Kegelradbauweise haben die größte Verbreitung gefunden. Die Ausgleichsräder des Differenzials wirken wie Waagebalken und bringen die beiden Antriebsräder ins Drehmomentgleichgewicht.

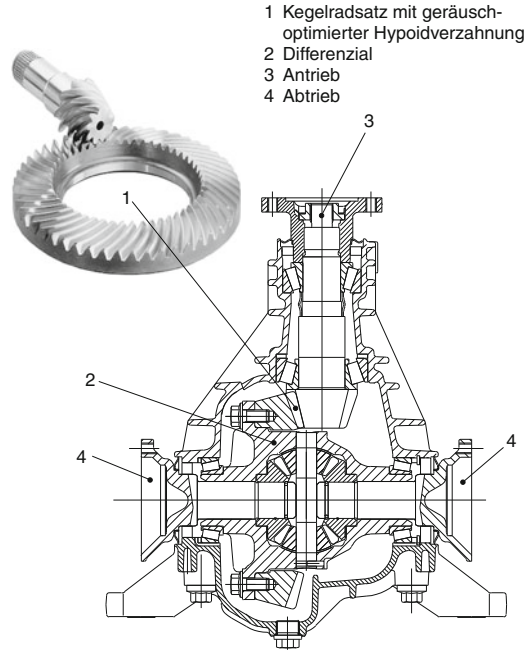



**Abb. 5.152** Pkw-Hinterachsgetriebe (ZF HAG 210)

Eine Alternative zu den Kegelraddifferenzialen stellen neuerdings Differenziale bestehend aus einem einfachen Plus-Planetensatz dar.

Bei Fahrbahnverhältnissen mit unterschiedlicher Traktion an den Antriebsrädern bestimmt das Rad mit dem niedrigen Reibwert – bedingt durch den Waagebalken-Effekt – die übertragbare Vortriebskraft des Fahrzeugs und rutscht bei Antriebsmoment-Überschuss durch. Dieser Traktionsverlust kann durch Sperrdifferenziale abgebaut werden. Man unterscheidet formschlüssige (schaltbare) und kraftschlüssige (selbsttätige) Sperren. Die formschlüssigen Sperren verbinden beide Achshälften starr miteinander, was zu Zwangsschlupf und Verspannung bei Kurvenfahrt führt.

Kraftschlüssige Sperrdifferenziale lassen Differenzdrehzahl zwischen den Antriebsrädern zu. Ihr Sperrmoment ist entweder proportional zum Antriebsdrehmoment (Kraftschluss durch Reiblamellen oder durch Reibung an kombinierten Schnecken- und Stirnradverzahnungen) oder abhängig von der auftretenden Differenzdrehzahl (Visco-Sperrdifferenzial).

Aktuell ist zu beobachten, dass strategiefähige, elektronisch geregelte kraftschlüssige Sperrdifferentiale an Bedeutung gewinnen. Eine Traktionsverbesserung kann auch mittels elektronisch gesteuertem Bremseneingriff erzielt werden. Durch Aktivieren der Bremse des durchrutschenden Rades wird ein Drehmoment aufgebaut, das die Traktion am nichtrutschenden Rad sicherstellt.

### 5.4.1.6 Allrad-Verteilergetriebe

Der Allradantrieb verbessert Traktion und Fahrsicherheit insbesondere auf nasser oder glatter Fahrbahn. Er ist entweder zuschaltbar oder permanent ausgeführt, ▶ Abschn. 5.5, ◘ Abb. 5.211.

Die beiden Achsen werden über ein zentral angeordnetes Verteilerdifferenzial mit hälftig oder auch asymmetrisch aufgeteiltem Drehmoment angetrieben.

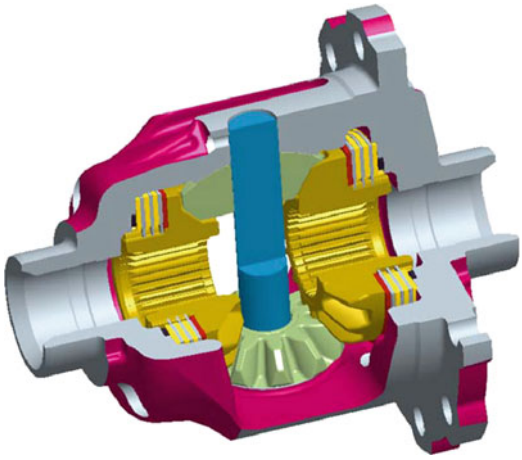
Das Verteilerdifferenzial ist häufig als Stirnrad-Planetensatz ausgeführt und kommt mit formschlüssiger Sperre (bei einigen Geländewagen), mit kraftschlüssiger Sperre (z. B. das Torsen-Differenzial) oder ungesperrt zum Einsatz. In letzterem Fall auch mit intelligent gesteuertem Eingriff in die Radbremsen, um so eine Sperrwirkung sowohl am Achs- als auch am Verteilerdifferenzial zu erzielen.

In immer mehr Allrad-angetriebenen Pkw verzichtet man auf ein zentrales Verteilerdifferenzial und setzt stattdessen eine elektronisch geregelte Lamellenkupplung zur gezielten Verteilung der Antriebskraft zwischen Vorder- und Hinterachse ein.

### 5.4.1.7 Gelenkwellen

Gelenkwellen überbrücken den Zwischenraum bei räumlicher Trennung von Getriebe und Achsantrieb und auch den zwischen dem Achsdifferenzial und den Rädern. Die Wellen müssen durch Gelenke verbunden werden, wenn die Achsen nicht in einer Flucht liegen. Zusätzlich muss ein Längenausgleich vorgesehen sein, um Toleranzen, Elastizitäten und kinematische Einflüsse auszugleichen. Der Ausgleich der Winkelbewegungen erfolgt durch Kardangelenke, Gleichlaufgelenke und auch Gelenkscheiben.

An die Gelenkwellen in Frontantriebsfahrzeugen werden besonders hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen nicht nur die Bewegungen von Motor und Rad ausgleichen, sondern auch die durch den Radeinschlag bedingten großen Beugewinkel beherrschen. Durchgesetzt haben sich Kugelgelenke, die auf eine Entwicklung von Hans Rzeppa zurückgehen, als Festgelenk und alternativ Tripode- oder Kugelgelenke als Verschiebegelenk, ◘ Abb. 5.153.



◘ **Abb. 5.153** Gleichlauf-Gelenkwelle für Frontantriebs-Pkw

Die Gelenkwellen für Fahrzeuge mit Hinterachsantrieb sind entweder einteilig oder bei größerer Länge auch mehrteilig mit Zwischenlagern.

Einzelheiten zu Aufgaben und Elementen des Triebstrangs siehe Literatur [148–151].

### 5.4.1.8 Schwingungssystem

Der Antriebstrang von Fahrzeugen ist ein schwingungsfähiges System. Werden Eigenfrequenzen resonanzartig angeregt, so können, je nach vorhandener Dämpfung, Schwingungsamplituden extreme Werte annehmen. Die Folge sind Lebensdauerprobleme und störende Geräusche (Karosseriebrummen, Rasseln).

Bei der Auslegung ist immer der komplette Antriebstrang als System zu betrachten.

Schwingungen im Antriebsstrang treten auf in Form von Torsionsschwingungen, Biegeschwingungen von Gelenkwellen sowie Biegeschwingungen des Motor-Getriebe-Verbandes (Gehäuse).

Massenträgheitsmomente, Massen, Torsions- und Biegesteifigkeiten der einzelnen Antriebstrang-Komponenten sind die bestimmenden Größen für die Eigenfrequenzen.

Die Erregung geschieht typischerweise durch den Verbrennungsmotor (Zylinderzahl, Bauart) und die Gelenkwelle.

Maßnahmen zur Vermeidung von Schwingungsproblemen sind (siehe auch ▶ Abschn. 3.4):

#### 5.4.1.8.1 Torsionsschwingungen

- Dämpfung des Resonanzdurchlaufs sowie Entkopplung von Verbrennungsmotor und Triebstrang im überkritischen Bereich durch Torsionsdämpfer (Mitnehmerscheibe bei konventioneller Schaltkupplung), Zwei-Massen-Schwungrad, Fliehkraftpendel, hydrodynamischer Wandler (ggf. Überbrückungskupplung mit Schlupfregelung),
- Verstimmung des Systems durch Tilger,
- kleine Beugewinkel bei Verlegung der Gelenkwellen anstreben

#### 5.4.1.8.2 Biegeschwingungen

- kurze Länge der Gelenkwellen (evtl. zwei Wellen mit Zwischenlager),
- hohe Steifigkeit von Motor- und Getriebegehäuse

Einzelheiten zu Schwingungen im Triebstrang siehe Literatur [152–154].

## 5.4.2 Anfahrelemente

### 5.4.2.1 Kupplungen

Für einen komfortablen Anfahrvorgang und zur Unterbrechung des Drehmomentflusses sind trockene, schaltbare Reibungskupplungen, in Öl laufende Mehrscheiben-Lamellen- und elektrische Magnetpulverkupplungen geeignet. Handschaltgetriebe erfordern für das Schalten eine sehr schnelle und vollständige Unterbrechung des Drehmomentflusses bei möglichst geringem Massenträgheitsmoment. Das leistet nur die trockene Reibungskupplung. Bei stufenlosen Getrieben (CVT) und den modernen Doppelkupplungsgetrieben sind die anderen Kupplungsvarianten mögliche Alternativen [155].

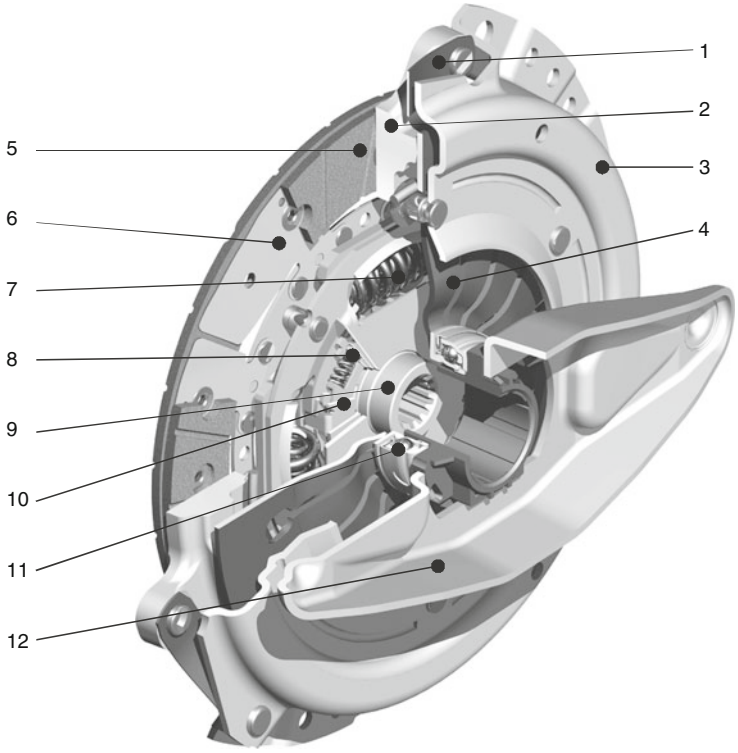
Die trockene Reibungskupplung (◘ Abb. 5.154, im Folgenden kurz: Kupplung) besteht aus einer am Schwungrad befestigten Membranfeder-Druckplatte, der axial auf der Getriebeeingangswelle verschiebbaren Kupplungsscheibe und dem Ausrücker, der über ein Kugellager den Ausrückweg von den nicht rotierenden Betätigungselementen auf die Druckplatte überträgt [156]. Zweischeibenkupplungen finden Anwendung bei Schwerlast- und Baustellenfahrzeugen, sowie auch bei manchen hochmotorisierten Pkws. Zwischen Motor und Getriebe ist ein Torsionsdämpfer erforderlich, der entweder in die Kupplungsscheibe oder in das Schwungrad des Motors (Zweimassenschwungrad) integriert ist.

#### 5.4.2.1.1 Drehmomentübertragung

Die Kupplung muss das maximale Motormoment zuzüglich dynamischer Überhöhungen übertragen. Das übertragbare Moment ist das Produkt aus Anpresskraft, Reibungskoeffizient des Reibbelags, mittlerem Reibradius und Zahl der Reibflächen [149]. Durch Variation der Anpresskraft wird die Kupplung zum Drehzahlwandler. Das Drehmoment wird unverändert durchgeleitet. Die Drehmomentübertragung unter Schlupf erwärmt die Kupplung und verursacht damit unvermeidbar den Belagverschleiß. Als Höchstbelastung werden für die ABE fünf Anfahrten an 12 % Steigung in fünf Minuten mit zul. Ges.-Gew. (einschließlich Anhänger) gefordert. Dabei kommt es zum Reibwertabfall (Fading) und wegen der Temperaturdifferenz zwischen Reibseite und Rückseite von Anpressplatte und Schwungrad zu deren konischer Verformung, wodurch sich die wirksame Reibfläche und der wirksame Übertragungsradius vermindern. Die Belagfeder kompensiert diese Verformung teilweise. Außerdem vermindert sie zwangserregte Rupfschwingungen (fühlbar als Schwingung z. B. beim Pkw von etwa 10 Hz) und erleichtert das ruckfreie Anfahren. Im Gegensatz zur Bremse ist für die Kupplung das Wärmespeichervermögen wichtiger als die Wärmeabfuhr. Die Bandbreite praktischer Auslegungen zeigt ◘ Abb. 5.155.

Bei der Standard-Bauweise ergibt sich die Ausrückkraft aus der Anpresskraft, geteilt durch das Übersetzungsverhältnis der Membranfeder ($i = 3 \ldots 4$).

Wahlweise kann mit einer zusätzlichen, gegen die Membranfeder arbeitenden Feder die Ausrückkraft reduziert werden. Voraussetzung dafür ist eine vom Belagverschleiß unabhängige Membranfeder-




**Druckplatte**
1 Rückholfeder
2 Anpressplatte
3 Gehäuse
4 Membranfeder

**Kupplungsscheibe**
5 Reibbelag
6 Belagfeder
7 Feder für Fahrbetrieb
8 Feder für Leerlaufbetrieb
9 Nabe
10 Reibeinrichtung
(Reibring, Tellerfeder, Steuerblech)

**Betätigung**
11 Ausrücker
12 Ausrückschwinge

**Abb. 5.154** Pkw-Kupplung, bestehend aus Membranfeder-Druckplatte, Kupplungsscheibe mit Torsionsdämpfer und Ausrücker

position, wofür eine Einrichtung zum automatischen Verschleißausgleich geeignet ist [157].

Die Kupplungsscheibe muss den Winkel- und Mittenversatz zwischen Kurbelwelle und Getriebeeingangswelle und das durch die Kurbelwellenbiegung verursachte Schwungradtaumeln ausgleichen können, weil es sonst zum Verschleiß der Verzahnung Nabe/Getriebeeingangswelle kommt.

Die wichtigsten Eigenschaften der Reibbeläge sind der Reibungskoeffizient, die Berstdrehzahl, der Verschleiß der Beläge und Gegenreibflächen, der Verzug bei thermischer Belastung, das Massenträgheitsmoment, die Dosierbarkeit des Drehmomentaufbaus und die Neigung zu Rupfen und Reibgeräuschen. Die Koeffizienten für die Gleitreibung (während des Schlupfs) und die Haftreibung (voll eingekuppelt) sind nahezu identisch, sie liegen bei

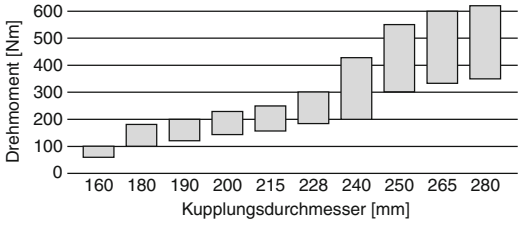



**Abb. 5.155** Zusammenhang zwischen max. Motormoment und Kupplungsdurchmesser

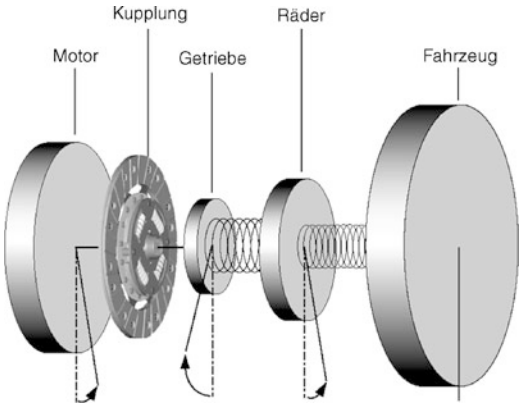



**Abb. 5.156** Der Antriebsstrang als System aus vier schwingenden Massen

normaler Beanspruchung zwischen 0,3 und 0,45 und sinken bei Fading auf 0,2. Beläge bestehen aus Garnen (vorwiegend Glasfaser- und Aramidbündel mit einem Messing- oder Kupferdraht), eingebettet in einen Reibzement aus Harzen, Kautschuken und Füllstoffen [158]. Metallische Sinterbeläge sind wegen ihrer Rupfneigung weniger gut geeignet, man findet sie jedoch in vielen Nkw-Anwendungen in den USA.

#### 5.4.2.1.2 Trennen

Nach dem Auskuppeln darf das Schleppmoment der Kupplung nur etwa 0,2 bis 0,5 Nm betragen. Die Auslaufzeit bis zum Stillstand der Scheibe hängt von ihrem Massenträgheitsmoment und vom Schleppmoment des Getriebes ab.

#### 5.4.2.1.3 Drehschwingungsdämpfung

Der Antriebsstrang ist aus Gewichts- und Komfortgründen relativ verdrehweich. Im ersten Gang können bei vollem Motordrehmoment Winkel bis etwa 90° auftreten. Die zündungsbedingte Drehungleichförmigkeit des Motors und Lastwechsel infolge schneller Fahrpedal- oder Kupplungsbetätigungen regen Drehschwingungen an (Abb. 5.156). So kann es z. B. zu Getrieberassel- und Karosseriebrummgeräuschen kommen. Während des Kupplungsschlupfs ist der Motor schwingungstechnisch vom Rest des Antriebsstrangs entkoppelt.

Mit dem Torsionsdämpfer in der Kupplungsscheibe beträgt die durch die Zündfrequenz angeregte Eigenfrequenz und damit das Rassel- und Brummmaximum je nach Fahrzeugtyp und eingelegtem Gang 40–70 Hz, was zum Beispiel bei 4-Zylindermotoren 1200 bis 2100 l/min entspricht. Abb. 5.157 zeigt eine typische Torsionsdämpferkennlinie mit Zug- und Schublast und Anschlägen, die die Drehmomentspitzen aufnehmen. Der Fahrdämpfer wird so abgestimmt, dass bei niedrigst möglicher Federsteifigkeit genau die Reibungshysterese festgelegt wird, die den besten Kompromiss zwischen Resonanzdämpfung und Verschlechterung der überkritischen Entkopplung ergibt. Im Motorleerlauf ohne eingelegten Gang tritt ebenfalls Getrieberasseln auf. Dagegen hilft der Leerlaufdämpfer. Die Federsteifigkeit beträgt etwa 1 % von der des Fahrdämpfers. Der Schwingwinkel von $\pm$ 2° bis $\pm$ 4° überlagert sich dem statischen Verdrehwinkel, der sich aus dem temperaturabhängigen Schleppmoment des Getriebes ergibt.

Im Zweimassenschwungrad (Abb. 5.158) ist der fettgefüllte Torsionsdämpfer zwischen dem Primär- und Sekundärteil des Schwungrads angeordnet. Das Primärschwungrad ist wie bisher mit der Kurbelwelle verschraubt und trägt den Anlasserzahnkranz und die Zündmarkierungen. Das Sekundärschwungrad, an dem die Druckplatte befestigt ist, ist auf dem Primärschwungrad gelagert und bildet eine der beiden Gegenreibflächen der Kupplungsscheibe. Die durch die Zündfrequenz angeregte Eigenfrequenz des Antriebsstrangs sinkt auf 8 bis 12 Hz, sodass das System bei Leerlaufdrehzahl bereits überkritisch läuft. Die Entkopplungsgüte ist wegen der großen Sekundärmasse hervorragend. Beim Anlassen und Abstellen des Motors wird die Eigenfrequenz kurzzeitig durchlaufen. Die höchste Beanspruchung tritt als Folge von Fahrfehlern auf: Längeres untertouriges Fahren im Bereich der Eigenfrequenz oder extrem schnelles Einkuppeln bei niedrigen Drehzahlen.

#### 5.4.2.1.4 Kupplungsbetätigung

Das Ausrücklager ist meist lebensdauergeschmiert und selbstzentrierend. Die Kupplung wird vorwiegend hydraulisch oder bei automatisierten Schaltgetrieben auch elektromechanisch betätigt (Abb. 5.159). Die Hydraulik besteht aus dem Geberzylinder mit selbsttätiger Entlüftung und automatischem Verschleißausgleich, dem Vorratsbehälter,

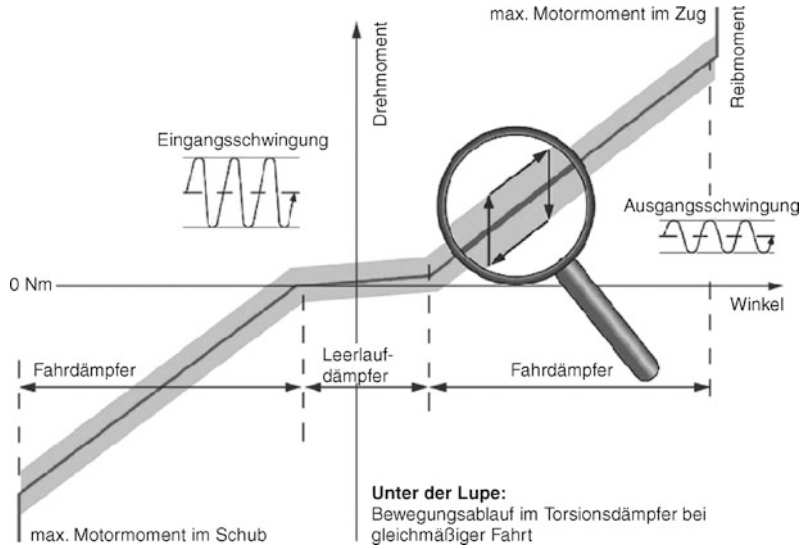



**Abb. 5.157** Torsionsdämpferkennlinie



**Abb. 5.158** Zweimassenschwungrad



**Abb. 5.159** Kupplung mit hydraulischer Betätigung

der Druckleitung und dem Nehmerzylinder mit Vorlastfeder. Nehmerzylinder und Ausrücker sind zum Teil zu einem Bauteil, dem konzentrischen Nehmerzylinder (CSC), zusammengefasst.

Die Pedalcharakteristik (Abb. 5.160) leitet sich aus der Ausrückkraftkennlinie der Druckplatte ab, wobei die Übersetzungen in Pedal, Betätigungshebel und Hydraulik, ggf. eine Hilfsfeder (Übertotpunktfeder), die Reibungsverluste und die Wegverluste durch elastische Verformung zu berücksichtigen sind. Letztere sind auch Voraussetzung für eine gute Dosierbarkeit der Kupplung.

Bei der automatischen Kupplungsbetätigung übernimmt ein elektrohydraulischer oder elektromechanischer Aktuator die Arbeit des Fahrerfußes. Er wird elektronisch angesteuert, und durch Sensoren bzw. CAN-Bus über die Absichten des Fahrers und den Bewegungszustand des Fahrzeugs informiert. Der Fahrerwunsch wird aus dem Fahrpedalwinkel und der -beschleunigung erkannt. Zudem sind mittlerweile Systeme am Markt verfügbar, die auch eine GPS-gestützte und damit vorausschauende Fahrstrategie beinhalten [160]. Um die Gänge schnell wechseln zu können, muss zeitlich über-

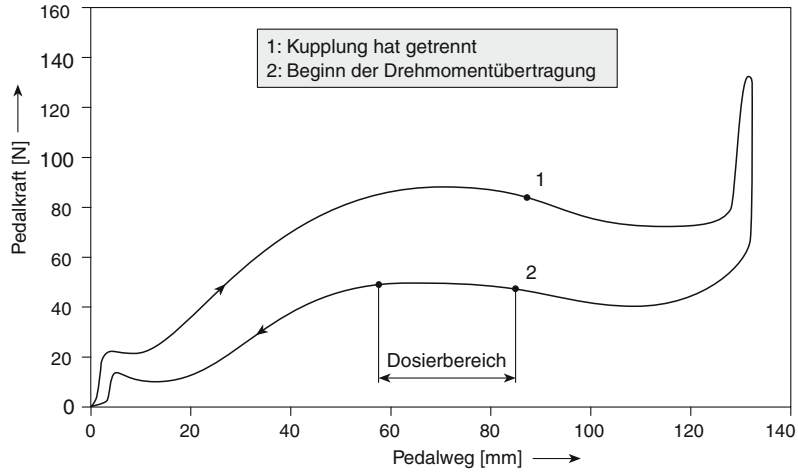



**Abb. 5.160** Kennlinie eines Kupplungspedals

lappend ausgekuppelt, geschaltet und wieder eingekuppelt werden. Die automatische Kupplungsbetätigung wird künftig als Baustein für automatisierte Getriebesysteme größere Bedeutung bekommen [187].

### 5.4.2.2 Hydrodynamische Drehmomentwandler

#### 5.4.2.2.1 Einleitung

Hydrodynamische Drehmomentwandler [148] sind hydrodynamische Getriebe, die sowohl Drehzahl als auch Drehmoment über einen weiten Betriebsbereich stufenlos wandeln können. Gegenüber Kupplungen bieten sie den Vorteil der Drehmomenterhöhung. Sie sind jedoch nur in Verbindung mit einer Überbrückungskupplung strategiefähig, da die hydrodynamische Kennlinie im Wandlerbetrieb ansonsten das Betriebsverhalten über die Abstimmung der Kreislaufteile vorgibt. Im Pkw-Antriebsstrang werden Wandler heute als Anfahrelement für Stufenautomatgetriebe und bei stufenlosen Getrieben (CVT) eingesetzt. Die Spreizung eines CVT-Getriebes lässt sich so deutlich erhöhen.

#### 5.4.2.2.2 Aufbau

Drehmomentwandler für den Einsatz in Pkw sind nach dem TriLok-Prinzip aufgebaut, d. h. Pumpen- und Turbinenrad stehen sich gegenüber. Zwischen diesen Laufrädern befindet sich das axial durchströmte Leitrad. Das Pumpenrad steht direkt mit der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors in Verbindung, während das Turbinenrad mit der Getriebeeingangswelle gekoppelt ist. Eine Stützwelle verbindet das Leitrad mit dem Getriebegehäuse. Zwischen Leitrad und Stützwelle ist ein Freilauf angeordnet, der die Drehmomentübertragung in nur einer Richtung zulässt. Zusätzlich sind in das Wandlergehäuse bei aktuellen Pkw-Anwendungen immer Überbrückungskupplungen und häufig Torsionsschwingungsdämpfer integriert (siehe Abb. 5.161). Der Wandler ist mit dem Druckölkreislauf des Getriebes verbunden und vollständig mit Öl gefüllt. Um die anfallende Verlustwärme abzuführen, wird das Öl mit einem überlagerten Massenstrom ständig ausgetauscht.

#### 5.4.2.2.3 Funktionsweise

**Hydrodynamischer Betrieb** Beschleunigt ein Fahrzeug aus dem Stand heraus, rotiert die Pumpe bei noch stehender Turbine. Durch den Fliehkraftunterschied wird ein umlaufender Massenstrom erzeugt, dadurch ein Moment übertragen und das Fahrzeug letztendlich angetrieben.

Die dabei stattfindenden inneren Strömungsvorgänge sind in Abb. 5.162 in einer Abwicklung der Schaufelgitter aufgezeigt. Die Ein- und Austrittsbereiche der Laufräder sind mit Ziffern von ① bis ⑥ gekennzeichnet und korrelieren mit Abb. 5.161.

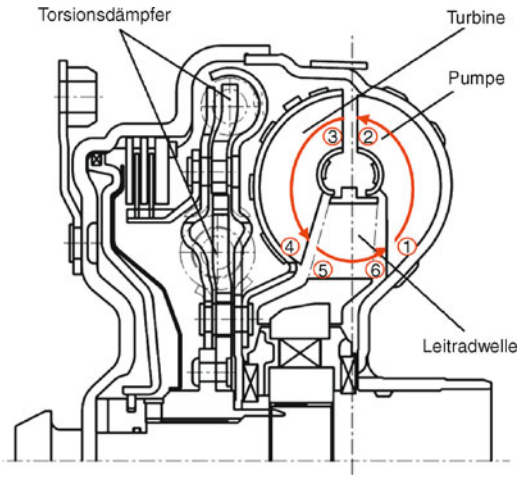



**Abb. 5.161** Drehmomentwandler mit Überbrückungskupplung und Torsionsdämpfer

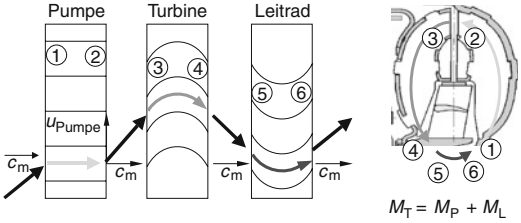



**Abb. 5.162** Prinzipieller Strömungsverlauf

Man definiert für den Drehzahlunterschied zwischen Pumpe und Turbine die Drehzahlwandlung

$$\nu = \frac{\omega_T}{\omega_P}$$

In der Pumpe, die direkt mit dem Motor verbunden ist, wird ein Fliehkraftdruck erzeugt. Das Öl wird vom Eintritt ① zum Austritt ② beschleunigt. Motordrehmoment $M_M$ und Pumpenmoment $M_P$ sind gleich. Das die Pumpe verlassende Fluid gelangt zum Turbineneintritt ③ und übt auf die Turbinenschaufel je nach Schaufelgestaltung einen Impuls aus. Damit wird das Turbinenmoment $M_T$, das dem Getriebeeingangsmoment entspricht, erzeugt. Im Leitradgitter (⑤ nach ⑥) erfährt das Fluid eine weitere Strömungsumlenkung mit dem resultierenden Leitradmoment $M_L$. In diesem Betriebspunkt stützt sich das Leitrad über den Freilauf am Getriebegehäuse ab. Die Momentbilanz des Wandlers lautet

$$\vec{M}_P + \vec{M}_T + \vec{M}_L = \vec{0}$$

Für die Beträge im dargestellten Betriebspunkt ergibt sich $M_T = M_P + M_L$ und damit die Drehmomentverstärkung bzw. Drehmomentwandlung. Diese wird mit

$$\mu = \frac{M_T}{M_P}$$

definiert und liegt für den Betriebspunkt in Wandlern dieser Bauart zwischen 1,8 und 3,0.

Nähert sich die Turbinendrehzahl der Pumpendrehzahl (Abb. 5.163), hat das Fahrzeug also seinen Anfahrvorgang nahezu beendet ($\nu > 0,9$), wird das Leitrad in einem deutlich anderen Strömungswinkel angeströmt. Ohne Freilauf würde sich die Richtung des Leitradmomentes umkehren und gemäß der Momentenbilanz $M_T = M_P - M_L$ keine Drehmomentverstärkung, sondern eine Reduktion stattfinden. Der Freilauf verhindert jedoch diese Momentübertragung, womit das Leitradmoment zu Null wird und der Wandler in den hydrodynamischen Kupplungsbetrieb übergeht. Es gilt jetzt $M_T = M_P$.

Steigt die Turbinendrehzahl weiter an bis zur identischen Drehzahl der Pumpe ($\nu = 1$), fließt aufgrund des nun gleichen Druckfeldes kein Ölstrom mehr. Es kann kein Moment mehr übertragen werden.

Im Umkehrschluss folgt daraus, dass zur Drehmomentübertragung vom Motor auf das Getriebe stets Schlupf im Kreislauf vorhanden sein muss. Dieser führt zu einer Verlustleistung innerhalb des Wandlers und damit einer Reduktion des Getriebewirkungsgrads.

In der Praxis hat sich zur Darstellung des Betriebsverhaltens eines Wandlers das so genannte Wandlerdiagramm durchgesetzt (Abb. 5.164). Es wird das Moment der Pumpe ($M_{p2000}$) bei einer konstanten Drehzahl (i. d. R. $n = 2000\,\text{min}^{-1}$) über der Drehzahlwandlung $\nu$ aufgetragen. Weiterhin wird die Momentwandlung $\mu$ sowie der Wirkungsgrad $\eta$ betrachtet. $\eta$ errechnet sich aus

$$\eta = \frac{M_T \cdot \omega_T}{M_P \cdot \omega_P} = \mu \cdot \nu$$

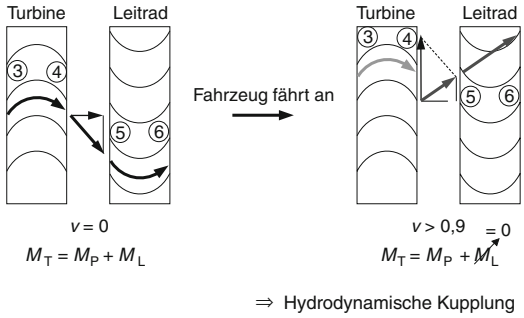



**Abb. 5.163** Strömung während des Anfahrvorgangs

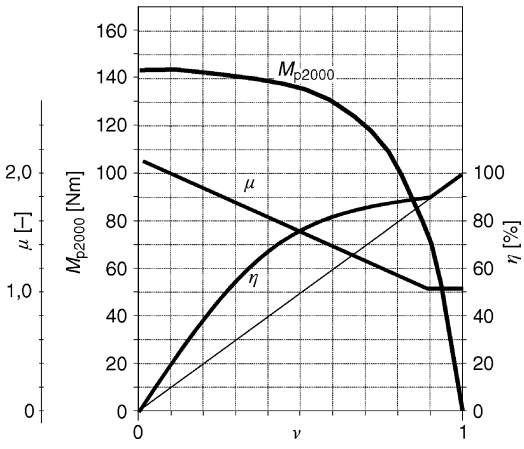



**Abb. 5.164** Typisches Wandlerdiagramm

Charakteristisch für die Momentenaufnahme des Wandlers ist der wie bei hydrodynamischen Strömungsmaschinen übliche quadratische Zusammenhang des Moments mit der Geschwindigkeit. Der hydraulische Durchmesser des Kreislaufs geht mit der 5. Potenz ein:

$$M_\mathrm{P} = C \cdot \omega_\mathrm{P}^2 \cdot D_\mathrm{P}^5$$

Die Konstante $C$ wird bestimmt durch die Dichte des Öls sowie durch die Bauteilgeometrie.

Wird ein derartig gemessenes oder berechnetes Wandlerkennfeld mit einer Motorkennlinie in Zusammenarbeit gebracht, lässt sich theoretisch der Momentverlauf des Getriebeeingangs sowie die Verlustleistung beim Anfahren ermitteln.

Damit ist eine den Wünschen des Kunden gemäße Auslegung des Wandlers möglich. Parameter sind neben der Wandlerdurchmessergröße die Meridianform des Kreislaufs sowie die Schaufelwinkel der drei Laufräder.

**Wandlerüberbrückungskupplung** Zur Verbrauchsreduktion ist der Einsatz von Überbrückungskupplungen, die den Rest-Schlupf des Drehmomentwandlers zwischen Pumpe und Turbine unterbindet, seit einigen Jahren Standard. Diese Kupplung erzeugt eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Pumpe und Turbine, der Kreislauf ist kurzgeschlossen. Dazu befindet sich im Wandlergehäuse ein Kolben, der mit einem Reibbelag versehen ist. Der Kolben ist verdrehfest mit der Turbine verbunden.

Das Öffnen und Schließen der Wandlerkupplung erfolgt mit der Drucksteuerung des Getriebes. Es werden rechts und links vom Kolben unterschiedliche Drücke erzeugt, die den Kolben in Richtung „Öffnen“ oder „Schließen“ bewegen. Dabei ist es unbedingt erforderlich, dass der Wandler komplett mit Öl gefüllt ist.

Neben den Vorteilen der schlupffreien Leistungsübertragung bringt die Wandlerkupplung den Nachteil der starren Kopplung von Motor und Getriebe mit sich. Die hervorragenden Eigenschaften bzgl. Schwingungsdämpfung, wie sie die Hydrodynamik bietet, stehen jetzt nicht mehr zur Verfügung. Dies führte dazu, dass zusätzlich Torsionsschwingungsdämpfer, wie sie ähnlich auch bei Trockenkupplungen für Schaltgetriebe bekannt sind, im Drehmomentwandlergehäuse integriert wurden. Der Betriebsbereich, in dem mit aktiver Wandlerkupplung und hohem Komfort gefahren wird, wächst an, so weit in dem vorhandenen Bauraum ein geeigneter Dämpfer integriert werden kann.

**Geregelt schlupfende Wandlerüberbrückungskupplung (GWK)** Eine Funktionserweiterung der Wandlerkupplung stellt ihr Einsatz mit geregeltem Schlupf dar. Die Wandlerkupplung wird in dieser Betriebsart nicht vollständig geschlossen. Es verbleibt ein definierter Schlupf zwischen An- und Abtriebsseite. Der Schlupf verhindert, dass die vom Motor erzeugten Drehschwingungen vollständig auf das Getriebe und damit auf den Antriebsstrang übertragen werden. Die deutliche Effizienzsteigerung dieses Systems ergibt sich daraus, dass in

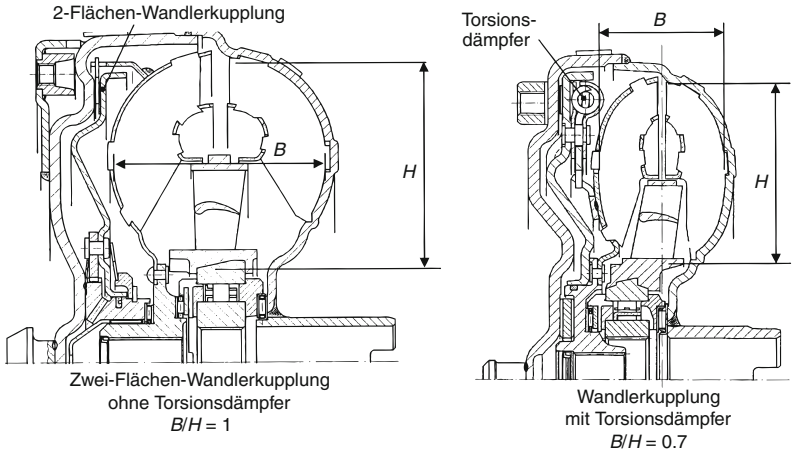



**Abb. 5.165** Ausführungsbeispiele

den Fahrbereichen, die zuvor aus Komfortgründen eine geöffnete Wandlerkupplung erforderten, jetzt mit dem erheblich kleineren mechanischen Schlupf gefahren werden kann. Die Fahrbereiche, die schon zuvor ein vollständiges Überbrücken ermöglichten, bleiben selbstverständlich erhalten. Hieraus ergeben sich Verbrauchsvorteile, besonders bei Dieselanwendungen.

Die in diesem Betriebszustand anfallende Verlustleistung sollte möglichst effizient aus dem Wandler abgeleitet werden. Dazu geeignete Wandlerkupplungen verfügen zu dem Zeck über Belagnuten und Kolbendüsen. Damit wird eine Überhitzung von Belag und Öl direkt am Reibkontakt weitgehend vermieden. Dies ist auch zwingend notwendig, da in modernen Automatgetrieben keine Ölwechsel über der Lebensdauer mehr vorgesehen sind.

#### 5.4.2.2.4 Ausblick

Der Drehmomentwandler beeinflusst wesentlich Verbrauch und Fahrleistung des Fahrzeugs. Daher obliegt er dem ständigen Zwang, weitere Optimierungen vorzuweisen. Reduziertes Systemgewicht in immer kleineren Bauräumen wird in modernen Antriebssträngen vorausgesetzt (vgl. Abb. 5.165).

Neben den Verbesserungen der hydrodynamischen Eigenschaften ist der Abstimmung des Torsionsdämpfungssystems hohe Aufmerksamkeit zu widmen. Ähnlich wie bei den Trockenkupplungssystemen müssen für den jeweiligen Fall die optimalen Steifigkeits-, Reibungs- und Massenverhältnisse gefunden werden. Ziel ist es, die Überbrückungskupplung bei noch kleineren Drehzahlen geschlossen zu halten. Deshalb zeichnet sich bei der Überbrückungskupplung ein Trend weg von der reinen Wandlerüberbrückung hin zur Funktionalität einer nassen Anfahrkupplung ab. Damit kann dem hydrodynamischen Moment während des Anfahrens ein weiteres von der Getriebesteuerung beeinflussbares Moment überlagert werden. Das mechanische System Drehmomentwandler ist somit in das elektronische Antriebsstrangmanagement integrierbar.

Aufgrund der angeführten Optimierungsmöglichkeiten sowie des systemimmanenten Vorteils des verschleißfreien Anfahrens mit Momenterhöhung ist auch in den nächsten Jahren mit einer weiten Verbreitung des Drehmomentwandlers für Pkw-Automatgetriebe zu rechnen.

## 5.4.3 Das Handschaltgetriebe-System

### 5.4.3.1 Funktion und Aufbau

Die wesentlichen Elemente von Handschaltgetrieben sind:

- fußbetätigte trockene Anfahr- und Trennkupplung,

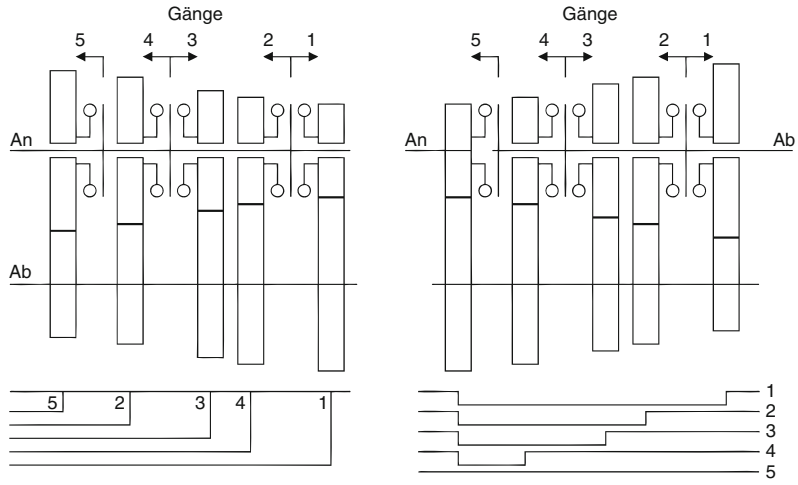



**Abb. 5.166** Bauarten von Handschaltgetrieben

- synchronisiertes Zahnradstufengetriebe mit 5 bis 6 Gängen,
- Getriebebetätigung mit Übertragung von Schaltbewegung und Schaltkraft vom Schalthebel zum Getriebe.

Die einzelnen Gänge werden formschlüssig geschaltet. Zum Gangwechsel ist deswegen der Kraftfluss Motor-Getriebe durch Betätigung der Kupplung zu trennen. Nach Herausnehmen des vorhergehenden Gangs und Drehzahlanpassung auf Gleichlauf am einzurückenden Schaltelement mittels Synchronisierung kann dann der neue Gang formschlüssig eingelegt werden. Das Schließen der Kupplung beendet den Schaltvorgang.

Zur mehrstufigen Übersetzungsbildung sind Zahnradpaare unterschiedlicher Zähnezahl in Vorgelegewellenbauweise im Dauereingriff. Der Rückwärtsgang wird durch ein zusätzliches Zwischenrad im Dauereingriff erzeugt. Die Getriebe haben üblicherweise eine Vorgelegewelle, gelegentlich auch zwei oder drei.

Die Handschaltgetriebe gibt es in zwei grundsätzlichen Varianten mit entweder koaxialem An- und Abtrieb oder mit Achsversatz, Abb. 5.166. Die koaxiale Getriebeausführung ermöglicht einen Direktgang ohne Zahneingriff und ist speziell für Fahrzeuge mit Standardantrieb geeignet. Getriebe mit Achsversatz haben keinen Direktgang. Sie kommen in Fahrzeugen mit Front- und Heckantrieb und Blockbauweise von Schalt- und Achsgetriebe zum Einsatz.

Handschaltgetriebe zeichnen sich durch besonders effiziente Leistungsübertragung aus. Geringe Verluste entstehen beim Abwälzen im Zahneingriff, durch Reibung an Schaltelementen mit Differenzdrehzahl, mitlaufenden Verzahnungen und an dynamischen Dichtstellen von Wellen und Lagern sowie durch Planschen. Koaxiale Getriebe erreichen im Direktgang einen Wirkungsgrad von annähernd 99 %.

### 5.4.3.2 Verzahnung

In Fahrzeuggetrieben werden ausschließlich Evolventen-Verzahnungen eingesetzt. Sie sind einfach herstellbar und unempfindlich gegenüber Achsabstands-Änderungen.

Im Pkw-Bereich kommt heute generell (mit Ausnahme des Rückwärtsgangs) Schrägverzahnung zum Einsatz.

Die Auslegung der Verzahnung erfolgt mittels Belastungskollektiven und muss Sicherheit gegen Zahnbruch, Flankenermüdung und Fressschäden bieten.

Im Pkw hat die Vermeidung von Zahnradgeräuschen besondere Bedeutung, da die akustischen Anforderungen an die Fahrzeuge ständig steigen. Neben der Schrägverzahnung sind präzise Fertigung, hohe Profilüberdeckung bis hin zur Hochver-

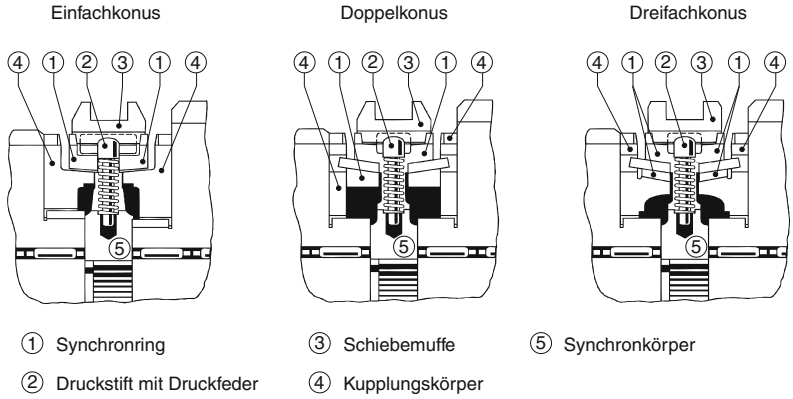



**Abb. 5.167** Synchronisierungs-Systeme

zahnung sowie geeignete Verzahnungskorrekturen (Schrägungswinkel, Höhen- und Längsballigkeit) wichtige Maßnahmen zur Reduktion von Verzahnungsgeräuschen.

Moderne Berechnungsverfahren auf der Basis der Finiten Elemente erlauben es heute bereits in der Konstruktionsphase eines Getriebes, Wellendurchbiegungen und Gehäuseverformungen unter Last für Verzahnungskorrekturen zu berücksichtigen, um so Belastbarkeit und Geräuschemission positiv zu beeinflussen.

### 5.4.3.3 Synchronisierung

Zwischenkuppeln und Zwischengas waren früher auch im Pkw üblich, um die für den Gangwechsel erforderliche Drehzahlanpassung der miteinander formschlüssig zu kuppelnden Teile vorzunehmen. Heute geschieht dies durch eine Einrichtung zur Synchronisierung von Drehzahldifferenzen, die der formschlüssigen Zahnkupplung vorgelagert ist.

Durchgesetzt haben sich Sperrsynchronisierungen. Sie sind als Reibungskupplung zur kraftschlüssigen Drehzahlangleichung ausgebildet, lassen das formschlüssige Einrücken des Gangs erst nach Erreichen der Drehzahlgleichheit zu und gewährleisten guten Schaltkomfort, insbesondere was die Gleichförmigkeit des Schaltungsablaufs angeht.

Es gibt verschiedene Arten der Sperrsynchronisierung. Am meisten verbreitet ist das System Borg Warner und zwar in Einfach-, Doppel- oder auch Dreifach-Konus-Bauweise, Abb. 5.167. Synchronisierungen mit Mehrfach-Konus werden bevorzugt in den unteren Gängen eingesetzt, da sie thermisch höher belastbar sind. Sie reduzieren auch die Schaltkraft und ermöglichen so eine Angleichung des Schaltkraftniveaus beim Einlegen der verschiedenen Gänge.

Als Reibpaarungen kommen unter anderem Messing, Streusinter, Molybdän und Carbon, jeweils gegen Stahl laufend, zum Einsatz.

Nachdem die Synchronisierung mehrfach im Getriebe eingebaut wird, wird bei ihrer Weiterentwicklung natürlich besonders auf die Kostenreduktion geachtet. Modulare Ausführung der Synchronisierung mit möglichst vielen Gleichteilen und Einsatz der Blechumform- oder Sintertechnik sind die bevorzugt eingesetzten Fertigungsverfahren.

### 5.4.3.4 Weitere Getriebekomponenten

Leichtbau und geringe Geräuschemission stehen neben geringen Herstellkosten und hoher Zuverlässigkeit bei modernen Handschaltgetrieben im Vordergrund.

Bevorzugte Gehäusewerkstoffe sind Aluminium und zunehmend auch Magnesium. Für möglichst hohe Steifigkeit und geringe Geräuschabstrahlung werden die Gehäuse mithilfe der Finite-Elemente-Methode nach Form, Wandstärke und Verrippung optimiert.

Zur weiteren Gewichtsreduktion kommen Hohlwellen zum Einsatz.

Die Abstützung von Wellen und Zahnrädern erfolgt nahezu ausschließlich mit Wälzlagern: Na-

dellager für die Losräder, Kugel-, Rollen- oder Kegelrollenlager für die Wellen im Gehäuse.

Die dynamische Abdichtung geschieht mittels Radialwellendichtringen aus Elastomer-Werkstoffen, zum Teil mit Drallstegen zur Erhöhung der Dichtsicherheit. Für die statische Abdichtung von Gehäusetrennflächen und Gehäusedeckeln kommen Feststoff-Flachdichtungen sowie Flüssigdichtungen aus Silikon oder anaerob aushärtenden Kunststoffen zum Einsatz.

Handschaltgetriebe haben heute Lebensdauerfüllung. Überwiegend wird Automatic Transmission Fluid (ATF) verwendet. Das Öl muss durch günstiges Viskositäts-Temperaturverhalten Schwerschaltbarkeit bei tiefen Temperaturen vermeiden und mit geeigneter Additivierung ein möglichst gleichmäßiges Reibverhalten der Synchronisierung unter allen Betriebsbedingungen sicherstellen. Gleichzeitig sind auch Fress- und Pittingtragfähigkeit der Verzahnung zu gewährleisten.

Je nach Getriebegröße und Ausführung liegt die Ölfüllmenge zwischen ca. 1,5 bis 2 Litern. Die Getriebeschmierung erfolgt mittels Spritzöl und spezieller Ölführung mit Ölleitelementen. In Getrieben mit besonders hoher Beanspruchung (z. B. in Sport- oder Geländefahrzeuge) findet man auch eine Schmierölpumpe zur Sicherstellung der Ölversorgung.

### 5.4.3.5 Getriebeschaltung

Die Getriebeschaltung überträgt die Schaltbewegung des Fahrers bis hin zum jeweiligen Schaltelement im Getriebe. Zu unterscheiden sind äußere Schaltung und innere Schaltung.

Die äußere Schaltung geht vom Schalthebel bis hin zum Getriebe. Sie kann als Gestängeschaltung mit fester Verbindung ausgebildet sein oder als Seilzugschaltung mit flexibler Verbindung. Die Seilzugschaltung hat Vorteile hinsichtlich des erforderlichen Freiraums, der Schwingungsentkoppelung zwischen Motor-Getriebe-Verbund und Fahrzeuginnenraum, bei Gewicht und der Montage, insbesondere bei den besonders beengten Raumverhältnissen in Fahrzeugen mit Frontantrieb und Quermotor [159].

Die innere Schaltung überträgt die eingeleitete Schaltbewegung über Schaltstangen und Schaltgabeln oder Schaltschwingen hin zur Schiebemuffe des Schaltelements.

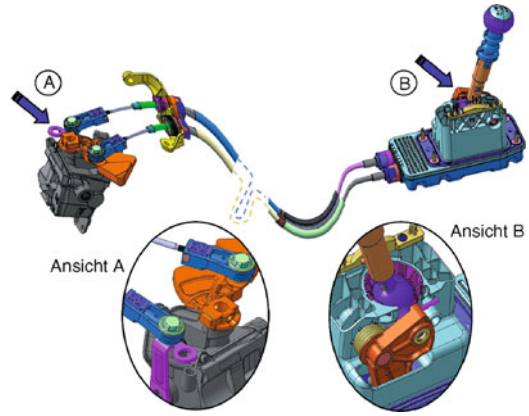



**Abb. 5.168** Äußere Schaltanlage in Seilzugausführung

Abb. 5.168 zeigt die äußere Schaltanlage in Seilzugausführung für ein 5-Gang-Schaltgetriebe.

### 5.4.3.6 Ausführungsbeispiele

Das Mercedes-Benz-5-Gang-Getriebe SG 150, Abb. 5.169, für ein Kompaktfahrzeug mit Frontantrieb und Quermotor ist in 2-Wellen-Bauweise mit Achsversatz zwischen An- und Abtrieb konzipiert und hat 180 Nm maximales Antriebsdrehmoment [161]. Der Wandlungsbereich beträgt 4,7. Erster und zweiter Gang werden mit einer Doppelkonus-Synchronisierung geschaltet, die übrigen Gänge einschließlich RW-Gang mit Einfachkonus.

Zur Gewichtsreduktion sind die Getriebewellen hohl ausgebildet. Das Getriebe wiegt 32 kg inklusive 1,8 Liter Ölfüllung.

Das 6-Gang ZF-Getriebe S6-37, Abb. 5.170, ist für Fahrzeuge mit Standardantrieb (auch in Allradversion) konzipiert [162]. Das maximale Antriebsdrehmoment beträgt 370 Nm. Abhängig vom Antriebsdrehmoment reicht der Getriebewandlungsbereich bis 6,19 mit direkter Übersetzung im 5. Gang. Das Getriebe wiegt 41 kg einschließlich 1,6 Liter Lebensdauer-Ölfüllung. Die Vorgelegewelle ist zur Gewichtsreduktion hohl ausgeführt.

Das S6-37 hat eine geräuschoptimierte Hochverzahnung und kann optional mit automatisierter Schaltung ausgestattet werden.

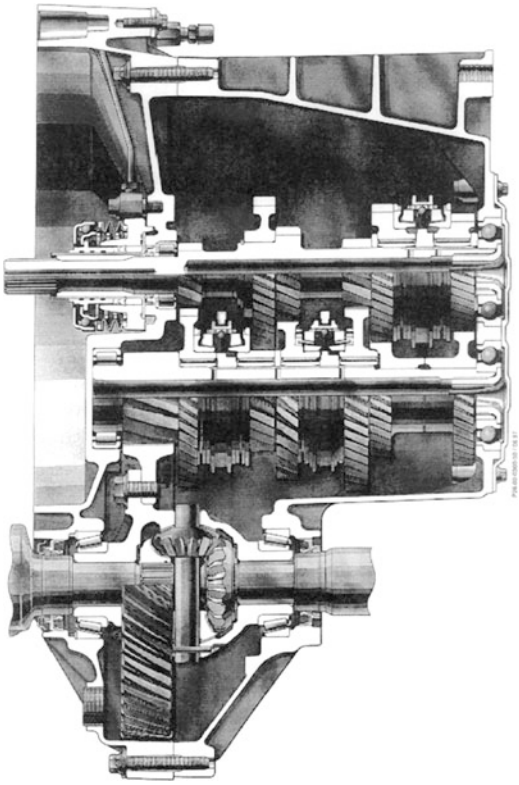


**Abb. 5.169** Mercedes-Benz-5-Gang-Schaltgetriebe SG 150

#### 5.4.3.7 Automatisierte Schaltgetriebe

Automatisierte Schaltgetriebe [163] sind in einigen Pkw der unteren Leistungsklasse einerseits und in sehr sportlichen Fahrzeugen andererseits in Serie eingeführt. Basis sind Handschalt-Synchrongetriebe, die mit elektrohydraulischen oder elektro-mechanischen Aktuatoren für die Kupplungs- und Getriebebetätigung kombiniert werden, Abb. 5.171. Es gibt auch speziell für die Automatisierung konzipierte Getriebesysteme mit bis zu 7 Gängen, die nicht vom Handschaltgetriebe abgeleitet sind. Während des Schaltvorgangs wird der Verbrennungsmotor durch die Getriebeelektronik geführt und die passenden Anschlussdrehzahlen nach Abschluss des Schaltvorgangs eingeregelt.

Automatisierte Schaltgetriebe verbinden den guten Wirkungsgrad von Handschaltgetrieben mit ökonomisch orientierten Schaltprogrammen. Nachteilig ist die deutlich spürbare Zugkraftunterbrechung beim Schalten insbesondere bei Beschleunigungsvorgängen unter hoher Last in den unteren Gängen.

### 5.4.4 Stufenautomatgetriebe

#### 5.4.4.1 Funktionsweise

Automatische Getriebe unterscheiden sich von Handschaltgetrieben im Wesentlichen durch drei Punkte:

**Das Anfahren erfolgt ohne Kupplungsbetätigung** Als Anfahrelement bei automatischen Getrieben wird i. d. R. ein hydrodynamischer Drehmomentwandler eingesetzt (vgl. ▶ Abschn. 5.4.2.2). Die minimale Übertragungsfähigkeit des Wandlers bei Motorleerlaufdrehzahl ermöglicht durch geringe Bremskräfte, das Fahrzeug zu Halten oder zum Stehen zu bringen. Beim Öffnen der Bremse kriecht das Fahrzeug. Dies erlaubt ein sehr fein dosiertes Rangieren und Parkieren. Außerdem hält das Kriechmoment das Fahrzeug gegen die Hangabtriebskraft an leichten Steigungen. Die Funktionsweise des Wandlers ermöglicht neben der Auftrennung des Triebstrangs im Stillstand auch ein sehr komfortables Anfahren und durch die Anfahrwandlung eine Zugkraft-Überhöhung mit einer zur Getriebe-Gesamtübersetzung vergrößerten Anfahrbeschleunigung.

**Die Schaltung erfolgt als Lastschaltung ohne Zugkraftunterbrechung** Bei Handschaltgetrieben und automatisierten Schaltgetrieben wird für einen Gangwechsel die Trennkupplung zwischen Motor und Getriebe geöffnet. Dabei wird die Zugkraft unterbrochen, die Fahrzeugbeschleunigung bricht ein (vgl. ▶ Abschn. 5.4.3.1). Demgegenüber wird der Gangwechsel bei automatischen Getrieben als Lastschaltung ohne Zugkraftunterbrechung ausgeführt. Dies erfordert mehrere Schaltelemente (Kupplungen, Bremsen), die so dimensioniert sind, dass sie die Motorleistung übertragen und schalten können. In Abb. 5.172 ist das Prinzip eines automatischen Getriebes am Beispiel eines 2-Gang-Lastschaltgetriebes dargestellt. Der erste Gang wird über die Kupplung K1 übertragen, während im zweiten Gang die Kupplung K2 geschlossen ist.

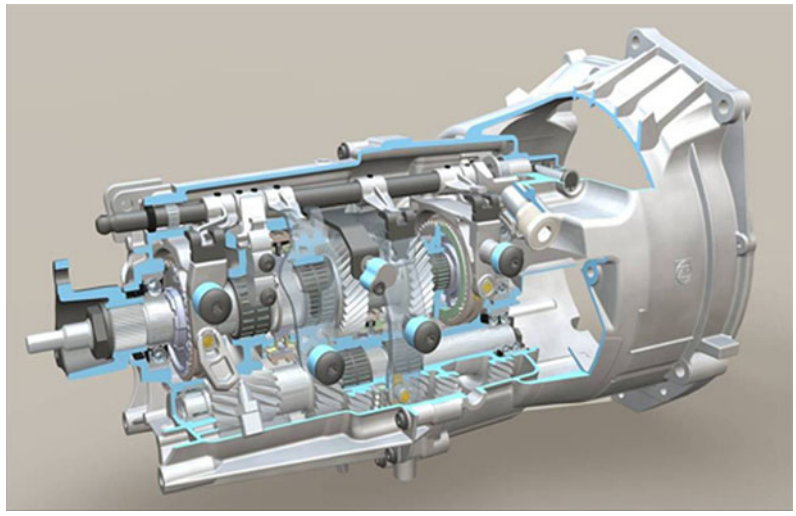


**Abb. 5.170** 6-Gang-Schaltgetriebe S6-37

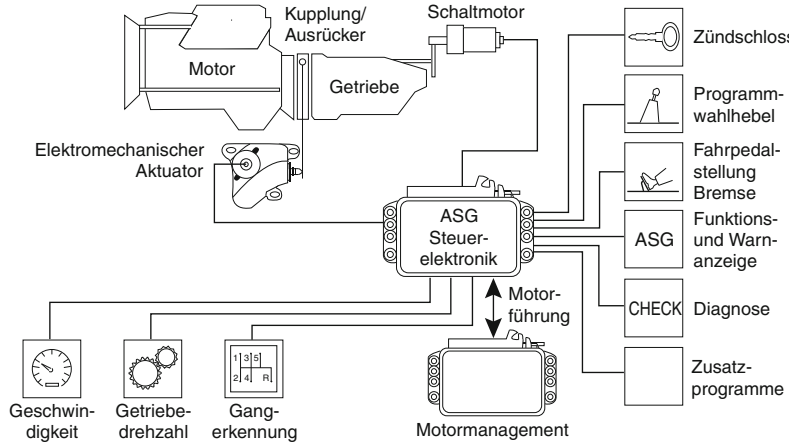



**Abb. 5.171** Systemaufbau automatisierter Schaltgetriebe

Für eine Zug-Hochschaltung sind in Abb. 5.173 die Drehmomente an den beiden Kupplungen, das Abtriebsdrehmoment des Getriebes und der Motordrehzahlverlauf dargestellt. Die Schaltung ist als Überschneidungsschaltung ausgeführt. Während der Überschneidungsphase wird das übertragbare Drehmoment der abschaltenden Kupplung abgesenkt und gleichzeitig das Moment der zuschaltenden Kupplung erhöht. Am Ende der Überschneidungsphase überträgt die zuschaltende Kupplung das Drehmoment des neuen Ganges, während noch die Drehzahl des alten Ganges vorliegt. Durch eine weitere Erhöhung des Drehmoments an der Zuschaltkupplung werden die motorseitigen Drehmassen auf das Drehzahlniveau des neuen Ganges synchronisiert (Überhöhungsphase). Aus dem Verlauf des Abtriebsmomentes ist zu erkennen, dass während der Hochschaltung das Drehmoment nach der Überschneidungsphase auf das Niveau des neuen Ganges absinkt. In der Überhöhungsphase kommt es zu einem Anstieg des Abtriebsmomentes durch die Einleitung der Energie der motorseitigen Drehmassen in den Triebstrang.

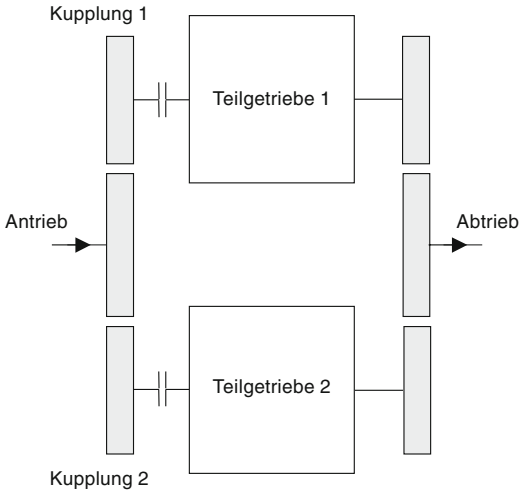



**Abb. 5.172** Prinzipdarstellung eines 2-Gang-Lastschaltgetriebes

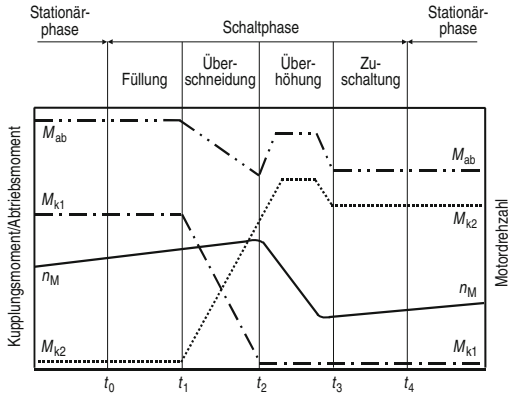



**Abb. 5.173** Momenten- und Drehzahlverlauf bei einer Zug-Hochschaltung

Mit dem Erreichen der Synchrondrehzahl ist das Abtriebsdrehzahlniveau und das Drehmoment des neuen Ganges erreicht. Der Verlauf des Abtriebsdrehmomentes während der Überhöhungsphase ist durch die Ansteuerung der zuschaltenden Kupplung und durch Manipulation des Motordrehmoments (Motoreingriff) beeinflussbar. Die anderen Schaltungsarten werden in ähnlicher Form gesteuert. Die Schaltungsabläufe sind in der Literatur ausführlich beschrieben [148].

**Die Gangwechsel werden automatisch ausgeführt** Bei automatischen Getrieben wird der Gangwechsel nicht durch einen bewussten Eingriff des Fahrers vollzogen, sondern erfolgt automatisch. Dies geschieht durch ein Schaltprogramm und ist im Wesentlichen von den beiden Einflussgrößen Fahrgeschwindigkeit und Drosselklappenstellung abhängig.

### 5.4.4.2 Aufbau

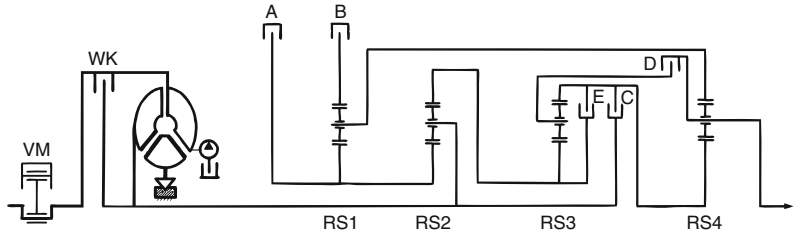
**Planetengetriebe** Automatische Getriebe werden i. d. R. als Planetengetriebe ausgeführt. Gründe dafür sind

- die Darstellung von mehreren Übersetzungen mit einem Radsatz (vergl. ► Abschn. 5.4.4.3).
- die koaxiale Anordnung der Zentralteile.
- die kompakte Bauweise.
- Die Motorleistung wird durch mehrere Zahneingriffe parallel übertragen (Leistungsteilung).
- der hohe Wirkungsgrad.

In Abb. 5.174 ist der schematische Aufbau des 8-Gang-Automatgetriebes ZF-8HP70 dargestellt, einem typischen Vertreter moderner Stufenautomatgetriebe für Heckantrieb. Das Getriebeschema zeigt die Anordnung der wichtigsten leistungsführenden Bauelemente:

- Wandler mit schlupfgeregelter Überbrückungskupplung (GWK) und Zwei-Dämpfersystem,
- Kupplungen (C, D, E),
- Bremsen (A, B),
- Freilauf im Wandler,
- Radsätze (4 einfache Planetenradsätze),
- mechanische Verbindungselemente (Wellen, Träger, …).

Aus dem Schaltungsdiagramm ist zu entnehmen, welche Elemente in welchem Gang geschaltet werden. Zur Leistungsübertragung sind in jedem Gang drei Schaltelemente geschlossen und zwei Schaltelemente geöffnet. Dies führt zu einem sehr guten Radsatzwirkungsgrad und geringen Schleppverlusten. Der Gangwechsel erfolgt durch das Zu- und Abschalten jeweils eines Schaltelements. Die Übersetzungen in den einzelnen Gängen werden durch




| Gang | Bremse | | Kupplung | | | Übersetzung | Gangsprung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | | |
| 1 | ● | ● | ● | | | 4,714 | |
| | | | | | | | 1,50 |
| 2 | ● | ● | | | ● | 3,143 | |
| | | | | | | | 1,49 |
| 3 | | ● | ● | | ● | 2,106 | |
| | | | | | | | 1,26 |
| 4 | | ● | | ● | ● | 1,667 | |
| | | | | | | | 1,30 |
| 5 | | ● | ● | ● | | 1,285 | |
| | | | | | | | 1,28 |
| 6 | | | ● | ● | ● | 1,000 | |
| | | | | | | | 1,19 |
| 7 | ● | | ● | ● | | 0,839 | |
| | | | | | | | 1,26 |
| 8 | ● | | | ● | ● | 0,667 | |
| | | | | | | | Total 7,071 |
| R | ● | ● | | ● | | –3,317 | |

**Abb. 5.174** Getriebeschema ZF-8HP70

unterschiedliche Koppelungen der Zentralteile der Planetenradsätze gebildet.

Bei der Entwicklung eines Planetengetriebe-Systems für ein automatisches Fahrzeuggetriebe ist es wichtig, für den jeweiligen Einsatzbereich eine geeignete Übersetzungsreihe zu finden. Neben einfachen Planetensätzen kommen auch spezielle Radsätze wie der Ravigneaux-, der Simpson- oder der Wilsonsatz zur Anwendung [148, 164, 165].

### 5.4.4.3 Baugruppen

**Planetensatz** Ein Planetensatz (Abb. 5.175) besteht aus den drei Zentralteilen Sonnenrad (1), Planetenträger (3) und Hohlrad (4). Die Planetenräder (2) sind im Planetenträger gelagert. Mit einem Planetensatz lassen sich folgende drei Übersetzungen darstellen:

$$i_3 = \frac{z_4}{z_1} \quad \text{(Standübersetzung)}$$

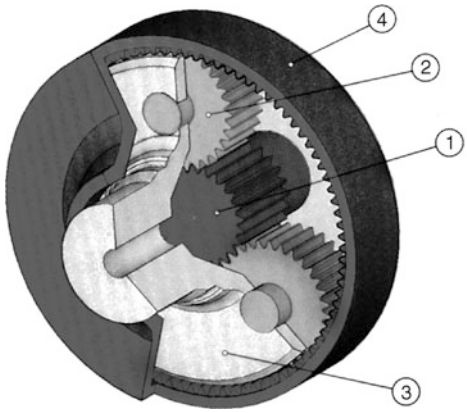
$$i_{13} = 1 - i_3$$

$$i_{43} = 1 - \frac{1}{i_3}$$

Durch Vertauschung von An- und Abtrieb lassen sich in den genannten Übersetzungen auch ihre Reziprokwerte darstellen. Je nach realisierter Übersetzung undLeistungsanforderung werden Planetensätze mit 3 bis 6 Planeten ausgeführt. Die Sonnen- und Planetenräder sind aus einsatzgehärtetem Stahl. Die Hohlräder sind aus Vergütungsstahl, werden geräumt und für hohe Belastungen nitriert. Die Planetenträger werden aus Blechteilen zusammengeschweißt oder genietet oder sind als Aluminium-Druckgussteile ausgeführt [169]. Der Aufbau von Ravigneaux-, Simpson- und Wilsonsatz ist in der Literatur beschrieben [148, 164, 165].

Für 6-Gang-Automatgetriebe wird heute bevorzugt das Lepelletier-Getriebesystem eingesetzt [170], das aus einem eingangsseitigen einfachen Planetenradsatz und einem ausgangsseitig angeordneten Ravigneauxsatz aufgebaut ist.

**Schaltelemente** Die Lastschaltelemente in automatischen Getrieben werden als Lamellenkupplungen und Lamellenbremsen ausgeführt. Der Aufbau ist in Abb. 5.176 für eine Lamellenkupplung dargestellt. Sie besteht aus einem Außenlamellenträger, der die Stahllamellen radial verdrehsicher, aber axial verschiebbar aufnimmt, einem Innenlamellenträger, in dem die Belaglamellen gehalten werden, einem Zylinder mit einer Druckölzuführung und




**Aufbau eines Planetenradsatzes**

1 Sonnenrad
2 Planetenrad
3 Planetenträger
4 Hohlrad

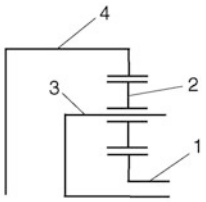
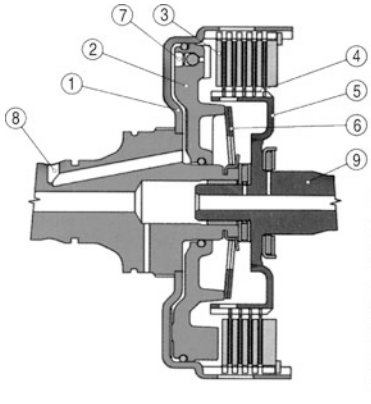



**Abb. 5.175** Planetensatz: Schema und Bild




**Lamellenkupplung**

1 Antriebszylinder
2 Betätigungskolben
3 Außenlamelle
4 Belaglamelle
5 Lamellenträger
6 Rückdruckfeder
7 Entlüftungssystem
8 Zuleitung/Drucköl
9 Ausgangswelle

**Abb. 5.176** Lamellenkupplung

einem Kolben, der mit Öldruck auf die Stahllamellen gepresst werden kann sowie einer Rückdruckfeder, die bei abgeschaltetem Öldruck den Kolben zurückschiebt, um die Kupplung zu öffnen. Während bei der Kupplung beide Lamellenträger rotierend gelagert sind, hat die Bremse einen gehäusefesten Außenlamellenträger.

Im stationären Zustand sind die Schaltelemente drucklos geöffnet oder mit Hauptdruck hydraulisch geschlossen und übertragen das anliegende Drehmoment kraftschlüssig. Das übertragbare Kupplungsmoment $M_K$ errechnet sich wie folgt:

$$M_K = \left(F_p - F_f\right) \cdot n \cdot \mu_{stat} \cdot r_m$$

Dabei sind $n$ die Anzahl der Reibflächen (zwei pro Lamelle), $\mu_{stat}$ der statische Reibwert, $r_m$ der mittlere Reibradius der Kupplungslamellen, $F_f$ die Rückdruckfederkraft und $F_p$ die Druckkraft im Kolben:

$$F_p = \left[\frac{\rho_{Öl} \cdot \omega_{Öl}^2}{4}\left(r_a^2 - r_i^2\right) + p_{stat}\right] \pi \left(r_a^2 - r_i^2\right)$$

mit $\rho_{Öl}$ der Dichte des Hydrauliköls, $\omega_{Öl}$ der Winkelgeschwindigkeit, mit dem das Öl in der Kupplung rotiert, $r_a$ dem Außen- und $r_i$ dem Innenradius des Betätigungskolbens und $p_{stat}$ dem eingestellten Kupplungsdruck.

Die Auslegung des Schaltmoments (maximales Schaltmoment = Motormoment plus Verzögerungsmoment der antriebsseitigen Massenträgheitsmomente) erfolgt nach der gleichen Formel, wobei für den Kupplungsdruck der variabel angesteuerte Schaltdruck $p_k$ und der dynamische Reibwert $\mu_{dyn}$ einzusetzen sind. Bei Bremsen ($\omega = 0$) entfällt der Druckanteil aus der Fliehkraft [148].

Als Außenlamellen werden Stahllamellen verwendet. Die Dimenionsierung der Lamellendicke erfolgt nach der Wärmemenge, die während einer Schaltung entsteht und die von der Stahllamelle mit einer akzeptablen Temperaturerhöhung aufgenommen werden muss. Als Innenlamellen werden Belaglamellen eingesetzt, die aus einem Trägerblech (ca. 0,8 mm dick) bestehen, auf das beidseitig der Reibbelag aufgeklebt ist. Als Reibbelag

werden so genannte „Papierbeläge“ verwendet, die aus einem Stützgerüst aus Zellulose, Aramidfasern, Kunststoffbestandteilen, Mineralien und einer Phenolharztränkung bestehen. Durch die Zusammensetzung des Belags kann der Reibwert in seiner Höhe und dem Verlauf über der Drehzahl beeinflusst werden. Dies hat nicht nur erheblichen Einfluss auf die Übertragungsfähigkeit der Kupplung, sondern auch auf den Schaltkomfort des Getriebes. In den Reibbelag sind Nuten eingebracht, die auch im geschlossenen Zustand der Kupplung eine Durchströmung mit Kühlöl ermöglichen. Dadurch kann nach einer Schaltung die in der Stahllamelle gespeicherte Wärme wieder abgeführt werden.

Außenlamellenträger, Innenlamellenträger, Zylinderraum und Kolben werden als Blechumformteile oder Aluminium-Druckgussteile ausgeführt. Sie sind meist mit Wellen, Planetenträgern oder anderen Verbindungsteilen verschweißt oder vernietet oder bilden mit den angrenzenden Funktionseinheiten ein Bauteil [169]. Die Kolben sind mit O-Ringen abgedichtet.

**Ölversorgung** Die Ölversorgung eines automatischen Getriebes erfüllt folgende Funktionen:

1. Kühlung des hydrodynamischen Drehmomentwandlers.
2. Schmierung und Kühlung des mechanischen Getriebeteils (Schaltelemente, Zahnräder, Lager).
3. Druckversorgung der hydraulischen Steuerung.
4. Druckversorgung der Schaltelement-Betätigung.

Ein Getriebe hat eine Ölfüllung von etwa 6 bis 8 Litern ATF (automatic transmission fluid). Heutige ATF's bestehen aus einem Grundöl auf Mineralölbasis, dem Additive (chemische Substanzen) beigemischt sind. Durch die Additivierung erfüllt das ATF die vielfältigen Anforderungen in einem automatischen Getriebe:

- Temperaturbeständigkeit von −40 °C bis +150 °C,
- thermische Alterungsbeständigkeit,
- hoher statischer Reibwert und steigender Reibwertverlauf über der Schlupfdrehzahl,
- möglichst geringe Viskositätsänderung über der Temperatur,
- Verhinderung von Schaumbildung,
- Vermeidung von Ablagerungen,
- Vermeidung von Korrosion,
- Verträglichkeit mit Dichtungswerkstoffen.

Die Ölversorgung übernimmt eine Innenzahnradpumpe, die durch den Hals des Drehmomentwandlers mit Motordrehzahl angetrieben wird. Die Innenzahnradpumpe passt sehr gut in den Bauraum zwischen Wandler und dem mechanischen Getriebeteil, ist einfach im Aufbau und robust in der Funktionsweise. Die theoretische Fördermenge liegt je nach Getriebeanforderung zwischen 14 und 23 $cm^3$/Umdrehung, der Drehzahlbereich reicht von 600 bis 7000 $min^{-1}$ und der Druckbereich von ca. 3 bis 24 bar. Da die Pumpe für die Leerlaufdrehzahl des Motors bei hohen Öltemperaturen ausgelegt sein muss, ist der Förderstrom bei hohen Drehzahlen viel zu groß. Dieser Volumenstromüberschuss muss möglichst verlustarm in den Ölsumpf oder auf die Saugseite der Pumpe zurückgeführt werden. Um diesen Nachteil zu vermeiden, wird z. B. im 8-Gang Automatgetriebe 8HP70 von ZF, eine doppelhubige Flügelzellenpumpe verwendet (siehe ◘ Abb. 5.177). Diese Art von Pumpe ist achsparallel in der Nähe der hydraulischen Steuereinheit angeordnet. Der Antrieb erfolgt über eine ins Schnelle drehende Rollenzahnkette direkt vom Wandlerhals. Druck und Saugkanal sind mit Rohren auf kurzem Wege strömungsgünstig direkt mit der hydraulischen Steuerung verbunden, eine Saugstromaufladung vom Hauptdruckventil verbessert die Füllung der Pumpe und führt zu günstig hohen Kavitationsdrehzahlen. Gegenüber der Innenzahnradpumpe der 6-Gang-Getriebe weist die Flügelzellenpumpe einen höheren Gesamtwirkungsgrad aus (siehe ◘ Abb. 5.178).

Zur Ölversorgung gehört auch ein Ölfilter, der auf der Saugseite der Ölpumpe angeordnet ist und im Ölsumpf liegt. Er verhindert, dass Restschmutz aus der Bauteilfertigung und Abrieb, der während des Betriebs entsteht, in die Ölpumpe und die hydraulische Steuerung gelangen.

**Hydraulische Steuerung** Seit der Einführung der elektronischen Getriebesteuerung EGS (vgl. ▶ Abschn. 5.4.6) hat die Bedeutung der hydraulischen Steuerung abgenommen. Zur Umsetzung der EGS-

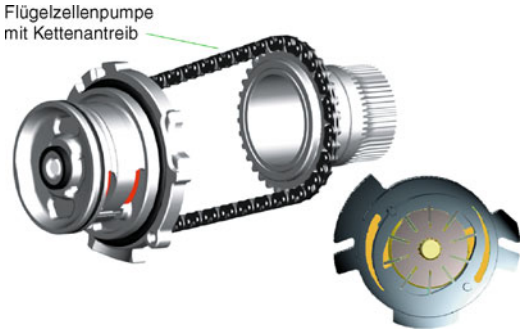



**Abb. 5.177** Doppelhubige Flügelzellenpumpe

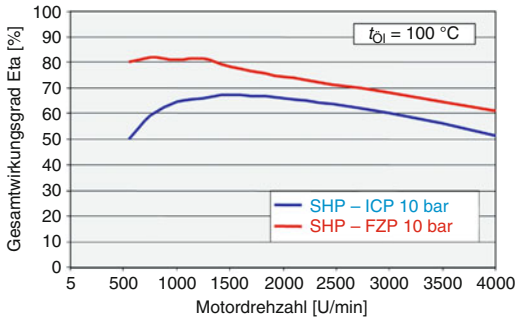



**Abb. 5.178** Wirkungsgrad Pumpensysteme

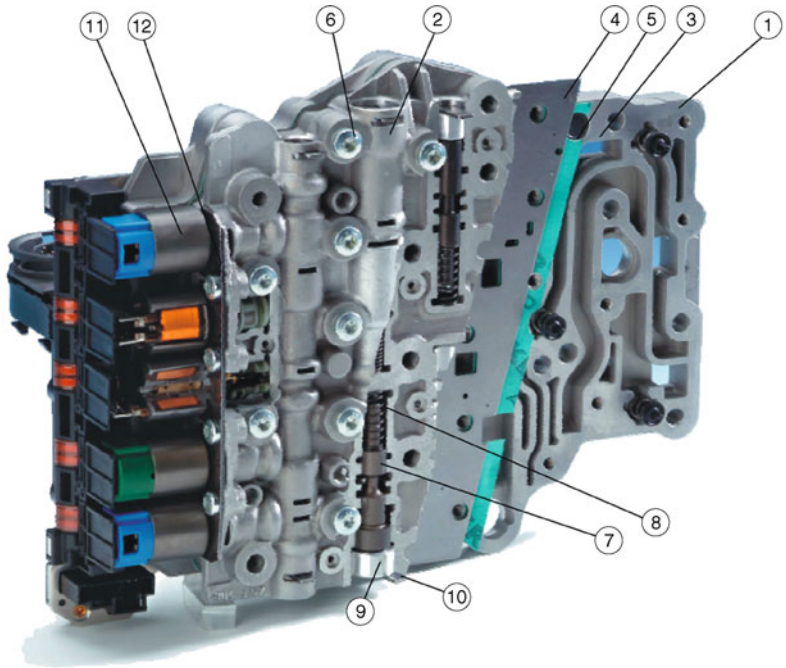
Funktionen in die leistungsführenden Bauteile des Triebstrangs ist jedoch nach wie vor die Getriebehydraulik erforderlich. Neben der Umsetzung von analogen und digitalen Drucksignalen, bei denen der Dynamik des Systemverhaltens eine entscheidende Bedeutung zukommt, verbleiben in der Hydraulik nach wie vor Grundfunktionalitäten wie z. B. Druckerhöhung oder -reduzierung, Sicherheits- und Notlauffunktionen.

Das hydraulische Steuerungssystem besteht aus folgenden Teilsystemen:

- Hauptdruckversorgung,
- Schaltdrucksteuerung,
- Gangwechselsteuerung,
- Wandlerkupplungssteuerung,
- Schmierdrucksystem,
- Notlaufsystem.

Der gesamte Umfang der hydraulischen Steuerungsfunktionen ist in einem Schaltplan beschrieben und im hydraulischen Schaltgerät realisiert. Abb. 5.179 zeigt den Aufbau einer typischen Automatgetriebehydraulik. Sie besteht aus einer Ölverteilerplatte (1) und einem Ventilgehäuse (2) aus Aluminium-Druckguss mit Ölkanälen und Öldurchführungen (3) zum Getriebegehäuse. Die Kanäle sind durch ein Zwischenblech (4) und Flachdichtungen (5) mit Durchtrittsöffnungen abgedeckt. Um Leckagen zu vermeiden, werden die Gehäuseteile engmaschig miteinander und dem Getriebegehäuse verschraubt (6). Im Ventilgehäuse sind Ventilbohrungen, in denen die Ventile (7) Ölströme steuern oder Drücke regeln. Die Ventile werden durch Federn (8) in Grundstellung gehalten und mit Stopfen (9) und Klammern (10) im Gehäuse arretiert. Teil des hydraulischen Schaltgeräts sind auch die Magnetventile und Druckregler (11), die in das Ventilgehäuse montiert sind und mit einem Halteblech (12) befestigt werden. Über einen Wählschieber, der mechanisch mit dem Wählhebel verbunden ist, werden die Vorwärts- (D) und Rückwärtsfahrstellung (R) vorgegeben und in der Fahrstufe N (Neutral) mindestens ein Schaltelement drucklos geschaltet, das den Triebstrang auftrennt. Die Umschaltventile werden von außen durch die EGS über Magnetventile oder durch interne Drücke gesteuert. Mit ihnen wird von einem Gang in den anderen geschaltet. Die Regelventile werden ebenfalls von der EGS über Druckregler mit einem analogen Drucksignal angesteuert. Mit den Regelventilen wird der Druckverlauf an der zu- und abschaltenden Kupplung während des Schaltvorgangs gesteuert, der Hauptdruck proportional zum Motormoment eingestellt und die Wandlerkupplung auf eine vorgegebene Schlupfdrehzahl geregelt.

Das hydraulische Schaltgerät ist meist unten an das Getriebegehäuse angeschraubt. Über Verbindungskanäle wird das Öl zur Ölpumpe, zum Wandler, zur Schmierung und zu den Schaltelementen geleitet. Meist trägt das hydraulische Schaltgerät auch noch Sensoren für Drehzahl und Öltemperatur und die Verkabelung für die Ventile samt dem Getriebestecker. Durch geeignete Ausführung der Hydraulik und des Elektriksatzes lassen sich hydraulische und elektrische Getriebesteuerungskomponenten zu einer elektrohydraulischen Baueinheit zusammenfassen [171]. Bei modernen Automatgetrieben ist die elektronische Getriebesteuerung (EGS) ebenfalls Bestandteil dieser elektrohydraulischen Baueinheit und enthält als Mechatro-




| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Ölverteilerplatte | 4 | Zwischenblech | 7 | Ventil | 10 | Klammer (Federspange) |
| 2 | Ventilgehäuse | 5 | Dichtung | 8 | Druckfeder | 11 | Druckregler |
| 3 | Durchflusskanal | 6 | Schraube | 9 | Stopfen | 12 | Halteblech |

**Abb. 5.179** Hydraulisches Schaltgerät

nikmodul die gesamte Steuerungsfunktionalität des Getriebes (vgl. ▶ Abschn. 5.4.8).

### 5.4.4.4 Betätigung

**Wählschieberbetätigung** Automatische Getriebe weisen als äußere Schaltung einen Wählhebel auf, der mit einem Gestänge oder einem Bowdenzug mechanisch mit der Wählwelle des Getriebes verbunden ist. Mit dem Wählhebel werden im Getriebe die Grundfunktionen P (Parken), R (Rückwärtsfahrt), N (Neutral) und D (Vorwärtsfahrt) gesteuert. Dazu wirkt die mechanische Verbindung auf den Wählschieber und die Parksperre. Die Arretierung der Wählwelle erfolgt über eine Rastenscheibe mit einer Feder. Meist ist außen am Getriebe auf der Wählwelle ein Positionserkennungsschalter angebracht. Er dient zur Erkennung der Wählhebelposition, die im Kombi-Instrument angezeigt wird und zur Steuerung des Rückfahrlichts und der Anlasssperre, die ein Starten des Motors in einer Fahrposition verhindert. Bei Getrieben mit integrierter Getriebeelektronik ist der Positionsschalter Teil des Mechatronikmoduls.

**Parksperre** Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe lassen sich gegen Wegrollen sichern, indem bei abgestelltem Motor ein Gang eingelegt wird. Dies ist bei automatischen Getrieben nicht möglich. Da bei stehendem Motor keine Druckölversorgung vorhanden ist, sind alle Schaltelemente geöffnet, das Getriebe befindet sich in Neutral. Um ein Wegrollen des Fahrzeugs ohne betätigte Handbremse zu verhindern, gibt es bei automatischen Getrieben eine Parksperre. Sie verriegelt durch ein verzahntes Rad und eine Klinke den Getriebeabtrieb gegen das Gehäuse. In den Wählhebelpositionen R, N, und D wird die Parksperrenklinke mit einer Rückhaltefeder am Einfallen in das Parksperrenrad gehindert. Beim Einlegen der Position P wird die Klinke über einen Keil gegen das Parksperrenrad gedrückt. Trifft die Klinke auf eine Lücke, rastet sie ein und verriegelt den Abtrieb. Trifft sie auf einen



**Abb. 5.180** Monostabiler Wählhebel (BMW 7er Serie)

Zahn, wird sie durch einen Federmechanismus vorgespannt, sodass bei einer Drehung des Abtriebs die Klinke mithilfe der Vorspannkraft in die nächste Lücke des Parksperrenrads einrastet.

**Wählhebel** Moderne Automatgetriebe-Wählhebel sind monostabil ausgeführt (siehe Abb. 5.180), wobei die Hauptfahrpositionen R, N und D per Tippbewegung nach vorne (R) bzw hinten (D) angewählt werden und die Parkposition durch Drücken des Tasters am oberen Ende des Wählhebels eingelegt wird. Die Fahrstufe N befindet sich in der monostabilen Mittenposition des Wählhebels. Durch eine Seitwärtsbewegung nach links (oder rechts, je nach Ausführung) gelangt man in den manuellen Tippmodus für die Einzelgangbetätigung. Dies dient in erster Linie dem Bremsbetrieb bei Bergfahrt, kann jedoch auch von leistungsorientierten Fahrern benutzt werden, um den Motor in hohen Drehzahlbereichen zu betreiben. Beim Übergang des Wählhebels in diese Gasse schaltet die EGS vom Automatmodus in einen Handschaltmodus um. Durch eine Wählhebelbewegung nach vorn (+) wird hoch- und nach hinten (–) zurückgeschaltet. Die Einführung der Tiptronic verfolgte die Absicht, dem Fahrer eines Automat-Fahrzeugs auch die Möglichkeit zu bieten, bei Bedarf wie mit einem Handschaltgetriebe zu fahren.

### 5.4.4.5 Betriebsverhalten

Das kundenrelevante Betriebsverhalten eines Fahrzeugs mit Automatgetriebe zeigt sich in der Schaltqualität, also der Art und Weise, wie der Gangwechsel vollzogen wird und ob, bzw. wie er spürbar ist und im Schaltprogramm, also in welchem Gang gefahren wird und wann die Gänge gewechselt werden.

**Schaltqualität** Da die Schaltung bei einem automatischen Getriebe definitionsgemäß automatisch erfolgt, also vom Fahrer nicht bewusst eingeleitet wird, muss sie weitgehend unspürbar ablaufen, sonst wird sie als störend empfunden. Weiterhin erwartet der Fahrer beim Betätigen des Fahrpedals eine direkte Reaktion in Form einer Fahrzeugbeschleunigung, die i.d.R. durch eine sofortige Rückschaltung erreicht wird. Das Ziel der Schaltablaufsteuerung ist es deshalb, bei Rückschaltungen spontan auf den Fahrerwunsch zu reagieren und Schaltungen möglichst ruckfrei ablaufen zu lassen. Die Grundvoraussetzungen für eine gute Schaltqualität liegen im Aufbau des mechanischen Getriebes und im hydraulischen Steuerungssystem. Mit kleinen Gangsprüngen ist eine gute Schaltung leichter zu erreichen als bei großen Stufen. In der hydraulischen Getriebesteuerung ist ein gutes Systemverhalten maßgebend für eine gute Schaltqualität, d. h. die gesamte sehr stark nichtlineare Übertragungsstrecke muss geringe Totzeiten aufweisen und in allen Betriebszuständen stabil sein. Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, können durch entsprechende Steuerungs- und Regelungsalgorithmen in der EGS die Schaltungsabläufe optimiert werden. Eine genaue Drehzahlerfassung von Getriebeeingangs- und -ausgangsdrehzahl ermöglicht eine Drehzahlregelung der zu- und abschaltenden Kupplung während des Schaltungsablaufs. Diese Regelung führt zu kontinuierlichen, immer gleich ablaufenden Schaltungen, unabhängig von den Betriebsbedingungen. In Schaltungsbereichen, in denen sich die Drehzahl nicht ändert, wird durch adaptive Strategien versucht, die Drucksteuerung der Kupplungen auf die richtigen Größen zu justieren. Mit Adaptionsalgorithmen wird gewährleistet, dass auch Änderungen während der Betriebsdauer, wie z. B. Setzvorgänge oder Verschleiß an den Kupplungen ausgeglichen werden und keinen negativen Einfluss auf das Schaltverhalten und die Schaltqualität des Getriebes haben.

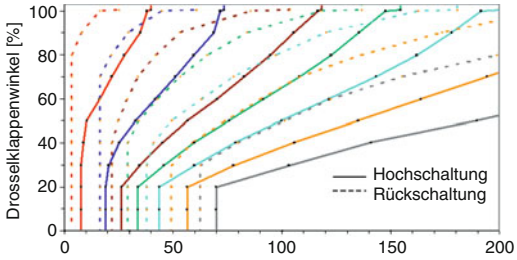



**Abb. 5.181** Schaltkennfeld als Funktion der Fahrgeschwindigkeit (km/h)

**Schaltprogramm** Automatische Getriebe werden in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und des Drosselklappenwinkels geschaltet. Ein Getriebeschaltkennfeld enthält abhängig von diesen Parametern Hoch- und Rückschaltlinien (Abb. 5.181) für alle Gangwechsel. Wird z. B. ein Fahrzeug bei konstanter Motorlast beschleunigt und dabei eine Hochschaltlinie überschritten, erfolgt eine Schaltung in den nächst höheren Gang. Wird andererseits durch ein Betätigen des Fahrpedals eine Beschleunigung des Fahrzeugs gefordert und dabei eine Rückschaltlinie überschritten, erfolgt eine Rückschaltung über einen oder mehrere Gänge. Die elektronische Getriebesteuerung bietet für die Gestaltung solcher Schaltkennfelder große Freiheiten. So können mehrere solcher Kennfelder in der EGS abgelegt werden, die eine unterschiedliche Fahrcharakteristik aufweisen. Üblich sind E-Programme (Economy) für ein sehr verbrauchsorientiertes Fahren mit frühen Hochschaltungen und späten Rückschaltungen und S-Programme (Sport) für fahrleistungsorientierte Fahrweise. Die Programme können mit einem Wahlprogrammschalter, der am Wählhebel angebracht ist, vom Fahrer ausgewählt werden oder sie werden von der Getriebeelektronik selbst bestimmt. Dies erfordert eine Schaltstrategie, die aufgrund verschiedener Einflussgrößen, wie z. B. Fahrpedalstellung, Fahrpedalbewegung, Fahrgeschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigung des Fahrzeugs, Bremsbetätigung, usw. eine Klassifizierung der Fahrbedingungen und des Fahrverhaltens vornimmt und bewertet und daraus ein entsprechend der Fahrsituation angemessenes Fahrprogramm auswählt [172]. Abb. 5.182 zeigt den Aufbau eines solchen Verfahrens. Eine andere Möglichkeit zur Anpassung des Fahrprogramms bietet der Aufbau eines Schaltkennfeldes, bei dem die Schaltkennlinien durch verschiedene Einflussgrößen variabel an die Fahrsituation angepasst werden können [173]. Eine Übersicht über alle

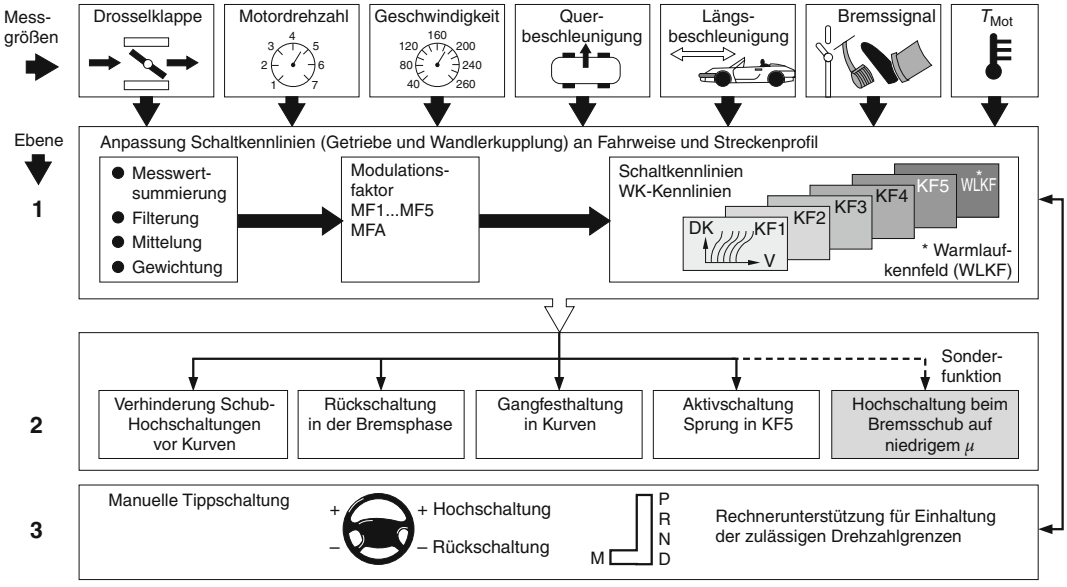



**Abb. 5.182** Schaltstrategie zur Auswahl von Schaltprogrammen

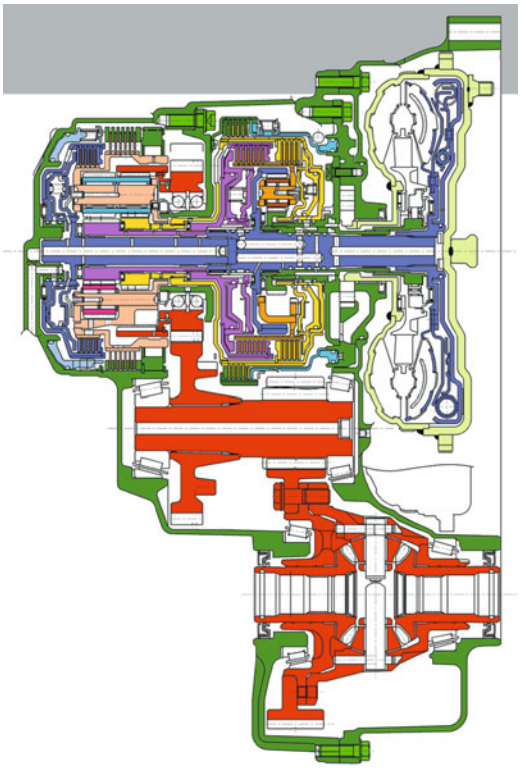


**Abb. 5.183** Schnittbild AW – TF-60SN für Front-Quer-Antrieb

gängigen Methoden zur Ausführung von Schaltprogrammen findet sich in der Literatur [174].

### 5.4.4.6 Ausführungsbeispiele

**Front-Quer-Antrieb** Für Pkw mit Frontantrieb und querliegender Antriebseinheit bleibt für das Getriebe relativ wenig Platz. Es muss daher sehr kurz bauen. Aufgrund der beengten Einbauverhältnisse, der Achslage von Motor und Seitenwellen, der Anordnung von anderen Aggregaten im Vorderwagen und den hohen Anforderungen an die Crashsicherheit werden an den Getriebeaufbau Anforderungen gestellt, die sehr stark vom jeweiligen Fahrzeug-Gesamtkonzept abhängen. Die Front-Quer-Anwendung wurden bis vor kurzem noch von 4-Gang-Getrieben dominiert. Als erstes 6-Gang-Automatgetriebe für die Front-Quer-Anwendung wurde vom VW-Konzern für die Golf-Plattform das Getriebe TF-60SN vom japanischen Hersteller Aisin AW eingeführt [175]. Das Getriebe basiert auf dem Lepelletiersystem, die Übersetzungen entsprechen nahezu den in Abb. 5.174 dargestellten Werten, das Auslegungsdrehmoment liegt bei 250 Nm und die Baulänge beträgt nur 350 mm. Abb. 5.183 zeigt einen Schnitt durch das Getriebe. Daraus sind der Aufbau und die wesentlichen Bauteile ersichtlich.

Ein schmaler Wandler mit Wandler-Überbrückungskupplung und integriertem Torsionsdämpfer und die geschachtelte Bauweise von Radsätzen und Schaltelementen sowie fertigungstechnische Maßnahmen zur Toleranzeinengung tragen zu einer kompakten Bauweise und der kurzen Getriebelänge bei. Das Getriebe hat einen Freilauf im 1. Gang, der den Innenlamellenträger der Bremse B2 gegen das Gehäuse abstützt. Charakteristisch für ein Frontantriebsgetriebe ist das integrierte Achsgetriebe. Durch unterschiedliche Stirnradstufen lässt sich die Endübersetzung den fahrzeugseitigen Forderungen nach Bergsteigfähigkeit und Höchstgeschwindigkeit anpassen.

**Standardantrieb** Im Standardantrieb haben sich seit 2008 8-Gang-Automatgetriebe in der Serie etabliert. Abb. 5.184 zeigt das ZF Getriebe 8HP70, das eine Gesamtübersetzung von 7,05 aufweist und für Motordrehmomente bis 700 Nm dimensioniert ist. Das Radsatzsystem besteht aus 4 einfachen Planetensätzen. Mit nur 5 Schaltelementen werden 8 Vorwärtsgänge und derRückwärtsgang geschaltet. Das Getriebe hat keine Freiläufe, alle Schaltungen laufen als geregelte Lastschaltungen ab. Das Getriebesystem sowie eine optimale Anordnung und Gestaltung der Bauteile ermöglicht einen sehr kompakten Getriebeaufbau. Das 8-Gang-Getriebe ist grössenmässig gleich (Länge, Durchmesser) und sogar etwas leichter als ein vergleichbares 6-Gang-Automatgetriebe [188].

2003 wurde von Mercedes-Benz ein Automatgetriebe mit 7 Gangstufen eingeführt [177]. Basierend auf dem Mercedes 5-Gang-Automatgetriebe W5A330/580 wurde der einfache eingangsseitige Planetensatz durch einen invertierten Ravigneauxsatz ersetzt und eine zusätzliche Lamellenbremse ergänzt, um 7 Vorwärts- und 2 Rückwärtsgänge darzustellen. Abb. 5.185 zeigt das Getriebe- und Schaltschema dieses Getriebes, das eine Spreizung von 6,02 aufweist und für Motormomente bis 700 Nm ausgelegt ist.

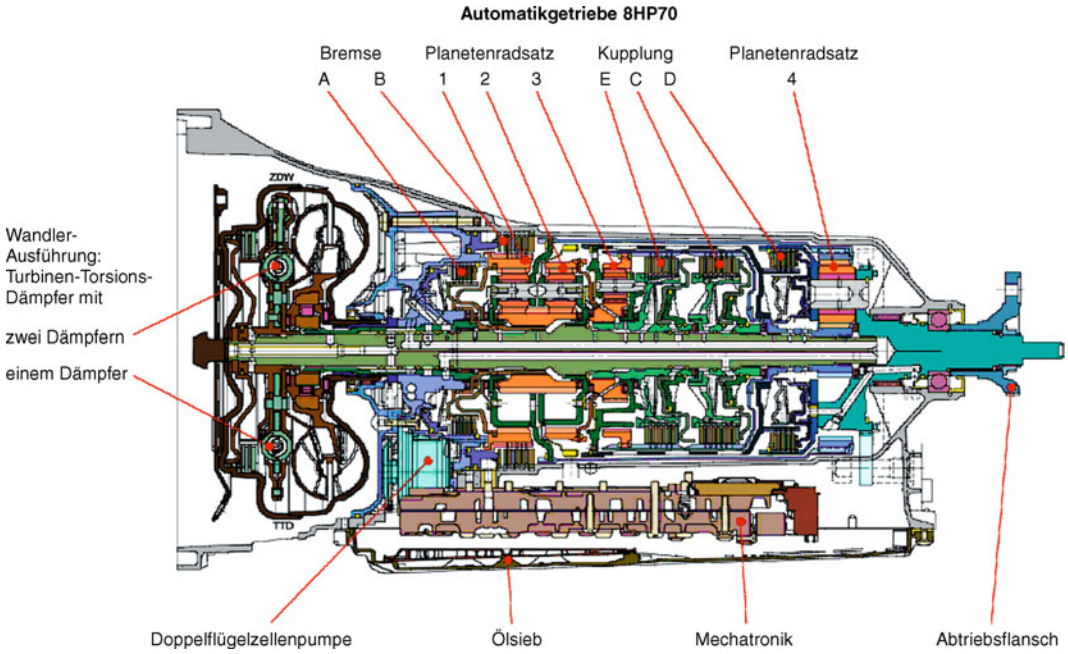
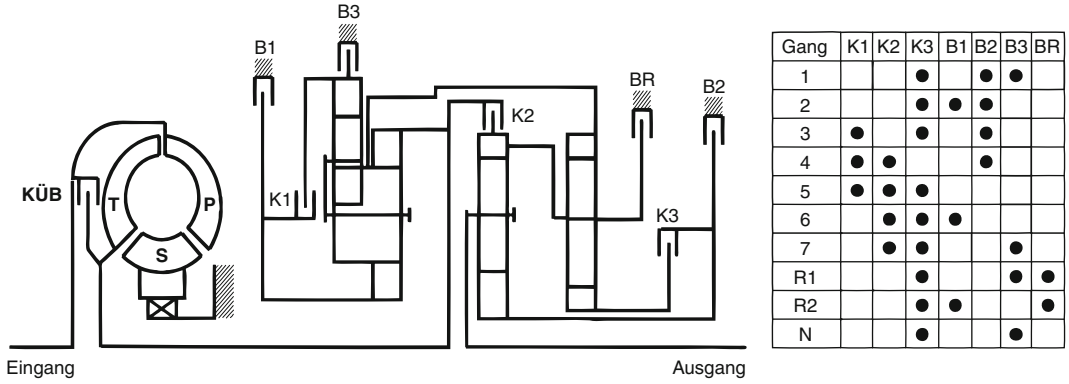



**Abb. 5.184** Schnittbild ZF-8HP70 für Standard-Antrieb




| Gang | K1 | K2 | K3 | B1 | B2 | B3 | BR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | ● | | ● | ● | |
| 2 | | | ● | ● | ● | | |
| 3 | ● | | ● | | ● | | |
| 4 | ● | ● | | | ● | | |
| 5 | ● | ● | ● | | | | |
| 6 | | ● | ● | ● | | | |
| 7 | | ● | ● | | | ● | |
| R1 | | | ● | | | ● | ● |
| R2 | | | ● | ● | | | ● |
| N | | | ● | | | ● | |

**Abb. 5.185** Getriebeschema MB 7-Gang-Getriebe W7A700

**Front-Längs- und Allradantrieb** Für Fahrzeuge mit Frontantrieb und längs eingebauten Motoren lässt sich aus den Standard-Getrieben eine Variante ableiten, die aus demselben Basis-Getriebe besteht, der Abtrieb aber über eine Stirnradkette und einer neben dem Getriebe liegenden Welle zu einem Achsgetriebe geführt wird, an das die Seitenwellen der Vorderachse angeflanscht werden können. Durch die Integration eines Verteilergetriebes lässt sich ein sehr kompakt bauender Allradantrieb realisieren, der bei Pkw-Allradanwendungen zum Einsatz kommt. Aus dem Standard-Getriebe lässt sich durch Anflanschen eines externen Verteilergetriebes an die Getriebe-Abtriebsseite auch die Möglichkeit für einen add-on-Allradantrieb darstellen. Dies wird in erster Linie für den Einsatz in Geländefahrzeugen realisiert.

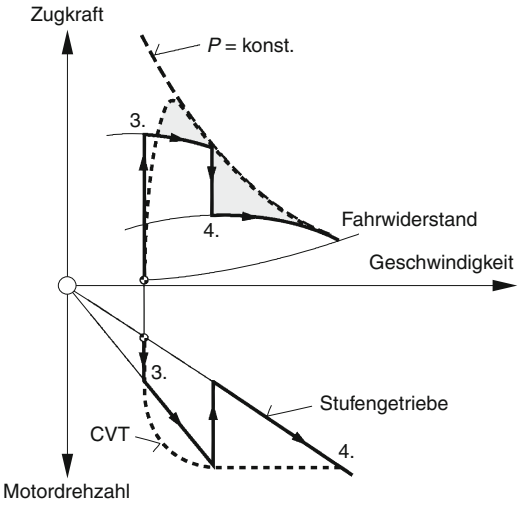



**Abb. 5.186** Übersetzungsanpassung an die Zugkrafthyperbel

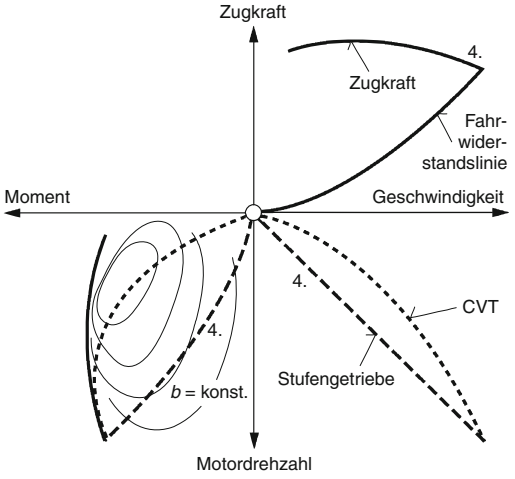



**Abb. 5.187** Betrieb im optimalen Verbrauchsgebiet des Motorkennfelds

## 5.4.5 Stufenlose Getriebe

### 5.4.5.1 Funktionsweise

Stufenlose Getriebe bieten gegenüber den Stufengetrieben den Vorteil, dass mit ihnen die starre Kopplung zwischen Fahrgeschwindigkeit und Motordrehzahl für einzelne Gangstufen aufgehoben werden kann. Daraus resultieren zwei Effekte. Zum einen kann die Übersetzung genau der Zugkrafthyperbel angepasst werden (Abb. 5.186). Dies bringt einen Gewinn an Zugkraft und damit eine Steigerung der Fahrleistung. Zum anderen kann die Übersetzung im Teillastbereich, in dem heute der größte Fahranteil liegt, so eingestellt werden, dass sich der Motorbetriebspunkt im Bereich des minimalen Kraftstoffverbrauchs befindet (Abb. 5.187). Dies trägt zur Kraftstoffeinsparung bei. Während die Funktion von Stufengetrieben heute durch Zahnradstufen in Vorgelege- oder Planetenbauweise ausgeführt ist, kann die stufenlose Kraftübertragung mit unterschiedlichen Prinzipien realisiert werden. Eine vertiefte Darstellung von mechanischen, hydrodynamischen, hydrostatischen und elektrischen Getrieben sowie die Möglichkeiten der Leistungsverzweigung ist in der Literatur zu finden [178].

Während sich die elektrischen Antriebe im Kraftfahrzeug bisher nur sehr begrenzt durchgesetzt haben, ist der stufenlose hydrostatische Antrieb in Arbeitsmaschinen für Baufahrzeuge, Traktoren und landwirtschaftlichen Maschinen, aber auch in Nutzfahrzeugen und Bussen für spezielle Einsatzfälle zu finden. Das hydrodynamische stufenlose Getriebe – der Drehmomentwandler – ist heute praktisch jedem Stufenautomatgetriebe als Anfahrelement vorgeschaltet. Bei den mechanischen stufenlosen Getrieben unterscheidet man im Wesentlichen die Wälzgetriebe und die Umschlingungsgetriebe. Bei den Wälzgetrieben sind die Toroidgetriebe am weitesten entwickelt [186]. Die Kraftübertragung von einer Antriebs- auf eine Abtriebsscheibe, die in der Form eines Torus ausgebildet sind, erfolgt über schwenkbare Rollen. Durch Änderung des Neigungswinkels der Reibrollen lässt sich das Übersetzungsverhältnis zwischen An- und Abtrieb stufenlos einstellen. Die Kraftübertragung erfolgt durch Reibkontakt. Dies führt zu sehr hohen Hertz'schen Pressungen an den Bauteilen und erfordert ein spezielles Traktionsfluid, das die hohen Pressungen erträgt und die Umfangskräfte übertragen kann. Toroidgetriebe waren bereits in den 30er-Jahren im Einsatz [179], konnten sich jedoch bisher nicht gegen die Stufenautomatgetriebe durchsetzen.

In der Pkw-Antriebstechnik wird heute das CVT (Continuously Variable Transmission) als stufenloses, mechanisches Getriebe in Form eines Um-

schlingungsgetriebes eingesetzt. Das Kernelement ist der Variator, der aus zwei Kegelscheibenpaaren besteht. Die Kraftübertragung erfolgt durch ein Umschlingungselement. Durch axiale Veränderung des Scheibenabstandes wird der Laufradius des Umschlingungselements und damit die Übersetzung geändert. Die Kraftübertragung zwischen Scheibenpaar und Umschlingungselement erfolgt durch Reibung. Die axiale Anpressung der Scheiben wird über Kolben durch hydraulischen Druck erzeugt. Die Übersetzungsverstellung wird ebenfalls hydraulisch gesteuert.

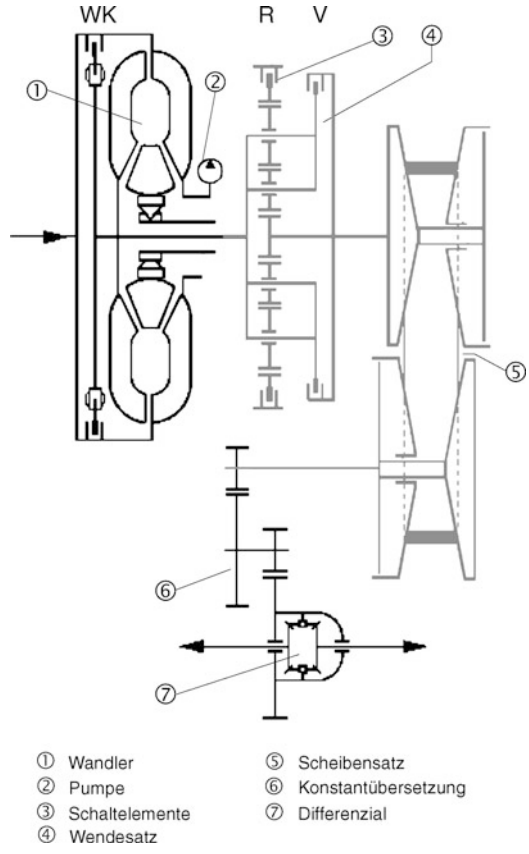
### 5.4.5.2 Aufbau

Der schematische Aufbau eines Getriebes für Front-Quer-Antrieb ist in ◘ Abb. 5.188 zu sehen [180]. Die für ein CVT charakteristischen Baugruppen sind im Bild bezeichnet. Als Anfahrelement kann neben dem hydrodynamischen Drehmomentwandler, der im Fahrbetrieb überbrückt wird, auch eine trocken- oder nasslaufende Lamellenkupplung oder eine Magnetpulverkupplung dienen. Die Umschaltung von Vorwärts- auf Rückwärtsfahrt ist durch einen Planetenwendesatz mit nasslaufenden Lamellenkupplungen realisiert. Ebenso ist eine Vorgelegewendestufe mit Klauenkupplungen möglich. Zur Druckversorgung steht in der Regel eine Zahnradpumpe zur Verfügung. Als Umschlingungselement dient eine Kette oder ein Schubgliederband. Der Endabtrieb wird mit schrägverzahnten Stirnrädern ausgeführt. Als Achsausgleichsgetriebe kommt ein Kegelraddifferenzial zum Einsatz. Hydraulische und elektronische Steuerungseinheit entsprechen in ihrem Aufbau den aus den Stufengetrieben bekannten Getriebesteuerungen, wobei für die Anpressdrücke um bis zum Faktor 5 höhere Werte als bei Stufenautomatgetrieben benötigt werden.

### 5.4.5.3 Baugruppen

Neben den von den Stufengetrieben bekannten Bauteilen und Baugruppen (vgl. ▶ Abschn. 5.4.4.3) verdienen die CVT-spezifischen Teile, das Umschlingungselement, der Variator und die Steuerung besondere Beachtung.

**Umschlingungselement** Für den Serieneinsatz im Pkw haben sich bisher als Umschlingungselemente




◘ **Abb. 5.188** Getriebeschema ZF-Ecotronic

das Schubgliederband von Van Doorne's Transmissie (VDT) und die Laschenkette von LuK bewährt. Das Schubgliederband (◘ Abb. 5.189) besteht aus 2 mehrlagigen Bändern, die sich aus ca. 0,2 mm dicken Endlosringen aus hochfestem Stahl zusammensetzen und die Klemmstücke aus gestanztem Stahlblech zusammenhalten. Die Kraftübertragung von der Primär- auf die Sekundärscheibe erfolgt nicht wie bei einer Kette durch Zugkräfte, sondern durch Schub über die Klemmstücke.

Für unterschiedliche Leistungsklassen stehen Schubgliederbänder von 24 und 30 mm Breite mit 6, 9, 10 und 12 Stahlringen zur Verfügung. Für kleine Leistungen (Motordrehmomente $< 65$ Nm) kommen auch Bänder aus Gummiwerkstoffen zum Einsatz. Für den Front-Längs-Antrieb wurde 1999 von Audi ein stufenloses Getriebe mit einer Laschenkette von LuK in den Markt eingeführt [181]

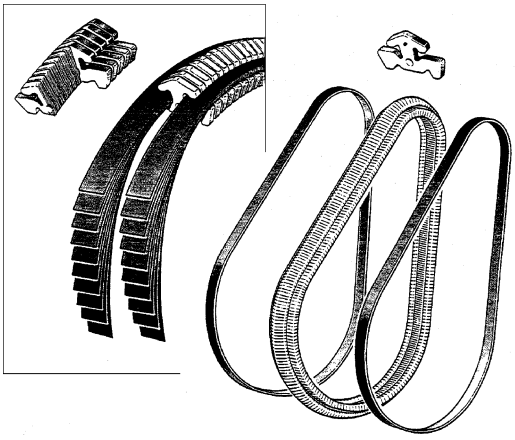


**Abb. 5.189** VDT-Schubgliederband

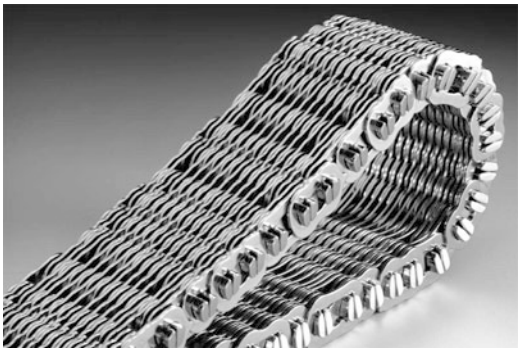


**Abb. 5.190** LuK-Laschenkette

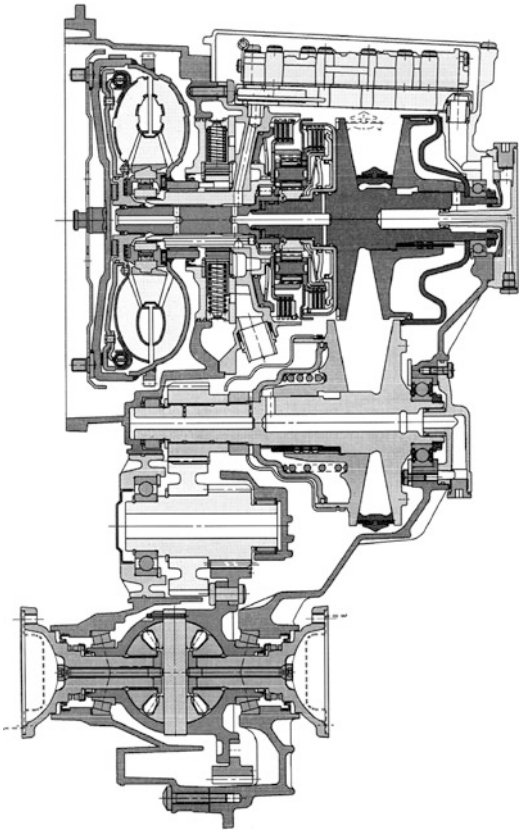


**Abb. 5.191** Schnittbild ZF-Ecotronic CFT23

(Abb. 5.190). Die Kraftübertragung erfolgt von den ballig ausgeführten Variatorscheiben durch Reibung auf die zweiteiligen Stifte der Kette. Die Stifte sind miteinander durch Laschen verbunden, die die Umfangskräfte durch Zug weiterleiten.

Die übertragbare Leistung der heute eingesetzten Umschlingungselemente liegt für beide Bauformen bei etwa 180 kW und einem maximalen Motordrehmoment von 330 Nm. Bei diesen Anwendungen beträgt die Spreizung des Getriebes mit Schubgliederband 5,4, die des Kettenvariators 6,25. Der Kettenvariator weist einen etwas besseren Wirkungsgrad auf, ist aber hinsichtlich des Geräuschverhaltens schwieriger zu beherrschen als das Schubgliederband, und erfordert i. d. R. zusätzliche fahrzeugseitige Dämmmaßnahmen [182].

**Variator** Abb. 5.191 zeigt ein ZF-Ecotronic-Getriebe im Schnitt. Daraus ist der Aufbau des konischen Primär- und Sekundärscheibensatzes ersichtlich. Ein Scheibensatz besteht aus einer wellenfesten Scheibe und einer Losscheibe, die auf der Welle axial beweglich geführt ist. Die axiale Führung der Losscheibe ist als Kugelführung ausgebildet, um die Druckkraft aus den Anpresszylindern mit minimaler Reibung an die Kontaktstelle zwischen Scheibe und Band zu übertragen. Geringe Reibung kommt auch der schnellen Scheibenverstellung zugute, um eine hohe Verstelldynamik des Variators zu gewährleisten. Die Scheiben sind aus gehärtetem Stahl mit geschliffenen Kegeloberflächen. Primär- und sekundärseitige Anpresszylinder sind als Blechumformteile ausgeführt. Der Sekundärscheibensatz ist über eine Feder mit einer mechanischen Vorspann-

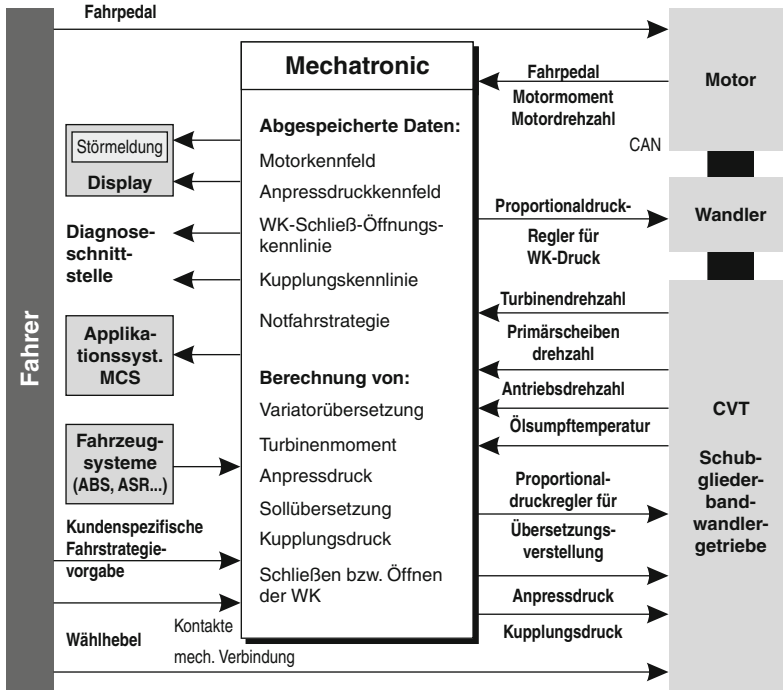



**Abb. 5.192** Blockdiagramm einer CVT-Getriebesteuerung

kraft beaufschlagt. Der Zylinderraum wurde mit einer zusätzlichen Blechabdeckung versehen, um die Fliehkraftwirkung des Öls zu kompensieren.

**Steuerung** Bei stufenlosen Getrieben sind keine Gänge zu schalten. Als besondere Aufgaben der Getriebesteuerung sind jedoch die Variatordrucksteuerung für die Anpressung und die Variatorverstellungen für die Übersetzungsregelung zu sehen. Die Anpressung des Bandes oder der Kette sollte proportional zum übertragenen Drehmoment erfolgen. Zu geringe Anpresskräfte führen zum Durchrutschen und zur Zerstörung des Bandes oder der Kette.

Überschüsse in den Anpresskräften bedingen hohe Drücke und daraus resultierend eine hohe Pumpenleistung. Dies führt zu einem schlechten Getriebewirkungsgrad. Deshalb ist eine möglichst genaue drehmomentabhängige Anpressdrucksteuerung von großer Wichtigkeit. Die Übersetzungsregelung erfolgt in der Regel über die Beeinflussung des Sekundärdrucks. Sowohl Anpressdruck als auch Übersetzungsregelung werden in Abhängigkeit von fahrzeugund getriebeseitigen Signalen in der Getriebelektronik errechnet und mithilfe von elektromagnetischen Druckreglern in hydraulische Drücke umgesetzt, die dann die entsprechenden Ventile in der Hydraulik steuern. Eine Systemdarstellung der Getriebesteuerung mit Signalflüssen und Funktionsinhalten zeigt ◘ Abb. 5.192.

### 5.4.5.4 Betätigung

Für die äußere Schaltung, den Wählhebel, den Positionserkennungsschalter, die Anzeige im Kombiinstrument und die Parksperre gelten für stufenlose Getriebe die Aussagen, wie sie in ► Abschn. 5.4.4.4 für die Stufengetriebe ausgeführt sind.

### 5.4.5.5 Betriebsverhalten

Ein stufenloses Getriebe bietet in seinem Betriebsverhalten einen höheren Freiheitsgrad als Stufengetriebe. Die Zwangskopplung zwischen Fahrgeschwindigkeit, eingelegtem Gang und Motordrehzahl ist aufgehoben. Damit kann das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs wesentlich beeinflusst werden.

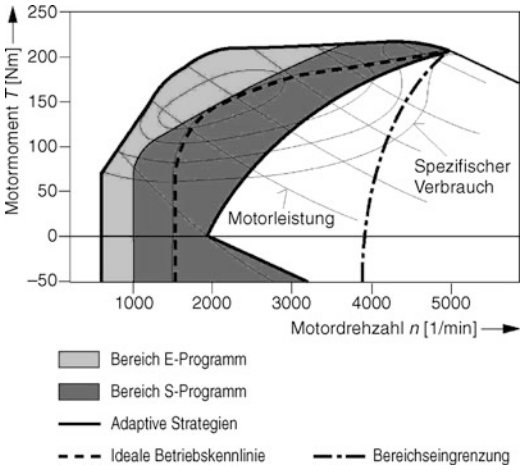



**Abb. 5.193** Fahrprogrammsteuerung eines CVT-Getriebes

**Fahrstrategie** Das Betriebsverhalten eines stufenlosen Getriebes wird von der Verstellstrategie des Variators beeinflusst. Dabei sind alle Möglichkeiten zwischen den Strategien „extrem ökonomisch" und „sehr sportlich" möglich. In Abb. 5.193 ist in einem Motordiagramm das Kennfeld einer Fahrprogrammsteuerung für unterschiedliche Strategien aufgezeigt. Dabei ist es möglich, über ein fest vorgegebenes Programm eine Betriebskennlinie auszuwählen oder über eine adaptive Betriebspunktsteuerung den geeignetsten Kennfeldpunkt in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebssituation einzustellen.

**Kraftstoffverbrauch** Ein Grund für den Einsatz von stufenlosen Getrieben ist die Möglichkeit zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Dies ist durch eine im Vergleich zu 4- und 5-Gang-Getrieben ($\varphi$ = 4,0 bis 5,0) höhere Getriebespreizung von $\varphi$ = 5,4 bis 6,4 gegeben. Gegenüber 6-Gang-Stufenautomaten haben stufenlose Getriebe den weiteren Vorteil, dass der Motor über weite Fahranteile in seinem verbrauchsgünstigsten Kennfeldbereich betrieben werden kann. Bei entsprechend ökonomisch eingestellter Fahrstrategie können Verbrauchswerte wie bei einem 5-Gang-Handschaltgetriebe erreicht werden. Gegenüber einem 4-Gang-Automatgetriebe lassen sich Verbrauchsvorteile von bis zu 10 % erzielen.

**Beschleunigungsverhalten** Durch die Möglichkeit, bei einer Fahrzeugbeschleunigung mit einem CVT direkt der Zugkrafthyperbel nachzufahren, können gegenüber einem Stufengetriebe die Zugkraftlücken ausgefüllt werden. Daraus ergibt sich ein Fahrleistungsgewinn. Dies führt zu besseren Beschleunigungswerten von 0 auf 100 km/h. Messungen haben um bis zu 8 % höhere Beschleunigungswerte als bei 4-Gang-Automatgetrieben ergeben. Bei vergleichbaren Verbrauchswerten liegt ein CVT in der Beschleunigung um ca. 4 % besser als ein 6-Gang-Stufenautomat [182].

**Komfort** Da bei stufenlosen Getrieben per Definition keine Schaltungen auftreten, gibt es keine Schaltrucke. Unter Schaltkomfortgesichtspunkten ist das CVT ein ideales Getriebe. Je nach Verstellstrategie ist das Motordrehzahlverhalten etwas gewöhnungsbedürftig. Mit elektronisch gesteuerten Getrieben kann das Fahrverhalten jedoch weitgehend dem der Stufengetriebe angepasst werden.

**Handschaltmodus** Für eingefleischte Selbstschalter lassen sich auch stufenlose Getriebe mit einem Handschaltmodus ausrüsten. Geschaltet wird mit einem Wählhebel, der eine separate Schaltkulisse mit 3 Stellungen („+" für Hochschaltung, Mittelstellung und „–" für Rückschaltung) aufweist. Mit dem CVT werden die festen Gangstufen simuliert, sodass der Fahrer über Tippschaltung z. B. wie mit einem 6-Gang-Getriebe fahren kann.

### 5.4.5.6 Ausführungsbeispiele

Ein Schnittbild des ZF-Ecotronic-Getriebes CFT23 zeigt Abb. 5.191. Das CVT ist mit einem Drehmomentwandler ausgestattet, um ein Anfahrverhalten und den Komfort beim Rangieren und Parkieren wie bei einem Stufenautomatgetriebe zu erhalten. Eine Besonderheit stellt die Radialkolbenpumpe dar. Sie ist zwischen Wandler und Wendesatz angeordnet. Der Volumenstrom wird durch saugseitige Drosselung auf max. 22 l pro Minute eingestellt. Damit wird die Leistungsaufnahme der Pumpe begrenzt. Dies trägt bei Motordrehzahlen ab etwa 2200 U/min zu einem guten Getriebewirkungsgrad bei. Der Variator wurde bereits in ▶ Abschn. 5.4.5.3 beschrieben, die Leistungsübertragung erfolgt mit

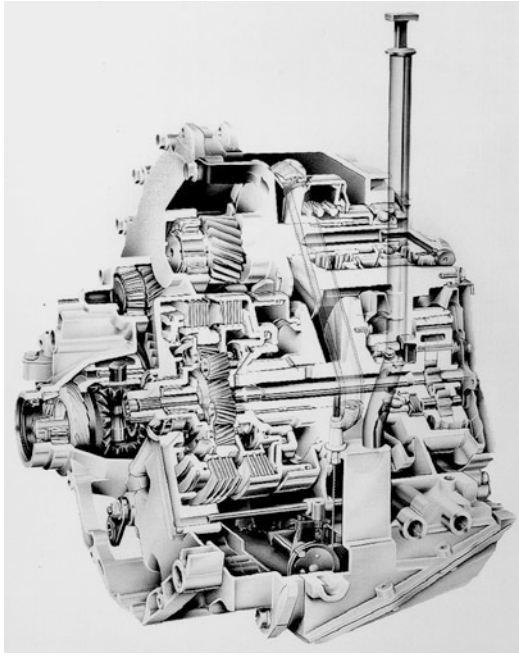


**Abb. 5.194** Schnittbild ZF-VT1

einem VDT-Schubgliederband. Die doppelte Stirnradstufe der Endübersetzung ist so aufgebaut, dass durch Einsatz unterschiedlicher Verzahnungsvarianten Anfahrübersetzungen im Bereich von 12,5 bis 17,2 realisiert werden können.

Die Abb. 5.194 zeigt eine stufenlose Getriebeausführung mit nasslaufenden Lamellenkupplungen als Anfahrelement. Die Vorwärtsgangkupplung und die Rückwärtsgangbremse des Planetenwendesatzes sind so ausgebildet, dass sie gleichzeitig zum Anfahren in der entsprechenden Fahrtrichtung genutzt werden können. Als Pumpe für die Ölversorgung dient eine Außenzahnradpumpe, die auf der Getrieberückseite angeordnet ist und mit einer innen durch den Primärsatz gehenden Steckwelle angetrieben wird. Das Getriebe zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise und geringes Getriebegewicht aus. Es wurde u. a. im New Mini von BMW eingesetzt [183].

Neben dem bevorzugten Einsatzgebiet der Fahrzeuge mit Front-Quer-Antrieb [180, 182, 183] lassen sich stufenlose Getriebe vorteilhaft auch für Fahrzeuge mit Frontantrieb und längseingebauten Motoren einsetzen.

Ein Ausführungsbeispiel ist in [181] beschrieben.

## 5.4.6 Doppelkupplungsgetriebe

Das Doppelkupplungsgetriebe ist ein Derivat der Handschaltgetriebe. Es besteht aus zwei Teilgetrieben in Vorgelegebauweise, bei denen das eine die geraden, das andere die ungeraden Gänge abbildet (siehe Abb. 5.195). Die Teilgetriebe sind eingangseitig jeweils mit einer Kupplung versehen. Die beiden Kupplungen sind entweder axial nebeneinander oder radial übereinander angeordnet und bilden als Einheit die sog. Doppelkupplung. Über die Doppelkupplung können Lastschaltungen zwischen den beiden Teilgetrieben ausgeführt werden. Ausgangsseitig werden die Teilgetriebe über die Abtriebswelle zusammengeführt. Die Schaltung der Gänge erfolgt im jeweils nicht leistungsführenden Teilgetriebe durch konventionelle Synchronisierungen [167]. Die Lastschaltung wird nach den gleichen Prinzipien durchgeführt wie in ▶ Abschn. 5.4.4.1 beschrieben. Für die Vorauswahl der Gänge in den beiden synchronisierten Teilgetrieben ist ein erheblicher Steuerungs- und Absicherungswand erforderlich. Abb. 5.196 zeigt als Beispiel für dieses Getriebeprinzip das bei Porsche eingesetzte Doppelkupplungsgetriebe (PDK) für heckgetriebene Sportwagen.

### 5.4.6.1 Funktionen und Bauteile

**Doppelkupplung** Je nach Anforderung und Fahrzeugsegment bestehen die Doppelkupplungen aus trockenen Reibungskupplungen oder in Öl laufenden Mehrscheiben-Lamellenkupplungen (siehe Abb. 5.197). In Abhängigkeit des Getriebelayouts werden die beiden Kuppplungen sowohl zum Anfahren als auch zum Schalten eingesetzt. Bei den trockenlaufenden Reibungskupplungen hängt die Baugröße in erster Linie vom zu übertragenden Drehmoment, der geforderten Schwingungsisolation und dem Gesamt-Fahrzeuggewicht ab (s. Abb. 5.198).

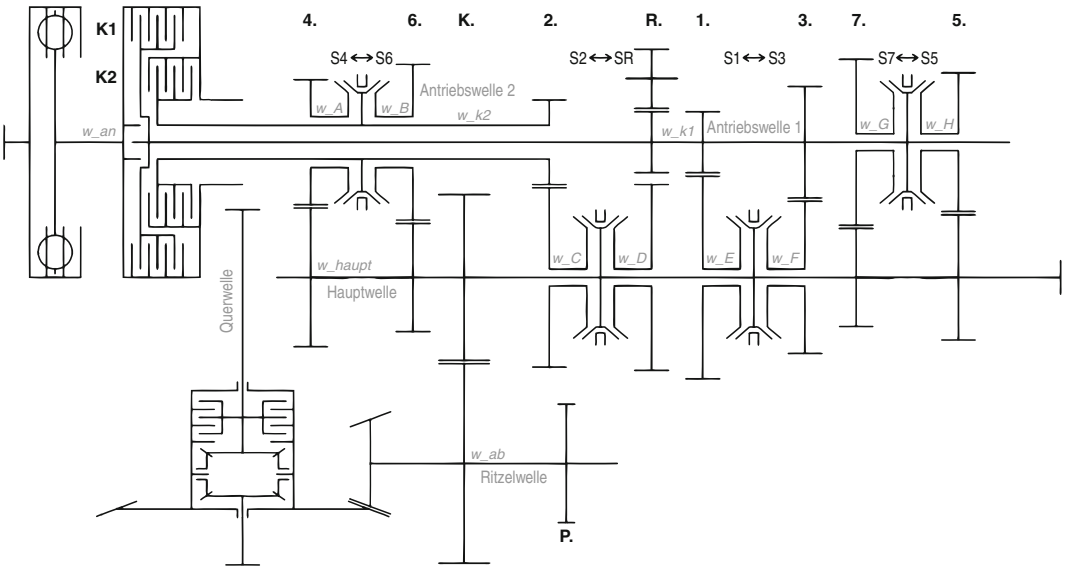



**Abb. 5.195** Doppelkupplungsgetriebe aus 2 Teilgetrieben in Vorgelegebauweise

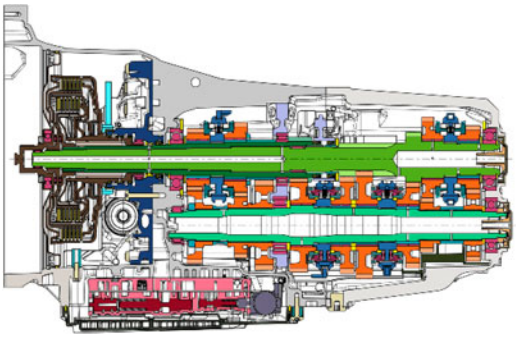


**Abb. 5.196** Doppelkupplungsgetriebe PDK für Porsche Sportwagen

Oberstes Auslegungsziel ist die thermische Robustheit und die Fähigkeit den nicht zu verhindernden Kupplungsbelagverschleiß durch eine – vorzugsweise – kraftgesteuerte Verschleißnachstellung zu kompensieren. Die Art und die Gestaltung der Lagerung der trockenen Doppelkupplung zwischen Motor und Getriebe ist ein weiterer wichtiger Realisierungsaspekt. Aufgrund der Betätigungskräfte ist eine direkte Anbindung und Lagerung auf der Kurbelwelle nicht möglich. Als geeignetste Lösung hat sich die Stützlagerung der Doppelkupplung auf der Hohlwelle des Getriebes bewährt. Abb. 5.199 zeigt diese Bauweise in der trockenen Doppelkupplung vom VW 7-Gang-Getriebe. Moderne Verbrennungsmotoren tendieren zu deutlich höheren Schwingungsanregungen in Richtung Getriebe. Durch entsprechend wirksame Torsionsdämpfungssysteme bestehend aus einem Weitwinkel-Bogenfederdämpfer auf der Eingangsseite der Doppelkupplung und zusätzlichen Torsionsdämpfern in einer oder beiden Kupplungsscheiben lässt sich eine ausreichende Schwingungsisolation darstellen [189].

Die nasslaufende Doppelkupplung besteht prinzipiell aus zwei getrennt ansteuerbaren Lamellenkupplungen, deren Aufbau in ▶ Abschn. 5.4.4.3 beschrieben ist. Die Doppelkupplung im PDK-Getriebe ist durch die radial übereinander angeordneten Lamelleneinheiten sehr kompakt und massearm. Dies ist mit Rücksicht auf die im Sportwagen zu erzielenden kurzen Schaltzeiten von Vorteil. Desweiteren sind die Belastungen der Synchronisationseinheiten minimiert. Das Schleppmoment in der jeweils offenen Lamellenkupplung wird durch geeignete Auswahl des Belagwerkstoffes, der Belagnutung (Form, Querschnitt, Fertigungstechnologie der Nutung etc.), Sinuswellung der Stahllamelle sowie einer bedarfsgerechten Kühlölzuführung auf niedrigstem Niveau gehalten. Ausserdem wird das

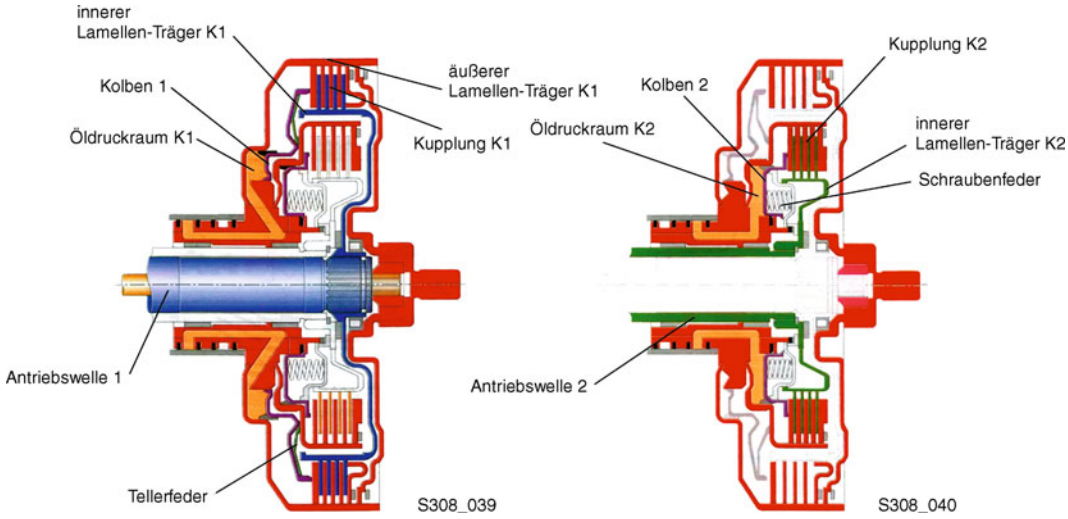



**Abb. 5.197** Nasse Doppelkupplung

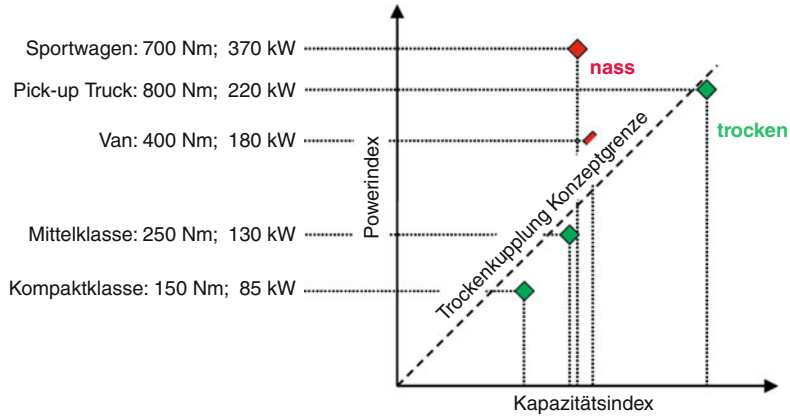



**Abb. 5.198** Kapazitätsindex

Lüftspiel der beiden Kupplungen individuell und durchmesserabhängig eingestellt.

**Ölversorgung** Ähnlich wie bei den Stufenautomatgetrieben müssen bei einem nasslaufenden Doppelkupplungsgetriebe folgende Funktionen bei der Ölversorgung erfüllt werden:

1. Kühlung der Doppelkupplung beim Anfahren und Schalten,
2. Schmierung und Kühlung des mechanischen Getriebeteils (Synchronisierungen, Lager, Zahnräder),
3. Druckversorgung zur Betätigung der Doppelkupplung und der Schaltstangen zum Ein- und Auslegen der Gänge.

Den notwendigen Druck und den erforderlichen Kühlölvolumenstrom liefert eine Pumpe, deren Drehzahl ausgehend von der Drehzahl des Verbrennungsmotors gleich oder ins Schnelle übersetzt ist.

**Lagerung** Um die Biege- und Torsionsschwingungen eines Doppelkupplungsgetriebes möglichst niedrig zu halten, kommt der Lagerung der Ein-

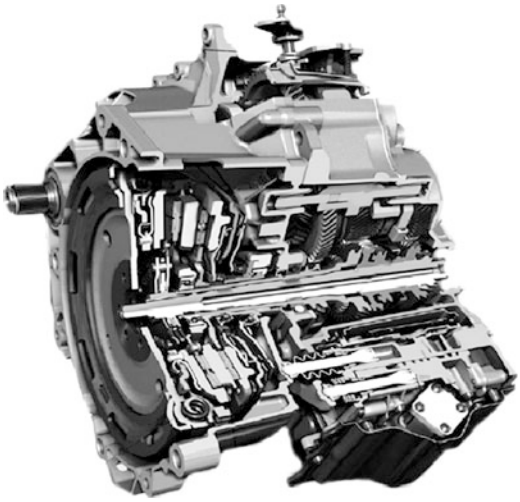


**Abb. 5.199** Trockenes 7-Gang Doppelkupplungsgetriebe von VW

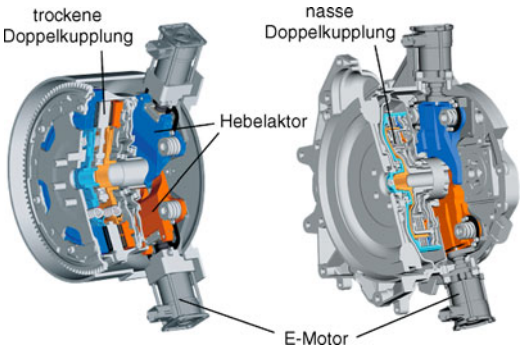



**Abb. 5.200** Elektromechanischer Hebelaktor von Luk

gangs- und Ausgangswellen besondere Bedeutung zu. Je nach Getriebelayout ist meist die innere Eingangswelle in einer Fest-/Loslagerung geführt, die äussere Eingangswelle verfügt über eine Trag-Stütz-Lagerung. Ziel ist es, eine kompakte Bauweise mit einem hohen Lagerwirkungsgrad in Einklang zu bringen, vorgespannte Lagerungen bei den Eingangswellen sind zu vermeiden. Bei Front-Quer-Anordnungen liegen auch die Zwischenwellen in Fest-/Loslagerungen, aus Durchbiegungsgründen müssen zusätzliche Stützlager eingesetzt werden. Die Ausgleichsgetriebe sind wegen der hohen Belastung meist mit Kegelrollenlagern geführt.

**Getriebeschaltungs- und Kupplungssteuerung** Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Betätigung der Doppelkupplungsgetriebe. Am weitesten verbreitet ist ähnlich wie bei den Stufenautomatgetrieben die elektro-hydraulische Steuerung, welche meist als Mechatronik-Einheit ausgeführt ist (siehe ► Abschn. 5.4.7). Seit 2010 gibt es auch Doppelkupplungsgetriebe auf dem Markt, wo zur Automatisierung der trockenen Kupplungen elektromotorisch angetriebene Aktoren eingesetzt werden. In ◘ Abb. 5.200 ist die elektro-mechanische Aktorik für die Doppelkupplung als Hebelaktor der Fa. Luk dargestellt. Der Hebelaktor ist hinsichtlich Steuerbarkeit und Dynamik einem hydraulischen System ebenbürtig. Der Kupplungsaktor kommt vorteilhaft mit einem Minimum an Hilfsenergie aus. Durch seine Teilintegration in die Kupplungsglocke ist der Aktorikanteil am Gesamtgetriebepackage gering.

### 5.4.6.2 Radsatzsynthese

Die Radsatzsynthese für Doppelkupplungsgetriebesystem erfolgt systematisch und rechnergestützt. Die besten Systeme orientieren sich an den geforderten Eigenschaften, die folgendermaßen zusammengefasst werden können:

1. optimale Wandlung des Motorkennfeldes mit Hilfe einer gut gestuften Übersetzungsreihe und ausreichend grosser Gesamtgetriebeübersetzung (Spreizung).
2. Die im Leistungsfluss liegenden Bauelemente sollte wenige und gering belastet sein.
3. Das Getriebesystem sollte mit einer einfachen Schaltlogik bedient werden können.
4. Eine Unterbringung hybrider Funktionen in Form von einer oder mehrerer E-Maschinen wird zukünftig von größerer Bedeutung sein.

Mit Hilfe einer Nutzwertanalyse werden im Regelfall die unbrauchbaren System sehr frühzeitig eliminiert. Die Getriebegrundstruktur ergibt sich aus der Anzahl der Radebenen und der Wellenzüge sowie der Anordnung des An- und Abtriebes. Getriebe können damit sowohl in Front-Quer als auch in Standardanordnung gesucht werden. Die einzelnen Syntheseschritte ergeben sich wie folgt:

1. Leistungspfaderzeugung, Erzeugung von Übersetzungen und Kopplungsgenerierung,

2. Optimierung der Radsatzübersetzungen,
3. Integration der Festkopplungen und Synchronisierungen.

Als Ergebnis erhält man eine Lösungsmenge an Funktionalitäten.



## 5.4.7 Hybridantriebe

Hybridantriebe in leistungsverzweigter Bauweise wie z. B. im Toyota Prius (siehe ◘ Abb. 5.201) sind schon seit etlichen Jahren auf dem Markt und zeichnen sich durch ihre verbrauchs- und umweltschonende Fahrweise aus (bei entsprechender Fahrweise). Im Vergleich zum $CO_2$-Ausstoß von modernen Dieselmotorantrieben haben sich die Hybridsystems aber noch nicht wesentlich absetzen können. Aufgrund der bislang eher geringen Stückzahlen weltweit war die Verbreitung dieser Fahrzeuge aus Kostengründen entsprechend eingeschränkt. Gesetzgebung und ressourcenschonenderes Käuferverhalten haben dafür gesorgt, dass inzwischen weitere Hybridanwendungen angeboten werden. Kaum ein Fahrzeughersteller kann es sich heute leisten, keinen Hybridantrieb im Fahrzeugportfolio zu haben.

### 5.4.7.1 Hybridsysteme

Aus einer Vielzahl verschiedener Hybridsysteme (► Abschn. 4.3.3) weist das Parallelhybridsystem eine hohe Wirtschaftlichkeit bei größtem Kundennutzen aus.

Der Bauraum zwischen Verbrennungsmotor und Automatgetriebe bietet sich bei gleichzeitigem Entfall des Drehmomentwandlers in idealer Weise für die Unterbringung der zusätzlichen elektrischen Komponenten (u. a. E-Maschine und Leistungsanschlüsse), des Dämpfungssystems und ggfs. einer Trennkupplung zum Abkoppeln des Verbrennungsmotors an.

Baukastensysteme (siehe ◘ Abb. 5.202) mit modular einsetzbaren Hybridmodulen für Start-Stopp, Rekuperation, Boosten und elektrischem Fahren tragen dem Wunsch nach Kostenreduzierung in Verbindung mit einem vorhandenen Automatgetriebesystem Rechnung.

Eine andere Bauform stellen die leistungsverzweigten Hybridantriebe wie das Toyota Hybrid-System THS, welches im Toyota Prius oder diversen Modellen von Lexus eingesetzt wird, oder das Two-Mode-System von General Motors dar. Hier dienen 2 elektrische Maschinen als weiterer paralleler Übertragungszweig, welcher durch ein Planetengetriebe wieder auf den An- oder Abtrieb aufsummiert wird. Dadurch entsteht ein stufenloses Getriebe. Der Aufwand im Vergleich zu einem parallelen Hybridgetriebe ist jedoch in der Regel höher.

### 5.4.7.2 Mikrohybrid

Als Mikrohybrid bezeichnet man ein Start-Stopp-System, bei dem das Getriebe für eine schnelle Reaktionsfähigkeit bei einem Verbrennungsmotorwiederstart möglichst schnell den erforderlichen Öldruck im Getriebe herstellen muss. Dies erfolgt z. B. über einen hydraulischen Impulsspeicher (HIS), bei dem durch Entspannen einer Feder der Systemdruck schlagartig aufgebaut wird [191].

### 5.4.7.3 Mildhybrid und Vollhybrid

Beim Mild- und Vollhybridgetriebe wird die elektrische Maschine getriebeseitig verbaut, während beim Mikrohybrid die elektrische Starteinrichtung des Motors mit Hilfe eines verstärkten Starters oder durch einen Riemen-Starter-Generator dargestellt wird. In ◘ Abb. 5.203 ist das Mildhybridgetriebe von ZF dargestellt. Der Vollhybrid hat im Vergleich zum Mildhybrid mit Start-Stopp, Rekuperation und Boosten als zusätzliche Funktionalität das elektrische Fahren anzubieten. Dies wird ermöglicht durch eine zusätzliche Trennkupplung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe. Diese Kupplung wird zum Wiederstart des Verbrennungsmotors im elektrischen Fahrmodus eingesetzt und fungiert nicht als Anfahrkupplung. Bei einer verbrennungsmotorischen Anfahrt wird ein Schaltelement des Getriebes eingesetzt, welches für diese zusätzlichen Anforderungen ertüchtigt wird.

### 5.4.7.4 Verbrauchseinsparung

Eine wesentliche Motivation für den Einsatz von Hybridantrieben ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauches in einem konventionellen Triebstrang. Das Zusammenspiel zwischen Verbrennungsmotor

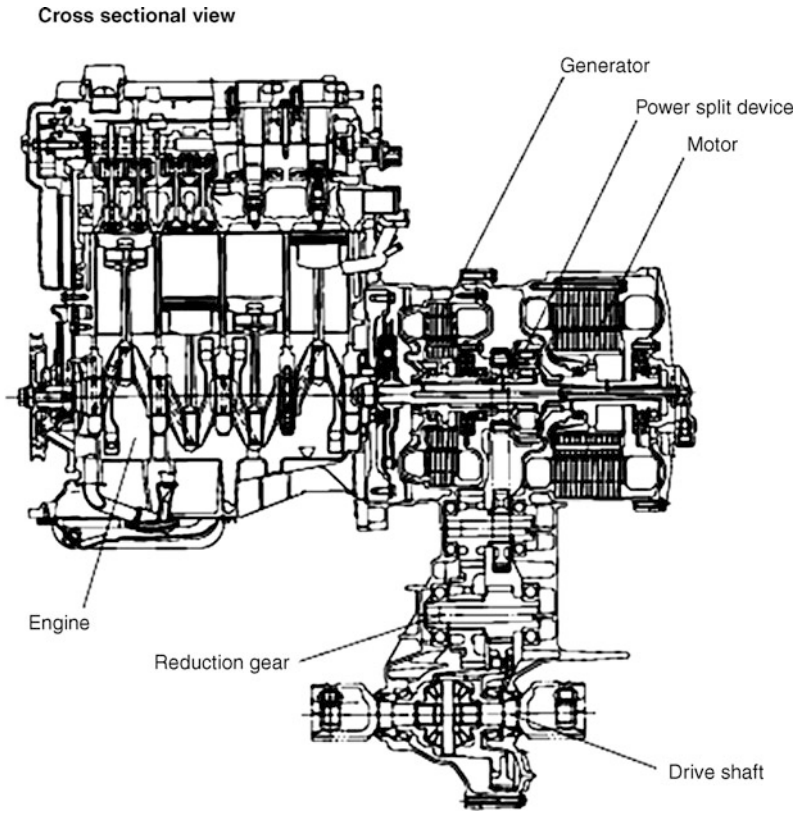



**Abb. 5.201** Toyota Prius Hybridantrieb

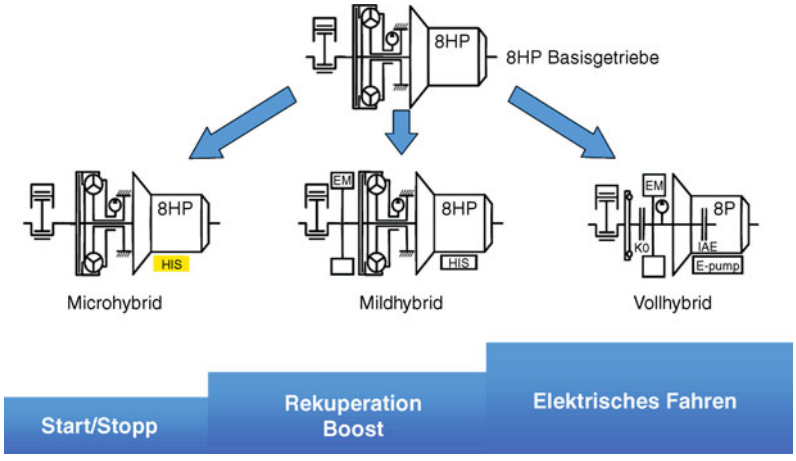



**Abb. 5.202** Hybridbaukastensystem von ZF

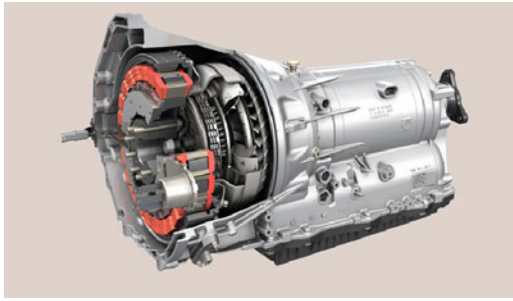


**Abb. 5.203** Mildhybridgetriebe 8HP70H von ZF

und Getriebe kann durch die Hybridisierung weiter optimiert werden. Ziel ist es, den Verbrennungsmotor zu jeder Zeit im optimalen Betriebspunkt zu betreiben.

Entscheidend bei der Simulation von hybriden Antrieben ist die Wahl einer geeigneten Betriebsstrategie. Es ist stets die optimale Lastverteilung zwischen Verbrennungsmotor und E-Maschine in Abhängigkeit vom Batterieladezustand und den Fahranforderungen einzustellen. Trotz der optimal verbrauchsgünstigen Fahrstrategie wird dabei die Fahrbarkeit nicht eingeschränkt. Der Verbrennungsmotor muss mit einer Mindestdrehzahl betrieben werden und dauerhaft ein Restbeschleunigungsvermögen zur Verfügung stellen.

In Abb. 5.204 ist dieser simulierte Einfluss auf den NEFZ-Verbrauchszyklus und die Realfahrer „ams"-Runde dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Hybrid im Gegensatz zum konventionellen Antriebsstrang die Betriebspunkte sich in Richtung günstigerer spezifischer Verbräuche bewegen. Ein Grund dafür ist die Möglichkeit beim Vollhybriden des rein elektrischen Fahrens. Gerade Betriebsbereiche mit sehr geringen Leistungsanforderungen und damit schlechten spezifischen Verbräu-

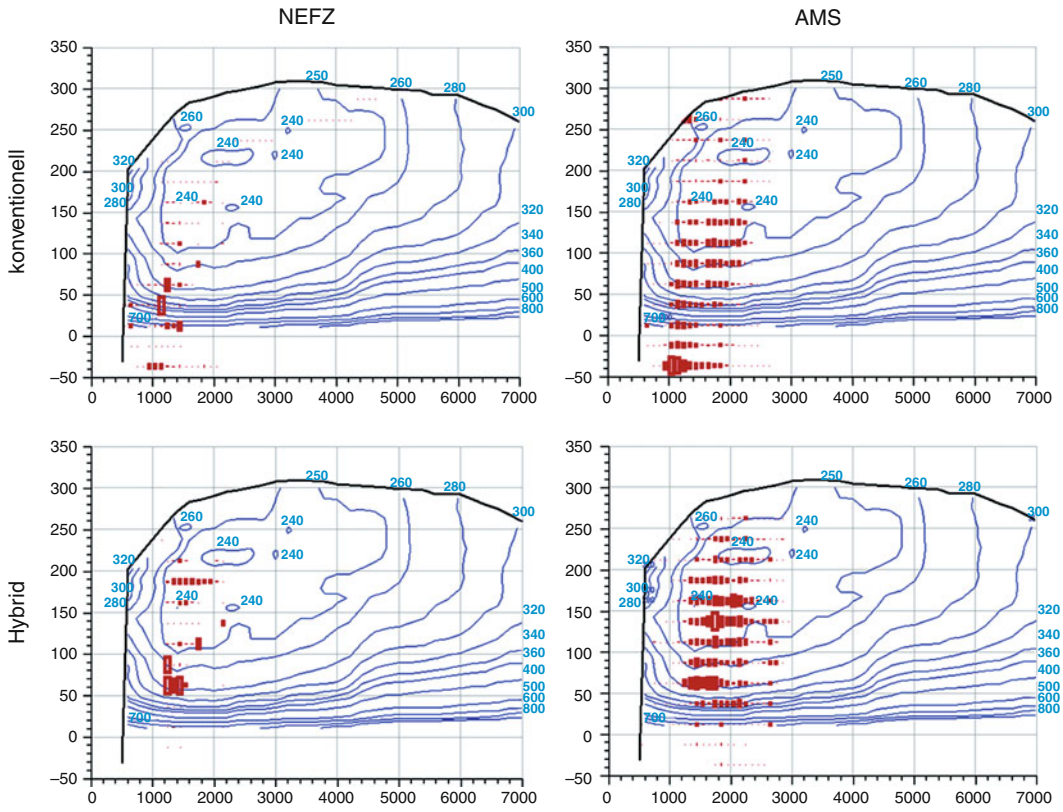



**Abb. 5.204** Betriebspunktverschiebung beim Hybrid

chen werden bei aureichendem Ladezustand des Energiespeichers rein elektrisch gefahren. Die dafür notwendige Energie wurde entweder beim Rekuperieren gewonnen oder aber durch eine künstliche Lastpunktanhebung, wo der V-Motor zusätzlich erzeugte Leistung durch generatorischen Betrieb der E-Maschine in die Batterie speichert. Durch diesen zusätzlichen Freiheitsgrad beim Hybridantrieb in der Lastpunktverschiebung durch Anheben (bzw. Absenken) der Last bei gleich bleibender Drehzahl wird der Betriebspunkt in bereiche eines günstigen spezifischen Verbrauches angehoben oder durch Absenken der Last bei plötzlicher Lastanforderung die Emissionen günstig beeinflusst. Bei konventionellen Antrieben besteht die einzige Möglichkeit einer Betriebspunktverschiebung hingegen durch Absenken der Drehzahl und damit Erhöhung der Motorlast entlang der Leistungshyperbel, dem sog. Down-Rating. Doch dieser Möglichkeit sind durch Schwingungsproblemen und verzögertes Ansprechverhalten, speziell bei abgasturbolaufgeladenen Motoren, Grenzen gesetzt.

Durch die Integration einer zusätzlichen Energiequelle ist es beim Hybrid möglich, den V-Motor bei sehr niedrigen Drehzahlen zu betreiben ohne an Fahrdynamik einzubüssen, da im Bedarfsfall das zusätzliche Moment der E-Maschine eingesetzt werden kann. Die Verbrauchseinsparungen im NEFZ bewegen sich beim Mildhybriden im Vergleich zu einem modernen 8-Gang-Automatgetriebe bei ca. 15 %, bei einem Vollhybridgetriebe lassen sich bis zu 25 % Kraftstoffersparnis erzielen.

## 5.4.8 Elektronische Getriebesteuerung

1983 wurde das erste elektronisch gesteuerte Pkw-Getriebe in Europa in den Markt eingeführt, 1990 betrug der Anteil weltweit bereits 27 %, bereits 5 Jahre später waren etwa 83 % aller Automatgetriebe elektronisch gesteuert [184]. Heute sind automatische Stufen- und Stufenlosgetriebe, Doppelkupplungsgetriebe sowie automatisierte Handschaltgetriebe ganz selbstverständlich mit einer elektronischen Getriebesteuerung ausgerüstet. Dabei wird immer mehr Funktionalität von der Hydraulik in die Elektronik verlagert. Während bei der ersten Generation der elektronischen Getriebesteuerungen nur das Schaltprogramm von der Elektronik gesteuert wurde, bleibt bei modernen Getrieben der Hydraulik nur noch die Umsetzung der elektrischen Signale in hydraulische Drücke, einige Grundfunktionen sowie Sicherheits- und Notlauffunktionen. Die wesentlichen Funktionsumfänge werden in der EGS realisiert.

### 5.4.8.1 Gesamtsystem

Die elektronische Getriebesteuerung (EGS) besteht aus einem elektronischen Steuergerät, das einerseits Sensorsignale aus dem Getriebe und dem Fahrzeug und Informationen von anderen Steuergeräten empfängt, diese Eingangsinformationen verarbeitet und Ausgangssignale bereitstellt, mit denen Aktoren im Getriebe und im Fahrzeug angesteuert werden. ◘ Abb. 5.205 zeigt die Einbindung der EGS in das Kommunikationssystem des Fahrzeugs [173]. Der Datenaustausch mit anderen Steuergeräten (Motorsteuerung, Fahrdynamiksysteme, Kombi-Instrument, Wählhebel, …) erfolgt über ein Datenbussystem (CAN). Wichtige Eingangsgrößen aus der Motorsteuerung sind Motormoment, Motordrehzahl, Motortemperatur, Drosselklappenwinkel und Fahrpedalstellung. Aus den Fahrdynamiksteuergeräten werden in erster Linie die Raddrehzahlen verarbeitet. Signale vom Wählhebel über die Wählhebelstellung und das gewünschte Schaltprogramm werden meist mit separaten Kabeln übertragen. Auch die Sensorinformationen aus dem Getriebe (Drehzahlen, Positionserkennung, Getriebetemperatur, …) werden über einen Kabelstrang an das Getriebesteuergerät geführt.

Vom Steuergerät werden die Ventile im Getriebe angesteuert. Druckregler weisen eine Strom-Druck-Kennlinie auf, so dass über den Strom die Druckhöhe eingestellt werden kann, während für Schaltventile und pulsweitenmodulierte Ventile eine Digitalansteuerung ausreichend ist. Die Stromversorgung der Sensoren und Masseanbindung der getriebeinternen Elektrik erfordert ebenfalls zwei Verbindungskabel. Als weiterer Ausgang ist die Diagnoseleitung zu nennen, die nicht nur zu Diagnosezwecken, sondern auch zur Programmierung des Steuergeräts dient. Wenn das Kombi-Instrument nicht CAN-fähig ist, wird die Ganganzeige im Cockpit ebenfalls mit separaten Kabeln vom Ge-

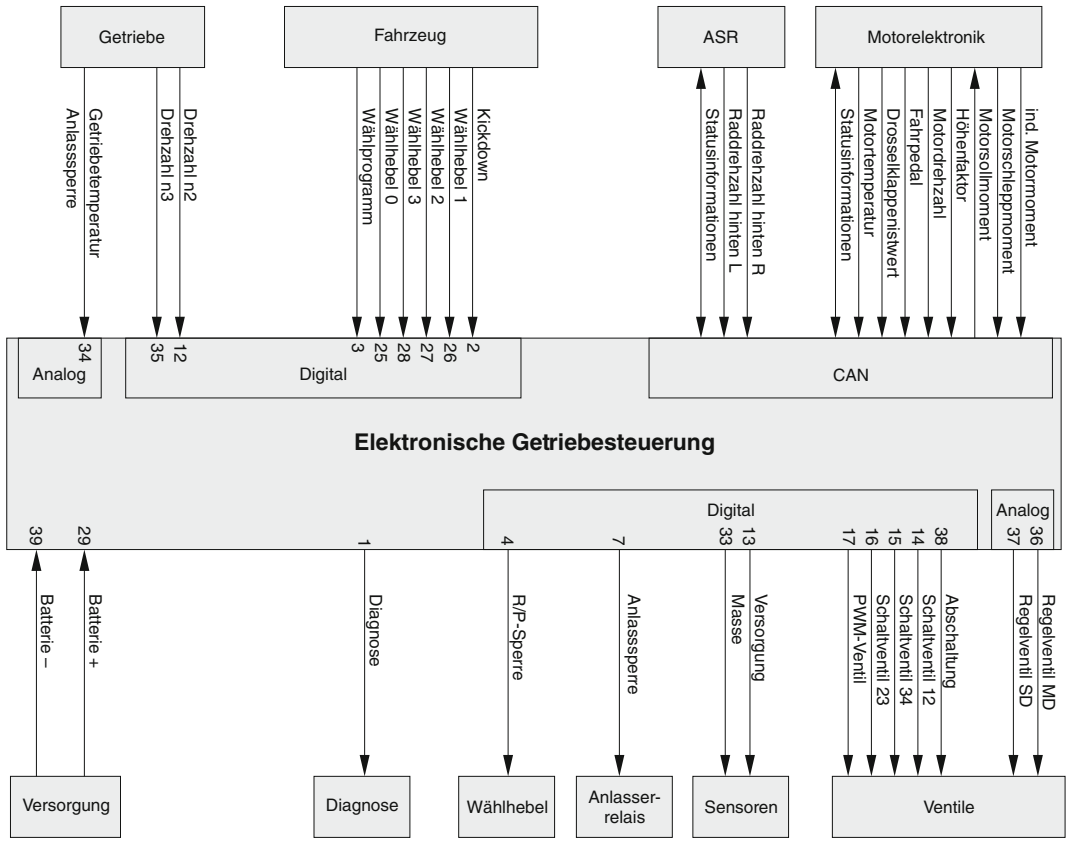


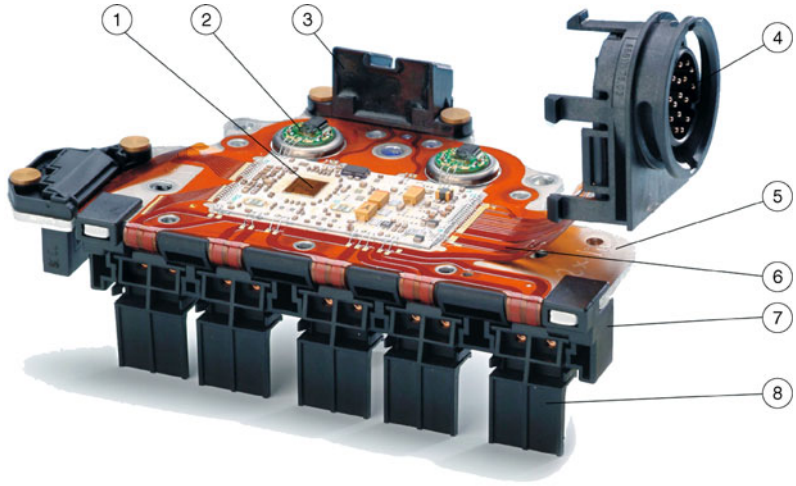

**Abb. 5.205** EGS-Gesamtsystem

triebesteuergerät aus angesteuert. Spezielle Anforderungen können die Steuerung des Rückfahrlichts, von shift lock- und key lock-Funktionen sein.

### 5.4.8.2 Steuergerät

Getriebesteuergeräte werden größtenteils als stand alone-Geräte in Leiterplattentechnik ausgeführt und sind im Fahrzeug-Innenraum oder im Motorraum untergebracht. Die wesentlichen Bauelemente sind Mikroprozessor, Arbeitsspeicher (RAM), Parameterspeicher (EPROM und EEPROM), Timer, Watchdog, CAN-Baustein, Eingangsstufen zur Signalaufbereitung und Ausgabeeinheiten mit Leistungsendstufen, Kondensatoren, Dioden, Transistoren, Netzteil sowie mechanische Bauteile wie Kühlkörper, Stecker und Gehäuse. In heutigen Steuergeräten werden 16- oder 32-bit-Prozessoren eingesetzt. Die Speicherkapazität beträgt bis zu 512 k ROM und 64 k RAM. Für eine mögliche Datenänderung von Seriengeräten werden häufig Flash-Speicher eingesetzt, die im eingebauten Zustand neu beschrieben werden können. Die Taktzeit für einen Programmzyklus liegt zwischen 10 und 20 ms.

In den letzten Jahren haben sich elektronische Getriebesteuerungen etabliert, die in das Getriebe integriert sind. Dabei werden Elektronik, Drehzahlsensoren, Temperatursensor, ggf. Drucksensoren, getriebeinterne Leitungsverbindung, Stecker und Positionsschalter in einer mechatronischen Baueinheit auf der hydraulischen Getriebesteuerung angeordnet [166]. Aus der Umgebung im Getriebeinnenraum resultieren besonders hohe Anforderungen an die elektronischen Bauteile bezüglich Temperatur- und Schwingungsbelastung und an das Gehäuse bezüglich der Dichtheit. Die Ausführung




1 Elektronische Steuerung (LTCC „Low Temperature Confired Ceramics")
2 Drucksensor
3 Drehzahlsensoren
4 Getriebestecker
5 Aluminium Trägerplatte
6 Leitungsverbindung (Flexfolie)
7 Stecker für Drehzahl- und Positionssensor
8 Kontakte für Druckregler

**Abb. 5.206** Elektronisches Getriebesteuerungsmodul in Mikrohybridtechnik

hat jedoch Vorteile bezüglich Bauraum, Gewicht, Zuverlässigkeit, Toleranzen, Getriebeprüfung und Systemkosten. Abb. 5.206 zeigt ein Elektronikmodul eines stufenlosen Getriebes ohne Abdeckung, so dass die Bauteile zu sehen sind:

1. elektronische Getriebesteuerung (EGS) in Mikrohybridausführung,
2. Drucksensor,
3. Drehzahlsensor,
4. Stecker (16-polig),
5. Trägerplatte aus Aluminium,
6. Leitungsverbindung als Flexfolie,
7. Kunststoffgehäuse mit Stecker,
8. Ventilkontaktierung.

Neben der stand alone-Ausführung und der Integration des Steuergerätes ins Getriebe kommen vor allen Dingen in den USA auch Steuergeräte zum Einsatz, bei denen Motor- und Getriebesteuerung zu einer Baueinheit zusammengefasst sind (Powertrain Controller). Bei japanischen Getrieben finden sich auch außen an das Getriebe angebaute Steuergeräte.

Die Programme für elektronische Getriebesteuerungen werden heute praktisch nur noch in Hochsprache (meist C oder C++) geschrieben. Aufgrund der sehr umfangreichen und komplexen Funktionen erfolgt die Funktionsentwicklung und Programmierung mithilfe entsprechender Tools, die eine klare Strukturierung der Programme ermöglichen und in Verbindung mit Simulationsprogrammen einen sofortigen Funktionstest am Rechner erlauben sowie die Dokumentation erleichtern. Programme sind üblicherweise in einen Programmteil und einen Datenteil gegliedert, wobei die Daten in fixe Größen, variantenabhängige Daten und Applikationsparameter aufgeteilt sind. Oft wird noch zwischen steuergeräte-, getriebe- und fahrzeugspezifischen Programmteilen und Datensätzen unterschieden, die in unterschiedlichen Verantwortungsbereichen entwickelt werden können.

### 5.4.8.3 Bauteile

**Sensoren** Zur Drehzahlerfassung werden Induktivgeber oder Hallsensoren eingesetzt. Meist werden die Getriebeeingangsdrehzahl und die Abtriebsdrehzahl, abhängig vom Getriebekonzept auch noch getriebeinterne Drehzahlen gemessen. Auf einen Abtriebsdrehzahlgeber kann verzichtet werden, wenn die Raddrehzahlen in ausreichender Signalgüte und Dynamik vorliegen. Hallgeber beinhalten eine aufwändigere Technik, ermöglichen je-

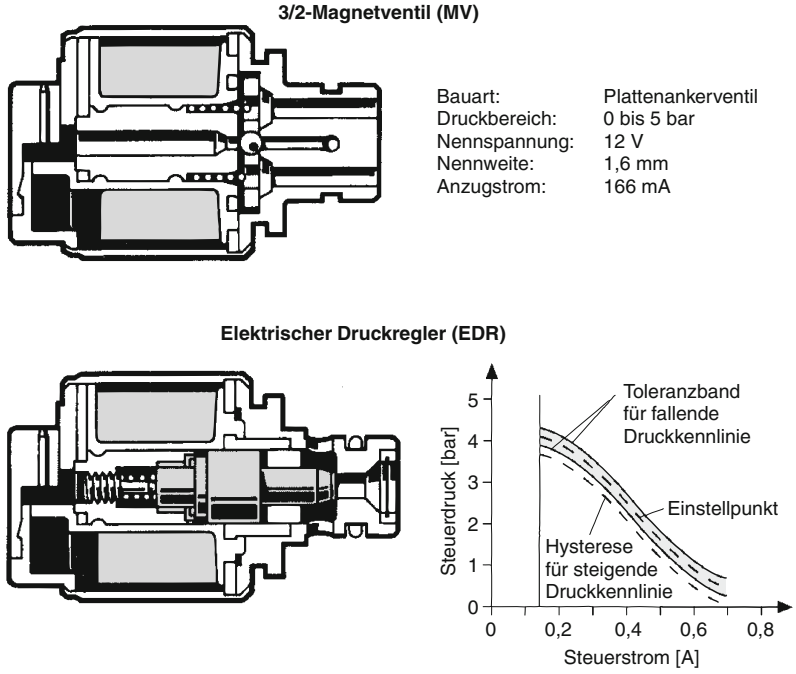



**Abb. 5.207** Druckregler und Umschaltventil

doch die Erfassung von niedrigeren Drehzahlen als Induktivgeber. Die Getriebeöltemperatur wird mit einem Halbleiterelement gemessen, das als Temperaturpille direkt an die getriebeinterne Leitungsverbindung gelötet ist. Die Wählposition wird in den meisten Fällen mit einem Positionsschalter erfasst, der außen am Getriebe auf die Wählwelle aufgesteckt ist oder im Falle einer integrierten Getriebesteuerung einen Teil des Steuerungsmoduls darstellt. Je nach Anforderung werden der EGS neben den Hauptfahrpositionen P, R, N und D auch die Stellungen 4, 3, 2 und 1 übermittelt, in Position R direkt das Rückfahrlicht angesteuert und die Positionen P und N zur Betätigung von shift- und key lock verwendet.

**Aktoren** Als Aktoren zur Umsetzung der Stromsignale aus der EGS in hydraulische Drücke dienen Druckregler, Umschalt- und PWM-Ventile. In Abb. 5.207 ist ein Druckregler im Schnitt mit der dazugehörigen Strom-Druck-Kennlinie dargestellt. Es handelt sich um einen Flachsitzregler mit fallender Kennlinie, d. h. er ist im nicht angesteuerten Zustand durch den anliegenden Druck geöffnet und wird mit steigendem Steuerstrom geschlossen. Je nach Anforderung werden auch Druckregler mit steigender Kennlinie eingesetzt, die mit Federkraft geschlossen sind. Druckregler werden heute für Drücke von 0,5 bis 7,5 bar und mit Steuerströmen bis ca. 1 A eingesetzt. Ebenfalls in Abb. 5.207 ist ein 3/2-Wege-Magnetventil zu sehen, wie es zur Umschaltung bei einem Gangwechsel verwendet wird. Es ist ein Plattenankerventil mit Kugelsitz, das stromlos geschlossen ist. Umschaltventile werden üblicherweise pulsweitenmoduliert (PWM) angesteuert. In der Schaltphase wird ein hoher Anzugstrom aufgebracht, um das Ventil sicher und schnell umzuschalten. In der Haltephase wird der Strom zurückgenommen, um den Strombedarf und die Verlustleistung zu reduzieren. Das Ventil bleibt hydraulisch jedoch in seiner Endlage. Anders ist dies bei PWM-Ventilen, bei denen über die modulierte Ansteuerung das Ventil auch hydraulisch moduliert wird. Durch eine stetige Auf-Zu-Bewegung des Ventils lässt sich mit diesen Schaltventilen ebenfalls eine Druckkennlinie realisieren, die je-

doch nicht der Genauigkeit einer Druckreglerkennlinie entspricht.

**Verkabelung und Stecker** Bei heutigen Getriebekonstruktionen wird versucht, alle elektrischen Bauteile im Getriebe anzuordnen, sie mit einem Kabelsatz zu verbinden und alle Leitungen über einen Stecker zum Anschluss an das Steuergerät nach außen zu führen. Die getriebeinterne Verkabelung besteht aus einem temperatur- und ölbeständigen Kabelstrang. Sensoren und Aktoren sind entweder direkt verbunden (Kabelschwanz-Ausführung) oder mit Steckverbindungen angeschlossen. Am Getriebestecker werden die Kabelenden gelötet oder verkrimpt. Die Anzahl der Steckerpins hängt stark von der Konfiguration des Gesamtsystems ab. Für stand alone-Steuergeräte werden zwischen 11 und 21 Pins verwendet. Eine kompakte und kostengünstige Alternative bietet ein elektrisches Steuerungsmodul, in das alle elektrischen Bauteile integriert sind und bei dem die Leitungsführung mit gestanzten Leiterbahnen erfolgt [171]. Durch die Integration des elektronischen Steuergeräts in dieses Modul lässt sich der Verkabelungsaufwand weiter reduzieren. In einem ausgeführten Beispiel einer integrierten Getriebesteuerung werden nur noch 5 Pins am Getriebestecker benötigt [166]. In dem Ausführungsbeispiel in ◘ Abb. 5.206 ist als elektrische Leitungsverbindung eine flexible Kunststofffolie eingesetzt, in die dünne Leiterbahnen aus Kupfer eingebettet sind.

### 5.4.8.4 Funktionen

**Drucksteuerung** Bei elektronisch gesteuerten Getrieben werden die Funktionen der Drucksteuerung in der Software der EGS realisiert. Die Umsetzung der elektrischen Signale in Kupplungsdrücke erfolgt mit Druckreglern in der hydraulischen Getriebesteuerung. Folgende Funktionen sind notwendig, um die Schaltelemente eines Getriebes mit dem erforderlichen Druck anzusteuern:

- Einstellung des Hauptdrucks in Abhängigkeit des Motormoments und der Drehmomentwandlung auf einen Wert, der das Getriebe-Eingangsdrehmoment übertragen kann.
- Schaltdrucksteuerung, mit der die Lastschaltvorgänge moduliert werden. Der prinzipielle Ablauf einer Lastschaltung ist in ▶ Abschn. 5.4.4.1 beschrieben.
- Gangeinlegen bei Stillstand und während der Fahrt.
- Ansteuerung der Wandlerkupplung. Dabei sind neben der offenen und geschlossenen Kupplung auch die Schlupfregelung und die Übergangszustände zu steuern. Die Vielzahl der Einflussparameter bei der Drucksteuerung einer schlupfgeregelten Wandlerkupplung zeigt ◘ Abb. 5.208 [173].

Die Drucksteuerung bestimmt die Schaltqualität des Getriebes und damit in direktem Maß den Fahrkomfort. Somit kommt der Funktionsentwicklung und der Applikation der Drucksteuerung eine sehr hohe Bedeutung zu.

**Motor-Getriebe-Management** Durch die Kommunikation zwischen Motor- und Getriebesteuerung wird die Schaltqualität des Getriebes durch Beeinflussung des Motormoments während der Schaltung verbessert. In ◘ Abb. 5.209 ist dies am Beispiel einer Zug-Hochschaltung dargestellt. Während der Überhöhungsphase erfolgt die Synchronisierung der Motordrehmassen nicht allein durch eine Erhöhung des Drucks in der Zuschaltkupplung, sondern durch eine gleichzeitige Reduzierung des Motormoments. Da dieser Vorgang sehr dynamisch und in genauer Abstimmung mit der getriebeseitigen Drucksteuerung erfolgen muss, wird er durch die Verstellung des Zündwinkels realisiert [185].

Weitere Funktionen sind die Anfahrdrehzahl- und Anfahrmomentenbegrenzung. Beim Einlegen des Wählhebels in eine Fahrstellung kann die Motordrehzahl begrenzt werden, bis das Getriebe kraftschlüssig ist. Damit wird verhindert, dass Getriebe und Triebstrang mit erhöhter Stoßbelastung beansprucht werden. Ebenfalls kann in diesem Betriebszustand das Motormoment begrenzt werden, um eine unzulässige Wärmebelastung der Reibschaltelemente zu vermeiden. Beim Anfahren im ersten Gang und im Rückwärtsgang mit voller Wandlung wird durch Motoreingriff das Motormoment reduziert, so dass das Getriebe nicht das volle Wandlermoment übertragen muss. Dies ermöglicht eine praxisrelevante Dimensionierung von Getriebe und Triebstrang.

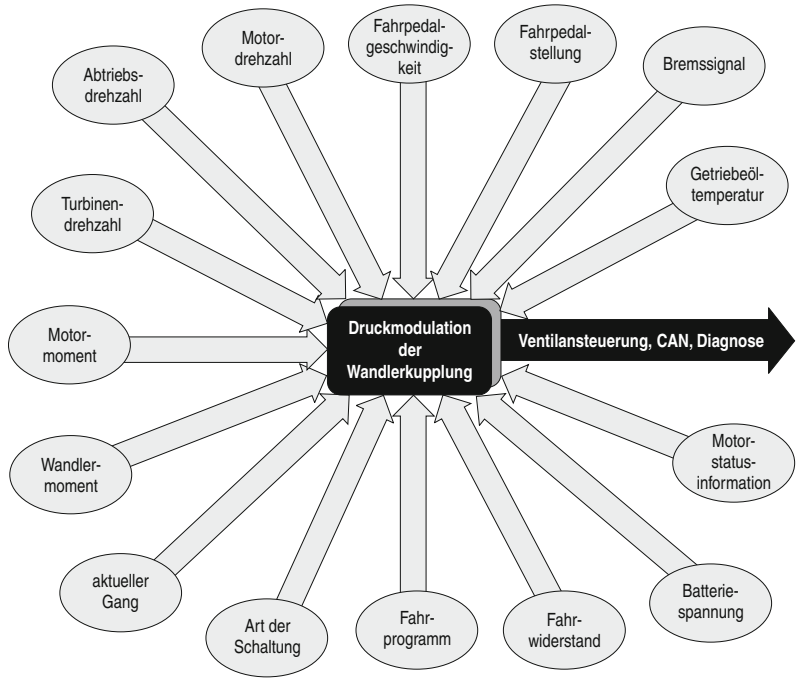



**Abb. 5.208** Einflussfaktoren auf die Drucksteuerung der Wandlerkupplung

**Schaltprogramm** Mit der Einführung der elektronischen Getriebesteuerung ergaben sich für die Gestaltung von Schaltprogrammen vielfältige Möglichkeiten [172–174].

Neben der softwareseitigen Darstellung von unterschiedlichen Schaltprogrammen und der Berücksichtigung des Fahrverhaltens über eine Fahrzustandsidentifikation (vgl. Ausführungen in ▶ Abschn. 5.4.4.5 und Abb. 5.181) werden folgende weitere wesentliche Funktionen realisiert:

- Kompensation von Fahrwiderstandsänderungen: Dabei werden Steigungen, aber auch der Beladungszustand einschließlich Hängerbetrieb des Fahrzeugs erfasst.
- Höhenkompensation: In Höhenlagen wie z. B. bei Passfahrten verlieren Verbrennungsmotoren an Leistung. Da Schaltprogramme auf normale geodätische Höhen abgestimmt sind, müssen sie auf diese Betriebssituation angepasst werden.
- Schaltungsverhinderung in Kurven: Beim Einfahren in eine Kurve wird durch die Gasrücknahme eine Hochschaltung eingeleitet. Durch die Erfassung von Fahrpedalbewegung und Fahrzeug-Querbeschleunigung kann dies verhindert werden. Der Gang wird während der Kurvendurchfahrt gehalten.
- Bremsrückschaltungen an Gefällstrecken: Mit der Steigungserfassung kann beim Bergabfahren die Betriebsbremse durch Rückschaltungen in niedrigere Gänge unterstützt werden.
- Dynamische Vollgasrückschaltungen: Die Rückschaltungen erfolgen nicht an fest definierten Schaltpunkten, sondern in Abhängigkeit des Fahrpedalgradienten. Damit werden bei einem gemächlichen Fahrstil Rückschaltungen erst spät eingeleitet, während bei schnellen Fahrpedalbewegungen spontane Rückschaltungen zur Verfügung stehen.
- Warmlaufprogramm: Im Kaltzustand wird durch eine Schaltpunktanhebung der Motor in höheren Drehzahlen betrieben und dadurch der Katalysator schneller auf seine Betriebstemperatur gebracht.

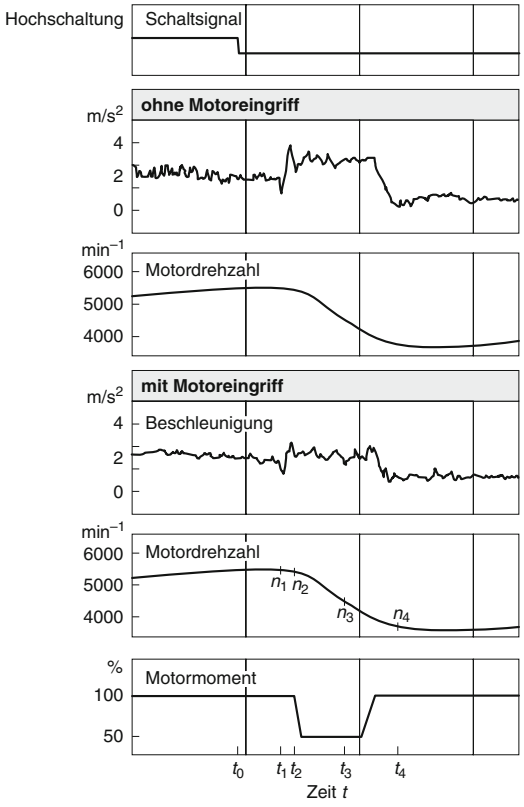



**Abb. 5.209** Motoreingriff während einer Schaltung

- Traktionsanforderungen: Fahrwerks-Regelsysteme werden durch spezielle Gangwahl unterstützt.
- Tempomatanforderungen: Durch die Beeinflussung der Schaltlinien kann die Regelgüte bei Tempomatbetrieb verbessert werden.

Weitere fahrzeug- und getriebespezifischen Funktionen sind in Entwicklung, um das Fahrverhalten eines Personenwagens mit automatischen Getrieben zu verbessern. Genannt sei die Beeinflussung des Schaltprogramms durch Verkehrsleitsysteme (GPS) und die optische Erfassung der Fahrbahn und des unmittelbaren Verkehrsgeschehens.

**Sicherheitskonzept und Diagnose** Das Sicherheitskonzept der elektronischen Getriebesteuerung ist so aufgebaut, dass bei Ausfall von elektrischen oder elektronischen Signalen die EGS versucht, mit Ersatzwerten weiter zu arbeiten. Dies hat ggf. Auswirkungen auf die Schaltqualität des Getriebes oder schränkt die Funktionen des Schaltprogramms ein, die Verfügbarkeit ist jedoch voll und ganz gegeben. Erst bei Ausfall von Basisinformationen, ohne die ein sicherer Betrieb nicht mehr gewährleistet ist oder von habhaften Fehlern wie z. B. Kabelabfall geht die EGS in Notaus und das Getriebe in einen hydraulischen Notlauf.

Fehler im Betrieb werden von Diagnosefunktionen erfasst und in einem Diagnosespeicher festgehalten. Mithilfe eines Diagnoserechners kann der Diagnosespeicher über die Diagnoseleitung in der Werkstatt ausgelesen werden. Dies ermöglicht im Fehlerfall eine schnelle und zielgerichtete Befundung und Reparatur des ausgefallenen Bauteils.

## 5.4.9 Ausblick

Der Triebstrang vom Pkw wurde in der Vergangenheit nahezu ausschließlich durch einerseits Handschaltgetriebe und andererseits Wandlerautomatgetriebe geprägt. Dieses Bild hat sich gründlich verändert. Zusätzlich findet man heute automatisierte Getriebe, Doppelkupplungsgetriebe und stufenlose Getriebe (CVT).

Bei den Getriebesystemen für Pkw mit konventionellem Antrieb können folgende Zukunftsperspektiven skizziert werden:

Das kostengünstige Handschaltgetriebe und das komfortorientierte Wandlerautomatgetriebe werden auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, das Handschaltgetriebe allerdings mit abnehmendem Anteil. Unter den aktuellen Wandlerautomatgetrieben findet man neben der 6-Gang-Ausführung zunehmend Getriebe mit 7 oder 8 Gängen. Die Weiterentwicklung dieser Getriebeart wird speziell unter den Gesichtspunkten Beitrag zur Verbrauchsreduktion und Verbesserung der Fahrbarkeit und Fahrdynamik erfolgen [188].

Automatisierte Getriebe in weiterentwickelter Form wird es auch künftig für kleine, nicht sehr beschleunigungsstarke und sparsame Fahrzeuge sowie für Sportwagen und Transporter geben.

Doppelkupplungsgetriebe passen gut zu sportlichen Fahrzeugen. Bei bestimmten Antriebskonzep-

**Tabelle 5.16** Formelzeichen in ▶ Abschn. 5.4 Größen und Einheiten

| Fz. | Einh. | Beschreibung |
|---|---|---|
| $a$ | m/s$^2$ | Fahrzeugbeschleunigung |
| $c_\mathrm{u}$ | m/s | Strömungsgeschwindigkeit, auf den Umfang bezogen |
| $c_\mathrm{w}$ | – | Luftwiderstandsbeiwert |
| $f$ | – | Rollwiderstandsbeiwert |
| $g$ | m/s$^2$ | Erdbeschleunigung |
| $i$ | – | Übersetzung |
| $i_\mathrm{a}$ | – | Übersetzung Achsgetriebe |
| $i_\mathrm{g}$ | – | Übersetzung Stufengetriebe |
| $m$ | kg | Fahrzeugmasse |
| $n$ | – | Anzahl |
| $p$ | Pa | Hauptdruck |
| $r$ | m | Radius, dynamischer Reifenradius |
| $r_\mathrm{m}$ | m | mittlerer Reibradius |
| $v$ | m/s | Fahrgeschwindigkeit |
| $z$ | – | Zähnezahl |
| $A$ | m$^2$ | Querschnittsfläche |
| $D$ | m | (Profil)durchmesser |
| $D_\mathrm{a}$ | m | Außendurchmesser |
| $D_\mathrm{i}$ | m | Innendurchmesser |
| $F_\mathrm{B}$ | N | Bremskraft |
| $F_\mathrm{W}$ | N | Fahrwiderstandskraft |
| $I$ | – | Wandlungsbereich Getriebe |
| $J$ | kg m$^2$ | Massenträgheitsmoment |
| $M$ | Nm | Drehmoment |
| $M_\mathrm{K}$ | Nm | Kupplungs-Drehmoment |
| $\dot{V}$ | m$^3$/s | Volumenstrom |
| $\alpha$ | ° | Steigungswinkel |
| $\Delta$ | – | Differenz |
| $\eta$ | – | Wirkungsgrad |
| $\varkappa$ | – | Faktor der rotatorisch beschleunigten Massen des Fahrzeugs |

**Tabelle 5.16** (Fortsetzung)

| Fz. | Einh. | Beschreibung |
|---|---|---|
| $\lambda$ | – | Leistungszahl |
| $\mu$ | – | Drehmomentwandlung |
| $\mu_\mathrm{dyn}$ | – | dynamischer Reibwert |
| $\mu_\mathrm{stat}$ | – | statischer Reibwert |
| $\nu$ | – | Drehzahlwandlung |
| $\rho$ | kg/m$^3$ | Dichte |
| $\varphi$ | – | Schnellgangfaktor |
| $\omega$ | rad/s | Winkelgeschwindigkeit |
| $\dot{\omega}$ | rad/s$^2$ | Winkelbeschleunigung |

**Tabelle 5.17** Formelzeichen in ▶ Abschn. 5.4 Indizes

| Index | Beschreibung |
|---|---|
| ges | gesamt |
| max | maximal |
| min | minimal |
| mot | Motor |
| 0 | auf Maximalleistung bezogen |
| $L$ | Leitrad |
| $P$ | Pumpe |
| $T$ | Turbine |
| 1 | Sonnenrad |
| 2 | Planetenrad |
| 3 | Planetenträger |
| 4 | Hohlrad |

ten (front-quer und front-längs) können sich auch Vorteile in Bauraum und Gewicht gegenüber einem Wandlerautomatgetriebe ergeben. Von daher werden sich die Doppelkupplungsgetriebe ihren Platz unter den Getriebesystemen erobern.

Auch die stufenlosen Getriebe werden sich weiter entwickeln, allerdings wohl nicht in der progressiven Form, wie in der Vergangenheit erwartet.

Eine weitere wichtige Entwicklungstendenz ist die zunehmende funktionale Vernetzung von strategiefähigen Komponenten und Aggregaten im Fahrzeug, z. B. Automatgetriebe, zu- und abschaltbare Allradverteiler, geregeltes Sperrdifferenzial, Lenkung sowie aktive Fahrwerkskomponenten. Diese funktionale Vernetzung wird wichtige Beiträge zur weiteren Verbesserung von Fahrdynamik, Fahrsicherheit und Fahrkomfort ergeben.

Alternative Antriebssysteme (Hybridantrieb, Brennstoffzelle) werden den Antriebsstrang beeinflussen. Erste Fahrzeuge mit Hybridantrieb haben sich auf dem Weltmarkt durchgesetzt und etabliert. Je nach künftigem Durchdringungsgrad des Hybrid wird es hier unterschiedliche, neuartige und interessante Lösungen im Antriebsstrang geben. Start-Stopp-Systeme werden in Kürze zum Stand der Technik werden. Auf jeden Fall kommen zusätzlich elektrische Komponenten in den Antriebsstrang.

Den gravierendsten Einfluss auf den Pkw-Antriebsstrang wird die Brennstoffzelle haben, falls sie in fernerer Zukunft tatsächlich zum Serieneinsatz kommt. Sie wird die mechanische Antriebstechnik weitgehend durch elektrische Lösungen ersetzen.

## 5.5 Allradantriebe, Brems- und Antriebsregelungen

### 5.5.1 Allradantriebs-Konzepte

#### 5.5.1.1 Verwendung von Allradantrieben

Der Allradantrieb hat Tradition im Automobilbau und hält auch heute eine wesentliche Position im Bereich der Antriebstechnik inne. Technisch gesehen, lassen sich drei Hauptkategorien für Allradfahrzeuge definieren:

- das Segment der leicht geländegängigen Fahrzeuge (SUVs, SAVs) und Geländewagen, die vier angetriebene Räder vor allem aus Traktionsgründen benötigen
- der Bereich der Sportwagen und Limousinen, in dem neben guter Traktion die verbesserte Fahrdynamik ausschlaggebend für den Einsatz von Allradantrieb ist und
- die Koppelung einer elektrisch angetriebenen Achse mit einem Standardantrieb, das sogenannte elektrische Allradsystem.

Bei reinen Geländewagen im häufigen Offroad-Einsatz bedeutet gutes Traktionsvermögen optimale Reibwertausnutzung an allen Rädern. Dies lässt sich am besten durch eine bei Bedarf starre Koppelung der Achsen erzielen.

Hochmotorisierten Personenkraft- und Sportwagen garantiert der Allradantrieb unabhängig von vorherrschenden Fahrbahnverhältnissen optimale Beschleunigungswerte. Eine gezielte Momentenverteilung im Antriebsstrang erlaubt außerdem eine spezifische Abstimmung des Fahrverhaltens.

Für diese Kategorie scheidet die starre Koppelung der Achsen aus fahrdynamischen Gesichtspunkten – sowie wegen Komfort- und Verschleißproblemen aufgrund starker Verspannungen – aus. Um diese Verspannung zu unterbinden und eine gewünschte Steuertendenz zu erreichen, sorgen entweder Zentraldifferenziale oder entsprechende Kupplungseinheiten für den notwendigen Drehzahlausgleich. Um gegebenen Kraftschluss an allen Rädern voll auszunutzen, erweisen sich zusätzliche Differenzialsperren als sehr vorteilhaft. Zu beachten ist allerdings auch, daß beim Bremsen völlig unabhängige Räder die beste Lösung darstellen. Jede Koppelung beeinflusst die Bremsstabilität und bedarf entsprechender Zusatzmaßnahmen. Gleiches gilt auch für einwandfreie Kompatibilität mit Fahrdynamikregelsystemen (ESP).

#### 5.5.1.2 Kennlinien von Allradantrieben

Zur Beurteilung der verschiedenen Allrad-Systeme erweist sich das Traktionsschaubild (◘ Abb. 5.210) als sehr vorteilhaft. In diesem wird die Antriebsmomentenverteilung der dynamischen Gewichtsverteilung des Fahrzeuges gegenübergestellt und so eine prinzipielle Aussage über das Fahrverhalten (Über- oder Untersteuern) ermöglicht. Vertikal werden die Beschleunigung bzw. die Steigung aufgetragen und horizontal die Antriebsmomenten- bzw. Gewichtsverteilung:

Die im Bild dargestellten Kennlinien ergeben sich durch verschiedene Parameter, wie Achslastverteilung, Radstand und Schwerpunktshöhe, wo-

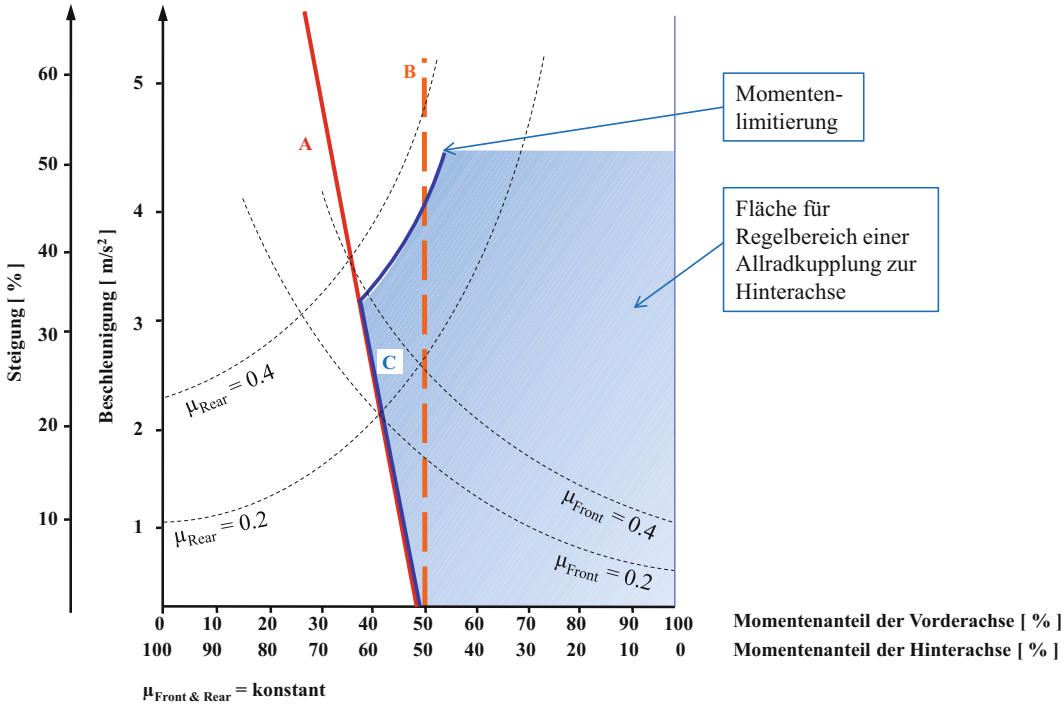



**Abb. 5.210** Kennlinien von Allradantrieben

bei Verluste wie die des Antriebs und der Reifen und der Luftwiderstand nicht berücksichtigt sind. Im dargestellten Bild ist die Achslastverteilung Vorderachse zu Hinterachse mit 50/50 % angenommen. Bei einer ungleichen Verteilung verschieben sich die Kennlinien entsprechend nach links oder rechts. Die Koppelung der Achsen des starren Antriebes bewirkt an diesen gleichen Schlupf und somit auch gleiche Reibwertausnutzung. Gemäß der Reibwertdefinition ergibt sich

$$F_V/F_H = G_V/G_H$$

d. h. die Umfangskräfte und damit auch die Momente verteilen sich beim starren Allradantrieb wie die dynamischen Achslasten (Gerade A, auf der sich auch alle Reibwertkurven schneiden). Jede Antriebsverteilung rechts dieser Geraden ergibt eine Betonung der Vorderachse und damit eine Tendenz zu untersteuerndem Fahrverhalten, im linken Feld demnach ein entsprechendes übersteuerndes Verhalten. Die Reibwertkurven (im Bild $\mu_{Front}$ und $\mu_{Rear}$ mit Reibwerten 0,2 und 0,4) stellen die Traktionsgrenzen des Kraftschlusses Reifen zu Fahrbahn dar.

Zentraldifferenziale verteilen die Momente immer im selben Verhältnis (B) (Annahme für die Darstellung ist ein Zentraldifferenzial mit einer Momentenverteilung von 50/50 %).

Eine zusätzliche Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bzw. Drehzahl führt zu Kennfeldern (C). Besonders elektronisch geregelte Kupplungen und Sperren erweitern den Regelbereich noch weiter.

Bei Kupplungen z. B. kann zwischen den Grenzen des Einachsantriebs einerseits und der starren Koppelung andererseits geregelt werden.

Kennfelder sind in ihren Extremwerten zu berücksichtigen und nur die Betrachtung aller Kombinationszustände gibt eine Aussage zum fahrdynamischen Verhalten des Fahrzeugs. Das ideal ausgelegte System gibt dem Fahrer in jedem Beladungs-

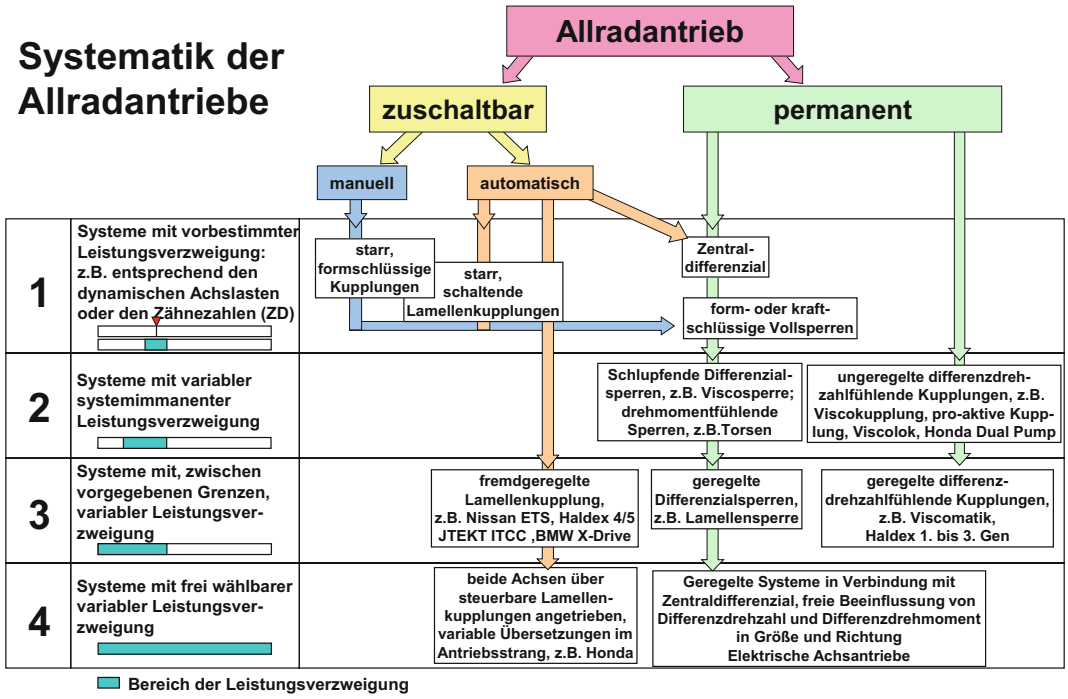



**Abb. 5.211** Varianten des Allradantriebes

und Betriebszustand dasselbe Fahrgefühl. Ob über-, untersteuernd oder neutral auszulegen ist, entscheidet die Philosophie des Fahrzeugherstellers.

### 5.5.1.3 Systematik der Antriebe

Die Einteilung nach baulichen Merkmalen ergibt sehr rasch ein unübersichtliches Bild. Wesentlich klarer ist eine Systematik nach der möglichen Leistungsverzweigung, wobei homogene Fahrbahnverhältnisse und Geradeausfahrt vorausgesetzt werden, Geschwindigkeit und Beschleunigung/Steigung werden variiert. Die Leistungsverzweigung (in Abb. 5.211) stellt das mögliche Verhältnis des Vorderachs- zu Hinterachsmomentes schematisch dar.

Nach diesen Kriterien erhält man vier Gruppen oder Generationen, welche aber keinesfalls eine Wertung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Systeme darstellen.

In die erste Gruppe fallen der zuschaltbare Vierradantrieb und der permanente Antrieb mit Zentraldifferenzial (ohne bzw. mit mechanischer Sperre).

Die zweite Gruppe baut häufig auf dieser Differenzialverteilung auf, überlagert sie jedoch mit einem systemimmanenten Sperrensystem (z. B. Viscosperre oder JTEKT-Torsen). Hierhin gehört auch der direkte Antrieb der zweiten Achse über eine differenzdrehzahlfühlende Kupplung, die das Zentraldifferenzial ersetzt und abhängig vom Radschlupf Drehmoment überträgt. Diese Konzepte sind auf Grund der drehzahlabhängigen Charakteristik nicht kompatibel mit ESP Systemen, wodurch sie vom Automobilmarkt verschwunden sind, ausgenommen Kupplungen, die mit einer Abschalteinrichtung kombiniert sind. Neben der bekannten Viscokupplung sind dies Lamellenkupplungen, die von differenzdrehzahlfühlenden Pumpen mit Druck beaufschlagt werden (z. B. HONDA Dual Pump, Pro-aktive Kupplung von MAGNA und das RBC-System von JTEKT).

RBC: Rotary Blade Coupling

Typisch für Systeme der dritten Gruppe ist die Verwendung von Elektronik zur Regelung von Kupplungen und Zentraldifferenzialsperren. Vertreter dieser Gruppe ist die Lamellenkupplung der

Firma HALDEX (bis zur III. Generation). Dieses System überlagert die interne Charakteristik des Basissystems mit einer externen Regelung. Ausschließlich fremdgeregelt sind Lamellenkupplungen/-sperren, wie sie nachfolgend beschrieben werden. Zu dieser Gruppe zählen Kupplungen der Hersteller GKN, JTEKT, HALDEX (IV. und V. Generation), MAGNA und BorgWarner.

In einer vierten Gruppe verfügen Allradantriebe über eine frei wählbare Leistungsverzweigung zwischen den Achsen, auch als „torque vectoring" bezeichnet und fallweise auch kombiniert mit freier Momentenverteilung quer an den Achsen.

### 5.5.1.4 Systemkomponenten

Um den Rahmen dieses Buches nicht zu sprengen, soll in Folge nur auf weitgehend etablierte und aus technischen Gründen hervorzuhebende Systeme eingegangen werden:

#### 5.5.1.4.1 Zentraldifferenziale

**Planetendifferenziale** Neben herkömmlichen Kegelraddifferenzialen eignen sich besonders Planetengetriebe als Mitteldifferenzial, da durch gezielte geometrische Abstimmung der Planetengetriebebauteile (Sonnen-, Planeten- und Hohlrad) und durch den Modus der Momentenzufuhr und -abnahme eine bestimmte Momentenverteilung im Antriebsstrang erreicht werden kann.

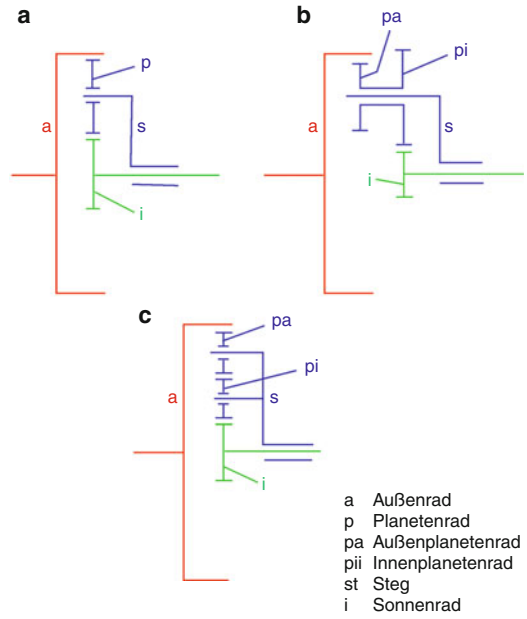
Für die gebräuchlichste Anordnung (◘ Abb. 5.212a) errechnet sich die Momentenverteilung bei Antrieb über den Steg über die Zähnezahlen der Zahnräder:

$$M_{\text{Hohlrad}} / M_{\text{Sonne}} = z_{\text{Hohlrad}} / z_{\text{Sonne}}$$

Mögliche Momentenverteilungen sind:
Anordnung a Hohlrad : Sonne = 65 : 35 (+/– 5 %);
Anordnung b Sonne 1 : Sonne 2 = 70 : 30 bis 30 : 70;
Anordnung c Steg : Sonne = 65 : 35 bis 50 : 50.

Ein Beispiel für eine technische Ausführung nach Anordnung c stellt ◘ Abb. 5.213 (Mercedes-Benz 4matic) dar.

**Doppel-Differenzial-Einheit** Kompakte Lösungen für Allrad-Fahrzeuge, welche aus Frontquerantrieben abgeleitet sind, stellen das TORSEN® type C




◘ **Abb. 5.212** Planetendifferenziale und ihre Bauformen

TWIN Differenzial von JTEKT oder die DDU-Ausführung von MAGNA (◘ Abb. 5.214) dar. Hier werden die Momente an die Wellen entsprechend ihrer Position entlang des Kraftflusses verteilt. Der Radsatz vereinigt die Funktion eines Zentraldifferenzials und die des Vorderachs-Querdifferenziales, wobei der Bauraum des frontgetriebenen Grundgetriebes ausreicht.

Zugkraftunterschiede an den Vorderrädern werden durch die Wälzlagerung der Planetenräder nicht auffällig. Ein Sperren des Zentraldifferenzials ist möglich.

Die Achsmomentverteilung kann beliebig gewählt werden, wobei eine Aufteilung von VA 65 %/HA 35 % bis VA 45 %/HA 55 % möglich ist.

Ausgeführt wurde diese Version im Hyundai Santa Fe (SUV) zur Markteinführung des Fahrzeuges im Jahre 2000. Im Zuge der weiteren Modellpflege wurde das Allradsystem im Jahre 2005 auf eine geregelte Kupplung umgestellt.

**Sperren** Die systemimmanente und feste Momentenverteilung sogenannter „offener" Zentraldifferenziale kann immer nur in einem Betriebspunkt auf den Höchstwert der Traktion abge-

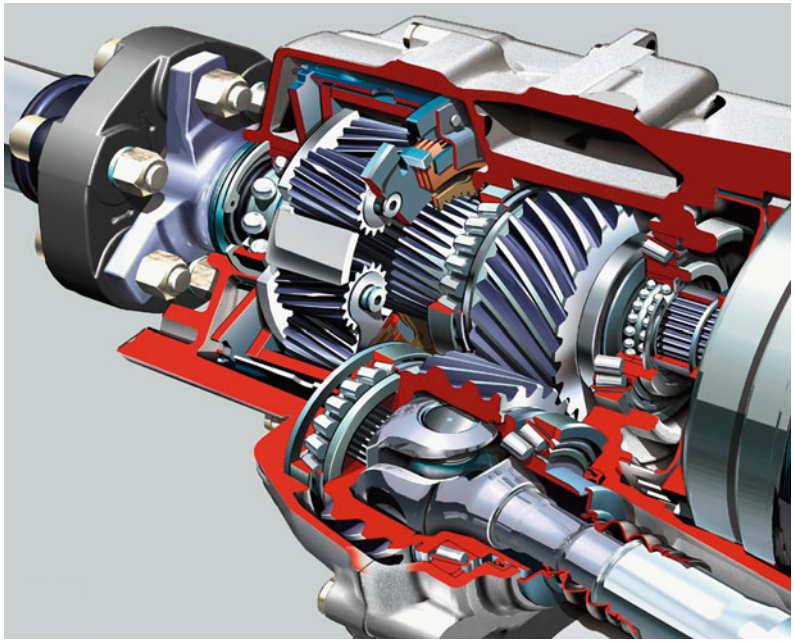
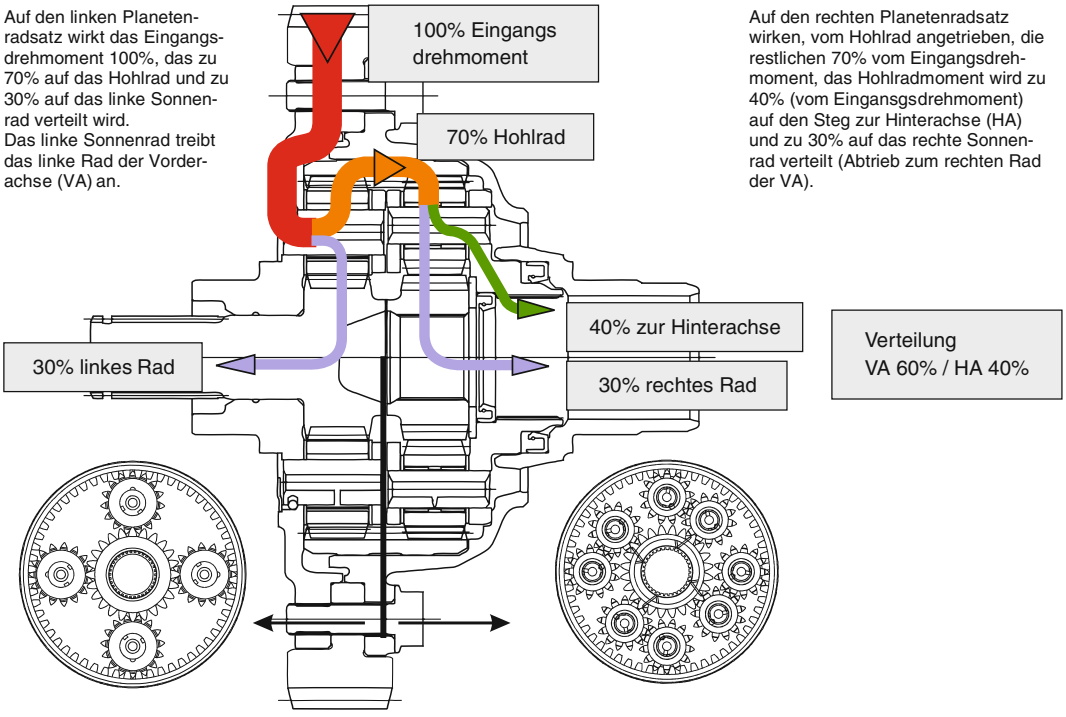


**Abb. 5.213** Mercedes-Benz 4matic, Baureihen S, E und C

Auf den linken Planetenradsatz wirkt das Eingangsdrehmoment 100%, das zu 70% auf das Hohlrad und zu 30% auf das linke Sonnenrad verteilt wird.
Das linke Sonnenrad treibt das linke Rad der Vorderachse (VA) an.




Auf den rechten Planetenradsatz wirken, vom Hohlrad angetrieben, die restlichen 70% vom Eingangsdrehmoment, das Hohlradmoment wird zu 40% (vom Eingangsgsdrehmoment) auf den Steg zur Hinterachse (HA) und zu 30% auf das rechte Sonnenrad verteilt (Abtrieb zum rechten Rad der VA).

**Abb. 5.214** Doppel-Differenzial-Einheit

stimmt sein. Um auch für von diesem Bestpunkt abweichende Bedingungen höchstmögliche Zugkraft übertragen zu können, sind Sperren erforderlich.

Mögliche Bauformen von Sperren sind:

- automatische Sperren,
  - drehzahlfühlend, bedingt durch die Unverträglichkeit mit ESP-Systemen vom Markt verschwunden (Viscosperren u. a.),
  - drehmomentfühlend (ZF Sperrdifferenzial, TORSEN Type A, B und C, GKN Super LSD, Helical LSD und Multi-plate LSD, AUDI Kronenrad Differenzial),
- extern geschaltete/geregelte Sperren,
  - vom Fahrer manuell betätigt,
  - elektronisch gesteuert (Lamellensperren u. a.).

Einen Sonderfall der Sperren stellt die aktive Bremsbetätigung dar. Diese wird im ▶ Abschn. 5.5.2 behandelt.

Zum Vergleich der Sperrensysteme wird häufig der sogenannte Sperrwert verwendet:

$$S = (M_{\text{high}} - M_{\text{low}}) \times 100/(M_{\text{high}} + M_{\text{low}})[\%]$$

Ebenso gebräuchlich ist das Momentenverhältnis (torque bias).

$$M_{\text{low}} : M_{\text{high}} = 1 : x$$

**TORSEN-Differenziale, GKN LSD Systeme, AUDI, Kronenrad Differenzial** Dies sind Differenzialeinheiten mit momentenabhängiger Sperrwirkung. Innere Reibung erzeugt ein vom Antriebsmoment abhängiges Sperrmoment.

Der bekannteste Vertreter ist das Torsen Typ A (◘ Abb. 5.215) mit gekreuzten Achsen der Ausgleichsräder. Mit parallelen Achsen arbeiten der Typ B und GKN. Torsen Typ C ist ein schrägverzahntes Planetengetriebe mit nur in Taschen des Steges aufgenommenen Planetenrädern. Die sogenannte „Twin Diff" Bauform beinhaltet sowohl das Vorderachsdifferenzial (mit Kegelrädern) als auch das Zentraldifferenzial (Ausführung Torsen type C). In allen Varianten wird das Sperrmoment durch die Zahngeometrie und die Reibflächenpaarungen abgestimmt.

Der große Vorteil der Torseneinheit ist die geringe Verspannung bei Kurvenfahrt, da vom Fahrzeug gewollte Differenzdrehzahlen zugelassen werden. Dies gilt auch für den Bremsvorgang, sodass die Bremsstabilität damit ähnlich wie beim offenen Differenzial gegeben ist.

AUDI stellte im Jahr 2010 am Automobilsalon in Genf im Modell RS5 erstmals das Kronenrad-Differenzial vor und erweiterte damit die Möglichkeiten im Allradantrieb (◘ Abb. 5.216).

**Aufbau** Das neue Kronenrad-Mittendifferenzial von Audi folgt einem mechanischen Prinzip. Sein zylindrisches Gehäuse wird vom Getriebe angetrieben. In seinem Inneren drehen sich zwei Kronenräder, die ihre Bezeichnung ihrer kronenartigen Verzahnungsgeometrie verdanken. Das hintere Kronenrad treibt die Kardanwelle zur Hinterachse an, das vordere eine Beveloidwelle, die zum Differenzial der Vorderachse führt.

Die Kronenräder werden durch vier geradverzahnte Ausgleichsräder angetrieben, die in 90 Grad Winkeln zueinander angeordnet sind. Sie sind auf den gehäusefesten Achsen drehbar gelagert. Hierdurch wird ein Drehzahlausgleich zwischen Vorder- und Hinterachse, wie er z. B. bei Kurvenfahrt notwendig ist, möglich.

Bei exakt gleichen Drehzahlen an Vorder- und Hinterachse drehen sich die beiden Kronenräder mit gleicher Drehzahl wie das Differenzialgehäuse. Aufgrund der speziellen Verzahnungsgeometrie weisen die Kronenräder unterschiedliche Zähnezahlen und Eingriffspunkte auf verschieden großen Durchmessern auf. In der Grundverteilung strömen 60 Prozent des Motormoments zum Differenzial der Hinterachse und 40 Prozent nach vorne.

**Sperrwirkung** Bei der Einleitung von Antriebsmomenten über die Verzahnung der Ausgleichsräder entstehen axiale Kräfte wodurch beide Kronenräder nach außen gedrückt werden. Diese Axialkraft wird dazu benutzt, um Lamellenpakete hinter den Kronenrädern zusammen zu drücken. Hierdurch wird ein Sperrmoment erzeugt, es fließen bis zu 85 Prozent des Antriebsmoments nach hinten oder bis zu 70 Prozent an die Vorderachse.

AUDI koppelt das Kronenrad-Mittendifferenzial mit einer spezifischen Softwarelösung, der radse-

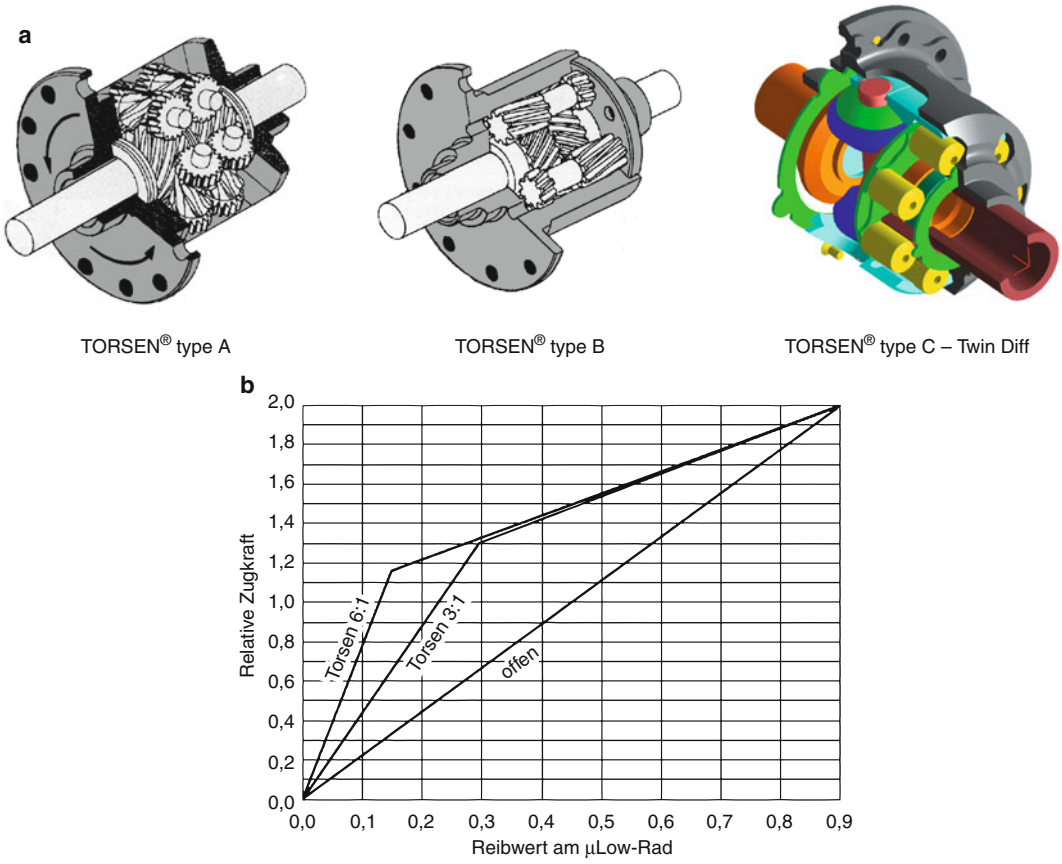



**Abb. 5.215** Bauformen (**a**) und Kennlinien (**b**) Torsen®

lektiven Momentensteuerung. Als Weiterentwicklung des ESP greift sie auf alle vier Räder zu. Der Bereich neutralen Fahrverhaltens wird erweitert, das Untersteuern beim Einlenken und Beschleunigen vermindert. Eingriffe des ESP können später und weicher erfolgen – falls sie überhaupt noch notwendig sind.

#### 5.5.1.4.2 Kupplungen mit selbsttätiger Momentenanpassung

Alle selbsttätigen Kupplungen reagieren auf die Differenzdrehzahl zwischen Ein- und Ausgang, die durch die Drehzahlunterschiede der Räder verursacht wird. Diese sind aus unterschiedlichen Gründen immer gegeben: Neben dem Antriebsschlupf oder dem „Durchdrehen" eines Rades ergeben sich Unterschiede auch durch Kurvenfahrt, Durchmesserunterschiede der Reifen, Brems- und ESP-Manöver sowie durch Abschleppen oder Prüfstandsbetrieb. In allen Situationen überträgt die Kupplung Drehmoment von der schnellen zur langsamen Seite. In manchen Fällen wie z. B. beim Bremsverhalten (siehe ► Abschn. 5.5.1.9) sind die Auswirkungen als negativ einzustufen.

**Viscokupplung** Viscokupplungen (VC) (◘ Abb. 5.217) zählen zu den Übertragungselementen mit systemimmanentem Verhalten, das sowohl zur selbsttätigen Antriebsmomentenverteilung als auch zur automatischen, differenzdrehzahlabhängigen Längs- bzw. Quersperre verwendet wird. Die Momentenübertragung erfolgt durch Flüssigkeitsreibung zwischen den Kupplungslamellen als Folge einer aufgezwungenen Drehzahldifferenz zwischen Außen- und Innenteil.

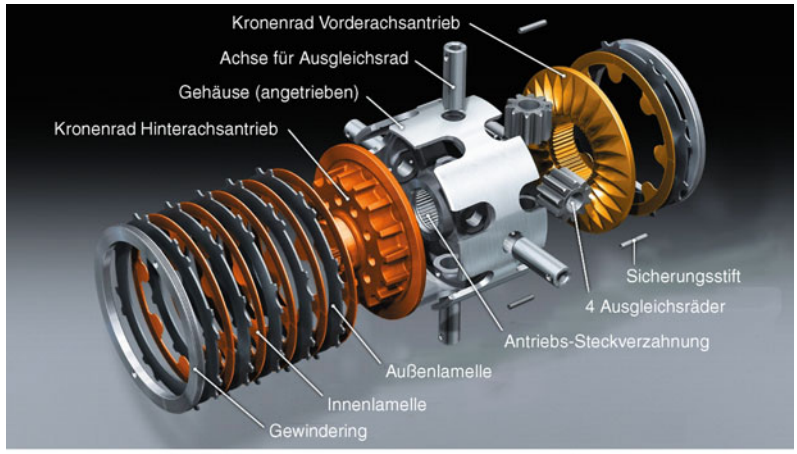



**Abb. 5.216** Kronenrad-Differenzial

Mit dem Einsatz von Fahrdynamik Regelsystemen (ESP) wird eine Entkoppelung des Antriebes zwischen den Rädern und Achsen notwendig. Da ungeregelte, drehzahlsensierende Systeme (z. B. die Viscokupplung) üblicherweise diese Entkoppelungsfunktion nicht aufweisen, sind diese Systeme mittlerweile weitestgehend vom Markt verschwunden.

#### 5.5.1.4.3 Kupplungen mit externer Regelung

Die Kennlinie einer ungeregelten Kupplung ist immer ein Kompromiss zwischen Traktion, Fahrdynamik, Gesamtwirkungsgrad und Komfort.

Durch eine externe Regelung erreicht man eine weitgehend kompromissfreie Erfüllung der Anforderungen.

Bei derartigen Systemen können folgende Einflüsse elektronisch erfasst und zur gezielten Antriebssteuerung eingesetzt werden:

1. Drehzahl der Räder,
2. Motormoment, Drosselklappenbewegung,
3. Bremssituation (Bremslicht-Signal, Bremsdruck),
4. Fahrzeug-Sensorik (z. B. ESP-Signale),
5. Lenkwinkel, Retourfahrt, Kupplung,
6. Sondersituationen (Abschleppen, Übertemperatur, Einachs-Rollenprüfstand).

Die gewünschte Eigenlenktendenz des Fahrzeuges wird über die Antriebsmomentenverteilung als Funktion obiger Betriebsdaten vorgegeben.

Eine Verknüpfung der Steuergeräte für Motor, Getriebe und Bremsen erfolgt heute über ein BUS-System.

Die Anforderungen an geregelte Systeme beziehen sich insbesonders auf:

- hohe Momentenübertragung bei sehr geringen Differenzdrehzahlen, was optimale Traktion und einen guten Wirkungsgrad bei gleichzeitig niedriger thermischer Belastung bedeutet.
- ein nahezu differenzdrehzahlunabhängiges Minimalmoment und
- ausreichend hohe Momentenauf- und -abbaugeschwindigkeiten, um den Anforderungen der Fahrdynamik und Bremsstabilität zu genügen ($M_{max} \rightarrow M_{min} \leq 100\,ms$).
- die Möglichkeit, das maximale Antriebsmoment zur geregelten Achse zu limitieren,

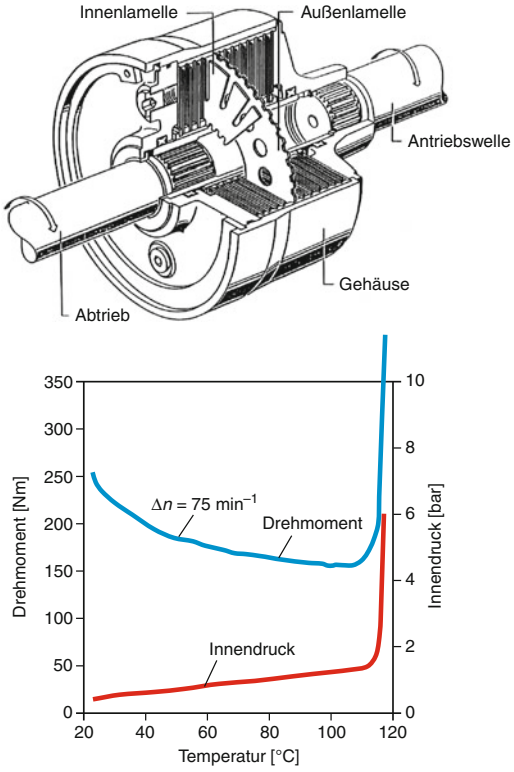



**Abb. 5.217** Kennlinien/Schnittbild VC-Kupplung

wodurch die Komponenten zur Drehmomentübertragung kleiner und kostengünstiger dimensioniert werden können.

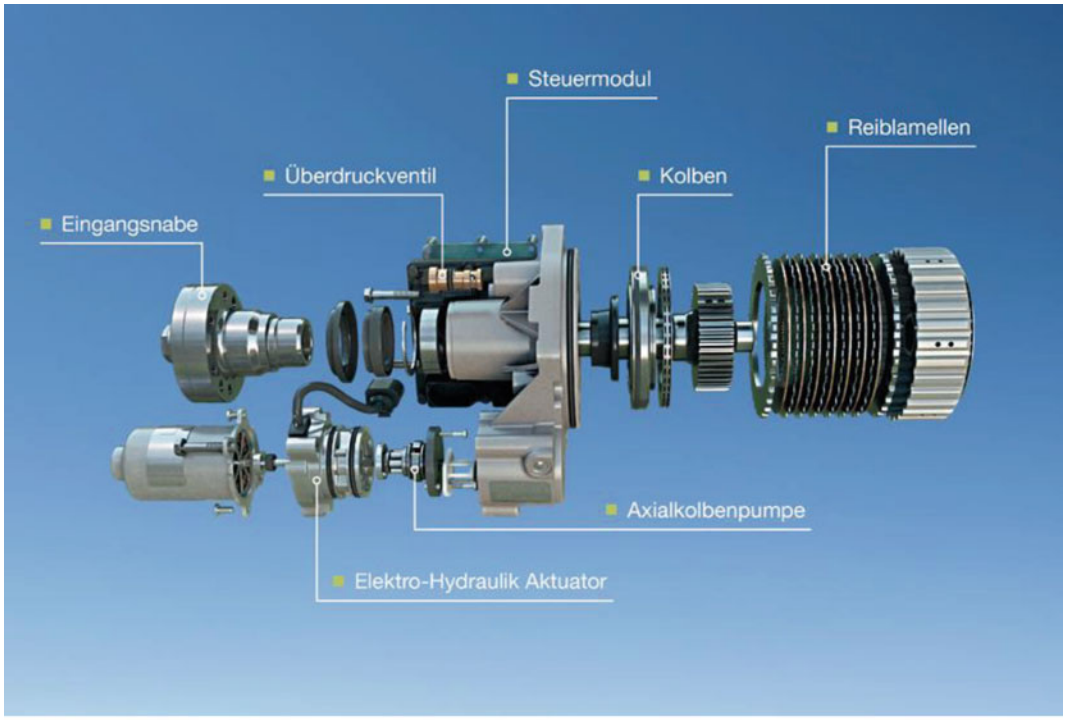
Zur eigentlichen Drehmomentübertragung werden nasse Mehrscheibenkupplungen verwendet, die sich bei den eingesetzten Aktuatoren und damit auch in ihrem Übertragungs- und Regelverhalten unterscheiden.

Die MAGNA Pro-aktive Kupplung und die Haldex-Kupplung (bis Generation III) benutzen die Differenzdrehzahl zur Erzeugung der Energie für die Aktuierung und als Regelgröße.

Bei Kupplungen mit reiner Fremdregelung werden Hydraulik oder Elektromechanik (Magnete oder Motoren) verwendet, als Regelgröße dienen die Drehmomentverteilung und die Differenzdrehzahl der Vorder- zur Hinterachse.

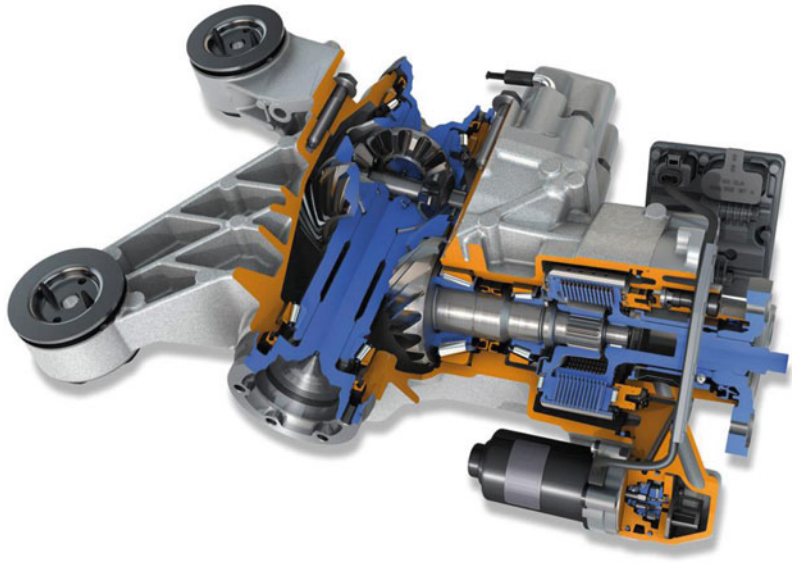
Auf einige Beispiele fremdgeregelter Systeme wird im weiteren Verlauf detaillierter eingegangen:

**Borg Warner Haldex**© Haldex Generation I und II: Auf Basis der Kombination eines differenzdrehzahlfühlenden Pumpensystems (Taumelscheiben und Ringkolben) und einer Lamellenkupplung wird die interne Bandbreite der Momentenübertragung durch externe Regelung erweitert. Über ein fremdgesteuertes Ventil wird das Druckniveau im Hydraulikkreis und damit der aktuelle Betriebspunkt im sehr weiten, verfügbaren Regelbereich eingestellt. Die Haldex Kupplung der III. Generation verwendet eine Vorladepumpe um bereits bei kleinen Differenzdrehzahlen ein hohes Drehmoment zu übertragen. Die Haldex Kupplung der IV. Generation besitzt eine elektrisch angetriebene Pumpe und einen zusätzlichen Kolbenspeicher, wodurch




(Foto: ©by Borg Warner)

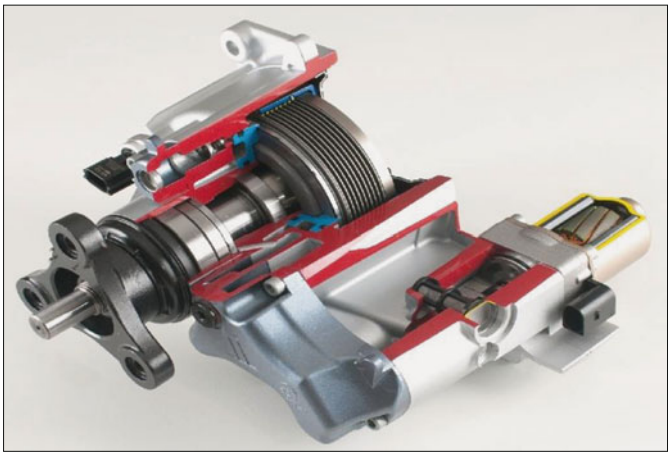
**Abb. 5.218** Haldex V Kupplung von Borg Warner



(Foto: ©by Borg Warner)

**Abb. 5.219** Haldex V Kupplung für den Golf VII 4Motion

1. Motor
2. Pumpe
3. Hydraulischer Kolben
4. Drucksensor
5. Steuergerät



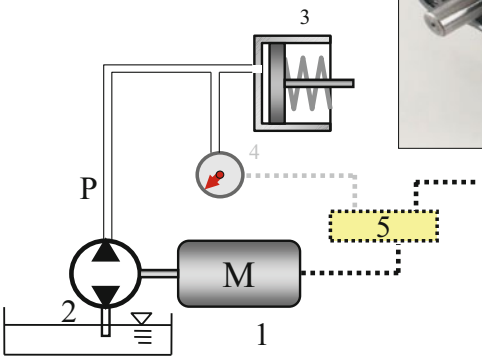



**Abb. 5.220** Dynamax Kupplung von MAGNA

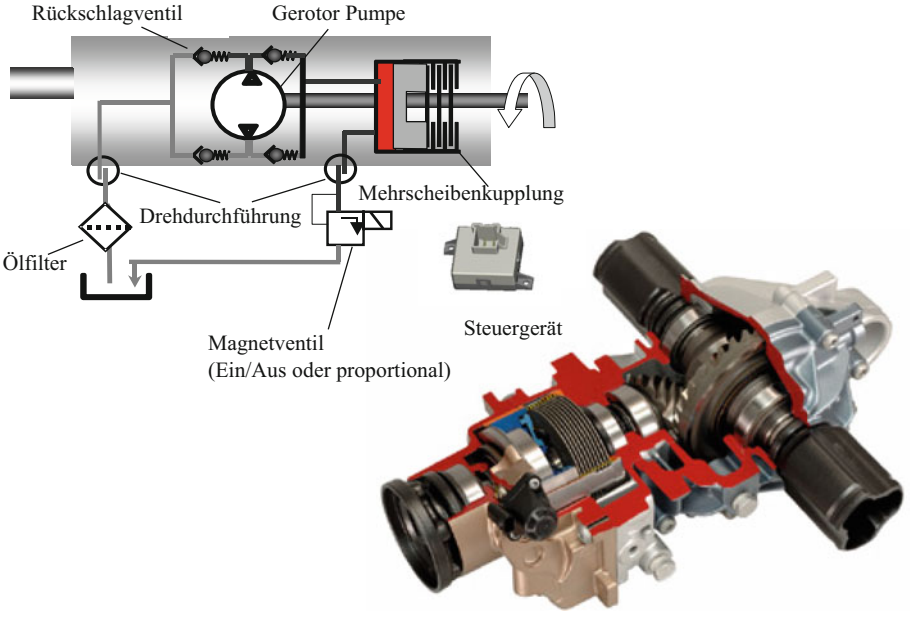



**Abb. 5.221** Pro-aktive Kupplung von MAGNA

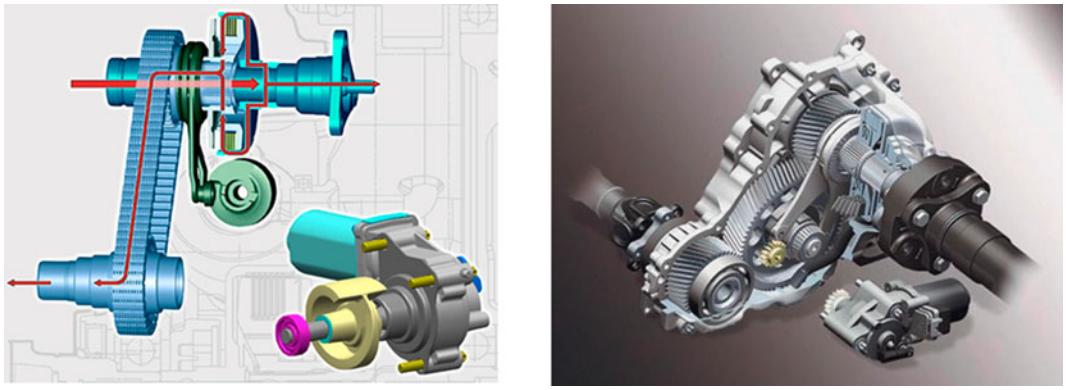


**Abb. 5.222** Schema und Bild BMW X-Drive

die Abhängigkeit des übertragenen Drehmomentes von der Differenzdrehzahl nicht mehr gegeben ist. Diese Ausführung bringt eine weitere Verbesserung des Ansprechverhaltens.

Die Haldex Kupplung der V. Generation (Abb. 5.218 und Abb. 5.219) beinhaltet ein elektro-hydrostatisches System. Hier wird die Lamellenkupplung direkt über eine elektrisch angetriebene Pumpe aktuiert, wobei der hydraulische Druck proportional zum übertragbaren Drehmoment der Kupplung ist.

**MAGNA Dynamax Kupplung** Die MAGNA Dynamax Kupplung (Abb. 5.220) arbeitet funktional ähnlich wie die Haldex der V. Generation: der hydrostatische Druck, erzeugt von einer elektrisch angetriebenen Pumpe, wirkt auf den Stellkolben der Lamellenkupplung und erzeugt das Kupplungsmoment für den Antrieb der zweiten Achse.

**MAGNA Pro-aktive Kupplung** Hier handelt es sich um ein hydraulisch aktuiertes Lamellenkupplungssystem (Abb. 5.221). Da die hydraulische Leistung aus der Differenzdrehzahl generiert wird, kann dieses System den drehzahlfühlenden Systemen zugeordnet werden. Eine entsprechende Abregellogik für Fahrdynamik-Regeleingriffe ist vorgesehen.

**BMW X-Drive** Auch dieses zum Antrieb einer Vorderachse entwickelte System bedient sich einer Lamellenkupplung mit Kraftmodulation (Abb. 5.222). Ein Elektromotor in Verbindung mit einem Kugelrampensystem setzt die vom Fahrdynamikregler ermittelte Soll-Drehmomentverteilung in entsprechende Anpresskräfte um. Zum Erkennen der Fahrsituation arbeitet das System mit der dynamischen Stabilitätskontrolle (DSC), dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) von BMW, zusammen und erhält hierüber ständig die notwendigen Informationen. Die Verteilergetriebe werden in zwei Ausführungsformen eingesetzt, für SUV's (X3, X4, X5, X6) wird eine Zahnkette für den Vorderachsabtrieb verwendet, für Limousinen wird ein Stirnradabtrieb verwendet.

**GKN, JTEKT, BorgWarner Kupplungen** Diese Kupplungssysteme verwenden für die Aktuierung einen Magneten, dessen elektronisch geregelte Kraft auf eine Pilotkupplung wirkt (Abb. 5.223). Über ein Kugelrampensystem wird das Drehmoment der Pilotkupplung in eine Axialkraft umgewandelt, diese aktuiert die Hauptkupplung. Das übertragene Drehmoment setzt sich hier aus den Drehmomenten der Pilot- und Hauptkupplung zusammen.

ITCC: Intelligent Torque Controlled Coupling

#### 5.5.1.4.4 Abschaltbarer Allrad-Teilleistungspfad

Leistungsbezogene Verluste des Allrad-Systems können durch gezielte Vorsteuerkonzepte von geregelten Kupplungen reduziert werden, indem das Kupplungsmoment auf einen Minimalwert

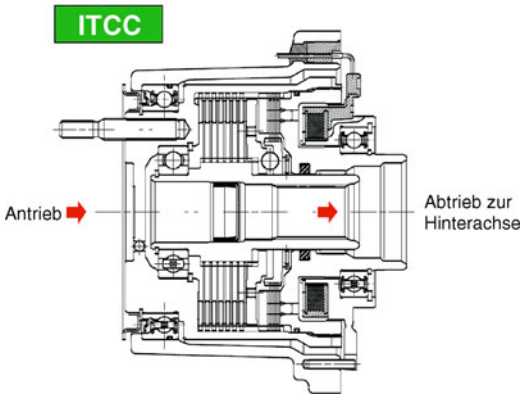



**Abb. 5.223** Schema JTEKT – ITCC

geregelt wird wenn die Fahrsituation keinen Antrieb der zweiten Achse erfordert. Die nicht leistungsbezogenen Verluste (Lager-, Dichtringreibungen, Planschverluste der Schmiermedien etc.) belasten aber den $CO_2$-Ausstoß weiterhin. Um den steigenden Anforderungen an Kraftstoff-Verbrauchsreduzierung gerecht zu werden, sind automatisierte Abschaltsysteme zur Stilllegung des Allrad-Triebstrangs bereits am Markt verfügbar. Die Stilllegung des Antriebes zur zweiten Achse reduziert die Gesamtreibung des Systems und somit den Kraftstoffverbrauch.

Im Range Rover Evoque ist ein Abschaltsystem von GKN in Verwendung, wobei die Stilllegung ab 35 km/h wirksam ist, wenn der Fahrzustand diese zulässt. Die Reaktionszeit, um den stehenden Teilstrang wieder auf aktuelle Betriebsdrehzahl hochzusynchronisieren und die Kupplung auf das geforderte Traktionsmoment zu stellen, wird mit $< 0{,}3$ Sekunden angegeben. Als weiteres Beispiel für ein Abschaltsystem sei das FLEX4 System der MAGNA genannt (Abb. 5.225).

### 5.5.1.4.5 Variable Drehmomentverteilung zur aktiven Beeinflussung des Gierverhaltens eines Fahrzeuges

Um für sämtliche Fahrzustände (Hoch- und Niedrigreibwert) ein ausgewogenes Fahrverhalten und eine verbesserte Fahrdynamik zu erreichen, bieten moderne Allradsysteme Funktionalitäten für eine optimale Antriebskraftverteilung zwischen den Achsen. Um die Gierbewegung eines Fahrzeuges aktiv zu beeinflussen, ist eine variable Momentenverteilung zwischen den Achsen nur bedingt brauchbar – diese wirken sich nur bei schneller Kurvenfahrt beziehungsweise bei hoher Ausnutzung des Seitenkraftpotentials zwischen Reifen und Fahrbahn aus. Eine variable Drehmomentverteilung zu den Rädern einer Achse kann jedoch unter nahezu allen Fahrzuständen ein Giermoment um die Fahrzeughochachse erzeugen.

Konventionelle Allradsysteme können den Drehzahlunterschied zwischen den Achsen bzw. zwischen den Rädern nicht aktiv erzeugen, da die kurvenäußeren Räder eine höhere Drehzahl aufweisen als die kurveninneren Räder. Dies wird als kinematischer Schlupf bezeichnet (Abb. 5.226).

**Torque Vectoring** Mit Torque Vectoring (Abb. 5.227) ist es möglich ein Giermoment zu erzeugen, das auch entgegen der Fahrzeugbeschleunigung um die Hochachse wirkt.

Am Markt existieren bereits unterschiedliche Konzepte, wobei man grundsätzlich von zwei Systemfunktionalitäten (Torque Vectoring und Torque Splitter) sprechen kann:

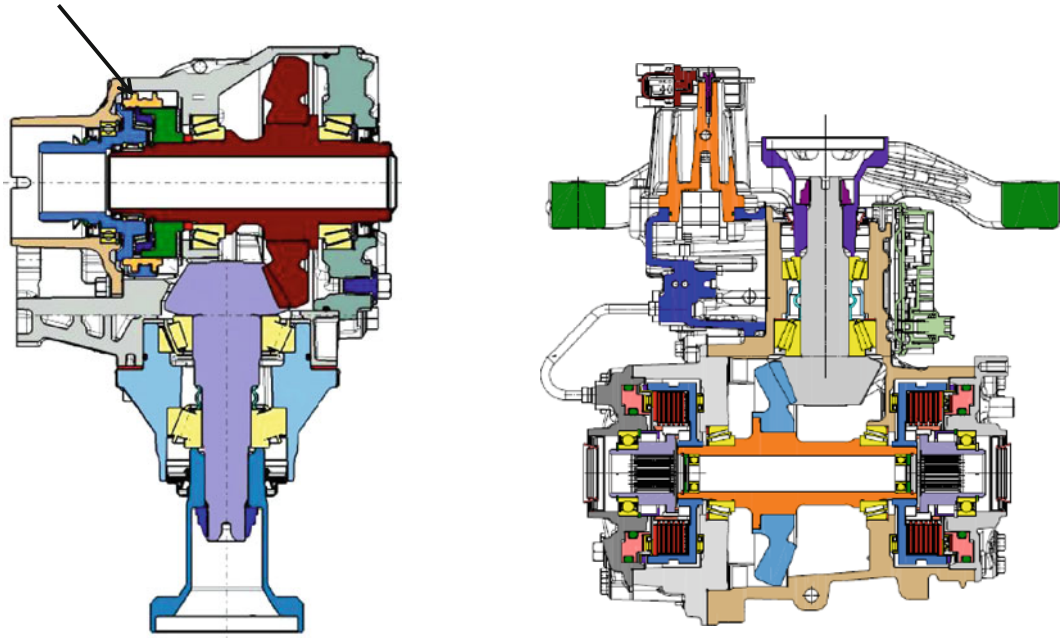
**Torque Vectoring – Funktionalität** Mit Torque Vectoring bezeichnet man Systeme im Antriebsstrang, die in der Lage sind, Moment zwischen den Achsen und/oder zwischen den Rädern einer Achse variabel und kontrolliert gesteuert bzw. geregelt zu verteilen. Diese Verteilung kann unabhängig vom Antriebsmoment erfolgen.

**Torque Splitter – Funktionalität** Als Torque Splitter bezeichnet man Systeme, die ein Antriebsmoment zwischen den Achsen bzw. den Rädern verteilen – in diesem Fall liegt jedoch eine Abhängigkeit vom Antriebsmoment vor. Beispielhaft kann hier ein Achsantrieb mit jeweils einer geregelten Kupplung zum Antrieb eines Rades genannt werden (z. B. Honda Legend ab 4. Generation). Die Notwendigkeit eines Differenzials entfällt in diesem Fall. Diese technische Lösung wurde im Hinterachs-Antrieb des Range Rover Evoque verwirklicht (Abb. 5.224).

**Mitsubishi Active Yaw Control und Active Center Differential** Im Jahre 1996 wurde erstmals von Mitsubishi im Lancer Evolution IV das sogenannte

Synchronisierungseinheit zum Abkoppeln des Triebstranges zur Hinterachse

Hinterachsgetriebe ohne Differenzial und mit 2 einzeln angesteuerten Lamellenkupplungen



(Quelle: 12th International CTI Symposium, December 2013, Berlin)

**Abb. 5.224** Range Rover Evoque „active Driveline"

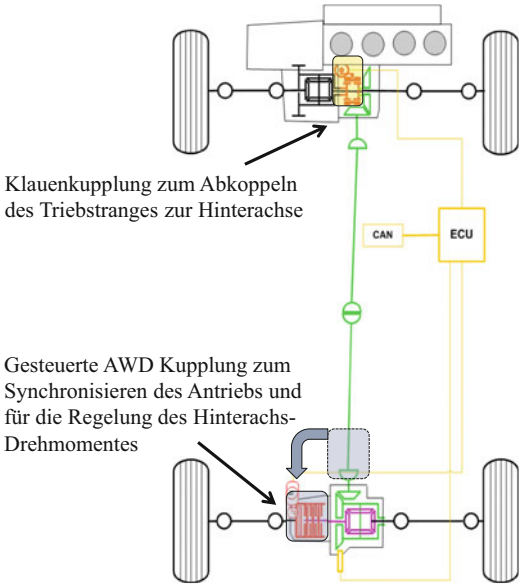



**Abb. 5.225** FLEX4 von MAGNA

Active Yaw Control – System (AYC) (Abb. 5.228) vorgestellt und bis heute mittlerweile in der Evolutionsstufe GSR/MR in Serie produziert. Dieses stellt das erste Torque Vectoring-System in einem Serienfahrzeug dar. Ab der Version Evo VIII zeigt Mitsubishi die Möglichkeit auf, eine geregelte Zentraldifferenzialsperre (ACD) mit einem Torque Vectoring Hinterachsgetriebe zu kombinieren.

**Audi Sportdifferenzial** Seit dem Jahr 2010 bietet Audi für fast alle quattro Modelle ein Sportdifferenzial mit Torque Vectoring Funktion an (Abb. 5.229). Durch das Differenzial wird die Antriebskraft zielgerichtet zwischen den beiden Hinterrädern verteilt, wodurch die Kurvendynamik deutlich gesteigert werden kann.

**BMW Dynamic Performance Control im X6 und X5 M** Zwei Einheiten pro Achse erzeugen das geforderte Vectoring-Drehmoment, welches ein Über-

Bei Kurvenfahrt drehen die äußeren Räder auf einem größeren Radius als die inneren Räder
→ Die äußeren Räder drehen mit höherer Drehzahl als die inneren Räder

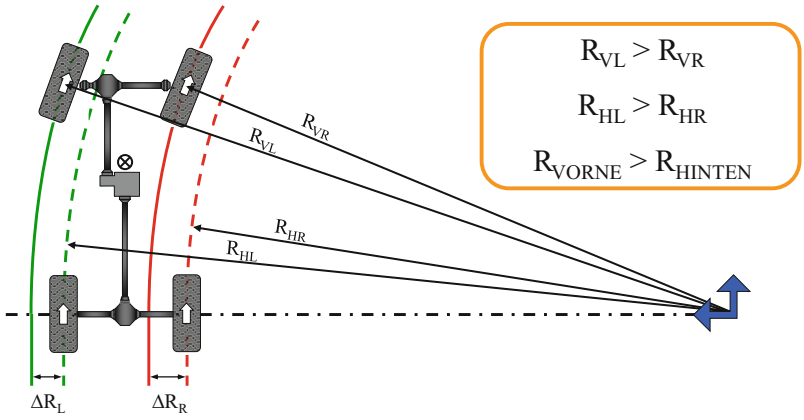



**Abb. 5.226** Kurvenfahrt

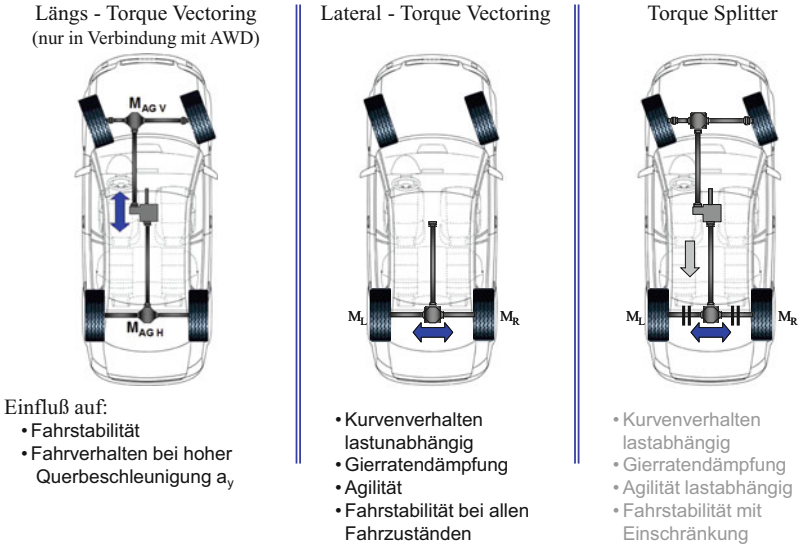



**Abb. 5.227** Bauarten Torque Vectoring

lagerungsmoment zu den Achsantriebsmomenten darstellt (Abb. 5.230). Ein Zahnradsatz überträgt das Vectoring-Drehmoment, welches durch eine elektromechanisch aktivierte Kupplung gesteuert wird.

**Honda Super Handling All Wheel Drive System (SH-AWD) (Abb. 5.231)** Honda brachte im Jahr 2004 unter der Bezeichnung Super Handling All Wheel Drive ein neues Antriebsstrangkonzept auf den Markt. Dieses kombiniert einen längsverteilenden Kupplungsallrad mit einer querverteilenden Momentenübertragungseinheit an der Hinterachse – in diesem Fall handelt es sich um ein Torque Splitter-System.

Der Antriebsstrang basiert auf einem Frontantrieb, das heißt die Vorderachse ist die primär angetriebene Achse. Das vordere Differenzialgehäuse

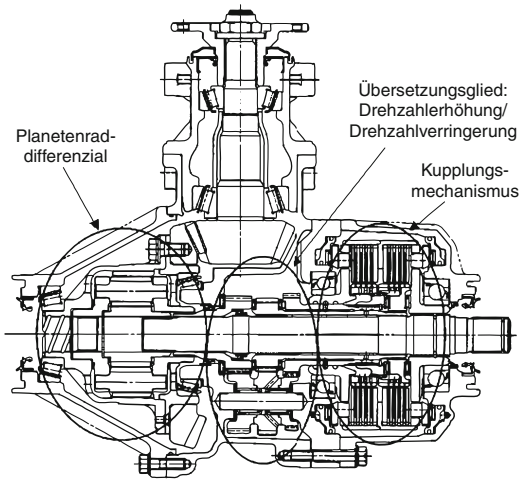



**Abb. 5.228** Mitsubishi AYC

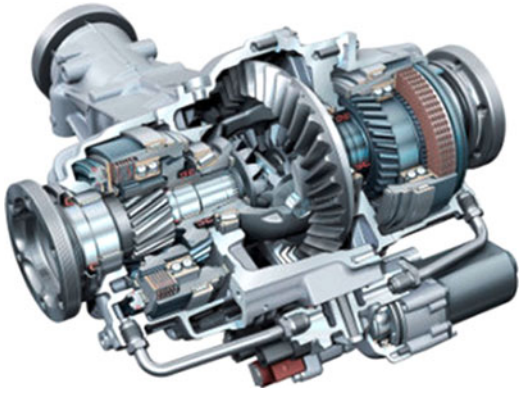


**Abb. 5.229** Audi Sportdifferenzial

treibt zusätzlich über ein Umlenkgetriebe und eine Gelenkwelle die Hinterachse an. Mittels einer Planetengetriebestufe kann über eine Kupplung eine Übersetzung zur Hinterachse zwischengeschaltet werden.

Damit wird es insbesondere bei Kurvenfahrt, (bedingt durch die kinematischen Verhältnisse der Raddrehzahlen) möglich, dem kurvenäußeren Hinterrad ein positives Antriebsmoment zuzuführen, obwohl dieses Rad schneller dreht als die durchschnittliche Drehzahl der Vorderräder. Ein herkömmliches Hinterachsdifferenzial kann entfallen, da die beiden elektromagnetisch betätigten Kupplungen schlupfend betrieben werden.

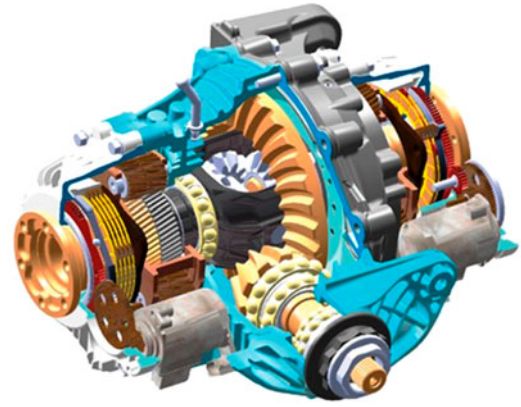


**Abb. 5.230** BMW X-Drive

**Allradantriebe mit elektrischen Antrieben auf der Sekundärachse** Durch die Verbreitung von hybriden Antriebssystemen sind auch Kombinationen mit Allradsystemen möglich geworden. Bei einer mittlerweile etablierten Architektur wird die hauptangetriebene Achse mechanisch angetrieben, die zweite Achse verfügt über einen elektrischen Antrieb. Mit dieser Architektur kann die Forderung Traktion, Erhöhung der Fahrleistung durch den elektrischen Kraftfluss (Boost) und die mögliche Energierückgewinnung im Schubbetrieb (Rekuperation bzw. Bremsenergie-Rückgewinnung) erfüllt werden. Ein wesentlicher Vertreter dieses Konzeptes ist der Lexus RX 450 H.

Dieses Allradkonzept hat die Vorteile einer sehr guten Regelgüte und den Entfall der Gelenkwelle. Dem stehen die Nachteile der geringeren Leistungsdichte und die höheren Fertigungskosten gegenüber.

Elektrische Achsantriebe für die Hinterachse (Abb. 5.232) erfordern üblicherweise aus zwei Gründen eine Abschaltmöglichkeit des Elektromotors:

- Fahrsicherheit im Fehlerfall des Systems gemäß den Anforderungen der funktionalen Sicherheit,
- Abkoppelung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten für die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades.

Um den Vorteil der Rekuperation von Energie zu nutzen, ist der Einsatz eines Energiespeicher not-

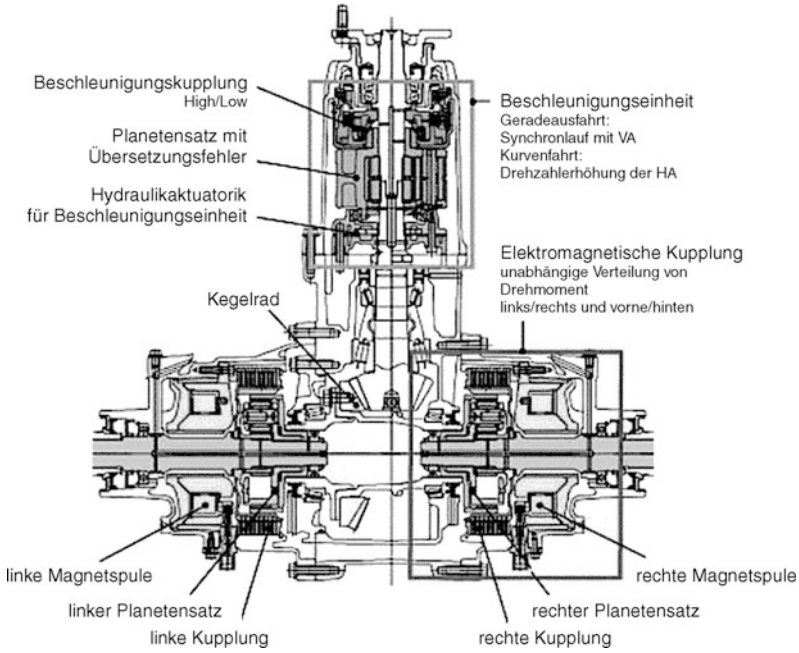



**Abb. 5.231** Honda SH-AWD

wendig, der nach heutigem Stand der Technik mit einer Batterie dargestellt wird.

Wenn diese Architektur als plug-in Hybrid ausgeführt wird und das Fahrzeug für elektrischen Betrieb ausgelegt ist, wird abhängig von der elektrischen Reichweite der Normverbrauch abgesenkt (gemäß ECE-Norm R 101).

### 5.5.1.5 Getriebeabtriebe

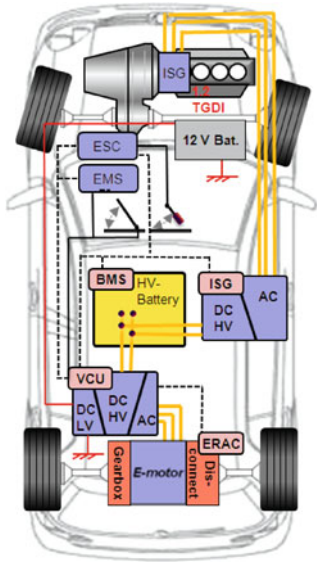
**Ausführungsbeispiele Front-Quer-Antrieb** Für den Einsatz in Fahrzeugen mit Front-Quer Anordnung der Antriebsaggregate eignet sich insbesondere das System der direkt angetriebenen Vorderachse und einer über eine Kupplung angetriebene Hinterachse. Die Ausführung des Vorderachsabtriebs wird von den Faktoren der Raumverhältnisse und der Adaptierbarkeit der Basisgetriebe bestimmt.

Die Anordnung des Abtriebes vom Vorderachs-Ausgleichsgetriebegehäuse im MINI Countryman (Abb. 5.233) beinhaltet eine Stirnradstufe und eine Kegelradstufe (Hypoid-Triebsatz). Mit dieser Lösung wird ein großer Achsversatz zwischen Antrieb und Lage der Gelenkwelle erreicht, um die Position des Lenkgetriebes beizubehalten.

Die zweite dargestellte Ausführung basiert auf dem Schaltgetriebe MQ350 von VW für Fahrzeuge mit 4motion-Antrieb (Abb. 5.234). Der Vorderachsabtrieb ist hier eine eigene Baueinheit welche an das Kupplungsgehäuse angeflanscht wird. Der Drehmomentenabgriff erfolgt am Ausgleichsgetriebegehäuse über eine Steckverzahnung. Vorteile: Das Schaltgetriebe ist nahezu ident mit der Frontantriebsvariante aufgebaut und damit können mit einem Winkelgetriebe unterschiedlichste Wechselgetriebe mit geringen Aufwänden zu einem Allradantrieb adaptiert werden. Ausführungen mit gemeinsamem oder getrenntem Ölhaushalt sind möglich.

**Ausführungsbeispiele für Längsantrieb** Bei Fahrzeugen mit Längsantrieb ergeben sich zwei Möglichkeiten des Aufbaus.

Ein im Hauptgetriebe oder dahinter angeordnetes Verteilergetriebe wurde bereits in Abb. 5.213 (Mercedes 4matic) und Abb. 5.222 (BMW X-drive) vorgestellt. Außer in den bereits beschriebenen Allradsystemen unterscheiden sich diese beiden Verteilergetriebe durch die Art des Sei-




Vorderachse:
Verbrennungskraftmaschine
Starter-Generator
Automatik- / Doppelkupplungs- /
Automatisiertes Getriebe

Hinterachse:
E-Maschine
Einstufen Getriebe mit Abschaltung
Leistungselektronik
Batterie

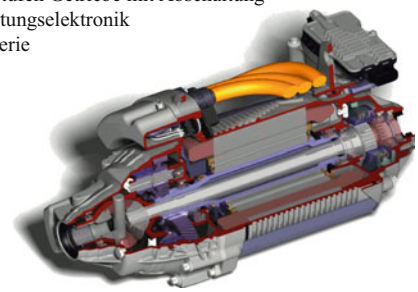


**Abb. 5.232** Elektrischer Achsantrieb

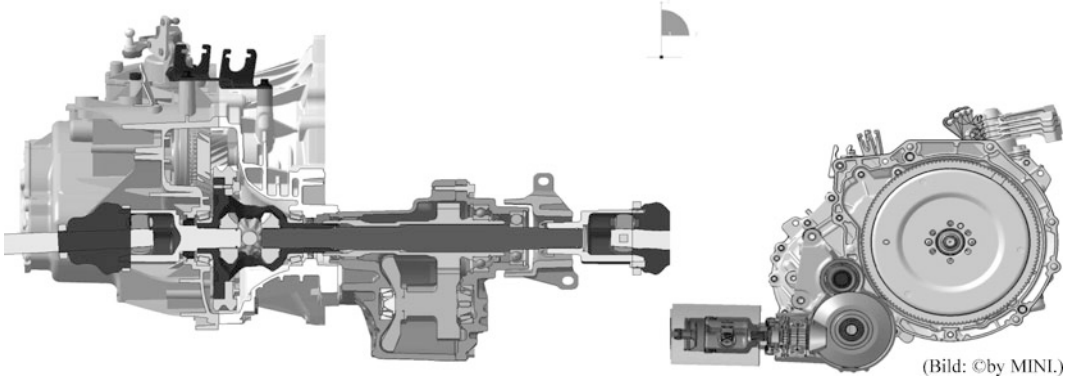



**Abb. 5.233** Power take off MINI Countryman

tenversatzes für die Antriebswelle zur Vorderachse. Die Verwendung eines ein- oder zweistufigen Zahnradsatzes ist typisch für den Einbau im beengten Tunnel einer Limousine. Im SUV und Geländewagen ist hingegen eine Zahnkette dominant in Verwendung, die zwar etwas mehr Bauraum benötigt aber kostenmäßige Vorteile bietet. Auch in den Kriterien Wirkungsgrad und Geräusch ist die Kette zumindest gleichwertig.

Neben den eigentlichen Allradkomponenten ist in einem Verteilergetriebe für den vollwertigen Geländewagen auch fast immer eine schaltbare Reduktionsstufe untergebracht (Abb. 5.235). Mit einem ausgeführten Übersetzungsbereich zwischen 2 und 3 wird die Zugkraft erhöht bzw. die Geschwindigkeit entsprechend reduziert.

Von der Getriebestruktur her werden überwiegend Planetengetriebe mit einem Übersetzungswert von circa 2,7 verwendet. In der Vergangenheit waren diese Getriebe nahezu ausschließlich unsynchronisiert und handgeschaltet, heute finden immer mehr synchronisierte Getriebe mit Aktuatorbetätigung (E-Motor) Verwendung.

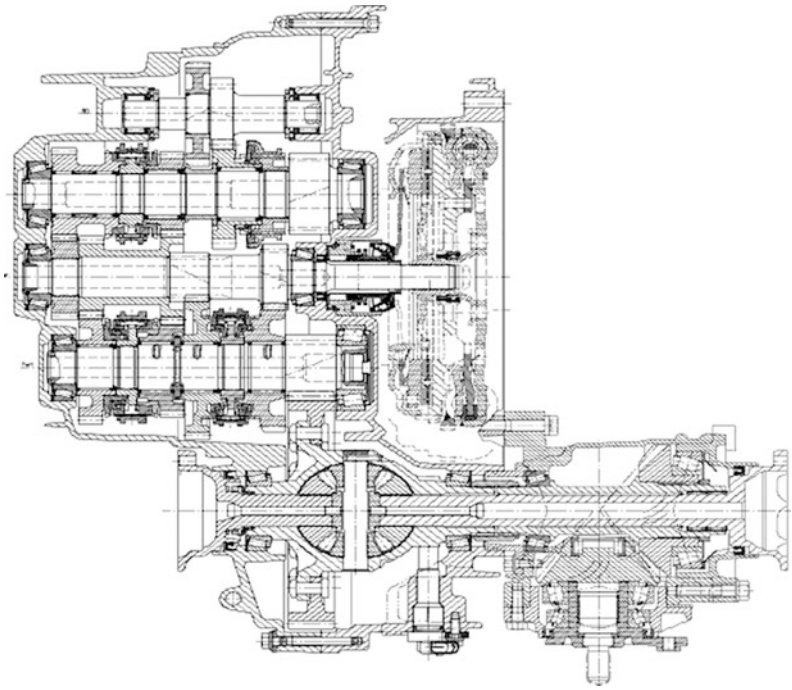


**Abb. 5.234** Schnittbild VW MQ350 4motion

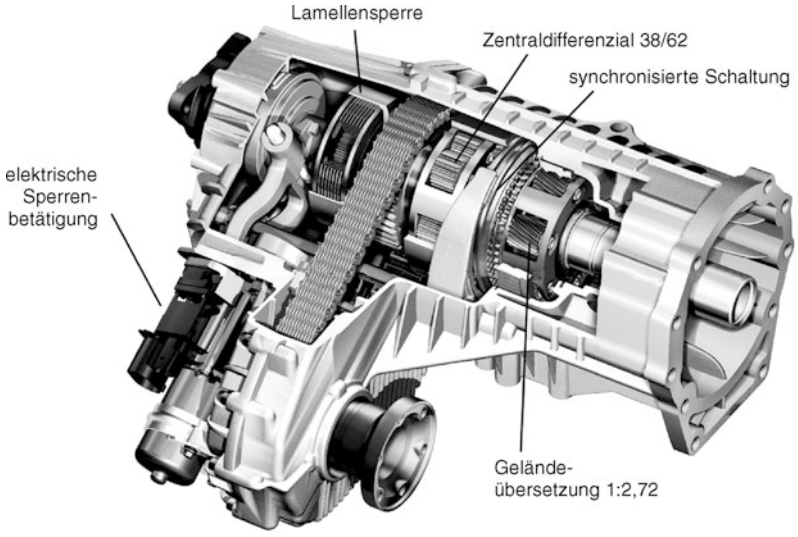



**Abb. 5.235** Verteilergetriebe mit Reduktionsstufe

In der Ausführung des AUDI Quattro, RS5 ab 2010, (Abb. 5.236) sind die Funktionen Verteilerdifferenzial und Vorderachsgetriebe im Getriebe integriert.

### 5.5.1.6 Systemauswahl

Maßgebend für eine Konzeptentscheidung sind alle in einem Lastenheft für das Fahrzeug angeführten allradspezifischen Forderungen. Die wichtigs-

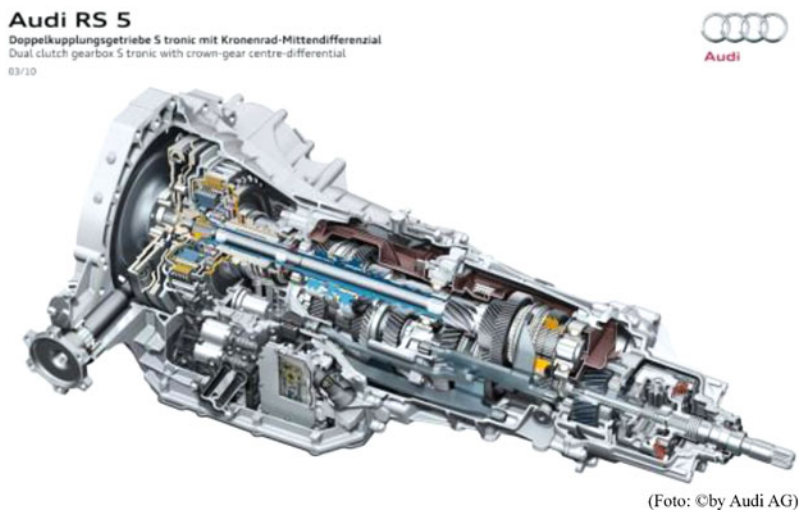



**Abb. 5.236** Audi Vorderachsantrieb integriert in Doppelkupplungsgetriebe

ten Festlegungen sind die Marktpositionierung, das zu erwartende Einsatzprofil in Kundenhand und die daraus sich ergebende Grundkonzeption des Fahrzeuges.

Weltweit gesehen ist die erhöhte Traktion noch immer *die* dominierende Kundenerwartung, für Europa sind aber die fahrdynamischen Eigenschaften mindestens ebenso wichtig.

Gemeinsam sind die Forderungen nach niedrigsten Kosten, geringem Gewicht und gutem Wirkungsgrad. Ein deutlicher Trend führt auch weg von allradspezifischen Bedienungsorganen, zumindest in Europa, und hin zur Forderung der absoluten Verträglichkeit des Allradantriebes mit anderen Regelsystemen (ABS, ESP).

In Vergleichstabellen sind alle für das Fahrzeug relevanten Systeme anzuführen und zu bewerten. Die wichtigsten Kriterien dazu sind:

- Kosten des Gesamtsystems,
- Traktion,
- dynamisches Verhalten,
- aktive/passive Sicherheit,
- Gewicht des Gesamtsystems,
- Package,
- Wirkungsgrad/Verbrauch,
- Wartung,
- Bedienung,
- Image.

Die Bedeutung dieser Kriterien ist von Fall zu Fall unterschiedlich.

#### 5.5.1.7 Einfluss auf Crashverhalten

Auch auf das Crashverhalten hat der Allradantrieb wesentlichen Einfluss. Grundsätzlich spielen die Mehrmasse des zusätzlichen Antriebsstranges sowie die geänderte Steifigkeit infolge des Antriebsstranges eine Rolle. Bei quer eingebauten Motoren wird durch den Antriebsstrang üblicherweise die Steifigkeit im Frontcrash erhöht und damit die Deformation der Fahrgastzelle verringert, wenngleich dies auch eine Erhöhung des Crashpulses bewirkt. Speziell deformierbare Gelenkwellen werden eingesetzt, um die Kraftübertragung der Gelenkwelle zu limitieren.

#### 5.5.1.8 Geräusch- und Schwingungstechnik Noise-Vibration-Harshness (NVH)

Die größere Anzahl an Bauteilen des Antriebsstranges von Allradfahrzeugen im Vergleich zu zweiradgetriebenen Fahrzeugen, stellt für den Fahrzeugakustiker eine besondere Herausforderung auf dem Weg zum geräuscharmen und komfortablen Automobil dar. Hinzu kommt, dass die bei der Derivatentwicklung (d. h. 2WD wird zu 4WD) in vielen Fällen notwendigen Änderungen an der Fahr-

zeugstruktur, am Fahrwerk und an der Abgasanlage, meist mit einer Verminderung des Akustik- und Schwingkomforts einhergehen.

Aus Sicht der Fahrzeugakustik sind folgende Charakteristika am allradgetriebenen Fahrzeug von Bedeutung (siehe auch ► Abschn. 3.4):

NVH-Verhalten der Einzelbauteile des Antriebsstranges (z. B. Getriebeeinheiten inkl. Sperren, Antriebswellen, Lamellenkupplungen): Spezielle NVH-Quellen sind z. B. Slip-Stick Effekte bei Lamelleneinheiten und Torsen-Systemen, aber auch bei verspannten Differenzialen. Abhilfe kann durch spezielle Öle bzw. Lamellenausführungen mit spezieller Oberflächenqualität geschaffen werden.

Das NVH-Verhalten des Systems Antriebsstrang (Torsionsschwingungen, Biegeschwingungen, Schwingungstransfer, Geräuschabstrahlung) ist sehr stark beeinflusst durch die erhöhte Anzahl an Aggregatlagerstellen und damit Geräuschübertragungspfaden in den Fahrzeuginnenraum.

Sehr kritisch sind die vermehrten Lastwechselschläge aufgrund möglicher Bewegungen der Abstützelemente. Diesen begegnet man mit sorgfältiger Abstimmung der Aggregate und Achslagerungen und durch gezielte Auslegung des Motor-Managements um abrupte Antriebsmomentenstöße zu glätten. Motorsteuergeräte haben hierfür in der Software spezielle Anti-Ruckel Funktionen die im Zuge der Anpassung der Fahrbarkeitsapplikation auf die Zielgrößen Ansprechverhalten und Komfort optimiert werden. Auch gezielt eingesetzte Dämpfungs- oder Reibelemente bringen Abhilfe.

Die dynamische Steifigkeit der Fahrzeugstruktur bezüglich globaler (Fahrzeugverwindung) und lokaler (Schwingungseinleitung) Schwingungsformen ist meist zu optimieren.

Dies ist unter dem Aspekt zu sehen, dass für ein modernes allradgetriebenes Fahrzeug hinsichtlich des Akustik- und Schwingungskomforts durchwegs die gleichen Ansprüche gestellt werden wie an zweiradgetriebene Fahrzeuge entsprechend des Standes der Technik.

#### 5.5.1.9 Dimensionierung

Für die Dimensionierung von Getrieben im Antriebsstrang sind hauptsächlich zwei Lastfälle von Bedeutung:

- Dauerbelastung nach Kollektiv, gemessen oder synthetisch ermittelt.
- Gewaltbruchsicherheit unter Extrembelastungen wie z. B. schnelles Einkuppeln, Verlust des Kraftschlusses einer Achse (oder eines Rades) beim Beschleunigen oder im Off-Road-Betrieb. Als Grenzwert gelten je nach Motorisierung entweder das maximal mögliche Antriebsmoment oder das Rutschmoment der Räder.
- Um leichtere Antriebsstränge mit kleineren Dimensionen zu erhalten, müssen beide oben genannten Belastungen reduziert werden. Das Kollektiv kann über die gezielte Kennliniengestaltung der Allradkupplung gesenkt werden, das Maximalmoment durch geeignete Begrenzer limitiert werden (bei Einsatz von geregelten Kupplungssystemen Stand der Technik).

#### 5.5.1.10 Allradantrieb und Regelsysteme

ABS und Fahrdynamik-Regelsysteme (ESP) gehören heute zur Standardausrüstung im Personenwagen und auch im Nutzfahrzeug.

Abhängig vom Koppelungsgrad der Achsen/Räder erfolgt auch hier eine Rückwirkung durch den Allradantrieb. Beim ABS treten Probleme bei der Bildung der Referenzgeschwindigkeit auf (Abhilfe Verzögerungssensor), bei ESP führt der Einzelbremseingriff an einem Rad auch zu Brems/Antriebsmomenten an den anderen Rädern, die zwar deutlich niedriger sind, aber die Effektivität des Systems trotzdem schmälern. Für volle ESP-Tauglichkeit ergibt sich die Forderung nach vollständiger Trennung des Drehmomentflusses zwischen den Antriebsrädern. Moderne Fahrzeugregelsysteme kombinieren das Fahrdynamik-Regelsystem mit der Allradregelung, um eine bestmögliche Synergie für das Fahrverhalten zu bewirken.

**Ausblick** Für die fahrdynamischen Regelsysteme ergeben sich in Verbindung mit elektrischen Antrieben zusätzliche Möglichkeiten. Die Fahrzeuge Mercedes SLS AMG oder Rimac Concept One (◘ Abb. 5.237) zeigen diese bereits auf.

Da moderne E-Maschinen Drehmoment-Gradienten von bis zu 8000 N m/s erreichen, können diese die Funktionen der Fahrdynamikregelungen übernehmen. Für den Rad-Einzelantrieb sind aber




**Abb. 5.237** Rimac Concept One

hohe Anforderungen an die Regelung inklusive Sensorik gegeben und es müssen die Vorgaben der funktionalen Sicherheit erfüllt werden. Es muss neben der hohen Maschinenleistung auch die Batterie den Leistungsanforderungen für das Be- und Entladen genügen.

Rimac Concept One: dies ist ein Sportwagen aus einer kroatischen Manufaktur, angetrieben von 4 elektrischen Maschinen.

Antriebsfunktionen des Rimac Concept One:

- Antrieb über 4 Räder, einzeln angesteuert,
- ABS Funktionalität,
- ESP Funktionalität,
- TC Traktionsregelung,
- 4-Rad Torque Vectoring,
- Drehmoment-Verteilung Vorne/Hinten vom Fahrer einstellbar,
- Antrieb vorne: ein-gängig,
- Antrieb hinten: zwei-gängig, lastschaltbar.

Dieses Antriebskonzept hat den Vorteil, dass die Regeleingriffe nicht über die Betriebsbremse des Fahrzeuges erfolgen, sondern über die Antriebsmaschinen. Dies heißt, dass der Regeleingriff durch sowohl Abbremsen als auch Beschleunigen von verschiedenen Rädern zur gleichen Zeit vollzogen werden kann. Somit kann das Fahrzeug auch während der Regeleingriffe weiter beschleunigt werden. Die indizierte Regelenergie kann bei negativen Drehmomenten als elektrische Energie zurück in die Batterie gespeist werden oder in Beschleunigungsenergie umgewandelt werden. Dadurch entsteht weniger Verlustleistung und der Verschleiß der Betriebsbremse kann reduziert werden.

## 5.5.2 Antriebs- und Bremsregelung

### 5.5.2.1 Unfallvorbeugende Sicherheit

Ein zweckmäßig ausgelegtes Fahrwerk trägt mit den Achsen, der Federung, Dämpfung, Lenkung und Bremsanlage erheblich zur unfallvorbeugenden Sicherheit bei. Im Zusammenhang mit der Massenverteilung werden die Traktion, die Fahrstabilität und das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs wesentlich beeinflusst.

Die Traktion hängt von der Achslast und dem verfügbaren Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn ab. Die maximale Kraftübertragung ist dann erreicht, wenn die Antriebsräder nicht durchdrehen und sich im Bereich des optimalen Antriebsschlupfs befinden. Beim Allradantrieb begrenzt diejenige Antriebsachse, die als erste den optimalen Schlupf übersteigt, die maximale Anfahrbeschleunigung oder Steigfähigkeit des Fahrzeugs.

Die zwei Antriebsachsen eines Allradfahrzeugs erlauben eine höhere Traktion als bei Einachsantrieb (Heckantrieb oder Frontantrieb). Durch besondere technische Vorkehrungen (Traktionssysteme) kann sowohl bei Fahrzeugen mit Einachsan-

trieb als auch mit Allradantrieb eine nahezu vollständige Kraftschlussausnutzung ermöglicht werden.

#### 5.5.2.2 Traktionssysteme

Neben mechanischen Sperren finden sowohl bei Einachs- wie bei Allradantrieb Aggregate Verwendung, bei denen durch die elektronische Regelung mit Fremdenergie (Hydraulik, Elektrik) eine Sperrfunktion realisiert wird (geregelte Sperren).

Neben den geregelten Sperren werden auch Allradsysteme mit geregelten Kupplungen, die im Bedarfsfall die zweite Antriebsachse zuschalten, verwendet. Die Kombination dieser Systeme mit zusätzlichen Längs- und Quersperren ist ebenfalls bekannt [202] (► Abschn. 5.5.1).

Ausführungsformen mit elektromagnetischer Längssperre und elektrohydraulischer Quersperre werden ebenso verwendet [203] wie voll hydraulische Lösungen. Die elektronische Regelung der Sperren erfolgt anhand der Radgeschwindigkeitssignale des ABS. Aus den achs- oder seitenweisen Differenzgeschwindigkeiten an Vorder- und Hinterachse kann das Steuergerät auf erforderliche Eingriffe an den Sperren schließen.

Aus Gründen der Aufwandsreduzierung kann die Funktion der geregelten Sperren durch Bremseneingriffe an den Antriebsrädern emuliert werden (Brems-Sperr-Differenzial BSD) [204]. Dies setzt voraus, dass eine ausreichende Bremsendimensionierung für eine längere Aktivierung des Bremseneingriffs vorliegt. Werden die Regelbedingungen für einen Bremseneingriff erfüllt, steuert die Pumpe des Bremsregelsystems (ABS, ASC ► Abschn. 5.5.2.3.1), DSC (► Abschn. 5.5.2.3.2) Volumen in die Bremse ein. Über die Magnetventile wird sichergestellt, dass durch eine Pulsstufenregelung des Bremsdruckes das Rad im Bereich optimalen Schlupfes gehalten wird. Das gegenüberliegende Antriebsrad kann durch den Bremseneingriff ein entsprechend dem eingestellten Bremsmoment höheres Antriebsmoment übertragen [205].

Das Prinzip des Bremseneingriffs an der Antriebsachse findet bei allen Antriebsarten Verwendung. In Erweiterung des Bremseneingriffs werden Systeme mit zusätzlichen Motoreingriff eingesetzt, die außer der reinen Traktionsregelung auch eine Beeinflussung der Fahrstabilität ermöglichen (Stabilitätssysteme).

#### 5.5.2.3 Stabilitätssysteme

Systeme, die nicht einseitig die Traktionsoptimierung sondern auch die Fzg.-Stabilisierung in den Vordergrund stellen, erfordern zusätzliche Eingriffsmöglichkeiten in den Motor und ggf. weitere Sensorik, die eine Abschätzung des jeweiligen Fahrzustands gestattet. Neben passiven Systemen, die auf Fzg.-Instabilitäten mit einer Reduzierung der Kraftschlussbeanspruchung an den Antriebsrädern reagieren, gibt es aktive Systeme, die durch ein gezieltes Aufbringen von Korrekturmomenten (radindividueller Bremseneingriff) eine Stabilisierung des Fzgs. herbeiführen.

##### 5.5.2.3.1 Passive Systeme ASC, ASR

Passive Stabilitätssysteme verwenden in der Regel ebenso wie ABS nur Eingangssignale der Raddrehzahlfühler, nur in Sonderfällen werden weitere Signale verarbeitet. Stabilitätsregelsysteme wie ASC (Automatische Stabilitäts Control) [205] oder ASR (Antriebs Schlupf Regelung) [206] bauen auf der Basishardware des ABS auf. Zweckmäßige Modifikationen der Aktorik und Elektronik passen das System für den erweiterten Aufgabenumfang an. Durch einen Schnittstellenverbund zum Antriebsstrang besteht die Möglichkeit, Antriebsmomente in kritischen Situationen zweckmäßig zu modifizieren.

◘ Abb. 5.238 zeigt den prinzipiellen Hydraulikaufbau eines ASC-Systems für Fahrzeuge mit diagonaler Bremskreisaufteilung. Zur Regelung des Antriebsschlupfs an der Antriebsachse werden zusätzliche Ventile zur Trennung des Hauptzylinders von den Bremskreisen installiert, so dass an der Antriebsachse ein individueller BSD-Druckaufbau ermöglicht wird.

Über Schnittstellen zum Motor-Management können sowohl Diesel- als auch Ottomotoren in die Regelung eingebunden werden. Bei Überschreiten kritischer Antriebsschlupfwerte wird über die Momentenschnittstelle zur Motorsteuerung eine Reduktion des Antriebsmomentes vorgenommen, wobei als Regelkreise die kombinierte Zünd-/Einspritzausblendung, die Zündwinkelverstellung sowie die

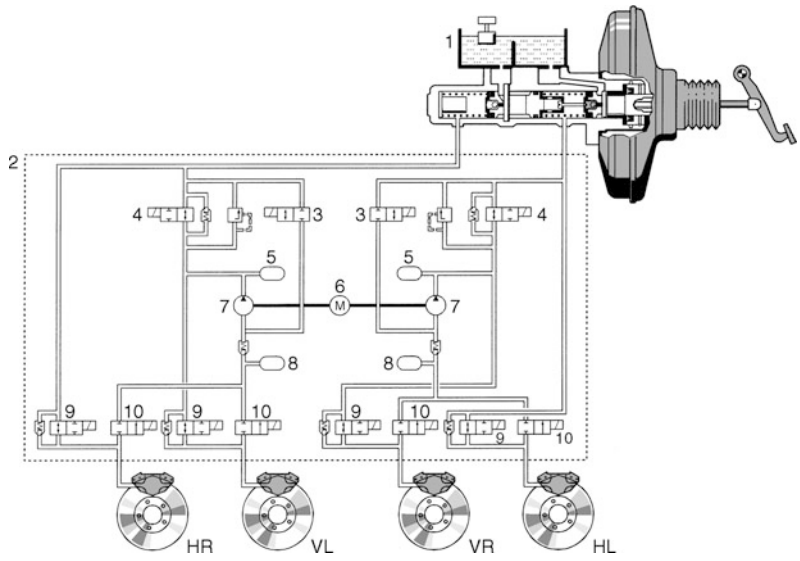



**Abb. 5.238** ABS/ASC-Hydraulikschaltplan

Drosselklappenregelung bei Ottomotoren bzw. die Einspritzmengen-Regelung bei Dieselmotoren zum Tragen kommt.

Die Aktuatorik für die Drosselklappensteuerung erfolgt überwiegend über eine elektronische Motorleistungsregelung (E-Gas). Bei Pkw Dieselmotoren wird auf die elektronische Regelung der Einspritzpumpe zurückgegriffen.

Bei Ottomotoren wird vereinzelt auf die Drosselklappe als Regelkreis verzichtet und stattdessen nur mit den Regelkreisen Zündung und Einspritzung operiert.

Um unerwünschte Pendelschaltungen während einer ASC-Regelung zu unterbinden, wird die ASC-Regelungs-Information an das Automatikgetriebe-Steuergerät übertragen.

Die negativen Auswirkungen übermäßigen Bremsschlupfs auf die Fahrstabilität an den Antriebsrädern beim heftigen Einkuppeln während eines Rückschaltvorgangs werden durch Regelkreise eliminiert, die durch einen gezielten Motoreingriff das Schleppmoment reduzieren (Motor-Schleppmomenten-Regelung MSR).

Mechanische Bremskraftregler an der Hinterachse werden weitgehend durch eine elektronische Regelung ersetzt, die sicherstellt, dass bei allen Bremsvorgängen unabhängig von der Beladung und der Fahrsituation der Bremsschlupf der Hinterräder auch bereits unterhalb der ABS-Eingriffsgrenzen in stabilitätsunkritischen Bereichen gehalten wird (Elektronische Bremskraft Verteilung EBV) [207].

Bei Bremsvorgängen während spezieller Fahrsituationen – vorzugsweise bei Kurvenfahrt oder Fahrspurwechsel – kann auftretenden Instabilitäten durch eine Cornering Brake Control CBC begegnet werden [208]. Die CBC bringt durch seitenweise unterschiedliche Bremskräfte Kompensationsmomente auf, die eine fahrzeugstabilisierende Wirkung ermöglichen.

Der Zusammenbau von Steuergerät und Hydraulikaggregat (Aktuatorik mit Pumpe und Magnetventilen) führt zu kompakten Baueinheiten mit reduzierter Anzahl externer elektrischer Schnittstellen. Der Aufwand für die Verkabelung wird hierdurch minimiert, da die Ansteuerung der Magnetventile und der elektrohydraulischen Pumpe durch interne Kontaktierung erfolgt. Das Steuergerät mit Spulenträger wird über einen „magnetischen Stecker" mit der Hydraulikeinheit verbunden.

Ausführungen mit in die Betätigung integrierter Schlupfregelhydraulik haben sich wegen der damit verbundenen Variantenvielfalt nicht durchsetzen können. Heute überwiegen bei konventionellen

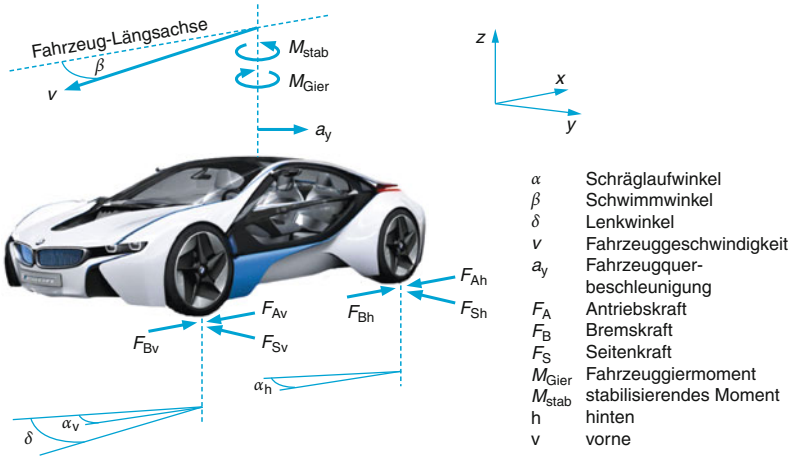



**Abb. 5.239** Funktion DSC

Verstärker-Bremsanlagen Systeme, die in Add-On-Technik in die vorhandene Bremsanlage integriert werden (► Abschn. 7.2).

#### 5.5.2.3.2 Aktive Systeme, DSC, ESP

Stabilitäts- und Traktionssysteme erleichtern das Befahren reibwertkritischer Fahrbahnen. Passive Systeme, die im wesentlichen nur den Längsschlupf, der aus den Raddrehzahlwerten abgeleitet wird, ausregeln, lassen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit unterschiedliche Eingriffe an Bremse und Motor zu. Sie wirken sich entweder in einer Antriebsmomentenreduktion oder einer Umverteilung des Antriebsmoments auf die Antriebsräder aus.

Durch die Verwendung zusätzlicher Fahrdynamik-Sensorik (Querbeschleunigung, Gierrate, Lenkwinkel) lässt sich sowohl der Fahrzustand als auch die Fahrervorgabe hinsichtlich des beabsichtigten Fahrkurses ermitteln. Aus der Zielabweichung können dann die unterschiedlichen Stellorgane, die über den Schnittstellenverbund mit dem Steuergerät kommunizieren, aktiviert werden. Die aktive Stabilisierung des Fahrzeugs erfolgt über eine radindividuelle Druckbeaufschlagung der Radbremsen, um störenden Giermomenten durch entsprechende Kompensationsmomente zu begegnen, ◘ Abb. 5.239.

Solche Systeme – u. a. Dynamische Stabilitäts Control DSC [209], Elektronisches Stabilitäts Programm ESP [210] – weisen neben der reinen DSC-Funktion zur Giermomentenkompensation durch Korrekturmomente als unterlagerten Regelkreis ebenso wie bei der ASC die Cornering Brake Control CBC auf. CBC verschleift den Übergang zum DSC-Eingriff und erlaubt hierdurch ein unter allen Fahrsituationen komfortables Eingreifen des Regelungssystems. Die prinzipielle Wirkung von CBC und DSC ist in ◘ Abb. 5.240 dargestellt.

In mehreren Studien wurde die Unfall vermeidende bzw. Unfallfolgen reduzierende Wirkung dieser Systeme nachgewiesen. Durch den Einsatz von aktiven Fahrstabilitätssystemen können erhebliche Einsparungen der Unfall-Folgekosten mit entsprechend positiven Auswirkungen für die Volkswirtschaft erzielt werden (► Kap. 9). Der elektrohydraulische Aufbau von DSC/ESP erfordert neben den Magnetventilen zusätzliche Drucksensorik, hinreichend ausgelegte Rückförderpumpen sowie bei gehobenen Komfortansprüchen Sonderbauformen der Pumpe und eine stetige Regelung zumindest der Einlassventile, ◘ Abb. 5.241.

Durch Einsatz von Mehrkolbenaggregaten kann eine wesentliche Glättung des Volumenstroms herbeigeführt werden. Gepaart mit ausreichend dimensionierten elektromotorischen Antrieben lassen sich Stabilisierungsleistungen erzielen, die den Einsatz dieser Systeme weit in den fahrdynamischen Grenzbereich bei immer noch ausreichender Stabilisierung ermöglichen.

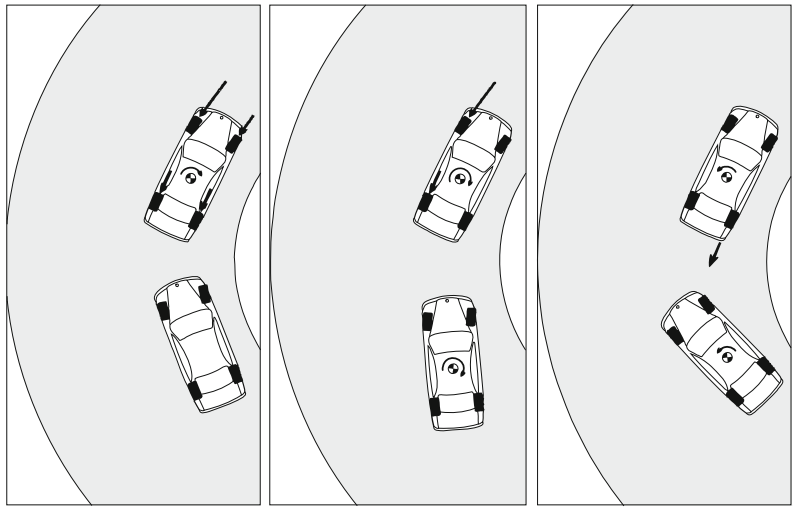



**Abb. 5.240** CBC und DSC bei Kurvenfahrt

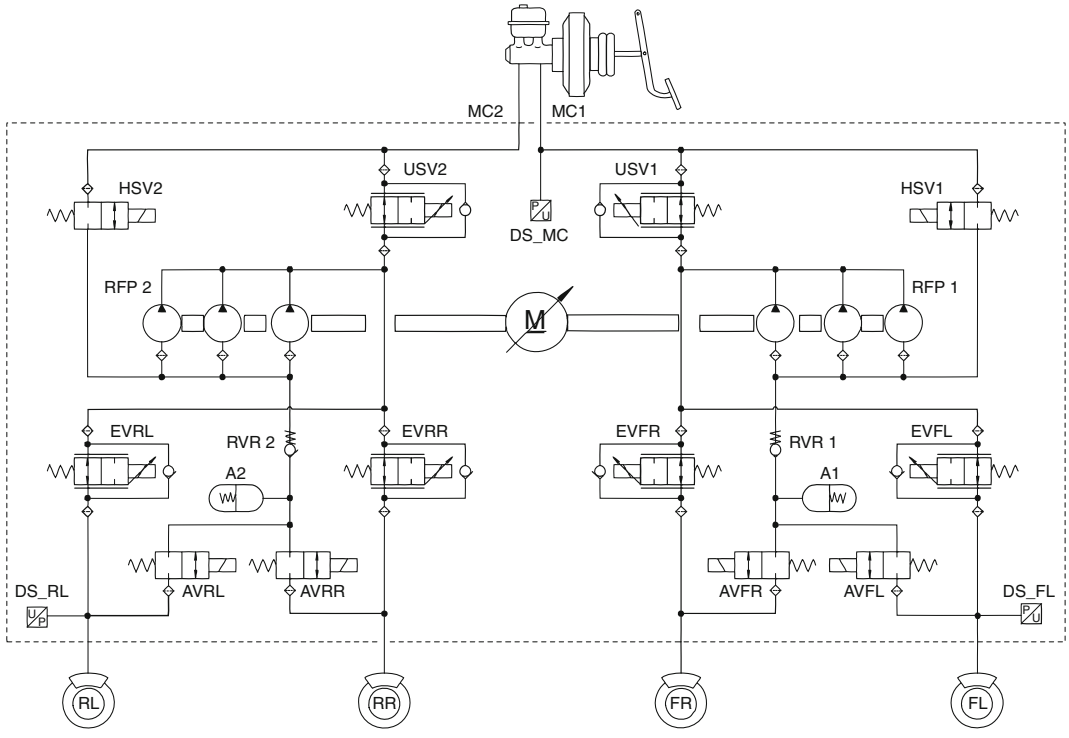



**Abb. 5.241** Hydraulikschaltplan DSC (Quelle: Robert Bosch GmbH)

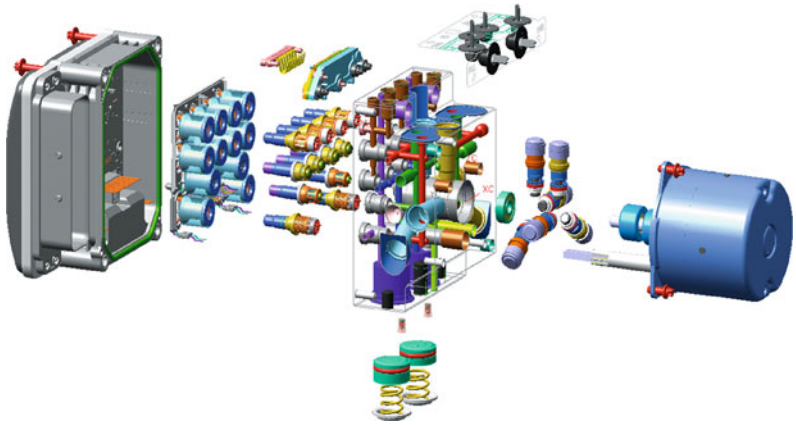


**Abb. 5.242** DSC/ESP Aggregat mit 6-Kolbenpumpe und Anbau-Steuergerät (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Die Verwendung des Mehrkolbenaggregates ermöglicht eine komfortable und akustisch unauffällige Nutzung der Hydraulikpumpe herunter bis in den Stillstandsbereich des Fahrzeugs. Abb. 5.242 zeigt eine Ausführungsform mit einer 6-Kolbenpumpe (3 Kolben/Bremskreis) und einem Anbausteuergerät.

Für das Tieftemperaturverhalten der DSC wird durch Sondermaßnahmen im Bereich des Hauptzylinders und der DSC-Pumpe der negative Einfluss der Viskositätszunahme bei tiefer Temperatur auf die Druckbereitstellung der Bremse nahezu eliminiert. Früher übliche aktive Verstärker oder elektrische Vorladepumpen werden daher nur noch vereinzelt angetroffen.

DSC Systeme können entweder in konventioneller Unterdruck-Verstärkertechnik integriert werden oder mit Hilfe von hydraulischen Verstärkern realisiert werden. Die höheren Kosten von Hydraulik-Verstärkerbremsanlagen haben bislang nur zu beschränkter Verbreitung geführt.

#### 5.5.2.3.3 Elektronisches Bremsen Management EBM

Der aktive radindividuelle Bremseneingriff der Fahrdynamik-Regelsysteme (► Abschn. 5.5.2.3.2) ermöglicht die Realisierung umfangreicher zusätzlicher Funktionsumfänge, die unter dem Sammelbegriff des Elektronischen Bremsen Managements EBM zusammengefasst werden. In Abb. 5.243 ist ein morphologischer Stammbaum des EBM exemplarisch dargestellt.

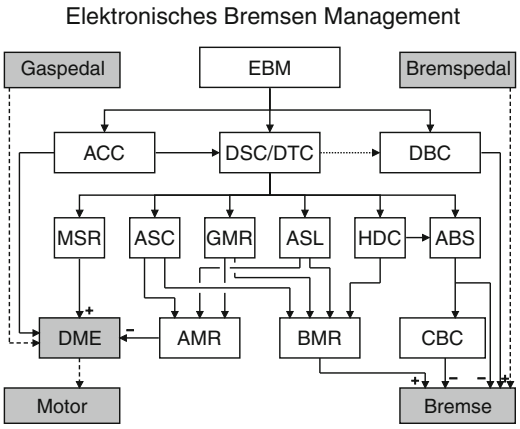



**Abb. 5.243** Morphologischer Stammbaum EBM

Das EBM stellt die Verzögerungsschnittstelle zur ACC (► Abschn. 8.5.5) dar und ermöglicht darüber die Abstandsregelung zu vorausfahrenden Fahrzeugen.

Die Notbremsfunktion der Parkbremse (► Abschn. 7.2.5.9) lässt über die Verwendung der hydraulisch/elektronischen Regeleinheit Verzögerungen bis zu 0,6 g durch aktive Druckbeaufschlagung beider Bremskreise zu.

Der hydraulische Bremsassistent (► Abschn. 7.2.4.6) wird über die Dynamic Brake Control DBC der EBM-Regeleinheit dargestellt.

Für Bergabfahrten im unteren Geschwindigkeitsbereich besteht über die Hill Descent Control HDC die Möglichkeit der Geschwindigkeits-Kon-

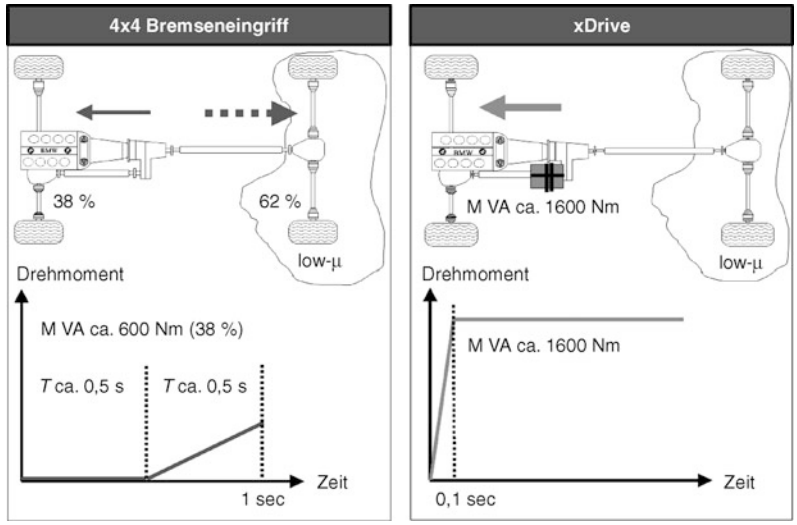



**Abb. 5.244** Zeitverhalten im Vergleich zu konventionellem 4 × 4-Antrieb

stantfahrt z. B. auch auf reibwertkritischen Fahrbahnen.

Fahrzeuggespanne werden mit Hilfe einer Anhänger Stabilisierungs Logik ASL aus dem pendelkritischen Geschwindigkeitsbereich automatisch herabgebremst.

Das EBM kann in Verbindung mit konventioneller Betätigungstechnik (Verstärkerbremsanlage, ► Abschn. 7.2.4.3) oder als Fremdkraftbremse (► Abschn. 5.5.2.4) ausgeführt sein (EHB, EMB).

#### 5.5.2.3.4 EBMx für Allradfahrzeuge

Auf Basis des EBM lässt sich über den Bremseneingriff sowohl die Funktion einer Längssperre als auch die der Quersperren an Vorder- und Hinterachse emulieren. Hierdurch lässt sich ein sehr kostengünstiges Allradkonzept mit offenen Differenzialen realisieren.

Spezielle Detektions-Algorithmen erkennen fehlenden Bodenkontakt einzelner Räder bei Geländefahrt und ermöglichen über einen schnellen Regeleingriff an den Bremsen der betroffenen Räder eine wesentliche Traktionsverbesserung.

Weitere Anwendungen des EBMx ergeben sich bei Off-Road-Fahrzeugen über situativ zweckmäßig variierte Eingriffsgrenzen des ABS, die z. B. bei Bremsungen auf Oberflächen mit losem Untergrund bei Geradeausfahrt bewusst ein Blockieren der Vorderräder und somit ein „Eingraben" mit entsprechender Verzögerung ermöglichen.

Werden aus Gründen erhöhter Traktionsanforderungen geregelte Sperren oder Kupplungen verwendet, lässt sich deren Ansteuerung ebenfalls über eine zweckmäßig erweiterte Version des EBMx darstellen.

Die gesamte Fahrdynamikregelung verfügt dadurch in Ergänzung zur Bremse und dem Motor über einen dritten Regelkreis, mit dem gezielt die Verteilung der Antriebsmomente beeinflusst werden kann.

In Abb. 5.244 ist der Vergleich des Zeitverhaltens eines Allradsystems mit reiner Sperrenemulation über einen Bremseingriff zu einem System mit geregelter Mittenkupplung (xDrive [223]) dargestellt. Der erheblich verbesserte Momenttransfer zur Vorderachse resultiert in einer wesentlich spontaneren Beschleunigung auf den dargestellten Fahrbahnverhältnissen Eis/Asphalt.

Optimale fahrdynamische Verhältnisse liegen erst vor, wenn eine gezielte achsweise Querverteilung der Antriebsmomente vorliegt (► Abschn. 5.5.1). Aus Aufwandsgründen wird man hier primär auf die Achse mit dem höheren Achslastanteil fokussieren. In Ergänzung der klassischen Fahrdynamikregelung über Bremse mit radindividueller

Eingriffsmöglichkeit, Antrieb und Längsmomentverteilung kann das resultierende Giermoment zusätzlich über seitenweise unterschiedliche Antriebskräfte pro-aktiv beeinflusst werden.

#### 5.5.2.3.5 Weiterentwicklung

Durch konsequente Systemintegration und Optimierungen in der Steuergeräte- und Hydraulik-Hardware wurde eine erhebliche Gewichts- und Bauraumeinsparung im Laufe der Entwicklung erreicht.

Die Anbausteuergeräte-Technologie hat sich bei der absoluten Mehrzahl aller Anwendungen zum Standard entwickelt. Bei wesentlich verbesserter Funktionalität wurde die Komponentenanzahl drastisch reduziert, gleichzeitig wurden Bauvolumen und Gewicht mehr als halbiert.

Durch die Fortschritte auf dem Gebiet der Mikroelektronik wurden eine höhere Rechenleistung und ein wesentlich erweiterter Funktionsinhalt ermöglicht. Schnellere Prozessoren mit vergrößertem Speicherplatz erlauben die Einbindung weiterer kundenwerter logischer Funktionen.

Die dargelegten Maßnahmen haben wesentlich zu der rasanten Verbreitung der Bremsregelsysteme bis in Fahrzeugklassen des Kompaktsegments beigetragen. Für Anwendungen mit besonderen Komfort- und Funktionsansprüchen werden Optimierungen bestehender Systeme vorgenommen.

Durch die Verwendung der EHB-Ventiltechnik (► Abschn. 5.5.2.4) kann der Schaltkomfort wesentlich verbessert werden. Optimierungen an der Rückförderpumpe mit dem Ziel einer schnelleren Druckbereitstellung und einer Reduktion der hydraulischen Pulsation führen zu einer Leistungsfähigkeit, die der der Fremdkraftbremssysteme EHB und EMB (► Abschn. 5.5.2.3.2) sehr nahe kommt. Vorteilhaft ist dabei, dass weiterhin mit dem herkömmlichen 12 V-Bordnetz operiert werden kann.

### 5.5.2.4 DSC, ESP mit Fremdkraft-Bremsanlage

Verstärker-Bremsanlagen erzeugen die Bremskraft am Rad über die Bremsbetätigung des Fahrers. Die Fahrerfußkraft erfährt hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Druckaufbau eine hydraulische oder pneumatische Verstärkung.

Im Gegensatz zu der Verstärker-Bremsanlage wird bei Fremdkraft-Bremsanlagen eine der Fahrerfußkraft proportionale Aussteuerung des Bremsmoments vorgenommen. Hierzu kommen grundsätzlich elektro-hydraulische (EHB) oder elektromechanische (EMB) Systeme in Frage.

Elektro-mechanische Bremssysteme sind ebenso wie elektrohydraulische Systeme wegen ihrer elektronischen Signalübertragung dem Brake-by-Wire zuzuordnen. Ausführungsformen der EHB werden vereinzelt in Pkw's verwendet, ein weiteres Einsatzgebiet ergibt sich bei Fahrzeugen mit Hybridantrieb (► Abschn. 5.5.2.5).

Während die bisherigen Ausführungsformen der EHB über eine hydraulische Rückfallebene verfügen, ist dies bei der EMB nicht vorgesehen. Die EMB erfordert ein Systemdesign, das sowohl hinsichtlich der Aktorik als auch im Hinblick auf Bordnetz und Datenkommunikation spezielle Vorkehrungen hinsichtlich Verfügbarkeit und Hilfsbremswirkung erforderlich macht.

Die EMB kann als direkt elektro-mechanisch zuspannender Sattel ausgeführt sein. Eine selbst verstärkende Variante stellt geringere Anforderungen an die Höhe der Bordnetzspannung.

Der Übergang von Add-On-Systemen zu integrierten Anlagen, die sowohl die Betriebsbremsfunktion als auch die Funktion der Stabilitätsregelung einschließen, kann mit Brake-by-Wire-Systemen erfolgen. Die Brake-by-Wire-Lösungen können entweder als Elektro-Hydraulische-Bremse (EHB) [211] oder Elektro-Mechanische-Bremse (EMB) [212] ausgeführt sein. In beiden Fallen wird der Bremswunsch des Fahrers sensiert und über ein Steuergerät in entsprechende Stellbefehle an die Aktuatorik gegeben. Die Rückmeldung über das eingestellte Bremsmoment erfolgt entweder über Drucksensoren oder über eine direkte Messung der Zuspannkraft.

### 5.5.2.5 Bremssysteme für Fahrzeuge mit Hybridantrieb

Neue Aspekte der Systemauslegung ergeben sich bei Fahrzeugen mit Hybridantrieb, bei denen ein möglichst hoher Anteil der Verzögerungsenergie als

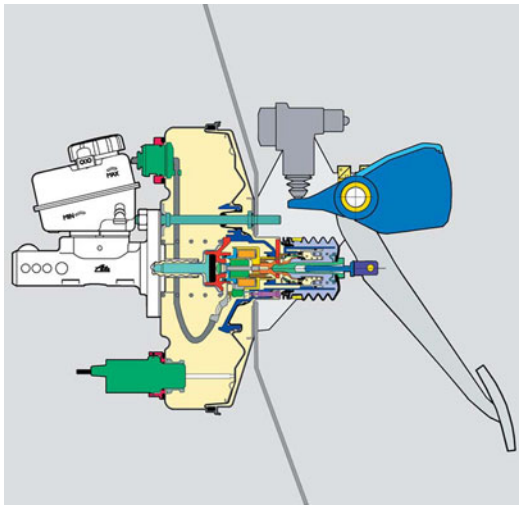


**Abb. 5.245** Bremskraftverstärker für pedal-entkoppeltes Bremssystem

elektrische Energie zurückgewonnen werden soll. Eine Aktivierung der Reibungsbremse soll hier nur bei voll geladenem Energiespeicher oder bei hohen Verzögerungen erfolgen [235].

In allen anderen Fällen hat die Rekuperation über die als Generator arbeitende Elektromaschine zu erfolgen.

Der Verzögerungswunsch des Fahrers führt entsprechend der Betriebsstrategie zu unterschiedlichen Aktivierungen der generatorischen Bremsung sowie der Reibungsbremse. Abhängig von der Betriebsbremsanlage – Brake-by-Wire oder Verstärkerbremse – können zusätzliche Vorkehrungen erforderlich werden, um spezielle Anforderungen aus dem Rekuperationsbetrieb erfüllen zu können.

Weitere pedalentkoppelte Ausführungsformen der Bremsanlage für Hybridfahrzeuge bestehen in Sonderbauformen pneumatischer Verstärker, Abb. 5.245 die eine By-Wire-Funktionalität emulieren.

EH-Systeme können entweder mit Speichertechnik und entsprechend zugeordneten stetigen Ventilen kombiniert werden, oder es werden elektro-hydraulische Plunger eingesetzt.

Sowohl die EM-Lösung als auch die EH-Plungerlösung stellen erhöhte Ansprüche an die elektrische Energieversorgung.

Kombinationen von konventioneller Betätigung an der Vorderachse und elektro-mechanischer Zuspannung an der Hinterachse (Hybridbremse [224]) werden vor dem Hintergrund der Beibehaltung des 12 V Bordnetzes diskutiert.

### 5.5.2.6 Sensorik

Die Stabilitätsregelsysteme sind auf Sensorsignale angewiesen, die sowohl das Radverhalten als auch den Fahrzustand präzise beschreiben. Die wesentlichen Bauarten sind die Raddrehzahlfühler und die Fahrdynamiksensoren.

#### 5.5.2.6.1 Raddrehzahlfühler

Bei der Radgeschwindigkeitssensorik wird zwischen „passiven“ und „aktiven“ Sensoren unterschieden. Passive Drehzahlfühler arbeiten nach dem Induktionsprinzip und liefern ein zur Drehzahl proportionales Spannungssignal, das über entsprechende Eingangsbeschaltungen im Steuergerät verarbeitet wird.

Der Drehzahlfühler tastet eine Impulsscheibe ab, die entweder als eigenständiges Bauelement im Achsbereich angordnet ist oder im Radlager integriert wird.

Da die Bewegung der Impulsscheibe Voraussetzung für die Spannungserzeugung des Sensors ist, lassen passive Sensoren keine Nullgeschwindigkeits-Messung zu.

Aktive Systeme basieren auf dem Hall Effekt oder nutzen das magnetoresistive Prinzip. Diese Sensoren können bereits aus dem Stillstand heraus ein Geschwindigkeitssignal abgeben. Durch ihre Spannungsversorgung ist bei aktiven Sensoren ein größerer nutzbar Luftspaltbereich zwischen dem Polrad und dem Sensor möglich. Eine weitere Steigerung möglicher Luftspalte ergibt sich mit Einsatz von kodierten (aufmagnetisierten) Impulsscheiben.

#### 5.5.2.6.2 Fahrdynamiksensorik

Außer der Radgeschwindigkeitsinformation sind für fahrdynamische Regelsysteme mit aktiver Bremskrafteinsteuerung Sensoren zur Erfassung der Fahrdynamik erforderlich. Die Sensorsignale für die Gierrate [213], die Querbeschleunigung und den Lenkwinkel werden zur Ermittlung des Soll- und des Istkurses verwendet. Um Übergangs-

zustände genauer unterscheiden zu können, wird zusätzlich der Bremsdruck sensiert.

Die Lenkwinkelsensorik zur Ermittlung des Fahrerwunsches bei DSC-Systemen muss neben der aktuellen Lenkradstellung auch den Lenkwinkelbereich erfassen können. Neben Sensoren in Potentiometer-Technologie werden auch digitale Sensoren auf opto-elektronischer oder Hall-Effekt-Basis verwendet.

Drucksensorik ist sowohl bei Brake-by-Wire Lösungen als auch bei konventionellen DSC-Systemen mit Verstärkertechnik erforderlich.

## 5.6 Abgasanlagen

### 5.6.1 Aufgaben und Komponenten der Abgasanlage

Abgasanlagen führen das bei der Verbrennung des Kraftstoff-Luftgemisches im Motor entstehende Abgas ins Freie. Die Abgasanlage und die darin verbauten Abgasnachbehandlungskomponenten (Katalysatoren und Filter) übernehmen die Reinigung des Abgases und die notwendige Dämpfung des Abgasgeräusches. Dabei müssen gesetzlich vorgeschriebene Grenzwerte erreicht werden. In modernen Dieselabgasanlagen findet zusätzlich die Filterung und Verbrennung von Rußpartikeln statt, sowie die Umwandlung schädlicher $NO_x$-Bestandteile in $N_2$. Durch die Abstimmung der Abgasanlage an den Motor wird dessen Leistungs- und Drehmomentvermögen positiv beeinflusst. Zusätzliche Anforderungen wie fahrzeugtypischer Sound, geringes Gewicht (Kraftstoffverbrauch), Dauerhaltbarkeit, Optik (z. B. Endrohre) vervollständigen das Aufgabenspektrum einer Abgasanlage.

Eine Abgasanlage besteht prinzipiell aus *Abgaskrümmer*, *Katalysatoren*, *Partikelfilter (bei Diesel)*, *Sensorik*, *Schalldämpfer*, *Endrohr*, *Aufhängungen*, *Rohrleitungen*, *Verbindungselementen* (◘ Abb. 5.246).

Weitere Bauteile, wie z. B. Abgasrückführleitung, Turbolader, Entkopplungselemente, Injektoren, Verdampfer, Abgasklappe, Mischer, Schwingungstilger, etc. werden je nach Fahrzeug- und Motorkonzept in der Abgasanlage zu einem Gesamtsystem zusammengefügt.

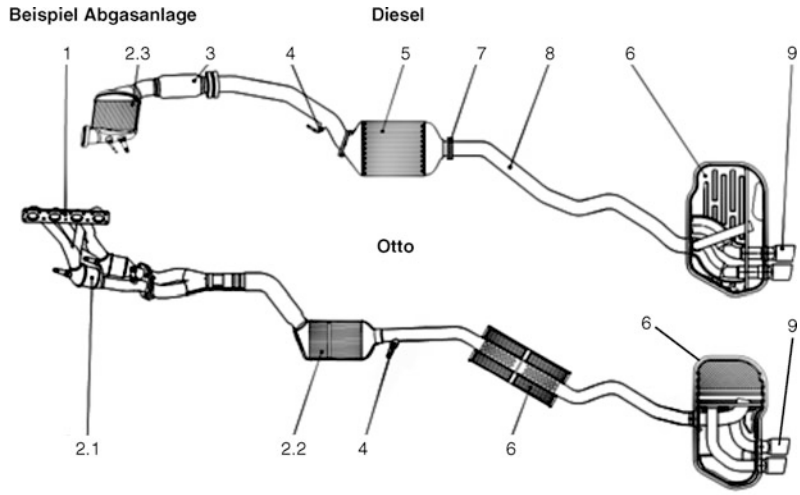
*Der Abgaskrümmer* ist das erste Bauteil einer Fahrzeugabgasanlage nach dem Motor. Die Hauptaufgabe des Krümmers ist, die Abgasströme aus den Auslasskanälen des Motors zusammenzuführen. Die Krümmergestaltung und die Gestaltung der am Krümmer oder Abgasturbolader angebundenen Rohre bzw. Katalysatoren haben einen erheblichen Einfluss auf das Leistungs- und Drehmomentverhalten des Motors sowie auf das Emissionskonzept des Fahrzeugs. Beim 4-Zylindermotor werden daher im Regelfall die Krümmerrohre der Zylinder mit maximalem Zündabstand zuerst zusammengeführt (Zylinder 1 und 4, bzw. 2 und 3), um eine negative Beeinflussung der Gaspulsationen auf den Ladungswechsel zu minimieren.

Die transiente Wärmekapazität des Krümmers spielt für die danach verbauten Abgasnachbehandlungssysteme ebenfalls eine wichtige Rolle und sollte möglichst gering sein, um ausreichend Wärme für nachgeschaltete Katalysatoren zur Minimierung der Schadstoffemissionen bereit zu stellen.

Ein *Turbolader* dient zur Drehmoment- und Leistungssteigerung des Motors. Seine Turbinenschaufeln dämpfen dabei die vom Motor erzeugten Gaspulsationen. Turbomotoren erfordern deshalb weniger aufwändige Abgasanlagen als Saugmotoren.

*Katalysatoren* vermindern bzw. eliminieren die Verbrennungsschadstoffe im Abgas von Otto- und Dieselmotoren durch Oxidations- oder Reduktionsvorgänge. Als Katalysatoren kommen in der Regel wabenartige Strukturen zum Einsatz, die längs durchströmt sind und eine große überströmte Oberfläche für die Katalyse der chemischen Reaktionen bieten. Je nach Anforderung werden ein oder mehrere Katalysatoren eingesetzt. Bei der Platzierung unterscheidet man motornahe Katalysatoren (direkt nach Krümmer bzw. nach Turbolader) und Unterboden-Katalysatoren. Eine motornahe Position ist wünschenswert um nach Motorstart möglichst schnell eine hohe Konvertierungsrate zu erreichen. Wegen des begrenzten Bauraumes im Motorraum wird aber oft ein zusätzliches Katalysatorvolumen im Unterboden angebracht.

*Dieselpartikelfilter* dienen zur Reduktion von Partikelemissionen bei Dieselmotoren, deren Abgase außer den gasförmigen auch feste Schadstoffe in Form von Rußpartikeln enthalten. Im Gegensatz




1 Abgaskrümmer, 2.1 Vorkatalysator, 2.2 Unterbodenkatalysator, 2.3 Motornaher Katalysator,
3 Entkoppelelement, 4 Sensorik, 5 Dieselpartikelfilter, 6 Mittel-, Nachschalldämpfer,
7 Verbindungselemente, 8 Rohrleitungen, 9 Endrohre

**Abb. 5.246** Beispiele moderner Abgasanlagen

zu Katalysatoren wird bei Partikelfiltern das Grundmaterial direkt durchströmt, wodurch die Partikel im Filter verbleiben. Ruß, der Hauptbestandteil der Partikel ist, wird durch Oxidation mit dem im Abgas enthaltenem Sauerstoff ($O_2$) oder Stickstoffdioxid ($NO_2$) entfernt. Bei diesem als Regeneration bezeichneten Vorgang verbleiben nicht oxidierbare Bestandteile als Asche im Filter zurück.

*Sensoren* im Abgasstrang für chemische und physikalische Größen dienen der Funktionsüberwachung und der Regelung von Abgasreinigungssystemen.

Die für die Regelung beim Otto-Motor notwendige Kenntnis des Sauerstoffgehaltes im Abgas wird durch Lambdasonden direkt gemessen und von der Motorsteuerung entsprechend verarbeitet. Je nach Abgasanlagenkonfiguration kommen auch $NO_x$-Sensoren, Temperatur- und Druckmesssonden zum Einsatz.

*Schalldämpfer* sind meist eine Kombination verschiedener Dämpfungsmechanismen. Durch gezielte Auslegung eines Schalldämpfers und durch seine Lage im Abgassystem wird sowohl die Dämpfung der Gaspulsationen als auch das gesamte mechanische Schwingverhalten stark beeinflusst. Abhängig von der Lage im System unterscheidet man Vor-, Mittel- und Nachschalldämpfer. Bei Dieselmotoren wird auf diese vorderen Schalldämpfer zunehmend verzichtet, da Partikelfilter und Katalysatoren bereits ein ausreichendes Dämpfungsverhalten aufweisen. Im Schnitt wird für die Auslegung der Größe einer Schalldämpferanlage beim Ottomotor das 10fache des Hubvolumens angesetzt. Dieser Wert kann allerdings stark variieren, je nachdem ob es sich um ein betont sportliches oder komfortorientiertes Fahrzeug handelt. Neben der Erfüllung gesetzlicher Geräuschvorschriften hat die Erzeugung eines markentypischen und fahrzeugtypischen (z. B. Roadster) Klangbilds des Abgasgeräusches einen hohen Stellenwert.

*Die Rohrleitungen* einer Abgasanlage verbinden die einzelnen Abgaskomponenten zu einem abgestimmten System. Die Länge und der Querschnitt der Rohre sowie die Art der Zusammenführung beeinflussen die Leistungscharakteristik des Motors und das akustische Verhalten. Isolierte Rohre (z. B. durch Luftspalt) verändern den Wärmehaushalt in einer Abgasanlage und beeinflussen damit das Anspringverhalten des Katalysators entscheidend.

*Verbindungselemente.* Für die Montage, bzw. Demontage wird eine Abgasanlage in Baugruppen aufgeteilt. Als wieder montierbare Verbindun-

gen werden Flanschverbindungen, Rohrschellen, V-Bandschellen, Kugelschellen und Verbindungshülsen eingesetzt.

*Aufhängungen* halten die Abgasanlage an dem Fahrzeug fest. Dabei soll die Übertragung von Schwingungen der Abgasanlage auf die Karosserie durch vibrationsdämpfende und schwingungsausgleichende Gummielemente vermindert werden. Die Aufhängung der Abgasanlage sollte vorzugsweise in den Schwingungsknoten des Gesamtsystems erfolgen.

## 5.6.2 Katalysatoren

Die Emissionen von Verbrennungsmotoren enthalten im Idealfall nur die Produkte vollständiger Verbrennung, also Wasser ($H_2O$) und Kohlendioxid ($CO_2$). Von realen Motoren werden jedoch außerdem eine Reihe von unerwünschten Abgaskomponenten emittiert. Gesetzlich limitiert sind die Emissionen von Kohlenwasserstoffen (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden ($NO_x$) sowie Partikeln (PM). Zur Minderung gasförmiger unerwünschter Abgaskomponenten werden Katalysatoren eingesetzt.

Die Katalysatoren im Automobilbau bestehen aus feinzelligen wabenförmigen Strukturen aus keramischen oder metallischen Werkstoffen. Man unterscheidet zwischen beschichteten Systemen, bei denen der Monolith aus einem *Träger*, einer inerten Matrix, besteht auf die eine katalytisch aktive *Beschichtung* aufgebracht ist und *Vollextrudaten*, bei denen die Aktivkomponente in der gesamten Matrix gleichmäßig verteilt ist. Bei beschichteten Systemen wird auf den Träger ein *Washcoat* aufgebracht, der die Aktivkomponente enthält. Die Zelldichte der Monolithe reicht je nach Einsatzfall von 200 cpsi (Zellen pro Quadratzoll) bis hin zu 1200 cpsi, mit Wandstärken zwischen 12 mil (milli inch) bei Vollextrudaten und 2 mil zuzüglich Beschichtung bei Metallträgern. Dünnwandige, hochzellige Substrate haben ein besseres Umsetzungsvermögen, weil sie eine hohe aktive Oberfläche mit schnellem Anspringverhalten nach dem Kaltstart verbinden.

Konventionelle Ottomotoren sind standardmäßig mit *Dreiwegekatalysatoren* ausgerüstet. Durch die Regelung des Verhältnisses von Kraftstoff und Verbrennungsluft auf das stöchiometrische Verhältnis $\lambda = 1$ im Abgas, werden die HC- und CO-Emissionen am Katalysator zu $H_2O$ und $CO_2$ oxidiert und umgekehrt das $NO_x$ zu Stickstoff ($N_2$) reduziert.

Mager betriebene Motoren verbrennen bei Sauerstoffüberschuss. Daher werden bei diesen Motortypen die HC- und CO-Emissionen mit reinen *Oxidationskatalysatoren* umgesetzt. Zur Verminderung der $NO_x$-Emissionen wird bei mager betriebenen Ottomotoren ein *$NO_x$-Speicherkatalysator* eingesetzt. Dieser Katalysator speichert im Betriebszustand $\lambda > 1$ das vom Motor emittierte $NO_x$ in Form von Metallnitrat. Sobald der Katalysator seine maximale Speicherkapazität erreicht hat wird im Motorbetriebszustand $\lambda < 1$ das gebundene $NO_x$ in Form von $NO_2$ wieder ausgespeichert (desorbiert) und nach der Reaktion wie sie auch auf dem Dreiwegekatalysator stattfindet zu $N_2$ reduziert.

Bei Dieselmotoren genügt zur Erfüllung der $NO_x$-Grenzwerte der Emissionsstufe Euro 5 seit 2009 in der Regel die Anpassung der Verbrennung mittels Einspritzpunktverschiebung und Abgasrückführung. Für Euro 6 ab 2014 sowie für die amerikanischen Emissionsgrenzwerte Tier2 Bin 5 ist eine zusätzliche $NO_x$-Nachbehandlung erforderlich. Zur Wahl steht neben dem $NO_x$-Speicherkatalysator die SCR-Technologie (Selektive Katalytische Reduktion). Dabei werden in einem speziellen Katalysator unter kontinuierlicher Eindüsung einer wässrigen Harnstofflösung (AdBlue™, in USA auch DEF – Diesel Exhaust Fluid) die Stickoxide zu Wasser und molekularem Stickstoff reduziert.

Das SCR-System (Injektor, Katalysator) ist meist nicht motornah angeordnet, sondern befindet sich zwischen dem Dieseloxidationskatalysator und dem Partikelfilter oder sogar nach dem Partikelfilter. Um dennoch eine ausreichende Betriebstemperatur im SCR-Katalysator sicherzustellen, muss die vordere Abgasanlage häufig erweiterte Isolationsmaßnahmen beinhalten. Außerdem kommt der Auslegung der Mischstrecke zwischen AdBlue™ Injektor und SCR-Katalysator eine große Bedeutung zu, um eine möglichst vollständige Umwandlung des AdBlue™ zu Ammoniak und eine gleichförmige Verteilung im

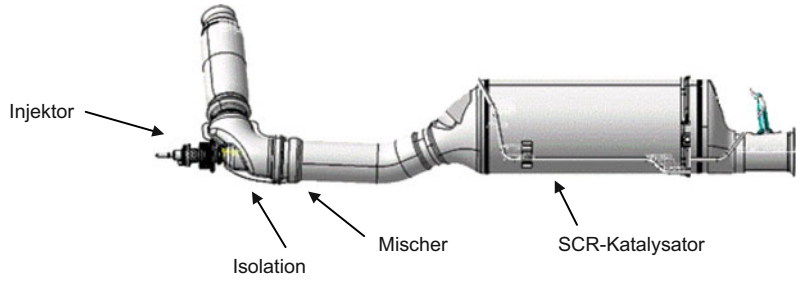



**Abb. 5.247** SCR-Mischstrecke und SCR-Katalysator

nachgeschalteten Katalysator zu erreichen (siehe Beispiel in Abb. 5.247).

Um die Anzahl der Substrate zu reduzieren wird versucht verschiedene Funktionen zu kombinieren. So wird die SCR Beschichtung mehr und mehr in dem Partikelfilter integriert, um das zu Verfügung stehende Volumen für katalytische Reaktionen zu nutzen. Somit wird es möglich für Dieselmotoren ein komplettes motornahes Abgasnachbehandlungssystem bestehend aus Oxydationskatalysator (für HC- und CO) und Partikelfilter mit SCR-Beschichtung (für $NO_x$ und Ruß) zu realisieren.

## 5.6.3 Partikelfilter

Partikelemissionen sind hauptsächlich ein Problem bei Dieselmotoren und im geringen Maße auch von direkt einspritzenden Ottomotoren. Das Größenspektrum der Partikel hat typischerweise ein Maximum bei ca. 100 nm. Diese Partikel sind Agglomerate von Kohlenstoff-Kernen mit angelagerten Kohlenwasserstoffen. Ein weiterer Bestandteil ist Asche, die sich sowohl in den Kondensaten (als Kondensationskeim) als auch in den Agglomeraten finden (▶ Abschn. 5.2.9). Zur Eliminierung der Partikel aus dem Abgas werden derzeit hauptsächlich Filter aus keramischen Monolithen verwendet. Dabei sind die Kanäle wechselseitig auf der Ein- bzw. Auslassseite verschlossen. Das Abgas passiert die Kanalwand und Partikel werden dabei weitestgehend durch *Oberflächenfiltration* als Filterkuchen zurückgehalten.

Durch die kontinuierliche Einlagerung von Ruß und Asche im Filter steigt der Abgasgegendruck. Um dem entgegenzuwirken muss der Ruß in regelmäßigen Abständen abgebrannt werden („Regeneration"). Bei diskontinuierlicher *thermischer Regeneration* wird durch die Motorsteuerung die Abgastemperatur über die Zündgrenze von Ruß auf ca. 650 bis 700 °C angehoben. Der Ruß brennt mit $O_2$ ab. Um die Zündtemperatur des Rußes herabzusetzen und eine vollständige Regeneration des Filters zu gewährleisten werden teilweise katalytisch wirksame Kraftstoff-*Additive* verwendet Die dabei entstehenden Additiv-Aschen verringern zusätzlich zu den vorhandenen Ölaschen jedoch die Lebensdauer des Filters.

Rein motorische Maßnahmen zur Erhöhung der Abgastemperatur erlauben eine Filterregeneration nicht unter allen Betriebsbedingungen. In Ergänzung dazu besteht die Möglichkeit, nachmotorisch Kraftstoff beispielsweise durch Verdampfung ins Abgas einzubringen. Oxidation des Kraftstoffs an vorgeschalteten Katalysatoren oder an selbst katalytisch beschichteten Filtern erhöht die Abgastemperatur auf das für die Regeneration nötige Niveau (Abb. 5.248).

Die Reaktion zwischen $NO_2$ und Ruß wird zur *kontinuierlichen Regeneration* ausgenutzt. Diese Reaktion findet schon bei Temperaturen um 250 bis 300 °C statt.

Wesentlichen Einfluss auf die Regeneration eines Partikelfilters haben die Anströmung und die Verteilung der Rußbeladung über den Filterquerschnitt. Eine möglichst homogene Strömungs- und Temperaturverteilung führen zu einer gleichmäßigen Beladung des Filters. Gleichmäßige Rußverteilung ist wiederum eine Voraussetzung für eine über das ganze Filtervolumen vollständige Regeneration bei gleichzeitig minimierter thermischer Belastung für das Filtersubstrat.

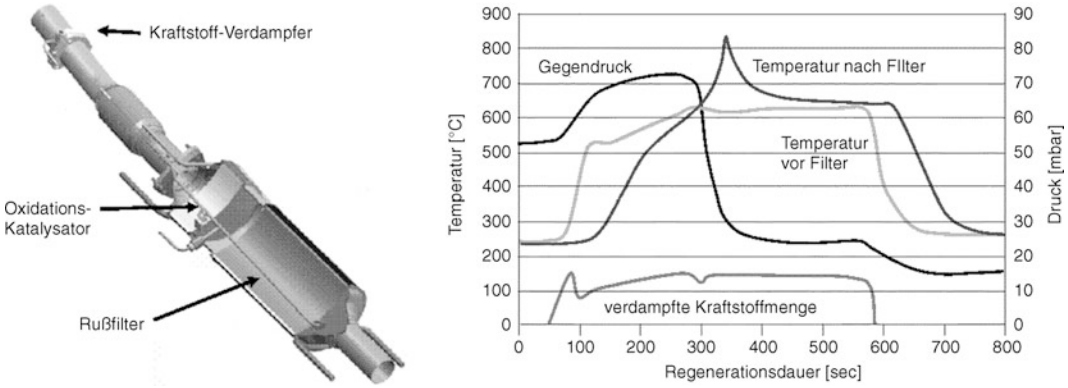



**Abb. 5.248** Außermotorische Regenerationsunterstützung mittels Kraftstoff-Verdampfer

Mit der nächsten Emissionsstufe Euro 6c in 2017 wird das Partikelgrenzwert für direkt einspritzenden Ottomotoren um Faktor 10 auf $6 \cdot 10^{11}$/km reduziert, den gleichen Wert den Dieselmotoren bereits seit 2011 erfüllen müssen. Der Einsatz eines Partikelfilters ist eine der Möglichkeiten um diesen Wert zu erreichen. Wegen der höheren Temperaturen als im Dieselmotorenabgas und der Präsenz von Sauerstoff während der Schubphasen kann die Regeneration oft und selbständig erfolgen. Der GPF (Gasoline Particulate Filter) wird somit nie größere Rußmengen beinhalten und kann deswegen aus preisgünstigeren Keramikmaterialen als einem DPF hergestellt werden. Auch hier ist die Integration einer Beschichtung möglich um eine kombinierte Rußfilterung und katalytische Funktion zu erreichen.




**Abb. 5.249** Detailschnitt eines motornahen Dieselpartikelfilters mit vorgeschaltetem Oxidationskatalysator

## 5.6.4 Canning und Monolith-Lagerung

Als *Canning* bezeichnet man die Lagerung von Substraten oder Trägern in einem metallischen Gehäuse, welches in die Abgasanlage integriert und mit Abgas durchströmt wird. Keramische Substrate sind Monolithe, die durch hohe Druckfestigkeit in Längsrichtung aber durch geringe mechanische Stabilität quer zur Strömungsrichtung gekennzeichnet sind.

Für die Lagerung des Monolithen im Blechgehäuse wird meist eine *Lagerungsmatte* eingesetzt (Abb. 5.249).

Dadurch werden zum einen die geometrischen Toleranzen der Substrate egalisiert, zum anderen muss die Lagerungsmatte aber auch die im Betrieb unter wechselnden Temperatur- und Druckverhältnissen auftretenden Haltekräfte für den Monolith aufnehmen. Daneben dient die Matte als thermische Isolation nach außen (Reduzierung der Oberflächentemperatur) und nach innen (Wärmespeicher im Substrat). Ausreichend Haltekräfte bedingen einen entsprechenden Druck zwischen Träger und Matte. Zielkonflikt zwischen Haltbarkeit und der Funktion des Trägers: Dünnwandige Hochzeller

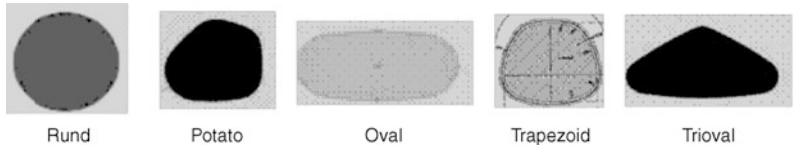



**Abb. 5.250** Konturbeispiele heutiger Katalysatoren oder Partikelfilter

haben weniger Festigkeit, sind also bruchempfindlicher, andererseits haben diese höhere Konvertierungsraten.

Unrunde Formen ergeben sich häufig aus der Einbausituation im Fahrzeug, die Festigkeit nimmt abhängig von der Unrundheit ab (Abb. 5.250).

Bei Lagerungsmatten wird grundsätzlich zwischen quellenden und nicht quellenden Materialien unterschieden. Die keramischen Fasern bei Quellmatten werden mit Vermikulliten (= Glimmerbestandteile) vermischt, die zu einer Volumenvergrößerung im Betrieb bei ausreichend Temperatur führen. Die Materialien werden durch einen Binder in eine verarbeitungsfähige Form als Matte gebracht. Eine typische Verteilung ist 10 % Binder, 45 % Fasern, 45 % Vermikullit. Nicht quellende Matten bestehen fast ausschließend aus reinen Fasern (≥ 90 %) und Binder. Wichtigste Kenngröße der Matten ist das GBD (engl.: gap bulk density). Es charakterisiert die Verpressung einer bestimmten Masse des Mattenmaterials im Spalt zwischen Monolith und Rohrmantel.

Das GBD-Fenster beschreibt den Bereich zwischen dem GBD bei maximal möglichem kurzeitigem Druck, bedingt durch die Substratfestigkeit, und dem GBD bei minimal notwendiger Haltekraft (Abb. 5.251).

Neben den physikalischen Anforderungen unterliegen Lagerungsmatten auch Umweltgesichtspunkten, die einerseits durch die Gefahrstoffverordnung und andererseits durch die in der sog. TRGS (Technical guideline for hazardous substances) 905 (WHO-fibre), 619 (material substitutes) und 521 (fibre dust) beschrieben sind.

*Canningtechnologien:* 4 Methoden werden grundsätzlich unterschieden, alle haben das Ziel, ausreichend Haltekraft unter allen Betriebszuständen zu gewährleisten und während dem Canning eine möglichst geringe Belastung des Substrats zu realisieren (Abb. 5.252). Konstante Prozessparameter am Schließwerkzeug sollten stabiles GBD oder besser noch definierten Mattendruck zur Folge haben.

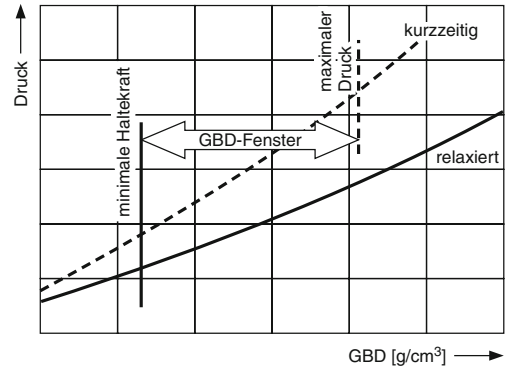



**Abb. 5.251** Druck-GBD Kennlinie

Die Auswahl des richtigen Canningverfahrens hängt auch von der Trichter/Mantelverbindung bzw. der Form des Trichters ab (Abb. 5.252). Konzentrische *Rohrkatalysatoren* können vorteilhaft mit angerollten Konen kombiniert werden.

Gewickelte Katalysatoren haben die größten Freiheiten, was die Monolithform betrifft und können mit unterschiedlichen Trichterkonturen verschweißt werden. *Halbschalenbauweise* kann Vorteile haben, wenn die aufwendigen Tiefziehteile bereits die Trichter enthalten sowie bei extrem flachen Formen.

## 5.6.5 Schalldämpfer

**Bauarten und Wirkungsweise** Je nach dem zur Verfügung stehenden Raum im Unterbodenbereich des Fahrzeuges werden Schalldämpfer in Wickel- oder Schalenbauweise bzw. mittels Rolldrücken hergestellt. Beim kostengünstigen Wickelschalldämpfer, in der Regel mit ovalem oder run-

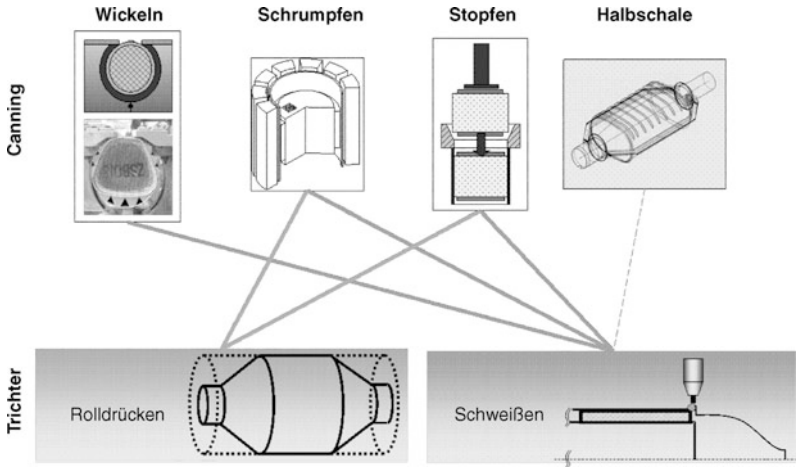



**Abb. 5.252** Canning- und Trichteranbindungs-Technologien

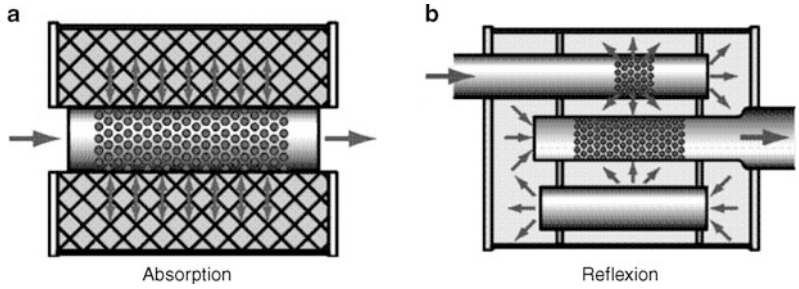



**Abb. 5.253** Schalldämpfungsprinzipien

dem Querschnitt, wird der Mantel durch Falzen oder Schweißen verbunden. Aufgrund der bei modernen Fahrzeugen engen Platzverhältnisse kommen vermehrt Schalenschalldämpfer zum Einsatz, deren Gehäuseober- und unterschalen durch Tiefziehen erzeugt werden. Zur Vermeidung von Resonanzen der Schalldämpferoberfläche, die zu störender Schallabstrahlung führen, werden die Schalen versickt, eine Optimierung erfolgt durch den Einsatz moderner Rechenverfahren (► Abschn. 11.3) [246].

Grundsätzlich kommen in heutigen Schalldämpferanlagen zwei Dämpfungsprinzipien zum Einsatz, je nach Anforderung einzeln oder auch in Kombination (■ Abb. 5.253).

Beim *Absorptionsprinzip* wird in Schalldämpferkammern poröses Material in Form von gesundheitlich unbedenklichen Endlosglasfasern oder kurzen, biolöslichen Fasern eingebracht. Die Schallenergie wird durch Reibung in Wärme umgesetzt, die Absorption beginnt ab ca. 200 Hz und besitzt im Kilohertzbereich eine sehr hohe Dämpfung.

Mit dem Reflexionsprinzip können hauptsächlich tiefe Frequenzen beeinflusst werden. Eine gezielte Anordnung von Kammern, die durch Rohrleitungen verbunden sind, bewirkt aufgrund der Querschnittssprünge und Interferenzen hohe Dämpfungen bis in den tiefen Frequenzbereich von unter 100 Hz.

Häufig wird eine *Kombination* beider Schalldämpferprinzipien genutzt, um im gesamten Frequenzbereich die gewünschte Dämpfung zu erreichen.

## 5.6.6 Akustische Abstimmung

Das Mündungsgeräusch der Schalldämpferanlage wird durch den Einsatz von 1-D- und 3-D-Berechnungsmethoden ausgelegt und am Prüfstand optimiert. Dabei ist der Auslegungskonflikt zwischen niedrigem Gegendruck und hoher akustischer Dämpfung zu bewältigen. Durch die Hervorhebung oder Absenkung von bestimmten Frequenzanteilen der am Motorauslass erzeugten Abgaspulsationen in der Schalldämpferanlage kann ein spezifischer Klang erzeugt werden. Bei diesem als „Sound Engineering" bezeichneten Verfahren wird das akustische Verhalten der Abgasanlage gezielt so abgestimmt, dass sowohl ein fahrzeug- als auch markentypischer Klang entsteht [237, 238]. Ein Roadster wird daher in der Regel lauter sein und signifikante tieffrequente Geräuschanteile aufweisen, während eine Luxuslimousine möglichst keinerlei auffälliges Brummen haben darf (▶ Abschn. 3.4).

Zur Erreichung eines bestimmten Mündungsgeräusches gibt es, basierend auf dem Grundprinzip der Reflexion, folgende häufig eingesetzte Schalldämpferelemente [239, 240]:

Die *Tiefpass-Kammer* dämpft breitbandig oberhalb ihrer Eigenfrequenz, die so tief abgestimmt sein muss, dass unerwünschte Brummigkeit vermieden wird. Für die Resonanzfrequenz gilt:

$$f_0 = \frac{C}{2\Pi}\sqrt{\frac{A \cdot L}{V}}$$

mit $A$: Rohrquerschnitt; $L$: Rohrlänge; $V$: Kammervolumen; $C$: Schallgeschwindigkeit.

In erster Näherung kann der Endschalldämpfer einer Abgasanlage als isolierter Tiefpass betrachtet werden. Anhand der Gleichung kann man dann ersehen, dass eine Reduzierung von $f_0$ und damit eine Erhöhung der Dämpfung für alle Frequenzen größer $f_0$ durch eine Verlängerung des Ausgangsrohrs, eine Verkleinerung des Rohrquerschnitts oder eine Erhöhung des Kammervolumens erfolgen kann. In vielen Fällen ist die Ausgangsrohrverlängerung das Mittel der Wahl, da eine Querschnittsverkleinerung unweigerlich den Druckverlust der Abgasanlage erhöht und überdies störendes Strömungsrauschen erzeugen kann. Einer ebenso möglichen Volumenvergrößerung steht sehr häufig der fehlende Bauraum entgegen [240].

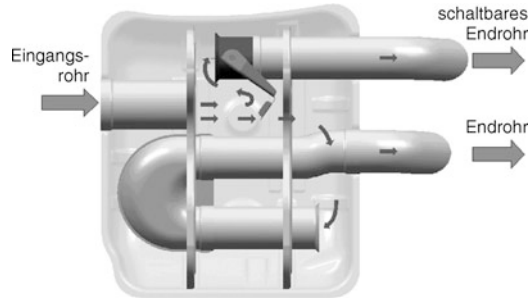



**Abb. 5.254** Schalldämpfer mit Klappe; Klappe geöffnet

Der *Helmholtz-Resonator* dämpft im Bereich seiner Resonanzfrequenz, vergleichbar einem spezifischen Filter. Die Resonanzfrequenz errechnet sich analog obiger Gleichung [241]. Helmholtz-Resonatoren werden eingesetzt um spezifische Störfrequenzen zu eliminieren, wie z. B. tieffrequentes Brummen im Leerlauf.

Das *Lambda-Viertel-Rohr* dämpft nur sehr schmalbandig. Dabei wird die Rohrlänge $L$ so ausgelegt, dass sie einer viertel Wellenlänge der zu dämpfenden Frequenz entspricht.

*Perforationen* in Böden oder Rohren können sowohl für die gezielte Führung des Abgases innerhalb des Schalldämpfers als auch zur breitrandigen Dämpfung eingesetzt werden. Diese Dämpfung entsteht durch Reibungseffekte beim Durchtritt des Abgases. Bei dieser Durchströmung können jedoch auch ungewollte Effekte, wie erhöhter Gegendruck und erhöhtes Strömungsrauschen auftreten. Mittels *Übersprechstelle* lassen sich in zweiflutigen Abgasanlagen die Anteile einzelner Motorordnungen beeinflussen.

*Klappen* erzeugen je nach Schaltstellung unterschiedliche Schall- und Strömungswege mit Vorteilen im Dämpfungs- und Abgasgegendruckverhalten. Extern gesteuerte Klappen werden drehzahl- und lastabhängig über ein pneumatisches Ventil oder einen elektrischen Aktuator geschaltet und sind im Allgemeinen in den Rohrleitungen oder im Endrohr integriert. Autonome Klappen werden hingegen sowohl in Reflexionsschalldämpfern als auch in den Rohrleitungen eingesetzt. Sie öffnen und schließen in Abhängigkeit vom Abgasimpuls und einer mechanischen Feder selbstständig. Abb. 5.254 und Abb. 5.255 zeigen exemplarisch den Strömungsweg in einen Schalldämpfer bei

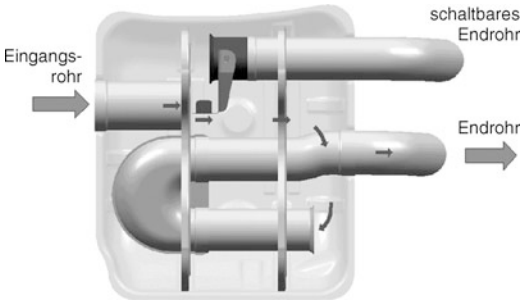



**Abb. 5.255** Schalldämpfer mit Klappe; Klappe geschlossen

unterschiedlichen Klappenstellungen. Wie sich aus obiger Gleichung ableiten lässt, mindert ein Klappenschalldämpfer den Zielkonflikt „hohe Dämpfung vs. geringer Druckverlust", über die drehzahl- und lastabhängige Bereitstellung unterschiedlicher Strömungsquerschnitte.

*Aktive Abgasanlagen* verfügen über einen oder mehrere Aktuatoren (meist elektrodynamische Lautsprecher), die das akustische Verhalten der Abgasanlage positiv beeinflussen. Man unterscheidet ANC (**A**ctive **N**oise **C**ancellation) und ASD (**A**ctive **S**ound **D**esign). Mit solchen Systemen kann ein gewünschtes Klangbild durch Einbringen zusätzlicher Klangkomponenten erzeugt werden (ASD), oder auch der Geräuschpegel mittels Gegenschall abgesenkt werden (ANC).

### 5.6.7 Körperschall

Neben dem klassischen Mündungsgeräusch wird über die Abgasanlagenaufhängungen Körperschall in die Karosserie eingeleitet. Ursache ist die mechanische Anregung der Abgasanlage durch den Motor, der eine feste Einspannstelle der Abgasanlage darstellt (Zwangserregte Schwingung). Die Abgasanlage weist aufgrund ihrer Größe, der Massenverteilung und ihrer Form ein sehr komplexes Schwingverhalten auf. Häufig treten Resonanzen bereits bei niedrigen Frequenzen auf und führen zu einem hörbaren Geräuscheintrag in die Fahrgastzelle. Eine Beurteilung des Abgasanlagenschwingungsverhaltens (Betriebsschwingungsanalyse) wird daher meist in Verbindung mit einer Betrachtung des Innengeräuschs durchgeführt. Die Betriebsschwingungsanalyse wird zur optimalen Auslegung auch mittels einer Finite Element Betrachtung durchgeführt.

Simple Auslegungsregeln für das Schwingverhalten der Abgasanlage existieren aufgrund der räumlich komplizierten Schwingungen nicht. In der Praxis wird daher die Abgasanlage primär anhand des zur Verfügung stehenden Bauraums konzipiert und über möglichst früh durchgeführte FEM-Berechnungen im Schwingverhalten optimiert. Als Maßnahmen stehen dafür Änderungen der Massenverteilung (Verschiebung/Größenänderung von z. B. Schalldämpfern) und Steifigkeiten (Rohrdurchmesser, -wandstärken) zur Verfügung. Zusätzlich werden auch Massentilger oder motor- bzw. getriebefeste Halter eingesetzt.

## 5.7 Bordenergie-Management

### 5.7.1 Ausgangssituation

Die Anforderungen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen steigen stetig. Gleichzeitig nimmt die Nachfrage an Sicherheits- und Komfortfunktionen in modernen Kraftfahrzeugen kontinuierlich zu. Die Realisierung zusätzlicher Funktionalität führt zu einem steigenden Anteil elektronischer Steuergeräte und elektrischer Verbraucher und damit zu einem vermehrten Energiebedarf. Die Erzeugung von zusätzlich 100 W elektrischer Leistung bedeutet aber einen Mehrverbrauch von etwa 0,1 bis 0,15 l/100 km und wirkt damit der Anforderung nach Reduktion des Kraftstoffverbrauchs entgegen. Um die beiden konträren Ansprüche gleichzeitig erfüllen zu können, sind neue Lösungsansätze gefragt. Eine Möglichkeit bietet ein Energiemanagement, welches die Energieflüsse im Kraftfahrzeug intelligent steuert und gleichzeitig die elektrische Energieversorgung des Kfz sicherstellt. Das Ziel eines Energiemanagements ist die Sicherstellung der Startfähigkeit und damit die weitgehende Vermeidung von Liegenbleibern durch entladene Batterien sowie die Steigerung der Energieeffizienz im Fahrzeug, um Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu senken. Weitere

Aufgaben sind die Erhöhung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung, Sicherstellung der Spannungsstabilität, die Optimierung der Verfügbarkeit von Komfortsystemen, auch bei Motorstillstand, und die Erhöhung der Batterielebensdauer. Diese Ziele stehen teilweise in Konkurrenz zueinander und müssen daher entsprechend priorisiert werden. Bei zukünftigen sicherheitsrelevanten Anwendungen ist ein Energiemanagement zur Sicherstellung der Energieversorgung dieser Systeme unabdingbar.

Im Folgenden sind beispielhaft einige elektrische Verbraucher aufgeführt, die aufgrund der beschriebenen Anforderungen eingeführt wurden bzw. deren Einführung angedacht wird:

- PTC-Zuheizer,
- Frontscheibenheizung,
- elektrische Klimatisierung,
- elektrische Servolenkung,
- elektrische Kühlmittelpumpe.

Der Einsatz elektrischer Nebenaggregate, die durch den Entfall der Kopplung mit dem Verbrennungsmotor einen bedarfsgerechten Betrieb ermöglichen und damit den Kraftstoffverbrauch senken, erhöht den elektrischen Energiebedarf weiter. Hierzu zählen die elektrische Wasserpumpe, die elektrische Ölpumpe oder Elektrolüfter. Die elektrische Servolenkung kann den Kraftstoffverbrauch senken, erhöht aber gleichzeitig den elektrischen Energieverbrauch. Die bedarfsgerechte Ansteuerung reduziert zudem den Kraftstoffbedarf bis zu 0,3 l/100 km [248]. Allerdings stellen elektrische Servolenkungen hohe Anforderungen an das elektrische Bordnetz, sowohl in Bezug auf die Verfügbarkeit als auch aufgrund der hohen auftretenden Spitzenlasten bei Lenkmanövern.

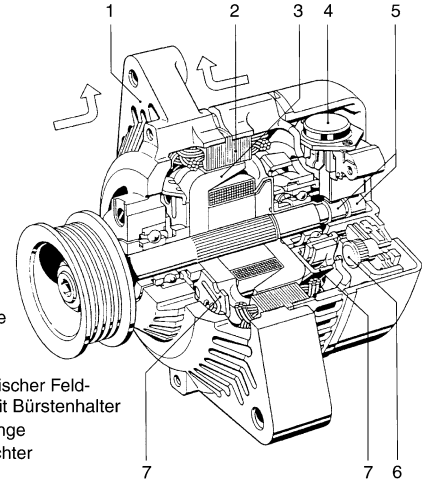
Parallel zum steigenden Energiebedarf verschlechtern sich die Randbedingungen für die elektrische Leistungserzeugung. Die Verkehrsentwicklung mit vielen Staus und hohen Leerlaufphasen reduziert das Drehzahlangebot für den Generator und damit dessen Leistungsabgabe. Kraftstoff sparende Maßnahmen im Triebstrang wie die Absenkung der Leerlaufdrehzahl oder ein Stopp-Start-Betrieb erschweren die elektrische Leistungserzeugung weiter und stellen parallel erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit des elektrischen Bordnetzes.

Hybrid- und Elektrofahrzeuge stellen darüber hinaus noch weitere Anforderungen an die elektrische Energiebereitstellung und deren Betriebssicherheit, insbesondere auch die Einführung von Spannungen oberhalb der Berührschutzspannung. Dies hat z. B. auch Einfluss auf den Werkstattservicebereich.

## 5.7.2 Der Klauenpolgenerator im Energiebordnetz

Zur elektrischen Versorgung eines Fahrzeugs mit konventionellem 12 V- oder 24 V-Bordnetze werden in Kraftfahrzeugen Drehstromlichtmaschinen eingesetzt. Wegen seiner robusten Bauform und der preisgünstigen Herstellung hat sich für diesen Anwendungsbereich allgemein der Klauenpolgenerator (◘ Abb. 5.256) durchgesetzt, der ein ähnliches Verhalten wie ein Schenkelpolsynchrongenerator besitzt.

Diese Generatoren besitzen ein geblechtes *Ständerpaket* mit Dreiphasenwicklung. In dieser *Wicklung* wird durch das Drehfeld ein Dreiphasen-Wechselstrom erzeugt. Da die Batterie zum Laden einen Gleichstrom erfordert, muss der Generator über einen *Gleichrichter* mit dem Bordnetz verbunden werden. Der erzeugte Drehstrom wird hierzu durch eine Diodenbrücke (B6-Brücke) gleich-




◘ **Abb. 5.256** Aufbau eines Klauenpol-Generators

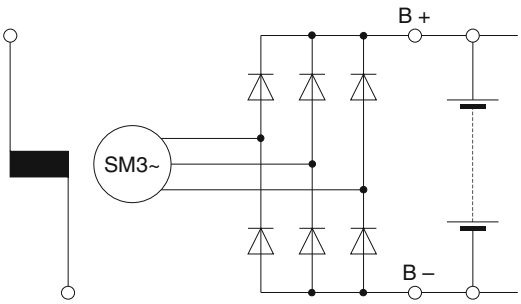



**Abb. 5.257** B6-Brückenschaltung

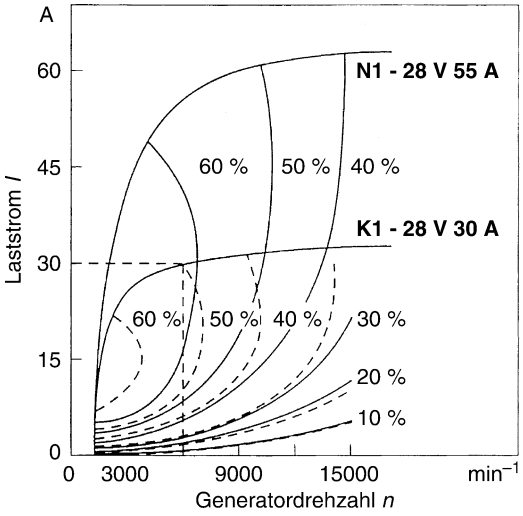



**Abb. 5.258** Wirkungsgrad-Kennfelder für Generatoren Kl und N1

gerichtet. Gleichzeitig dient die Diodenbrücke als *Rückstrom-Sperre*. Ein Stromfluss ist nur vom Generator zur Batterie möglich, um ein Entladen der Batterie über den Generator zu verhindern (Abb. 5.257).

Die Maschine unterscheidet sich nur im *Läuferaufbau* gegenüber üblichen Synchrongeneratoren. Der Läufer der Maschine besteht aus zwei Polplatten, deren umgebogene Polfinger wie Klauen einer Kupplung ineinander greifen. Das Polsystem wird durch eine konzentrisch zwischen den Polplatten liegende Gleichstromwicklung erregt. Diese Läuferbauform bietet den Vorteil eines mechanisch einfachen und sehr robusten Aufbaus. Die Erregerwicklung rotiert meist mit dem Läufer mit und erhält ihren Erregerstrom über Schleifringe und Kohlebürsten.

### 5.7.2.1 Leistungs- und Wirkungsgradverhalten

Die Leistung des Generators bei konstanter Ausgangsspannung ist abhängig vom Erregerstrom und der Generatordrehzahl. Üblich ist die Darstellung des Abgabestromes (Abgabeleistung) über der Drehzahl. Dabei ist die maximale Leistung durch den maximalen Erregerstrom begrenzt. Die Abgabeleistung nimmt mit wachsender Temperatur ab, da der Widerstand der Erregerwicklung temperaturabhängig ist. Bei konstanter Bordnetzspannung (Erregerspannung z. B. 14 V bei Pkw oder 28 V bei Nkw) sinkt der maximale Erregerstrom durch den steigenden ohmschen Erregerwiderstand bei höheren Temperaturen.

Bei niedrigen Drehzahlen ist die induzierte Spannung des Generators kleiner als die Bordnetzspannung und es kann kein Strom über die Gleichrichterbrücke in das Bordnetz geliefert werden. Erreicht der Generator bei der Null-Watt-Drehzahl $n_0$ die Batteriespannung, beginnt er mit der Leistungsabgabe. Bei hohen Drehzahlen arbeitet der Generator nahe bei seinem Kurzschlusspunkt. Der Strom erreicht seinen Maximalwert und kann nicht weiter ansteigen. Die Abgabeleistung ist somit auf einen maximalen Wert begrenzt (Abb. 5.258).

Die mechanischen Verluste (diese setzen sich in erster Linie aus den Reibungsverlusten und dem Leistungsbedarf der Lüfter zusammen) und die Eisenverluste steigen stark mit der Drehzahl der Maschine an. Dadurch begründet sich die Tatsache, dass bei hohen Drehzahlen der Generatorwirkungsgrad stark abfällt (Abb. 5.258). Die Kupfer- und Gleichrichtverluste sind dagegen nur vom Belastungsstrom und somit von der abgegebenen Leistung abhängig und nicht von der Drehzahl.

Um die Leistungserzeugung dauerhaft zu steigern sind weitere Verbesserungen des Generatorwirkungsgrads anzustreben.

Nachfolgend sind einige Maßnahmen aufgeführt, die dies bewirken:

- erhöhter Kupfereinsatz zur Reduzierung der Ständerkupferverluste,
- umschaltbare Ständerwicklung, d. h. drehzahlabhängige Anpassung der Ständer-

wicklungszahl und dadurch Reduktion der Kupferverluste,
- Generatorbetrieb mit freier Spannung und Einstellung der Bordnetzspannung über Leistungselektronik,
- Einsatz von Synchrongleichrichtern mit MOSFETs zur Reduzierung der Diodenverluste.



Die derzeit verbaute Generatorleistung für 12 V-Netze von Pkw liegt bei typischerweise 1,5 bis 2,5 kW. Für Pkw mit sehr hohem elektrischem Ausstattungsgrad werden Generatoren auch bis über 3,0 kW verbaut. Diese Leistungen können noch problemlos mit luftgekühlten Generatoren umgesetzt werden, wassergekühlte Generatoren haben sich auf Grund der höheren Kosten nicht breitflächig durchsetzen können.

Aufgabe der *Spannungsregelung* ist es, bei stark wechselnden Generatordrehzahlen und unterschiedlichen Belastungen die Bordnetzspannung auf einem konstanten Niveau zu halten. Diese Spannungsregelung kann nur im Teillastbereich des Generators arbeiten. Überschreitet die Bordnetzbelastung die maximal mögliche Abgabeleistung des Generators, kann die Bordnetzspannung unter den Wert des Toleranzbandes absinken. Dieser Fall kann insbesondere bei kleinen Generatordrehzahlen auftreten. In diesem Bereich fällt die Leistungsabgabe des Generators stark ab und die Leistung muss bei großen Lasten teilweise aus der Batterie entnommen werden.

Um bei tiefen Temperaturen ein besseres Ladeverhalten der Batterie zu erhalten, wird bei niedrigen Betriebstemperaturen die Sollspannung durch den Regler erhöht. Umgekehrt, um ein Überladen der Batterie zu verhindern, wird bei hohen Temperaturen die Spannungsvorgabe abgesenkt.

#### 5.7.2.2 Überspannungsschutz

Überspannungen im Bordnetz können sowohl die angeschlossenen Verbraucher als auch die Bauelemente des Generators schädigen. Daher ist die maximal auftretende Spannungshöhe zu begrenzen. Bei Betrieb des Bordnetzes mit einer Batterie fängt diese einen Teil der Überspannungen ab, jedoch wird in den meisten Fällen ein Notbetrieb auch ohne angeschlossene Batterie verlangt. Auch kann bei voll geladener Batterie die Bordnetzspannung unzulässig ansteigen, da die Batterie nicht mehr aufnahmefähig ist. Überspannungen können durch verschiedene Ursachen entstehen. Als wichtige Ursache ist der *Lastabwurf* zu betrachten. Wird vom Bordnetz eine hohe Leistung entnommen und schlagartig ein großer Verbraucher abgeschaltet, steigt die Bordnetzspannung an. Der Generator ist noch nicht auf die neue Belastung eingeregelt. Der Spannungsregler des Generators kann nur mit der Zeitkonstanten des Erregerkreises reagieren (Größenordnung 100 ms). Die überschüssige Generatorleistung muss von der Batterie aufgenommen werden und führt zu einem Spannungsanstieg. Während dieser Zeit ist die Bordnetzspannung in geeigneter Weise auf einen Maximalwert zu begrenzen. Bei Generatoren für 12/14 V Bordnetze werden hierzu üblicherweise die Brückengleichrichter mit *Z-Dioden* bestückt. Die Zenerspannung der Dioden ist so gewählt, dass die Dioden bei einer Spannung von ca. 28 V in Rückwärtsrichtung leiten. Somit wird die maximale Überspannung im Bordnetz wirksam beschränkt. Durch diese Maßnahme kann das komplette Bordnetz wirksam gegen energiereiche Überspannungen geschützt werden.

#### 5.7.2.3 Generator mit Schnittstellenregler

Generatoren mit Schnittstellenregler ermöglichen eine intelligente Regelung des Generators und damit eine Möglichkeit der Bremsenergierückgewinnung. Hierbei wird die elektrische Leistung bevorzugt dann erzeugt, wenn wenig Kraftstoff hierfür erforderlich ist. Idealerweise geschieht dies im Schubbetrieb, wenn aufgrund der Schubabschaltung die Erzeugung der elektrischen Leistung keinen Kraftstoff benötigt. Im Gegenzug wird die elektrische Leistungserzeugung gedrosselt bzw. eingestellt, wenn sie wegen des schlechten Wirkungsgrads von Verbrennungsmotor oder Generator einen hohen Kraftstoffverbrauch erfordern würde. Voraussetzung für diese Bremsenergierückgewinnung ist das gezielte Einstellen eines teilgeladenen Zustands der Batterie. Diese Änderung der konventionellen Ladestrategie, deren Ziel eine möglichst voll geladene Batterie war, ermöglicht, dass die Batterie in der Schubphase Ladung aufnehmen kann, die dann in Phasen mit geringem Wirkungsgrad

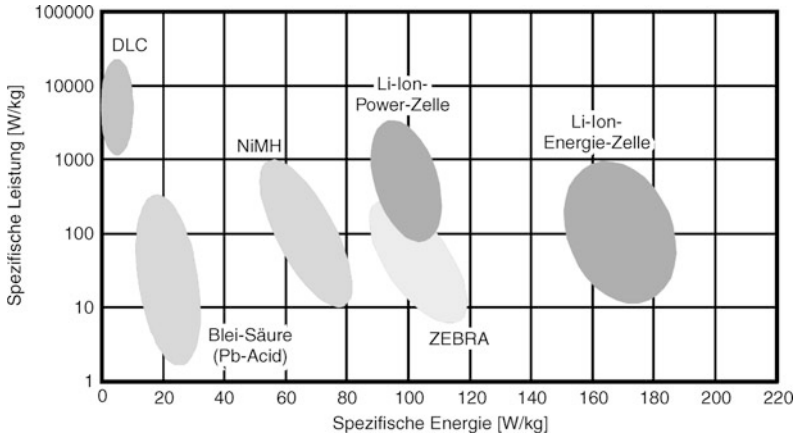



**Abb. 5.259** Ragone Diagramm

wieder abgegeben wird. Das Unterschreiten eines für die Startfähigkeit notwendigen Mindestladezustands ist dabei auf jeden Fall zu vermeiden.

Um diese Funktion im vollen Umfang nutzen zu können, ist daher die genaue Kenntnis des aktuellen Batteriezustands erforderlich.

Durch diese Art der Bremsenergierückgewinnung sind, abhängig vom Fahrzyklus und der Ausprägung der Strategie, zwischen 1 % und 4 % Kraftstoffeinsparung möglich.

Weiterer Vorteil des Schnittstellen-Reglers ist die Möglichkeit, das auf den Verbrennungsmotor wirkende Drehmoment des Generators zu ermitteln und zu beeinflussen. Um das generatorische Moment abhängig von der Last des Verbrennungsmotors regeln zu können, sind moderne Generatoren durch eine LIN- oder PWM-Schnittstelle in das Informationsnetz des Motormanagements eingebunden.

### 5.7.3 Elektrische Speicher im Energiebordnetz

Im Kraftfahrzeug-Bordnetz hat der elektrische Energiespeicher, im Allgemeinen die Batterie, die Aufgabe, die vom Generator erzeugte elektrische Energie zu speichern. Mit der gespeicherten elektrischen Energie werden bei Bedarf, z. B. im Motorleerlauf oder bei Motorstillstand, die Verbraucher versorgt. Insbesondere muss die Batterie in der Lage sein, kurzfristig hohe Ströme für den Start des Verbrennungsmotors vor allem auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu liefern.

In konventionellen Fahrzeugen kommt aus Kostengründen seit jeher die Blei-Säure-Batterie (PB-Acid) zum Einsatz, welche heute bezüglich Elektrodengeometrie und Zellenchemie als Starterbatterie für ausreichend hohe Kaltstartströme optimiert ist.

In Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang kommt die Batterie zusätzlich als Energiespeicher für Traktionszwecke zum Einsatz und wird daher auch als Traktionsbatterie bezeichnet.

Die Energie- versus Leistungsdichte verschiedener Speicher ist in Abb. 5.259 dargestellt. Diese Darstellung wird als Ragone Diagramm bezeichnet.

Bei teilweise oder komplett elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Elektro- und Hybridfahrzeuge) genügen Blei-Säure-Batterien der Anforderung nach Lade-Entladezyklen und Energieinhalt nicht. Für den Einsatz als Traktionsspeicher eignen sich daher insbesondere Batterien mit Li-Ionen Zellchemie, da sie bereits über eine hohe Energie- und Leistungsdichte verfügen, an deren Weiterentwicklung in der Automobilindustrie intensiv gearbeitet wird.

Dabei wird die Zellchemie für folgende Einsatzgebiete optimiert:

- High Power Zellen mit hoher Leistungsdichte für den Einsatz in Hybridfahrzeugen,
- High Energy Zellen mit hoher Energiedichte für den Einsatz in Elektrofahrzeugen zur Maximierung der Fahrzeugreichweite.

Aufgrund ihrer geringeren Energiedichte aber hohen Leistungsdichten werden Hochleistungskondensatoren (Doppelschichtkondensatoren, DLC) vereinzelt für dynamische Leistungsanforderungen von z. B. Hochstromverbrauchern oder zur Glättung der Spannungswelligkeit im Bordnetz verwendet. Dieser Speichertyp eignet sich nicht für rein elektrischen Betrieb des Fahrzeugs.

### 5.7.3.1 Blei-Säure Batterien

Im konventionellen Bordnetz werden Blei-Säure-Akkumulatoren eingesetzt. Wichtigste Kenngrößen eines Blei-Akkumulators sind die Nennspannung $U_N$ und die Nennkapazität $K_N$. Beim Bleiakkumulator ergibt sich die Nennspannung als Vielfaches der Einzelzellenspannung von 2 V. Tatsächlich schwankt die Leerlaufspannung einer Zelle im Bereich von ca. 1,94 V bis 2,14 V zwischen leerem und voll geladenem Zustand. Typische Nennspannungen von Bordnetzbatterien sind 12 V im Pkw bzw. 24 V im Nkw. Die Nennkapazität ist definiert als die Strommenge, die innerhalb von 20 Stunden bis zu einer Entladeschlussspannung von 1,75 V/Zelle mit konstantem Entladestrom entnommen werden kann. Der dabei fließende Strom wird mit $I_{20}$ bezeichnet. Eine weitere wichtige Kenngröße ist der Kälteprüfstrom $I_{-18}$. Nach DIN muss die Klemmenspannung bei Entladung mit $I_{-18}$ 30 s nach Entladebeginn mindestens 1,5 V/Zelle und 150 s nach Entladebeginn mindestens 1 V/Zelle betragen. Der Kälteprüfstrom beträgt z. B. ca. 150 A bei einer 36 Ah-Batterie und ist eine wichtige Größe für die Auslegung des Starters.

#### 5.7.3.1.1 Entladen von Blei-Säure-Batterien

Abb. 5.260 zeigt einen typischen Verlauf der Batteriespannung bei Konstantstromentladung. Kurz nach Beginn der Entladung fällt die Spannung auf einen Wert, der sich bis zum Erreichen der vollständigen Entladung, des so genannten Entladeschlusses, kaum ändert. Erst dann bricht die Spannung aufgrund des Verbrauchs an Säure und/oder aktivem Material der Elektroden zusammen.

Wichtig ist hier auch die Abhängigkeit der entnehmbaren Ladung vom Entladestrom. Mit zunehmendem Entladestrom verringert sich der auf die 20-stündige Entladung bezogene Wert.

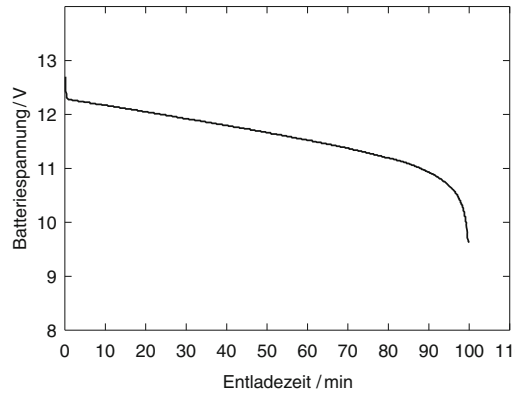



**Abb. 5.260** Batteriespannungsverlauf bei Konstantstromentladung

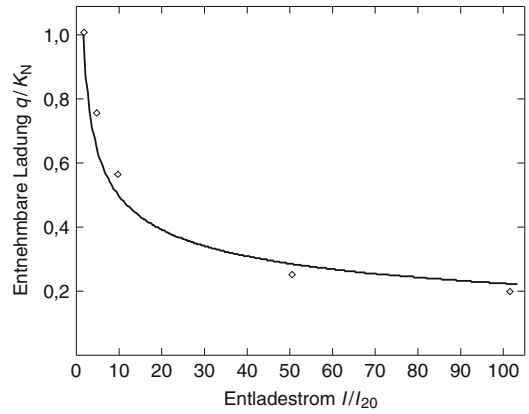



**Abb. 5.261** Entnehmbare Ladung über dem Entladestrom (Peukert-Faktor = 1,3)

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5.261 dargestellt und kann näherungsweise durch die so genannte Peukert-Gleichung beschrieben werden:

$$I^n \cdot t_E = \text{const.},$$

mit $I$ = Strom, $t_E$ = Entladezeit, Peukert-Faktor $n = 1{,}2 \ldots 1{,}5$.

Für den Startfall, bei dem Ströme im Bereich von 200 bis 300 A fließen, würde dies erlauben, eine Ladung von ca. 45 % der Nennladung zu entnehmen. Dies gilt jedoch nur für einen bis zum Entladeschluss konstant fließenden Starterstrom. Da die Startzeit im Allgemeinen jedoch im Bereich

weniger Sekunden liegt, ist die damit verbundene Ladungsentnahme, bezogen auf die Nennkapazität, vernachlässigbar klein. Für den Startvorgang wird also von der Batterie kurzfristig eine hohe Stromabgabe und damit eine entsprechend hohe Leistungsdichte gefordert, während die zum Starten benötigte Energie und die damit verbundene Energiedichte gering sind.

#### 5.7.3.1.2 Laden von Blei-Säure-Batterien

Beim Laden von Batterien ist zwischen Laden mit konstantem Strom und dem Laden bei konstanter Spannung zu unterscheiden. Im Kfz-Bordnetz wird die Batterie mit Spannungsbegrenzung geladen, d. h. der Ladestrom geht bei Erreichen einer vom Generatorregler eingestellten Spannungsgrenze, die unterhalb der so genannten Gasungsspannung liegt, automatisch zurück und eine schädliche Überladung, die zu verstärkter Wasserzersetzung und Gitterkorrosion führen würde, wird so vermieden. Da die Gasungsspannung stark temperaturabhängig ist, wird auch der Wert der Ladespannung von etwa 14,1 V ± 0,3 V bei 20 °C mit einem Temperaturgradienten von (−7 . . . 10) mV/K nachgeführt. Bei einer Umgebungstemperatur von 50 °C würde demnach z. B. eine Ladespannung von 13,8 V eingestellt. Zur Überwachung des Batteriezustandes und der Erhöhung der Lebensdauer setzen sich in konventionellen Bordnetzen zunehmend Batteriemanagement Systeme durch, die aus den charakteristischen Batteriekenngrößen eine Information über Ladezustand (State of Charge SoC) Gesundheitszustand (State of Health SoH) und Funktionszustand (State of Function SoF) der Batterie berechnen.

### 5.7.3.2 Traktionsspeicher

Als Traktionsspeicher werden Nickel-Metallhydrid Batterien und vor allem Lithium-Ionen Batterien mit Leistungen im Bereich von etwa 15 bis über 100 kW und Energieinhalten im ein- bis zweistelligen kWh-Bereich für die Versorgung des elektrischen Antriebs eingesetzt.

Für diese Batterien sind neben der Energie- und Leistungsdichte wichtige Kenngrößen die kalendarische Lebensdauer, die Zyklenfestigkeit und die Temperaturbeständigkeit. Um die Zyklenfestigkeit zu gewährleisten und den Zustand der Batterie zu überwachen, wird eine Überwachung von Zellengruppen sowie für Li Ionen Systeme Ladungskompensation von Einzelzellen während des Betriebs durchgeführt und die Lade-/Entladezyklen gesteuert.

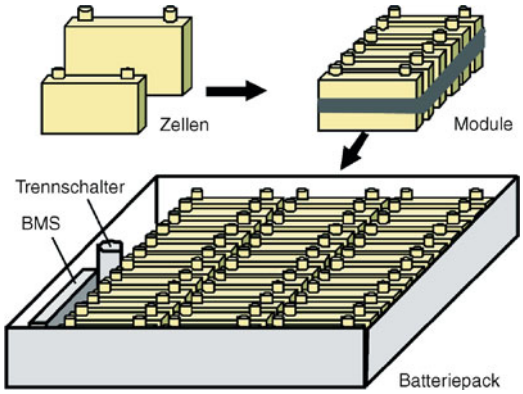



**Abb. 5.262** Aufbau einer Traktionsbatterie

#### 5.7.3.2.1 Aufbau und Auslegung von Traktionsbatterien

Die elektrische Auslegung einer Traktionsbatterie wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Anforderungen an Fahrleistung und Reichweite des Fahrzeugs und das Spannungsniveau der Antriebsmotoren. Zur Auslegung der Traktionsbatterie werden typischerweise für Hybridfahrzeuge Zellen mit einer Nennkapazität von etwa 5 Ah, für rein batterieelektrische Fahrzeuge Zellen mit Kapazitäten im zweistelligen Ah-Bereich verwendet, Abb. 5.262. Die Zellen werden in Reihe zu Modulen verschaltet, mehrere Module werden zusammen zu einem Batteriepack verschaltet. Durch entsprechende Reihenschaltung der Zellen mit einzeln etwa 3,7 V Nennspannung kann in einem Strang die erforderliche Pack-Gesamtspannung erreicht werden. Durch Parallelverschaltung von Strängen kann bei Bedarf die Leistung und der Energieinhalt zusätzlich erhöht werden. Batteriepacks werden mit Luft- oder Flüssigkeitskühlung ausgestattet, um die Lebensdauer zu optimieren und thermisch sichere Betriebsbereiche einzuhalten.

Traktionsbatterien verfügen über ein Batteriemanagementsystem (BMS) – im Wesentlichen bestehend aus einem oder mehreren Rechnereinhei-

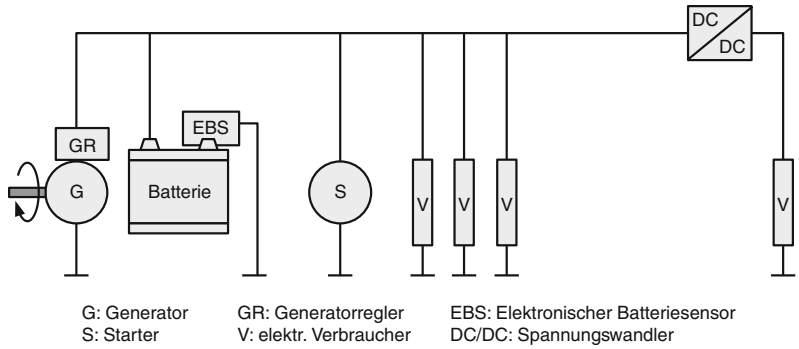



**Abb. 5.263** Energiebordnetz für Start/Stopp Fahrzeuge

ten, Strom-, Spannungs- und Temperatursensorik und I/O-Schnittstellen zur Ansteuerung von Trennrelais und weiterer Aktorik. Das BMS nimmt im Wesentlichen folgende Aufgaben wahr:

- Batteriezustandserkennung: Erfassung des aktuellen Ladezustandes und der Leistungsfähigkeit des Akkus,
- Lebensdaueroptimierung: Überwachung und Ausgleich von abweichenden Ladezuständen der einzelnen Zellen untereinander und Einhaltung von optimalen Temperaturgrenzen (Thermomanagement),
- Betriebssicherheit: Vermeidung von Tiefentladung, Überladung und thermischer Überbeanspruchung sowie Abschaltung im Crash-Fall und Überwachung der Isolationsfestigkeit.

Die Traktionsbatterie stellt über eine Signalleitung, typischerweise dem CAN-Bus, Informationen über ihren Zustand und die aktuellen Energieflüsse an andere Steuergeräte, z. B. dem Fahrzeugführungsrechner, bereit. Hierdurch wird ein Gesamtenergiemanagement im Fahrzeug unter Einbindung des Energiespeichers realisiert.

## 5.7.4 Energiebordnetze für konventionelle Fahrzeuge

### 5.7.4.1 Energiebordnetze für Start/Stopp Fahrzeuge

Für konventionelle Fahrzeuge mit 12 V-Energienetz schreitet in den letzten Jahren zunehmend die Einführung der automatischen Motor-Start/Stopp-Funktion vorab. Bei der automatischen Stopp-Start-Funktion wird der Verbrennungsmotor beim Fahrzeugstillstand abgeschaltet und wieder gestartet sobald der Wunsch zur Weiterfahrt erkannt wird, z. B. durch Betätigen von Kupplungs- und Gaspedal. Diese Strategie vermeidet Leerlaufverluste in Standphasen und spart dadurch Kraftstoff je nach Fahrzyklus und Randbedingungen im Bereich von etwa 4 bis 6 %. Voraussetzung für die Akzeptanz einer Stopp-Start-Funktion ist ein zuverlässiger Wiederstart des Verbrennungsmotors sowie die Verfügbarkeit von Komfortfunktionen während der Standphasen.

Auswirkungen und Maßnahmen im Energiebordnetz:

Bei Einführung der Motor-Start/Stopp-Funktion sind Maßnahmen am Energiebordnetz erforderlich bzw. sinnvoll (Abb. 5.263). So erlebt z. B. die Batterie einen deutlich höheren Ladungsmengendurchsatz, wodurch die Batteriealterung schneller voranschreitet. Der erhöhte Ladungsmengendurchsatz beruht vor allem darauf, dass in den Stopphasen der Generator bei abgeschaltetem Motor das Bordnetz nicht mehr versorgen kann und die elektrische Energie in dieser Zeit komplett durch die Fahrzeugbatterie bereitgestellt werden muss.

Der bzgl. Lebensdauer kritische kumulierte Energiedurchsatz bei heutigen Starterbatterien (Blei-Säure Nassversion) beträgt etwa die 100- bis 150-fache Nennkapazität, bei so genannten AGM (Absorbent Glass Matt) Versionen der Bleisäure-Akkus liegt der Wert bei etwa 250- bis 300-facher Nennkapazität. Daher werden für Start/Stopp-

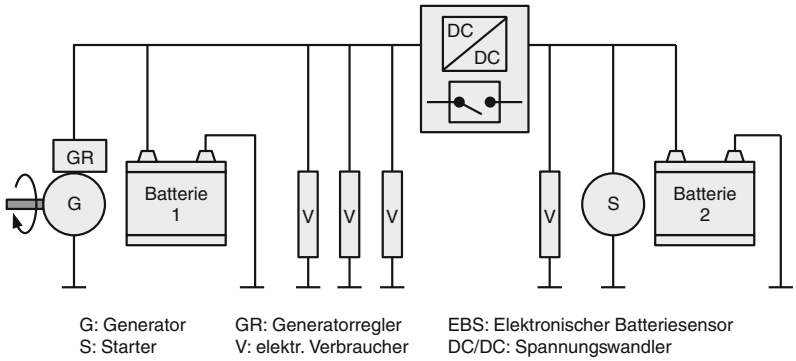



**Abb. 5.264** Zwei-Batterien-Bordnetz

Anwendung die etwas teureren aber deutlich zyklenfesteren AGM-Batterien verwendet.

Bei zu niedrigem Ladezustand oder ungeeigneten Temperaturen der Batterie wird der Stopp-Betrieb verhindert. Die Zustandserkennung der Batterie wird durch einen Batteriesensor realisiert. Durch die häufige Anzahl an Warmstarts muss die Batterie oft kurzeitige Spitzenleistungen an den Starter bereitstellen, woraus sich Spannungseinbrüche – je nach Batteriezustand – im 12 V-Netz auch deutlich unter 12 V ergeben können. Dies kann dazu führen, dass vereinzelte Verbraucher je nach deren elektronischer Ausführung kurzzeitig eingeschränkte Funktionalität haben. Für den Fahrer wäre dies ggf. am kurzzeitigen Unterbrechung der Unterhaltungselektronik (Radio) erkennbar. Um dies zu vermeiden empfiehlt sich je nach Auslegung der E/E-Architektur der Einbau eines Spannungswandlers (DC/DC-Wandler), welcher darauf ausgelegt ist, die Spannung für ausgesuchte Verbraucher kurzzeitig während des Startvorganges zu stabilisieren.

### 5.7.4.2 Zwei-Batterien-Bordnetze

In Fahrzeugen der Luxusklasse mit sehr hohem elektronischem Ausstattungsgrad oder Fahrzeugen mit sicherheitsrelevanten Systemen (x-by-wire Systeme) kommen Energiebordnetze mit zwei 12 V-Batterien zum Einsatz.

Eine solche Energiebordnetzarchitektur bietet zwei Vorteile: Zum einen kann der Energienetzbetrieb so organisiert werden, dass ein Speicher stets nur für die Versorgung der (Komfort-)Verbraucher eingesetzt wird (in Abb. 5.264 Batterie Nr. 1), während der andere Speicher (in Abb. 5.264 Batterie Nr. 2) ausschließlich nur als Starterbatterie für den Motorstart eingesetzt wird. Eine ungewollte Entladung der Starterbatterie kann durch entsprechende Koppelelemente (Schalter oder DC/DC-Wandler) vermieden werden und somit die Startzuverlässigkeit des Fahrzeugs deutlich erhöht werden. Zum anderen kann die Zusatzbatterie aber auch als Rückfallebene zur exklusiven Versorgung eines sicherheitsrelevanten Verbrauchers verwendet werden, falls die Hauptbatterie nicht mehr genügend Leistung zur Verfügung stellen kann. Bei Verwendung von zwei Batterien ist üblich, dass die Versorgungsbatterie speziell für hohe Zyklenfestigkeit und die Starterbatterie speziell für hohe Kaltstartströme ausgelegt wird, wodurch sich das Gesamtgewicht der Batterien optimieren lässt. Im Zusammenhang mit der notwendigen Energieeinsparung wird auch der Einsatz eines 48 Volt Bordnetzes immer wahrscheinlicher, siehe ► Abschn. 8.2.

### 5.7.4.3 Elektrisches Energiemanagement EEM in konventionellen Fahrzeugen

Der Einsatz eines elektrischen Energiemanagements, das die elektrische Energieverteilung und -erzeugung steuert, kann die Pannenzahl durch ent-

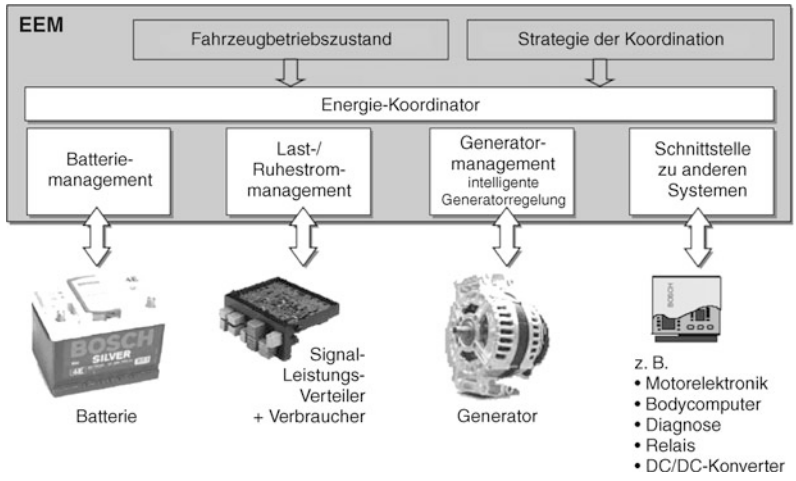



**Abb. 5.265** Struktur eines elektrischen Energiemanagements (EEM)

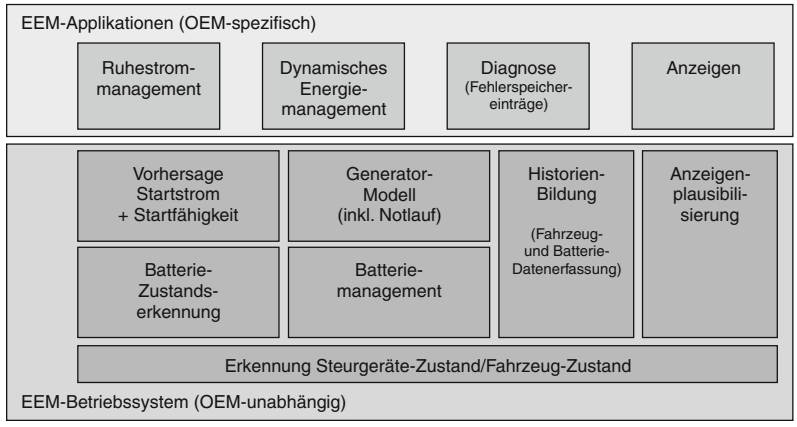



**Abb. 5.266** Mögliche Architektur eines elektrischen Energiemanagements (EEM)

ladene Batterien deutlich senken. Das Energiemanagement führt damit zu einer erhöhten Verfügbarkeit des elektrischen Bordnetzes und des Fahrzeugs.

Abb. 5.265 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Elektrischen Energiemanagements (EEM).

Es hat die Aufgabe, während des Fahrbetriebs eine positive oder zumindest ausgeglichene Ladebilanz sicherzustellen und bei Motorstillstand den Energiebedarf so zu überwachen, dass z. B. die Startfähigkeit erhalten bleibt. Zudem können durch koordiniertes Schalten von elektrischen Verbrauchern Spitzenlasten reduziert werden.

Das EEM umfasst die Module „Batteriemanagement“, „Generatormanagement“, „Lastmanagement“ und bietet auch eine Schnittstelle zu Systemen außerhalb der elektrischen Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, z. B. dem Motormanagement [249].

Das EEM steuert die Energieflüsse der Energieerzeugung, -speicherung und des -verbrauchs durch ein intelligentes Management der beteiligten Systeme.

Abb. 5.266 zeigt eine mögliche Architektur des EEM. Dabei gibt es eine kundenspezifische Schicht mit den gemäß Kunden-Philosophie definierten

Funktionen, wie das Anzeige- und Diagnosekonzept, aber auch die Eingriffe des Energiemanagements in der Ruhe- und der Fahrphase [250]. In der kundenunabhängigen Schicht sind Module zusammengefasst, die Eingangs- bzw. Hilfsgrößen für die Kundenfunktionen liefern. Hierunter fällt die Batteriezustandserkennung, aber auch die Ermittlung von Generatorgrößen wie Generatormoment und Leistungsreserve anhand eines Generatormodells. Die für das EEM erforderliche Erkennung der Fahrzeugzustände (Ruhemode, Startmode, …) ist ebenfalls Teil dieser Schicht.

#### 5.7.4.3.1 Ruhestrommanagement

Ein intelligentes Ruhestrommanagement überwacht bei länger geparkten Fahrzeugen die Entladung der Batterie durch dauerhaft aktivierte Steuergeräte, die entweder geplant oder verursacht durch einen Defekt nicht in den Ruhemodus wechseln. Ebenso optimiert es die Verfügbarkeit von Verbrauchern bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor. Hierzu zählen z. B. Standheizung und Infotainmentkomponenten wie Navigationssystem, Radio und Telefon.

Die Batteriezustandserkennung sendet bei drohendem Verlust der Startfähigkeit eine Botschaft an das Anzeigemodul, um den Nutzer zu informieren. Zudem reduziert das Verbrauchermanagement bei Annäherung an die Startfähigkeitsgrenze den Energieverbrauch bis hin zum Abschalten einzelner Verbraucher, um die Startfähigkeit möglichst lange zu erhalten.

Das Anzeige- und Abschaltkonzept im kritischen Bordnetzzustand, insbesondere die Höhe der Leistungsreduktion und die Priorität der einzelnen elektrischen Verbraucher sind Vorgaben des jeweiligen Fahrzeugherstellers und damit kundenspezifisch.

#### 5.7.4.3.2 Fahrbetrieb/Dynamisches Energiemanagement

Bei laufendem Verbrennungsmotor und damit laufendem Generator steuert das Verbrauchermanagement das Zu- und Abschalten von Verbrauchern. Koordiniertes Schalten von Verbrauchern hilft, Leistungsspitzen zu reduzieren. Zudem kann im Vorfeld von hochdynamischen Schaltvorgängen der Schaltwunsch an das Generatormanagement kommuniziert werden, um die Erregung des Generators frühzeitig einzuleiten und damit die Spannungsstabilität zu erhöhen.

Zum dynamischen Energiemanagementmodul gehören auch die Koordination der Generatorregelung für die Bremsenergierückgewinnung und die Regelung der Hochleistungsheizsysteme wie Frontscheibenheizung und PTC-Zuheizer [251].

Durch temporäres- und prioritätengesteuertes Abschalten der Verbraucher wird erreicht, dass die Funktion der Verbraucher möglichst wenig vom Sollverhalten abweicht und die Funktionseinbußen für die Fahrzeuginsassen kaum wahrnehmbar sind. Bei länger anhaltender oder hoher Überlast ist dies nicht mehr möglich. Da der daraus resultierende Funktionsverlust vom Nutzer nur in Ausnahmefällen akzeptiert wird, muss das Bordnetz so ausgelegt sein, dass diese Phasen nur selten auftreten.

Eine Alternative zur Leistungsreduktion von Verbrauchern durch das EEM ist die temporäre Erhöhung der Leistungserzeugung. Die Leistungsabgabe bei Generatoren ist im unteren Drehzahlbereich stark reduziert. In diesem Bereich bewirken kleine Drehzahlanhebungen bereits eine deutliche Steigerung der Leistungserzeugung. Eine einfache Maßnahme zur Verbesserung der Leistungserzeugung ist daher die Anhebung der Leerlaufdrehzahl. Die Anpassung der Schaltstrategie bei Automatikgetrieben ist eine weitere Alternative zur Anhebung des Drehzahlniveaus. Wegen der negativen Auswirkungen auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen sind diese Eingriffe nur in Zuständen sinnvoll, in denen eine beschleunigte Batterieladung erfolgen soll.

#### 5.7.4.3.3 Diagnose und Anzeige

Im Diagnosemodul laufen die kundenspezifischen Überwachungsalgorithmen des EEM. Dies kann sowohl die Erkennung von Komponenten mit zu hohem Ruhestrom inklusive Fehlereintrag umfassen als auch Fehlereinträge durch defekte oder unplausible Eingangsgrößen des Energiemanagements.

Das Konzept der Anzeige kritischer Betriebszustände und der daraus resultierenden Eingriffe des Energiemanagements wird im Anzeigemodul festgelegt. Mit Hilfe des Anzeigekonzepts werden EEM-Eingriffe, die zum Teil Komforteinbußen zur Folge haben, dem Fahrer verständlich gemacht.

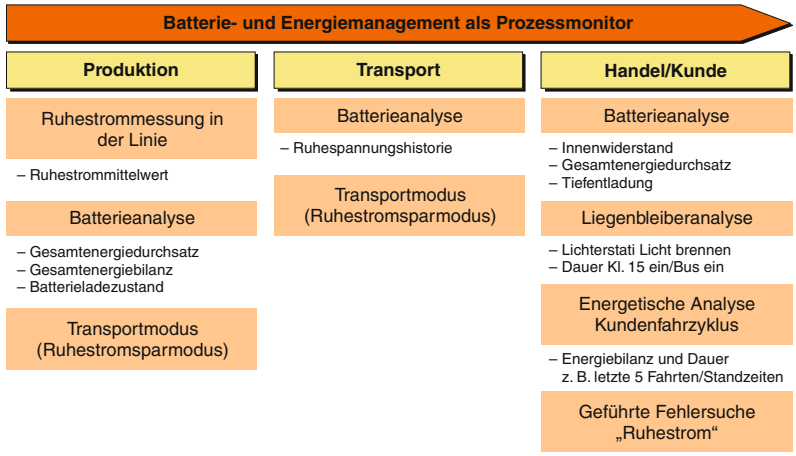



**Abb. 5.267** Zusatzfunktionen des EEM

#### 5.7.4.3.4 Zusatzfunktionen

Neben den bereits beschriebenen Funktionen unterstützt das Energiemanagement auch Sonderfunktionen (Abb. 5.267), wie:

- Werkstattdiagnose, z. B. geführte Komponentendiagnose zur Erkennung von fehlerhaften Ruhestromverbrauchern.
- Diagnose während der Produktion, z. B. durch Messen der Stromaufnahme des Fahrzeugs und Erkennen fehlerhafter Steuergeräte. Die Einbindung der für das Energiemanagement erforderlichen Sensorik in den Produktionsablauf bietet zudem noch Potenzial zur Kostenreduktion durch den möglichen Entfall von zusätzlichen Diagnosegeräten.
- Aktivierung eines Transportmodus, der z. B. bei der Verschiffung von Fahrzeugen den Ruhestrombedarf minimiert.

Das Energiemanagement bietet damit die Möglichkeit einer umfassenden Bordnetzdiagnose und kann eine fahrzeugübergreifende Systemdiagnose unterstützen [252].

#### 5.7.4.3.5 Batteriezustandserkennung/ Batteriemanagement

Eingriffe des elektrischen Energiemanagements gehen gegenüber dem Normalbetrieb mit Komforteinbußen und/oder erhöhtem Kraftstoffverbrauch einher. Sie sind nur notwendig bei kritischem Batteriezustand und z. B. drohendem Verlust der Startfähigkeit.

Voraussetzung für ein gutes Energiemanagement ist daher eine zuverlässige Batteriezustandserkennung, welche die benötigten Batterie-Informationen aus den messbaren Batteriegrößen Strom, Spannung und Temperatur zur Verfügung stellt. Die Messung dieser Größen erfolgt z. B. über einen Elektronischen Batterie Sensor EBS.

Eingangsgrößen für das EEM sind der Ladezustand (**S**tate **o**f **C**harge, SOC), die Leistungsfähigkeit (**S**tate **o**f **F**unction, SOF) und der Alterungszustand (**S**tate **o**f **H**ealth, SOH) der Batterie, d. h. die Vorhersage des Batterieverhaltens für unterschiedliche Szenarien. Die Schnittstelle ist in Abb. 5.268 dargestellt.

Die Vorhersage der entnehmbaren Batterieladung bei vorgegebenem Stromprofil bis zum Erreichen der Startfähigkeitsgrenze oder die Vorhersage des Spannungseinbruchs bei einem vorgegebenen Laststrom, liefert Informationen, die die Strategie des Energiemanagements beeinflussen [253].

#### 5.7.4.3.6 Batteriesensor EBS

Eingangsgrößen der Batteriezustandserkennung (Abb. 5.269) sind üblicherweise der Batteriestrom, die Klemmenspannung und die Batterietemperatur. Diese Größen müssen präzise, dynamisch und zeitsynchron erfasst werden, was eine hohe Anforderung an die Sensorik bedeutet. Aus Kosten- und

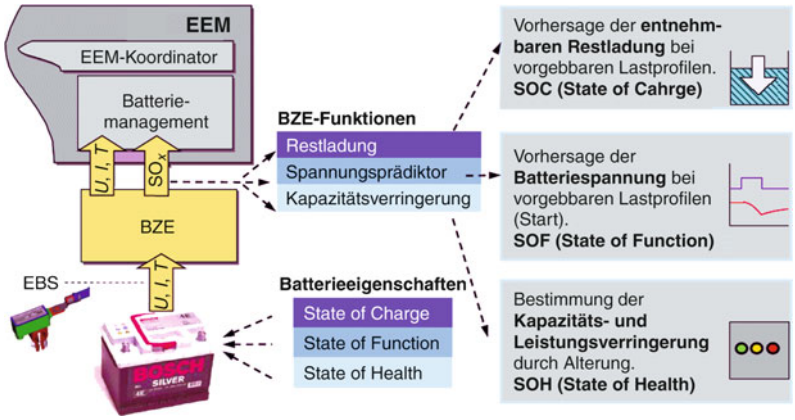



**Abb. 5.268** Schnittstelle zwischen Batteriesensor und EEM

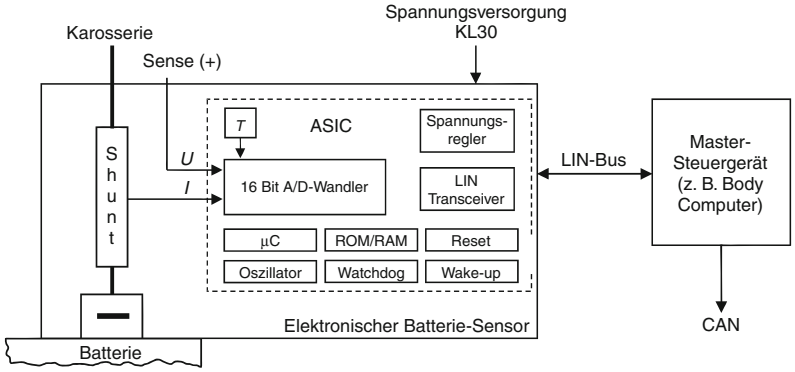



**Abb. 5.269** Blockschaltbild eines EBS (Quelle: Bosch)

Einbauraumgründen ist ein direkt am Batteriepol platzierter und mit der Polklemme kombinierter Sensor vorteilhaft (Abb. 5.270).

Da die Polnische nach DIN 72311 genormt ist, ist keine Applikation an unterschiedliche Batterien erforderlich.

Abb. 5.269 zeigt das Blockschaltbild eines elektronischen Batteriesensor EBS mit hochintegrierter Elektronik. Der Strom wird mit Hilfe eines Shunts gemessen, wobei sowohl Ruheströme im mA-Bereich als auch Startströme bis 1500 A genau gemessen werden können. Basis des EBS ist ein ASIC, das u. a. einen leistungsstarken Mikrorechner zur Messwerterfassung und -verarbeitung enthält. Zudem laufen auf dem Mikroprozessor Algorithmen der Batteriezustandserkennung, deren Ausgangsgrößen über eine Kommunikationsschnittstelle (z. B. LIN-Bus) an übergeordnete Steuergeräte zur Weiterverarbeitung im Energiemanagement übertragen werden [254].

## 5.7.5 Energiebordnetze für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang

Abb. 5.271 zeigt eine typische Energiebordnetzarchitektur für ein Fahrzeug mit elektrifiziertem Antriebsstrang.

Unterschieden wird die Hoch- und Niedervoltseite der beiden Teilbordnetze.

Der Generator, welcher im konventionellen Fahrzeug die Versorgung des Niedervolt-Netzes übernimmt wird in diesem Fall durch einen Span-



**Abb. 5.270** Elektronischer Batteriesensor EBS

nungswandler (DC/DC) ersetzt, der das Niedervoltnetz aus dem Hochvoltnetz versorgt. Die Leistungsauslegung des Wandlers orientiert sich an den Verbrauchern des konventionellen 12 V-Netz und ggf. zusätzlichen Verbrauchern wie z. B. elektrifizierte Kühlmittel- und Ölpumpen, Unterdruckaggregate oder Zusatzlüfter.

Auf Hochvoltseite mit Gleichspannung bis 400 V sind der Inverter der E-Maschine, die Traktionsbatterie, ein Einbau-Ladegerät und ggf. leistungsstarke Verbraucher wie z. B. ein elektrisches Klimaaggregat angeschlossen.

Auf Hochvoltseite hat sich aus Gründen des Aufwandes für Isolationsschutz und der Verfügbarkeit von automotive-geeigneten elektronischen Bauteilen bisher eine Nennspannung von typischerweise bis zu max. 400 V etabliert.

Eine höhere Spannung hat den Vorteil, dass Elektronik, Kabelbaum und Verbindungstechnik für kleinere Ströme ausgelegt werden muss, jedoch sind die für die Leistungen resultierenden Ströme bei 400 V gut beherrschbar, so dass eher nur in Einzelfällen auf höhere Spannungen gegangen wird.

Die Masse des Hochvoltnetzes wird in der Regel „mittig“ and die Karosseriemasse (Niedervoltnetzmasse) angebunden. Dies erfolgt über hochohmige Widerstände als Spannungsteiler in Abb. 5.271 gestrichelt eingezeichnet. Die mittige Anbindung erfolgt aus sicherheitsrelevanten Überlegungen, so dass im Berührfall zwischen Hoch- und Niedervoltseite eine Potentialdifferenz von nur maximal der halben Nennspannung des Hochvoltnetzes anliegt.

Das Energiemanagement in derartigen Fahrzeugen läuft in der Regel in einem Fahrzeugführungsrechner und nimmt folgende Aufgaben wahr:

- Regeneration von kinetischer Fzg.-Energie (Rückspeisung von Energie aus der E-Maschine in die Traktionsbatterie bei Verzögerungsvorgängen),
- Koordination der Energieflüsse im Fahrzeug unter Berücksichtigung der Leistungsanforderungen der Komponenten und der elektrisch bedingten verbleibenden Fahrzeugreichweite,
- Fahrzeugthermomanagement unter Berücksichtigung des Kühl- und Heizbedarfs des

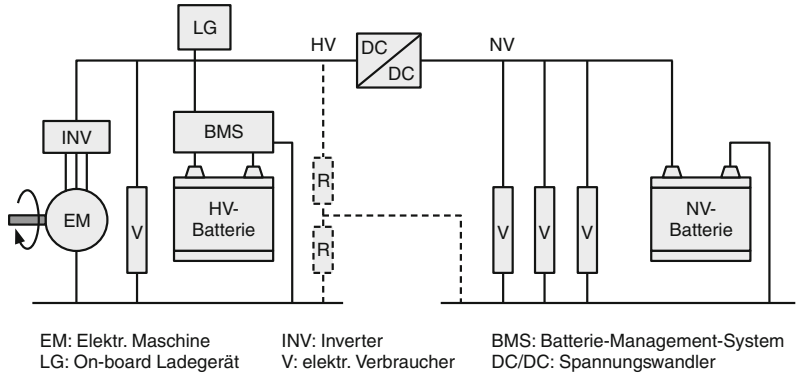



**Abb. 5.271** Energiebordnetz für Fzg. mit elektrifiziertem Antriebsstrang

Fahrgastraumes, der Antriebe und der Traktionsbatterie.

#### 5.7.5.1 Elektrifizierte Antriebsstränge

Grundsätzlich unterscheidet man zwei wesentliche Ausprägungen bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Reine Elektrofahrzeuge haben ausschließlich Elektromotoren als Antrieb des Fahrzeugs. Dabei gibt es Variationen in der Anzahl der eingesetzten Elektromotoren, typischerweise 1–4 E-Motoren in unterschiedlichsten Kombinationen (z. B. verteilt an verschiedenen Achsen oder auf einer Achse für jeweils ein Rad).

Hybridfahrzeuge haben weiterhin einen Verbrennungsmotor als Antriebsmotor und werden durch einen elektrischen Antrieb ergänzt. Hierbei gibt es verschiedenste Antriebs-Topologien:

a. paralleler Hybrid,
b. serieller Hybrid,
c. verschiedene Kombinationen aus beiden Antriebstopologien.

#### 5.7.5.2 Elektromotoren

Für Elektro- und Hybridfahrzeuge im Pkw werden heute typischerweise Elektromotoren mit einer Leistung von 20–100 kW eingesetzt. Dabei werden Asynchronmaschinen und Synchronmaschinen auf Grund deren kompakten Bauweise, dem guten Leistungs-/Gewichts-Verhältnis und den Kostenvorteilen am häufigsten eingesetzt. Die Regelung der E-Maschinen erfolgt in einem Inverter, der die Gleichspannung aus dem Traktionsbordnetz in eine 3-phasige Wechselspannung wandelt.

#### 5.7.5.3 Energiespeicher

An den Energiespeicher werden in Elektro- und Hybridfahrzeugen sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt. Bei Elektrofahrzeugen steht der Energieinhalt für eine maximale Reichweite im Fokus, bei Hybridfahrzeugen steht häufiger eine maximale Leistung zum Boosten und Rekuperieren im Vordergrund. Zusätzlich wird auch eine hohe Ladefähigkeit der Batterie gefordert, um die Zeit zum Wiederaufladen der Batterie möglichst gering zu halten.

Heutzutage werden vorwiegend Li-Ionen-Zellen für Antriebsbatterien verwendet, da Li-Ionen-Zellen eine hohe Zellspannung (typ. 3,6–4,2 V Nennspannung) haben und dadurch eine verhältnismäßig geringe Anzahl für den Batterieverbund benötigt werden. Nachteil dieser Technologie ist jedoch, dass die Zellspannungsgrenzen aus Sicherheitsgründen nicht über- und unterschritten werden dürfen und daher ein umfangreiches Batteriemanagementsystem erforderlich ist.

#### 5.7.5.4 Sicherheitsanforderungen in Hochvolt-Bordnetzen

Bordnetzspannungen größer 60 V Gleichspannung stellen deutlich höhere Sicherheitsanforderungen an das Bordnetz als bei herkömmlichen Fahrzeugen. Um lebensgefährliche Verletzungen durch direkten Kontakt zu vermeiden, müssen Spannungen größer 60 V gegen Berühren geschützt werden. Dadurch müssen Leitungen, Steckkontakte und Anschlüsse ausreichend isoliert werden und im Betrieb überwacht werden. Zusätzlich ist in Hochvolt-Bordnetzen eine große elektrische Energie gespeichert, die im Fall eines Kurzschlusses oder bei Verkehrsunfällen größere Schäden verursachen kann. Daher muss im Fehlerfall die Hochvoltbatterie schnell abgeschaltet werden und das Hochvoltbordnetz definiert entladen werden, sodass keine Gefahr mehr für die Unfallopfer und deren Helfer besteht. Auch um gefahrlos Reparaturen am Fahrzeug durchführen zu können muss das Hochvoltbordnetz im ausgeschalteten Zustand spannungslos sein.

## 5.8 Chancen und Risiken des Zweitaktmotors

Anfang der neunziger Jahre wurde der Zweitaktmotor als Pkw-Antrieb aufgrund günstiger Rahmenbedingungen wieder verstärkt in den Entwicklungsabteilungen untersucht. Ein Großteil der Automobilhersteller betrachtete dieses Motorenkonzept als verbrauchs-, gewichts-, und kostengünstige Alternative zu den existierenden Viertakt-Ottomotoren. Mittlerweile sind allerdings die Viertaktmotoren durch Direkteinspritzung, Aufladung und variable Ventiltriebe weiterentwickelt, so dass die Arbeiten am Zweitaktmotor als Pkw-Antrieb eingestellt wurden.

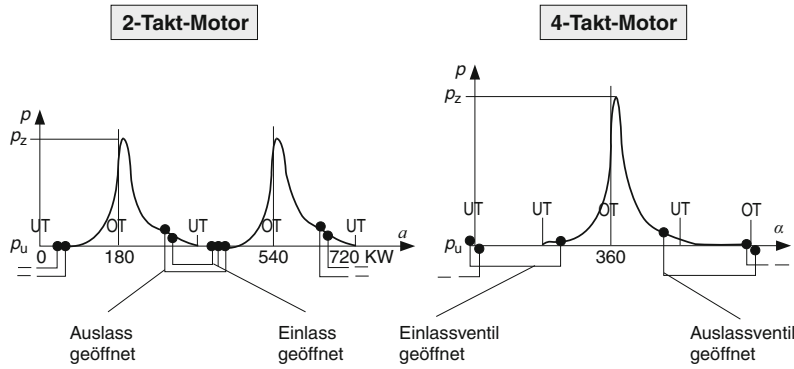



**Abb. 5.272** Zylinderdruckverlauf 2- und 4-Takt-Motor

## 5.8.1 Das Zweitaktverfahren

Das Prinzip des Zweitaktverfahrens ist in Abb. 5.272 im Ablauf dem Viertakt-Arbeitsverfahren gegenübergestellt. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass die Prozesse: Ansaugen – Verdichten – Expandieren – Ausschieben nicht über 720° Kurbelwinkel, sondern über 360° stattfinden.

Im Gegensatz zum ladungswechselsteuernden Ventiltrieb des Viertaktmotors werden im Zweitaktbereich in erster Linie Schlitze in der Zylinderbohrung eingesetzt, durch die das im Kurbelgehäuse vorverdichtete Gemisch (im Fall der direkteinspritzenden Verfahren: Luft) in den Brennraum gelangt. Dort verdrängt die Frischladung die Abgase der zuvor stattgefundenen Verbrennung durch die gleichzeitig offenen Auslassschlitze. Zur last- und drehzahlgerechten Optimierung des Ladungswechselvorgangs wird im Auslassbereich ein Walzen- oder Drehschieber verwendet. Seltener werden auf der Auslassseite Ventile zur Verringerung der Überströmverluste angeordnet.

Daher wurde das Konzept: Querspülung mit Vorverdichtung und Auslassverstellung als erfolgversprechendste Variante weiter betrachtet. Die potentiellen Vorteile und die bekannten Problembereiche der folgenden Tabelle bildeten die Schwerpunkte der Zweitaktentwicklung.

Vorteile:

- günstigeres Package,
- geringeres Gewicht,
- günstigerer Teillastverbrauch,
- höhere spezifische Leistung,
- verbesserter Komfort durch die doppelte Anzahl an Arbeitsspeicher,
- niedrigere Servicekosten

Problembereiche:

- erhöhter Ölverbrauch,
- hoher Kraftstoffverbrauch, Abgasemissionen,
- schlechte Leerlaufqualität,
- unausgewogene Motorcharakteristik,
- geringe Motorbremswirkung,
- unzureichende Lebensdauer,
- ungünstiges Geräuschverhalten,
- problematische Fertigung

## 5.8.2 Das verwendete Konzept

Als Versuchsträger wurde ein moderner kurbelgehäusegespülter Zweitaktmotor mit elektronisch gesteuerter, luftunterstützter Direkteinspritzung, elektronisch gesteuerter Öldosierung sowie elektronisch gesteuerten, variablen Auslasssteuerzeiten (Walzendrehschieber) verwendet. Der Motor mit seinen Details ist in Abb. 5.273 dargestellt.

Weitere wichtige Details des Motors sind:

- Spülkonzept:
  - Querspülung mit Vorverdichtung im Kurbelgehäuse unter Verwendung von Reed-Ventilen zur Vermeidung des Rückströmens der Frischluft in das Ansaugsystem,

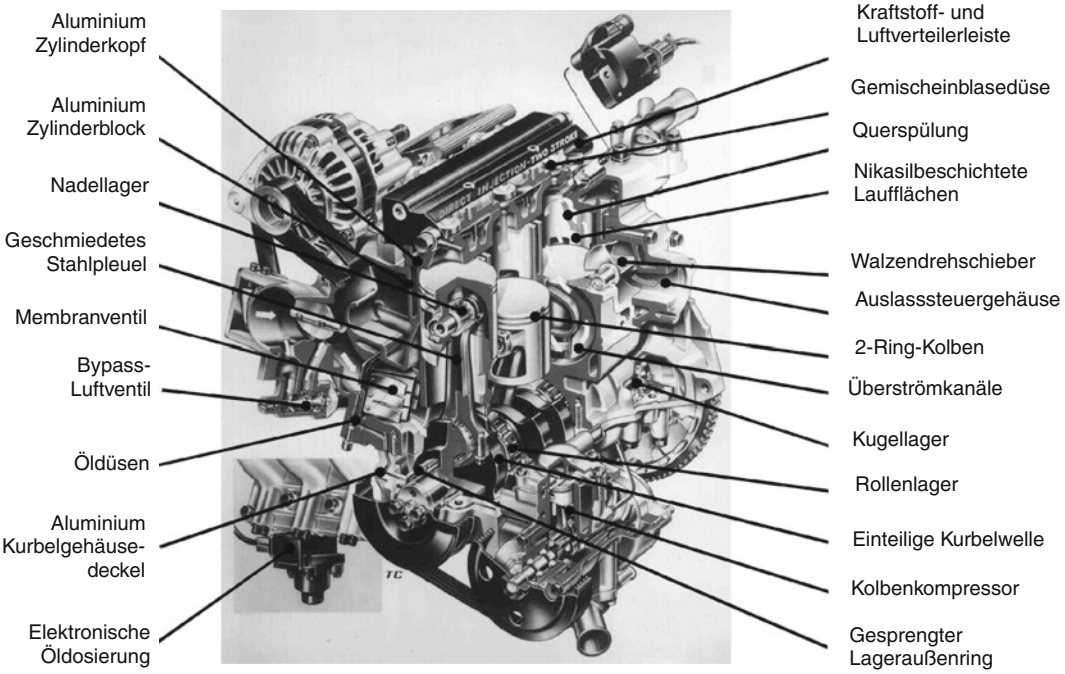



**Abb. 5.273** Moderner kurbelgehäusegespülter 2-Takt-Motor

- Kompressionsverhältnis:
  - geometrisch 10,5 : 1,
  - aufgrund der variablen Auslasssteuerzeiten ergibt sich:
    - Auslassschieber offen 6,4 : 1,
    - Auslassschieber geschlossen 9,3 : 1.

Dieses Konzept erschien attraktiv, da es die einfache Bauweise eines Zweitaktmotors ohne Ventiltrieb mit einem hohen Ausmaß an Einflussmöglichkeit auf den Ladungswechsel verbindet. Durch die Wahl des Einspritzverfahrens in den Brennraum wird ein mögliches Überschieben von Frischgemisch in den Abgastrakt auf das Überschieben von Luft reduziert. Dies ist unabdingbar um eine realistische Chance zur Einhaltung der Abgasgrenzwerte zu haben.

## 5.8.3 Die Entwicklungsschwerpunkte

Aus den erwarteten Vorteilen und bekannten Schwächen des Zweitaktmotors ergaben sich die Entwicklungsschwerpunkte: Abgas-, Geräuschverhalten, Kraftstoffverbrauch, mechanische Standfestigkeit, Package und Gewicht sowie Kosten.

### 5.8.3.1 Abgasverhalten

Das Abgasverhalten des betrachteten Zweitaktmotors wird geprägt durch die spezifischen Bedingungen seines Ladungswechsels und der Gemischbildung durch die luftunterstützte Direkteinspritzung. Zusätzlich erschwert wird die Abgasnachbehandlung durch das nicht stoichiometrisch eingestellte Gemisch und die Verlustschmierung mit der daraus resultierenden Kontamination des Katalysators mit Verbrennungsrückständen des Öls.

Durch das mager eingestellte Gemisch sollen die $NO_x$-Emissionen schon motorseitig so niedrig liegen, dass die Abgasgrenzwerte ohne Abgasnachbehandlung eingehalten werden. Hieraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen einer verbrauchsgünstigen Verlagerung der Betriebspunkte zu niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten und der damit verbundenen hohen Stickoxidemissionen. Weiterhin wird durch die inhomogene Gemischbildung (Restgasschichtung, Spülprozessführung) die Abmagerungsfähigkeit eingeschränkt.

Die Nachbehandlung der Kohlenwasserstoffemissionen ist aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen des mager laufenden Motors problematisch. Ebenso liegen die HC-Rohemissionen aufgrund der unvollständigen Verbrennung des geschichteten Gemischs höher (hohe Restgasgehalte und inhomogene Schichtung bei kleinen Lasten/Drehzahlen, unvollständiges Zusammenhalten der Gemischwolke).

Langzeitversuche zeigten, dass die $NO_x$-Emissionen über eine Laufzeit von 80.000 km nahezu konstant auf einem Niveau liegen, die HC-Emissionen jedoch mit der Laufleistung ansteigen. Die Bedingungen der heutigen Stufe VI Grenzwerte machen eine Abgasnachbehandlung durch einen $DeNO_x$- bzw. $NO_x$-Speicherkatalysator unerlässlich. Des weiteren muss ein Öl entwickelt werden das eine Kontamination des Katalysators und damit eine laufzeitbedingte Verschlechterung der Abgasnachbehandlung vermeidet, als auch erlaubt die Grenzwerte der Partikelemissionen einzuhalten.

### 5.8.3.2 Geräuschverhalten

Eine Analyse des Ist-Zustandes ergab, dass der Versuchsträger am oberen Ende des Streubandes vergleichbarer 8-Ventil und 16-Ventil Vierzylinder-Viertakt-Ottomotoren lag. Weiter war festzustellen, dass bei niedrigen Drehzahlen die Geräusche des Einspritzsystems, im mittleren Drehzahlbereich das direkte und indirekte Verbrennungsgeräusch und bei hohen Drehzahlen das mechanische Geräusch dominieren. Maßnahmen dieses Geräuschverhalten positiv zu beeinflussen sind: Entkopplung des Einspritz- und Ansaugsystems, Monoblockbauweise und Versteifung des Auslasssteuergehäuses, Gleitlagerung der Kurbelwelle und Einbau der Kurbelwelle in ein Tunnelgehäuse sowie eine Kapselung der Ölwanne.

Weitere Maßnahmen sind der Einsatz graphitierter Kolben, die Erhöhung der Schwungmasse sowie die Reduktion des Druckanstiegs $dp/da$ durch eine Zurücknahme des Zündwinkels. Letztere Maßnahme muss aber mit dem einhergehenden Abfall des Drehmoments abgeglichen werden. Bei niedrigen Drehzahlen und Lasten zeigt sich das, obwohl der Drehkraftverlauf aufgrund der doppelten Zündfrequenz gegenüber einem Viertaktmotor ausgeglichener ist, die zyklischen Schwankungen

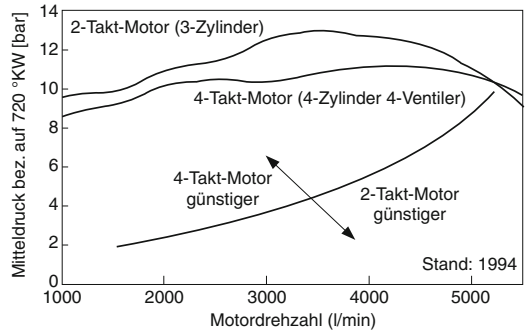



**Abb. 5.274** Unterschiede im spezifischen Kraftstoffverbrauch

aufgrund der hohen und undefinierten Restgasgehalte größer sind.

Es muss aber auch klar gesehen werden, dass ein akustisch optimierter Zweitaktmotor nicht mehr das einfache und kostengünstige Motorkonzept darstellt.

### 5.8.3.3 Kraftstoffverbrauch

Einer der Hauptgründe für die Wiederaufnahme der Entwicklung der Zweitaktmotoren war die erwartete Verbrauchsminimierung aufgrund der geringeren Drosselverluste und Reibung sowie der Verbrennung eines mageren Gemischs. Ein Vergleich der Verbrauchskennfelder von Zwei- und Viertaktmotoren ergab jedoch die in Abb. 5.274 dargestellten Unterschiede.

Bezogen auf ein Viertaktarbeitsspiel erreicht der Zweitaktmotor höhere Vollastmitteldrücke. Dieses führt bei einer auf gleiche Fahrleistungen ausgelegten Getriebeübersetzung zu einer Verbrauchsverbesserung durch Betriebspunktverlagerung. Im gesamten Drehzahlbereich erwies sich der Viertaktmotor im oberen Lastbereich als günstiger. Damit ergaben sich im außerstädtischen Bereich des neuen europäischen Fahrzyklus sogar Verbrauchsnachteile für den Zweitaktmotor. Da zukünftige Fahrzyklen (WLTP) von höheren Lasten geprägt sind, wäre dies für den Zweitaktmotor eine zusätzliche Hürde.

Eine Analyse der Reibung und der Thermodynamik sollte Aufschluss über diesen Sachverhalt geben. Da die Gesamtreibungsverluste von Zwei- und Viertaktmotor auf gleichem Niveau lagen wurde eine detaillierte Analyse durchgeführt.

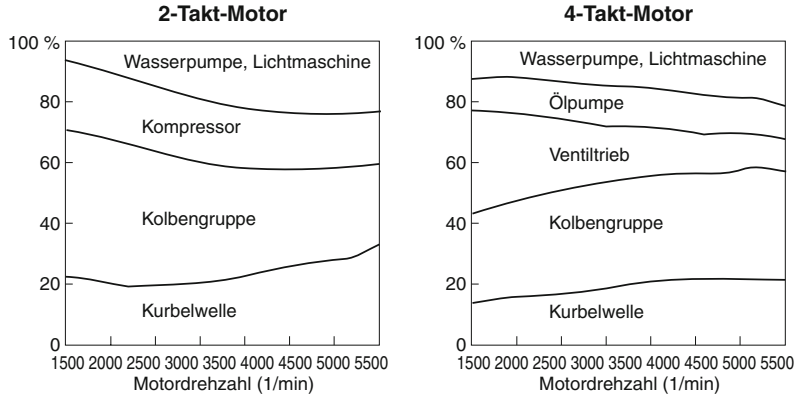



**Abb. 5.275** Aufteilung der mechanischen Reibung

Abb. 5.275 zeigt im Vergleich die Anteile von Kurbelwelle, Kolbengruppe und Nebenantrieben (Wasserpumpe, Lichtmaschine) von Zwei- und Viertaktmotor sowie des Kompressors für die Lufteinblasung des Zweitaktmotors und Ventiltrieb und Ölpumpe für den Viertaktmotor an der Gesamtreibung in Abhängigkeit von der Drehzahl. Man erkennt, dass der entfallene Ventiltrieb durch den Kompressor (ca. 20 % der Gesamtreibung) kompensiert wird. Besonders auffallend ist der hohe Anteil der Kolbengruppe an der Reibung des Zweitaktmotors. Dies obwohl ein Zweitaktmotor ohne Ölabstreifringe mit einem Viertaktmotor verglichen wird. Die Ursache hierfür sind die Mischreibungsgebiete im Bereich der Kanäle, ein starker Verzug der Bohrung sowie Ölablagerungen in den Ringnuten. Versuche mit Motoren in Monoblockbauweise und alternativen Ölformulierungen zeigen Ansätze, diese Probleme zu beherrschen.

Eine thermodynamische Analyse zeigt Nachteile des Zweitaktmotors nicht nur aufgrund des niedrigen effektiven Verdichtungsverhältnisses. Ebenso steigen die Wärmeverluste aufgrund des insgesamt höheren Temperaturniveaus bedingt durch die doppelte Zündfrequenz an.

Im Vergleich zu einem modernen stoichiometrisch betriebenem Viertaktmotor lassen sich Verbrauchsvorteile von 5–10 % erzielen. Dies wird allerdings von direkteinspritzenden Viertaktmotoren im Schichtbetrieb oder mit variabler Ventilsteuerung mittlerweile übertroffen. Des weiteren werden die Drosselverluste durch die heutigen kleinen aufgeladenen Motoren mit Mitteldrücken über 18 bar auch bei stoichiometrischem Betrieb verringert, was den Verbrauchsvorteil des Zweitaktkonzepts weiter vermindert.

### 5.8.3.4 Mechanische Standfestigkeit

An den Zweitaktmotor werden die gleichen Anforderungen bezüglich der Dauerhaltbarkeit gestellt wie an jeden Viertakt Otto- oder Dieselmotor. Bisher gefertigte Zweitaktmotoren können in der Regel diese hohen Laufleistungen nicht erreichen. Fehlerursachen liegen meist im Bereich Kolben, Ringe und Zylinderrohr die konstruktiv bedingt andere Verhältnisse haben als im Viertaktmotor. Die hohe spezifische Leistung, die doppelte Zündfrequenz und die großen Kolbenoberflächen bei Kurzhubern bewirken einen hohen Wärmeeintrag in den Kolben. Der thermischen Probleme des Kolbens muss sorgfältig Rechnung getragen werden um ein frühzeitiges Versagen zu vermeiden. Die Wärmeabfuhr ist durch die von Spülschlitzen unterbrochenen Zylinderwände unzureichend. Diese Situation wird noch verschlechtert durch die starken Bohrungsverzüge aufgrund der mangelhaften Abstützung der Zylinderrohrwände durch die Spülschlitze. Abb. 5.276 zeigt diesen Zusammenhang.

Im Betrieb wird der Verzug durch die ungleiche thermische Belastung der Ein- und Auslassschlitze größer. Durch die hohen erforderlichen Kolbenspiele kommt es zu Verkokungen in der Ringnut und Abdampfen von Schmieröl im Ringbereich.

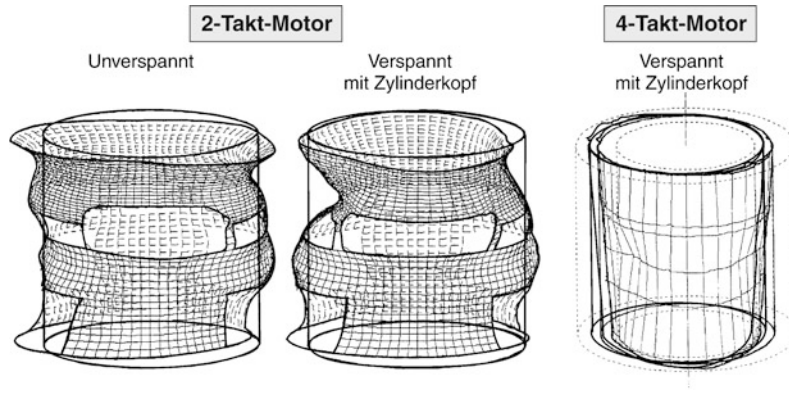



**Abb. 5.276** Statische Bohrungsverzüge von 2- und 4-Takt-Motor

Ein weiterer Schwachpunkt stellt das Schmiersystem selbst dar. Das Öl wird über eine kennfeldgesteuerte Dosierpumpe dem Luftstrom im Bereich der Lamellenventile zugemischt. Überschüssiges Öl sammelt sich im Kurbelgehäuse und wird von dort in den Sammelbehälter abgepumpt. Eine gezielte Schmierung kritischer Stellen ist somit nicht möglich. Ebenso bedürfen die Ölqualitäten einer weiteren Optimierung.

Die Funktionsfähigkeit der Lamellenventile und der Kurbelwellenlager kann durch lose Kohlenstoffpartikel die mit der Abgasrückführung ins Ansaugsystem und damit ins Kurbelgehäuse gelangen beeinträchtigt werden.

Geeignete Maßnahmen gegen die genannten Probleme wären eine Fertigung des Motors in Monoblockbauweise um die Verzüge zu minimieren sowie die Abdichtung der Lager und die Verwendung einer Druckölschmierung. Diese Maßnahmen stehen jedoch dem Wunsch nach einem einfachen und kostengünstigen Zweitaktmotor entgegen.

### 5.8.3.5 Package/Gewicht

Die Abb. 5.277 und Abb. 5.278 zeigen die Unterschiede in den äußeren Abmessungen der Motorenkonzepte Zwei- und Viertaktmotor.

Die Breite des Motors wird in beiden Fällen durch den Ansaug- und Abgaskrümmer sowie die Anordnung der Nebenaggregate bestimmt. Die Gesamtbauhöhe des Zweitaktmotors ist geringer als die des Viertaktmotors. Dieser Vorteil ist jedoch zum größten Teil im Bereich unterhalb der Kurbelwelle zu finden und damit nur bedingt verwendbar da über das Getriebe in Verbindung mit den Antriebswellen die Position der Kurbelwelle vorgegeben ist wenn Vier- und Zweitaktmotoren im gleichen Fahrzeug verbaut werden. Nur ein spezifisch auf den Zweitaktmotor zugeschnittenes Getriebekonzept könnte diesen Bauraumvorteil nutzen. In der Länge hat der betrachtete Zweitaktmotor den Vorteil der Dreizylinderbauweise gegenüber einem Vierzylinder-Viertaktmotor. Wird der Viertaktmotor als Dreizylinder ausgeführt relativiert sich dieser Vorteil ebenfalls. Eine Optimierung des Zweitaktmotorkonzepts aus akustischen und Dauerhaltbarkeitsgesichtspunkten (Kapselung, Gleitlagerung der Kurbelwelle, Druckölversorgung) lässt keinen Spielraum die möglichen Bauraumvorteile des Zweitaktkonzepts zu behalten.

Die gleichen Gründe, die einen Bauraumvorteil des Zweitaktmotors unwahrscheinlich erscheinen lassen, lassen sich auch in der Betrachtung des Gewichts anführen und zeigen, dass es schwierig sein dürfte die mittlerweile erreichten Gewichte eines modernen Viertaktmotors zu erreichen.

### 5.8.3.6 Kosten

Durch den einfachen Aufbau des Zweitaktmotors wurde eine erhebliche Kosteneinsparung erwartet. Betrachtet man diese Problematik genauer zeigt sich eine Einsparung vor allen Dingen durch den Wegfall des Ventiltriebs und des aufwendigen Zy-

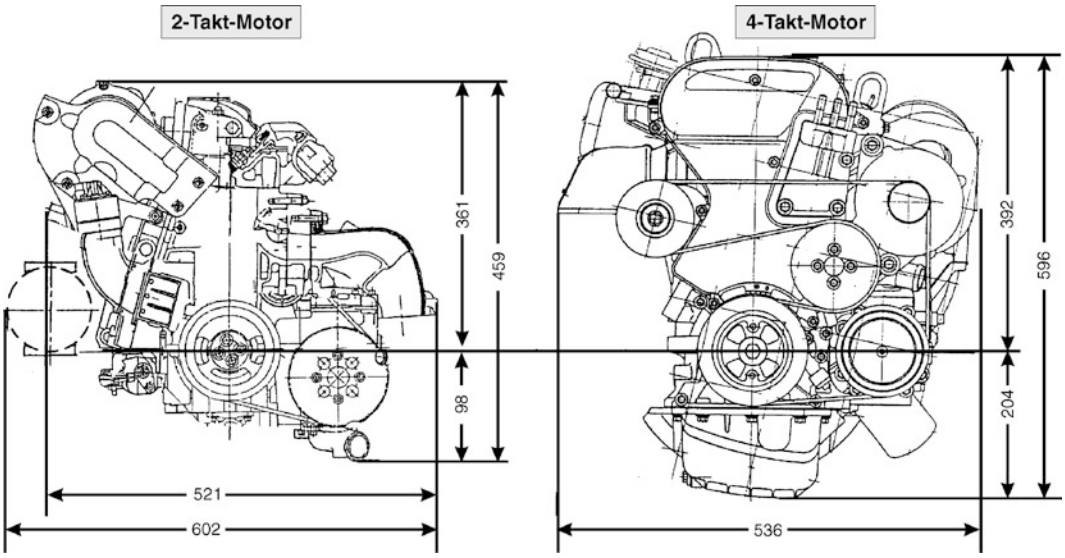



**Abb. 5.277** Package-Vergleich: Breite und Höhe

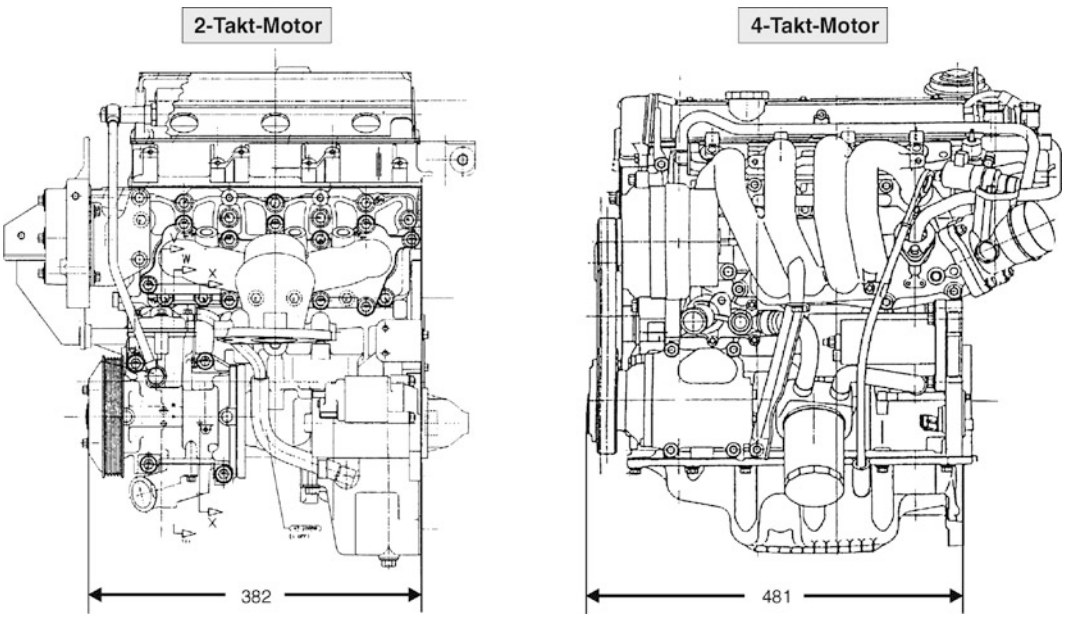



**Abb. 5.278** Package-Vergleich: Länge

linderkopfs. Im Gegenzug wird die Bearbeitung des Zylinderblocks der jetzt die Ladungswechselorgane beinhaltet, sowie die Luft für das nächste Arbeitsspiel vorverdichtet, umfangreicher. Ebenso gestaltet sich die Fertigung und Montage der Kurbelwelle und der geteilten Wälzlager der Kurbelwellenhaupt- und Pleuellager aufwendiger. Zweitaktmotorspezifische Bauteile sind die Membraneinlassventile, die die Vorverdichtung der Luft im Kurbelkasten ermöglichen und der Walzendreh-

schieber zur Steuerung der Restgasmenge. Ebenfalls muss das Gemischeinblasesystem in eine Kostenbetrachtung einbezogen werden. Insgesamt fällt der Kostenvorteil des Zweitaktmotors unter gleichen Randbedingungen gering aus.

### 5.8.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die wesentlichen Punkte lassen sich aus heutiger Sicht wie folgt zusammenfassen:

- Emissionsgrenzwerte sind nur durch aufwendige Abgasnachbehandlung erfüllbar (DeNO$_x$-Katalysator, NO$_x$-Speicher) analog der Viertakt Magermotorkonzepten,
- aufwendige konstruktive Maßnahmen zur Erzielung eines befriedigenden NVH-Verhaltens erforderlich,
- 5–10 % potentieller Verbrauchsvorteil gegenüber einem stoichiometrisch betriebenem Viertaktmotor (der aber auch ebenfalls homogen mager betrieben werden kann),
- kein Verbrauchsvorteil mehr gegenüber einem stoichiometrisch betriebenem, kleinen aufgeladenen Viertaktmotor mit Direkteinspritzung,
- aufwendige Maßnahmen zur Erzielung ausreichender mechanischer Standfestigkeit,
- Bauraumvorteil nur in der Länge aufgrund einer geringeren Zylinderzahl bei gleicher spezifischer Leistung,
- geringer Gewichtsvorteil,
- keine bis nur geringe Kostenvorteile.

Der Zweitaktmotor konnte in der kurzen Entwicklungsphase Anfang der neunziger Jahre nicht so überzeugend weiterentwickelt werden um eine breite Anwendung als Fahrzeugantrieb zu finden. Zudem sind die Emissionsrandbedingungen der Stufe VI so, dass ein Aufgreifen dieses Konzepts nicht erfolgversprechend erscheint. Der Zweitaktmotor bleibt aber aufgrund seiner spezifischen Vorteile ein attraktives Motorkonzept für andere Anwendungen. Dies gilt insbesondere wenn die Anforderungen bezüglich kleiner Bauweise und eingeschränktem Betriebsbereich nur gering durch andere Anforderungen eingeschränkt werden. Anwendungsgebiete sind damit Motoren mit kleinem Hubvolumen im Zweiradbereich und das breite Feld der in erster Linie stationär betriebenen Motoren bei Generatoren, Schiffen und Arbeitsgeräten (Kettensägen, etc.).

## 5.9 Konventionelle und alternative Kraftstoffe und Energieträger

Ein wesentlicher Pfeiler einer modernen Gesellschaft ist die Mobilität, der Transport von Gütern und Personen.

Zur Ableitung eines zukünftigen Energieportfolios für die Mobilität müssen die wesentlichen Entwicklungen im Mobilitätssektor mit einbezogen werden. Eine solche Entwicklung der letzten und kommenden Jahre stellt die zunehmende Elektrifizierung der Individualmobilität dar. Die Elektrotraktion in Verbindung mit Elektrizität aus regenerativen Quellen kann den Weg zur nachhaltigen Mobilität ebnen. Gleiches gilt für verbrauchsoptimierte Verbrennungsmotoren – besonders in Kombination mit nachhaltigen $CO_2$-reduzierten Kraftstoffen. Diese Koexistenz der Antriebstechnologien von Verbrennungsmotor und Elektrotraktion zeigt Abb. 5.279. Sie verdeutlicht, dass eine nachhaltige Mobilität perspektivisch nur zu erreichen sein wird, wenn die antriebsseitige Effizienzsteigerung und Elektrifizierung mit einer Dekarbonisierung des für den Antrieb genutzten Energieträgers einhergeht.

Heute stellt mit Anteilen von ca. 93 % sowohl in Deutschland als auch weltweit ([275, 276]) Rohöl den dominierenden Energieträger für die Mobilität dar. Nur wenn perspektivisch regenerative Primärenergie für die Mobilität in erheblichem Umfang nutzbar gemacht wird, sei es als flüssiger oder gasförmiger Kraftstoff oder als Elektrizität, kann die klimapolitisch notwendige Entkopplung der global weiter steigenden Nachfrage nach Mobilität und der Emissionen durch diese Mobilität erreicht werden.

Um die unterschiedlichen Dimensionen dieser Herausforderung in einem globalen Kontext zu veranschaulichen, zeigt Abb. 5.280 für vier ausgewählte Regionen den Anteil von Benzin, Diesel und Biokraftstoffen zur Deckung des Energiebedarfes für den Straßenverkehr. Aus den Marktanteilen für Benzin und Diesel kann man ableiten, dass

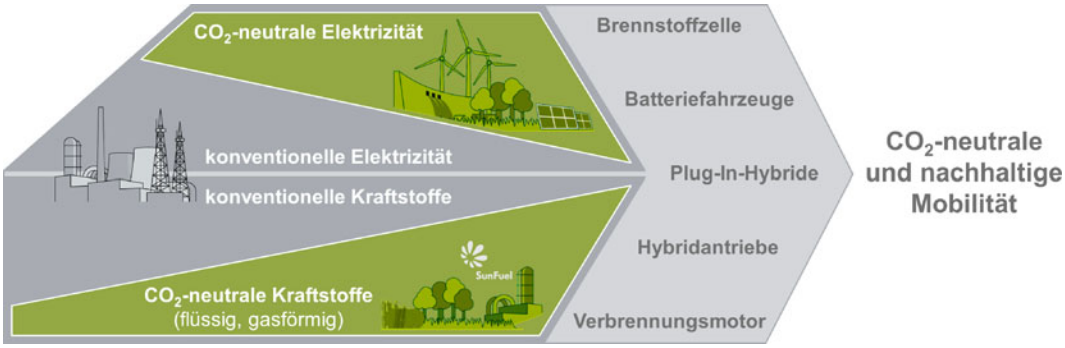



**Abb. 5.279** Entwicklungspfad zu einer nachhaltigen Mobilität unter notwendiger Koexistenz diverser Antriebstechnologien. Basierend auf [271]

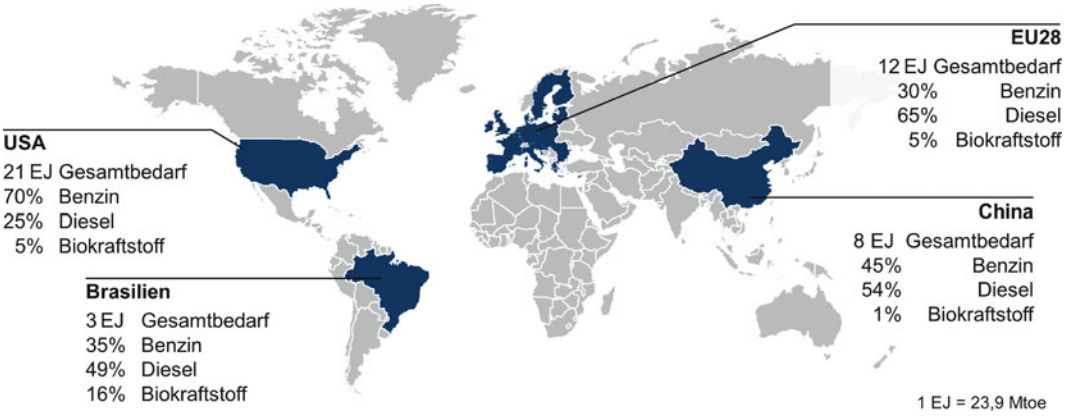



**Abb. 5.280** Marktanteile unterschiedlicher Kraftstoffe und regenerativer Derivate für den Straßenverkehr im Jahr 2012. Basierend auf [272]

sich für regenerative Derivate die regionalen Märkte sehr unterschiedlich entwickeln müssen. In den USA beispielsweise müssten zurzeit für die Erreichung einer bestimmten Ethanol-Beimischquote zu Benzin größere Mengen produziert werden, als in Europa, China und Brasilien zusammen. Außerdem lässt sich ablesen, dass die Absprungbasis für die in Abb. 5.279 dargestellte Entwicklung sich regional sehr unterschiedlich darstellt. Während in den USA und der EU, auf Grund von gesetzlichen Vorgaben, derzeit rund 5 % des Energiebedarfes des Straßenverkehrs durch Biokraftstoffe abgedeckt werden, liegt dieser Wert in Brasilien mit knapp 16 % mehr als drei Mal so hoch, weil dort Bioethanol aus Zuckerrohr in großen Mengen zu wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar ist. In China hingegen, wie Brasilien ein aufstrebendes Schwellenland, spielen Biokraftstoffe heute nahezu keine Rolle. Die Chancen für Biokraftstoffe auf eine erfolgreiche Marktdurchdringung hängen demnach offensichtlich nicht von marktwirtschaftlichen, sondern im Wesentlichen von den politischen Rahmenbedingungen ab.

Von großer Bedeutung für die Bewertung der Perspektiven von konventionellen und alternativen Kraftstoffen für Pkw ist die zukünftige Entwicklung der Mobilitätsnachfrage. Zur Veranschaulichung des historischen Trends dient Abb. 5.281. In den letzten Jahrzehnten hat der Energiebedarf des Straßenverkehrs kontinuierlich (im Durchschnitt um 2,8 % pro Jahr [272]) zugenommen, trotz stetiger Steigerung der Antriebseffizienz. Die Energiebereit-

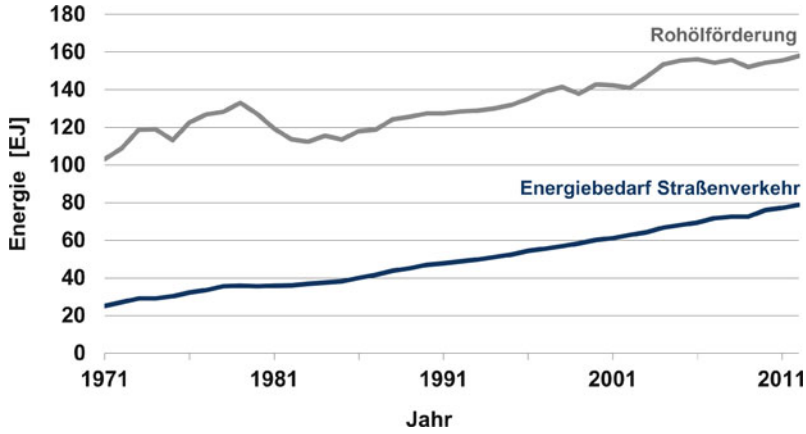



**Abb. 5.281** Entwicklung der weltweiten Rohölförderung und des Energiebedarfes des globalen Straßenverkehrs ab 1971. Basierend auf [272]

stellung für den Straßenverkehr, repräsentiert durch die Rohölförderung, hat im dargestellten Zeitraum nahezu um den identischen Betrag zugenommen wie die Nachfrage durch den Straßenverkehr. Daran lässt sich wiederum die Abhängigkeit der Erdölproduzenten von der Mobilität als wichtigstem Kunden erkennen.

Eine Vorstellung der zukünftigen Entwicklung des weltweiten Energiebedarfes für den Straßenverkehr vermittelt Abb. 5.282. Die Grafik wurde in Analogie zu Forschungsarbeiten des MIT zur Gesamtmobilität in den 1990er Jahren [274] entwickelt und stellt die Pkw-Verkehrsleistung pro Einwohner einzelner Länder einem volkswirtschaftlichen Wohlfahrtsindikator (Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner) gegenüber. Die aktuellsten Datenpunkte in Abb. 5.282 basieren auf Daten aus dem Jahr 2012. Es besteht eine eindeutige positive Kor-

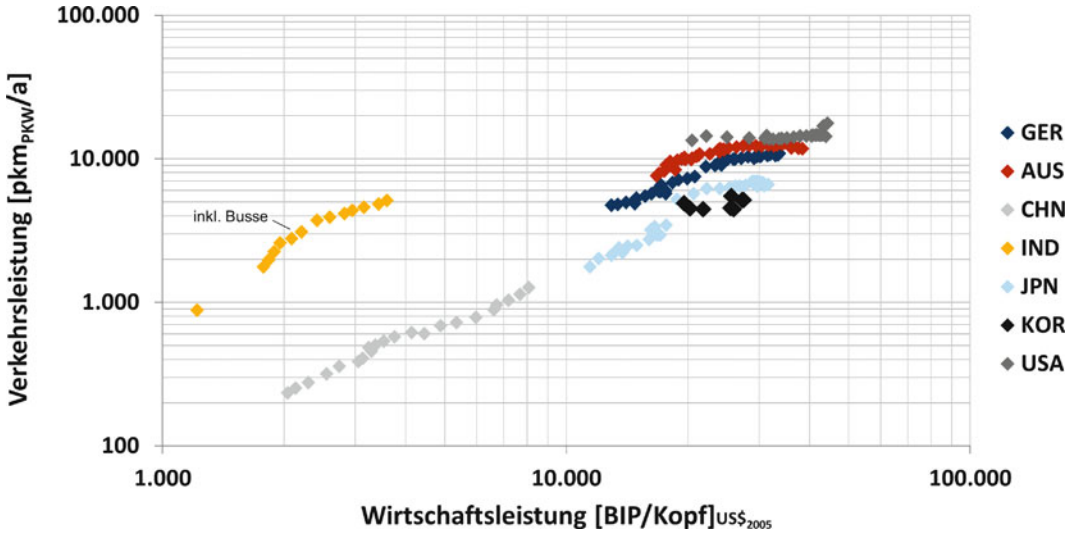



**Abb. 5.282** Entwicklung der Verkehrsleistung mit Pkw je Einwohner in Abhängigkeit des Pro-Kopf-Bruttoinlandsproduktes zwischen 1970 und 2011 (Daten für IND, CHN & RUS erst ab 1990 verfügbar). (Quelle: Eigene Berechnung basierend auf [272] und [273])

relation zwischen der spezifischen Wirtschafsleistung, als Äquivalent des Einkommens, und der in Pkw zurückgelegten jährlichen Wegstrecke. Regionale Unterschiede lassen sich vor allem durch Unterschiede bei Geografie (bspw. Japan und Korea als Insel/Halbinsel und USA und Deutschland als Festland) und Populationsdichte der einzelnen Länder erklären. Die Parallelverschiebung der Datenpunkte für Indien gegenüber dem in doppeltlogarithmischer Darstellung linearen Pfad der anderen Nationen lässt sich mit dem zu Grunde liegenden Datensatz erklären, welcher für Indien nicht Pkw-Wege separat erfasst, sondern alle auf Straßen zurückgelegten Wege.

Die dargestellten Industrieländer scheinen jeweils an ihrer individuellen Grenze der mittleren Fahrleistung angekommen zu sein, da sich diese im letzten Jahrzehnt nur noch in geringem Maße erhöht hat. China und Indien – als bevölkerungsreichste Länder der Welt – hingegen zeigen in den letzten 20 Jahren eine enorme wirtschaftliche Dynamik, welche sich auch in eine deutliche Steigerung der individuellen Fahrleistung überträgt.

Aus der dargestellten Entwicklung der letzten Jahrzehnte kann die Erwartung abgeleitet werden, dass die weltweite Nachfrage nach Mobilität – und damit auch die Nachfrage nach Kraftstoffen – auf Grund der Wachstumsdynamik in den Schwellen- und Entwicklungsländern auf absehbare Zeit weiter in erheblichem Umfang steigen wird.

Von großer Bedeutung für die Zukunft einzelner konventioneller und alternativer Kraftstoffe und Energieträger sind, wie oben bereits kurz erwähnt, die politischen bzw. gesetzlichen Rahmenbedingungen. Regional werden verschiedene politische Strategien verfolgt diesen unterschiedlichen Herausforderungen zu begegnen. In Europa steht die Klimaerwärmung im Vordergrund. Die politischen Strategien sollen in erster Linie die $CO_2$-Emissionen reduzieren helfen. In den USA dagegen befindet sich der Schwerpunkt bei der Energieversorgungssicherheit. In den Schwellenländern, in denen das schnell anwachsende Mobilitätsbedürfnis zwingend für die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung benötigt wird, stehen die Beherrschung der lokalen Emissionsbelastung und die Energieversorgungssicherheit im Vordergrund.

In Europa ist das erklärte politische Ziel ein Anteil von 10 % erneuerbarer Energien im Transportsektor bis 2020, wobei Biokraftstoffe wegen der Verfügbarkeit die Hauptlast bis 2020 tragen werden. Verbunden mit dem $CO_2$-Reduktionspotenzial der Biokraftstoffe [277], werden sich die $CO_2$-Emissionen allein durch Biokraftstoffe um ca. 5 % reduzieren lassen. Bei den Biokraftstoffen dominiert in Europa gegenwärtig Biodiesel (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) aus Rapsöl. Weiterentwicklungen wie hydrierte Pflanzenöle (Hydrotreated Vegetable Oils, HVO) und synthetischer Diesel werden ebenfalls vorangetrieben.

Großes Potenzial wird bei Ethanol aus Zuckerrübe und Getreide gesehen, wobei hierbei die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln in der gesellschaftlichen Diskussion ist.

Die Erneuerbare Energien Richtlinie [277] sieht vor, dass Biokraftstoffe die dort definierten Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllen müssen. Diese Nachhaltigkeitsanforderungen werden seit 2010 alle zwei Jahre einer erneuten Überprüfung unterzogen. Es besteht somit für die Biokraftstoffanlagenbetreiber das Risiko, dass früher anerkannte Biokraftstoffe bei einer erneuten Überprüfung der Nachhaltigkeitsanforderungen ihre Anerkennung verlieren. Die damit verbundene ungewisse Planungssicherheit erschwert in Europa Investitionen in neue Biokraftstoffanlagen.

In den USA steht die Substitution von erdölstämmigen Kraftstoffen im Vordergrund, wenn auch zunehmend die Treibhausgasreduktion stärker in den Fokus rückt [278]. So ist eine 10 %-ige Kohlendioxidreduktion Ziel des „Low Carbon Fuel Standards“ des Staates Kalifornien. Als wichtigster Erdölersatz für den Mobilitätsbereich wird Ethanol gesehen. Dabei werden drei unterschiedliche Rohstoffquellen für Ethanol betrachtet: aus heimischem Mais, aus Zellulose (Stroh, Gras) und importiertes Ethanol aus Zuckerrohr. Intensive Aktivitäten sind in den USA auf dem Gebiet von Zellulose-Ethanol zu erkennen. Der Renewable Fuels Standard II der U. S. Environmental Protection Agency, EPA [278] gibt absolute Mengen von zum Teil klar definierten Biokraftstoffen bis 2022 vor. Diese wurden aber in der Vergangenheit jährlich nach unten angepasst, sodass auch hier keine Investitionssicherheit gege-

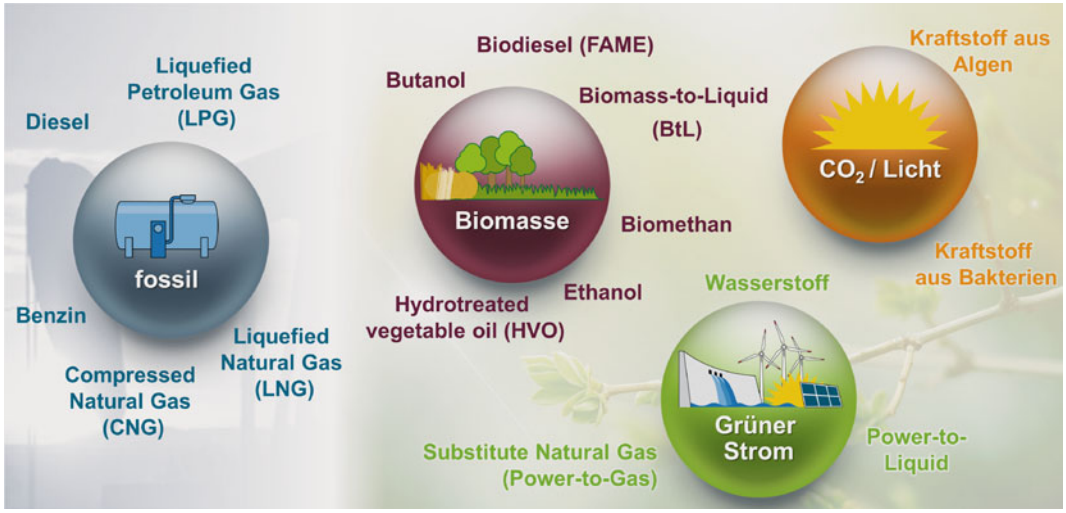



**Abb. 5.283** Konventionelle und alternative Kraftstoffe auf Basis unterschiedlicher Energiequellen (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

ben ist. Insgesamt spielen neben Ethanol andere Biokraftstoffe insbesondere für Dieselmotoren eine klar untergeordnete Rolle.

Der Wunsch nach mehr Energieversorgungsunabhängigkeit aktiviert die Nutzung nationaler Ressourcen. Damit werden auch das Kraftstoffangebot und die Kraftstoffqualitäten lokal zunehmend stärker variieren, was schon heute im chinesischen Markt zu beobachten ist. Steigender Kostendruck und weltweit steigende Anforderungen an die Emissionen der Fahrzeuge sollten durch eine harmonisierte und an die Emissionsanforderungen angeglichene und zeitlich synchronisierte flächendeckende Kraftstoffqualität gekoppelt sein. Diesem Zielkonflikt gilt es nicht nur durch technische Maßnahmen zu begegnen.

Auf Basis der bisher diskutierten Entwicklungen und Rahmenbedingungen stellt sich die Frage, welche konkreten konventionellen und alternativen Kraftstoffe und Energieträger zur Verfügung stehen werden, um die Nachfrage zu decken. Abb. 5.283 stellt alle relevanten Alternativen dar, von denen einige in den folgenden Abschnitten im Detail vorgestellt werden. Neben den heute etablierten fossilen und biogenen[1] Kraftstoffen spielen in der langfristigen Perspektive vor allem fortschrittliche Kraftstoffe auf Basis von regenerativer Elektrizität oder modifizierter Fotosynthese eine immer wichtiger werdende Rolle.

[1] Auf Basis von Anbau-Biomasse und Reststoffen.

## 5.9.1 Fossile Energiequellen

Im Jahr 2012 wurde der globale Primärenergiebedarf zu 87 % aus fossilen Quellen gedeckt [276]. Dies beinhaltet Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernkraft, wobei Erdöl mit 31 % den größten Anteil beiträgt. Dieses zeigt sich auch in der Mobilität, deren Energieversorgung zu 93 % aus fossilen Kraftstoffen besteht. Weil sich die Dominanz fossiler Energieträger in den kommenden Jahren zunächst nur marginal ändern wird, sind die Reichweiten der jeweiligen Reserven und Ressourcen von zentraler Bedeutung, welche in Abb. 5.284 veranschaulicht sind.

In der Darstellung sind die bereits geförderten Mengen und die konventionellen und unkonventionellen Reserven und Ressourcen normiert auf die Förderung 2013 in Jahren dargestellt. Es zeigt sich, dass weniger Erdgas als Erdöl gefördert wurde und dass Erdgas eine deutlich höhere statische Reichweite aufweist als Erdöl. Langfristig hat damit Erdgas das größere Potential die steigende Nachfrage nach fossilen Energieträgern zu decken. Dies wird noch verstärkt durch die unkonventionellen

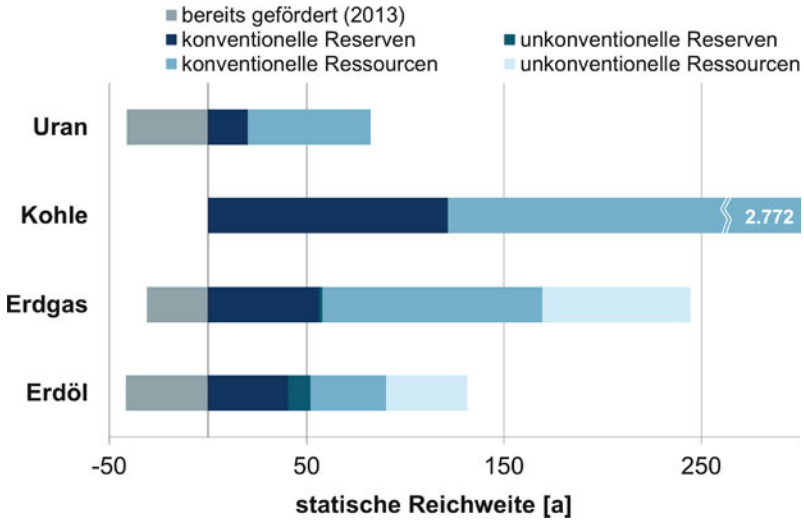



**Abb. 5.284** Konventionelle und unkonventionelle Ressourcen und Reserven. Abbildung basierend auf [279]

Reserven/Ressourcen, die in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus gerückt sind. Insbesondere die USA erleben seit 2008/2009 einen erneuten Erdöl- und Erdgas-Boom, der auf der Förderung der unkonventionellen Schiefergas/-öl Reserven beruht. Dadurch wurde die USA 2013 zum größten Erdgasproduzenten hinter Russland und zum drittgrößten Erdölproduzenten nach Saudi-Arabien und Russland. Die Frage ob es sich hierbei um ein langfristiges Phänomen handelt, wird kontrovers diskutiert. Prognosen der U. S. Energy Information Administraton zeigen ein Maximum der Ölproduktion in 2019 und eine stetige Steigerung der Erdgasproduktion [281]. Ob dieses Phänomen auch auf andere Länder übertragbar ist, ist umstritten. Zwar besitzt z. B. China die weltweit größten Schiefergas- und drittgrößten Schieferölressourcen jedoch gänzlich andere geologische und infrastrukturelle Voraussetzungen als die USA. Diese erschweren die Förderung immens, so dass nur langfristig mit einem Anstieg der Förderung aus unkonventionellen Quellen zu rechnen ist.

Ein globaler Effekt zeichnet sich jedoch schon jetzt durch die verstärkte Schiefergasproduktion ab. Da sich die USA zum netto Erdgasexporteur entwickelt hat, werden verstärkt LNG (Liquefied Natural Gas, Flüssigerdgas) Import-Terminals in Exportterminals umgerüstet, so dass sich der LNG Markt deutlich vergrößert hat. Es zeigen sich auch Tendenzen LNG verstärkt in der Mobilität zu nutzen. Diese beziehen sich momentan ausschließlich auf den Fernverkehr, da eine sinnvolle Anwendung in der Mobilität eine hohe Auslastung der Fahrzeuge und Infrastrukturen erfordert.

Eine weitere fossile Alternative ist Flüssiggas (Liquid Petroleum Gas: LPG). Es wird zusammen mit Erdöl und Erdgas in einem durchschnittlichen Anteil von ca. 6 % gefördert [282]. Das Substitutionspotenzial von LPG ist daher auf 6 % der Erdöl- bzw. Erdgasförderung beschränkt. Hinzu kommt, dass LPG ein wichtiger chemischer Rohstoff ist und der zentrale Energieträger zum Kochen für Bevölkerungsteile, die weder zu Gas oder Strom Zugang haben. Daher ist das Potenzial von LPG zur Energieversorgungssicherheit für die Mobilität beschränkt.

Das größte Potential aller fossilen Energieträger besitzt Kohle. Jedoch steht die positive Rohstoffsituation im Gegensatz zu den Anstrengungen die Energieversorgung $CO_2$-neutraler zu gestalten. Eine Möglichkeit dies trotz allem zu erreichen ist die Kohlendioxid Sequestrierung (Carbon Capture and Storage, CCS), die aber hauptsächlich in den USA und China vorangetrieben wird. Für den Einsatz in der Mobilität stehen zwar Technologien zur Umwandlung von Kohle in Kraftstoffe (Coal-to-Liquid,

CtL) mit z.B. Fischer-Tropsch-Synthese zur Verfügung, werden aber nur in China und Südafrika großtechnisch umgesetzt. Einzig in Südafrika leisten CtL-Kraftstoffe bisher einen signifikanten Beitrag zur Mobilität.

Langfristig werden die weiter unten diskutierten regenerativen Alternativen an Bedeutung gewinnen und schließlich die Energieversorgung auch für den Mobilitätsbereich dominieren.



## 5.9.2 Regenerative Energiequellen

Der entscheidende Vorteil der regenerativen Energien ist die nach menschlichen Maßstäben unendliche Reichweite der Reserven und Ressourcen. Die Herausforderung besteht darin, die verfügbare Primärenergie wirtschaftlich und mit möglichst wenig Energieverlust in eine nutzbare Form zu überführen.

Die einfachste Methode ist derzeit die Umwandlung von Wasserkraft, Sonnenenergie und Windkraft zu „grünem Strom". Dieser kann jedoch derzeit nur im geringen Maße direkt in die Mobilität einfließen, da in vielen Märkten nur ein verschwindend geringer Anteil von Batteriefahrzeugen vorhanden ist. Durch chemische Prozesse, wie die Elektrolyse, Methanisierung und das Fischer-Tropsch-Verfahren können aus dem „grünen Strom" in gasförmige oder flüssige Kraftstoffe überführt und somit für die klassischen Verbrennungsmotoren nutzbar gemacht werden.

Derzeit beruhen Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen nahezu vollständig auf der Produktion aus Biomasse. Dabei dient Sonnenergie als Energiequelle für die Fotosynthese, um energiereichere Biomasse aus energieärmeren Stoffen aufzubauen. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass Pflanzen nur ca. 1 % der Energie des Sonnenlichtes umwandeln [282]. Dieser geringe Wirkungsgrad resultiert in einem hohen Flächenbedarf, um ausreichende Kraftstoffmengen für den weltweiten Bedarf zu erzeugen und führt daher zunehmend zu einer Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion.

Immer wieder im Gespräch sind auch Kraftstoffe aus Algen, welche – genau wie Pflanzen – mittels Fotosynthese Biomasse aufbauen, also $CO_2$ und Licht als Rohstoffquelle verwenden. Vorteil im Vergleich zu Kraftstoffen aus Landpflanzen ist hierbei, dass keine Agrarflächen benötigt werden und somit keine Konkurrenz zur derzeitigen klassischen Lebensmittelproduktion vorhanden ist. Da Algen jedoch auch gegessen werden können und auch für die Produktion von anderen Produkten (Farbstoffe, Nahrungsergänzungsmittel, etc.) verwendet werden, ist diese fehlende Konkurrenz nur unter dem Gesichtspunkt zu sehen, dass durch die Aufstellung neuer Produktionsanlagen keine existierenden Systeme verdrängt werden. Außerdem ist es unwahrscheinlich, dass die wenigen heute schon existierenden Algenanlagen auf eine Kraftstoffproduktion umrüsten, weil die Gewinnmarge bei letzterem wesentlich geringer ausfällt.

Für eine nachhaltige Mobilität müssen Biokraftstoffe eine Reihe von Anforderungen erfüllen, die unter anderem vom Gesetzgeber und der Gesellschaft vorgegeben sind. Zu den Hauptforderungen zählen die Reduktion der $CO_2$-Emissionen und ein möglichst hohes Substitutionspotenzial für fossile Energiequellen. Aus technischer Sicht von besonderer Bedeutung sind die Kompatibilität zu den vorhandenen Fahrzeugen im derzeitigen Pkw-Bestand und die Kompatibilität zur Kraftstoff-Verteilungsinfrastruktur durch z. B. problemlose Mischbarkeit mit heutigen Kraftstoffen.

Die Auswirkungen von Biokraftstoffen auf den Nahrungsmittelsektor und die Nutzung von Agrarflächen werden seit Jahren diskutiert. Eine Einteilung von Biokraftstoffen anhand der angesprochenen Konkurrenzsituation zeigt ◘ Abb. 5.285.

Einige Herstellpfade für Biokraftstoffe stehen in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und zur Veredelungswirtschaft (Fleischproduktion). Diese Prozesse basieren beispielsweise auf Getreidekörnern, Rapssamen oder Palmfrüchten. Im Falle der Verwendung von Ackerland zur Produktion von zellulosehaltiger Biomasse, wie Agrarholz und Grassilage, reduziert sich die Konkurrenzsituation auf eine direkte Konkurrenz zu Biomasse und zu Ackerland. Bei Verwendung von landwirtschaftlichen Reststoffen wie Stroh oder Restholz besteht keine Konkurrenz zu Agrarfläche und Nahrung; lediglich die Biomasse selbst konkurriert mit anderen Nutzungsmöglichkeiten (Wärmeerzeugung). Nur bei Biokraftstoffen basierend auf

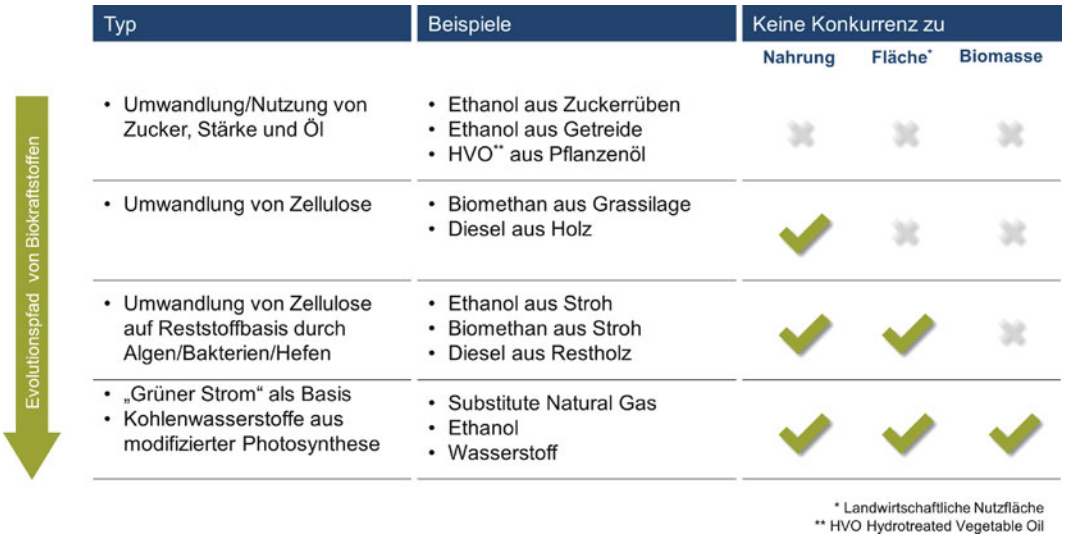



**Abb. 5.285** Einteilung von Biokraftstoffen anhand der Konkurrenzsituation. (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

„grünem Strom" und aus mikrobieller Fotosynthese mit einem modifizierten Stoffwechsel, der eine biomassefreie Produktion von Kraftstoffen – unter Verwendung von $CO_2$ und Licht als Rohstoffquellen – erlaubt, ist die direkte Konkurrenz zu Biomasse, Agrarfläche und Nahrung aufgehoben. Dies gilt ebenfalls für die Wandlung von „grüner" Elektrizität in chemische Energieträger wie beispielsweise Methan („Power-to-Gas").

Im Folgenden werden einige der genannten Verfahren zur Kraftstoffproduktion aus Biomasse und elektrischem Strom genauer erläutert.

### 5.9.2.1 Biokraftstoffe auf Basis von Biomasse

Je nach Zusammensetzung der Biomasse sind unterschiedliche Prozesse zur Biokraftstofferzeugung möglich, wobei bevorzugt öl- und zuckerhaltige Biomasse verwendet wird. Zuckerhaltige Biomasse wird in der Regel durch fermentative Prozesse in Alkohole (Ethanol und Butanol) oder in Biogas umgewandelt, während ölhaltige Biomasse zu Biodiesel oder zu hydrierten Pflanzenölen (HVO) verarbeitet wird.

**Zuckerhaltige Biomasse** Aus Zucker (Glukose $C_6H_{12}O_6$) lassen sich verschiedene gasförmige und flüssige Kraftstoffe, als Substituenten für fossilen Otto- und Dieselkraftstoff, herstellen. Wie Abb. 5.286 zeigt ist Glukose über verschiedene Prozesse zu gewinnen und stellt den molekularen Anteil der Biomasse dar, welcher für die Kraftstoffherstellung nutzbar ist. Hierbei liegt die Glukose je nach Biomasse in unterschiedlich komplexen Formen vor und erfordert mit zunehmender Komplexität einen erhöhten verfahrenstechnischen Aufwand zur Nutzbarmachung.

Der verfahrenstechnische Aufwand ist am geringsten bei zuckerhaltigen Biomassen wie z. B. Zuckerrüben oder Zuckerrohr, da der Zucker direkt extrahiert werden kann. In Stärkepflanzen wie Mais oder Getreide liegt der Zucker dagegen in Form von Stärke vor, welche in einer enzymatischen Hydrolyse in die einzelnen Zuckermoleküle aufgebrochen werden muss. Am komplexesten gestaltet sich der Biomasse-Aufschluss bei lignozellulosehaltigen Rohstoffen wie z. B. Getreidestroh. Einem mechanischen Aufschluss folgt eine Vorbehandlung meist mit Säuren, bevor mit Hilfe von speziellen Enzymen das Monomer Glukose extrahiert werden kann.

Der gewonnene Zucker kann über verschiedene Konversionsrouten zu unterschiedlichen Biokraftstoffen verarbeitet werden. Zu den klassischen Wegen zählt die Fermentation mit Mikroorganismen bei der Alkohole (Ethanol oder Butanol) oder

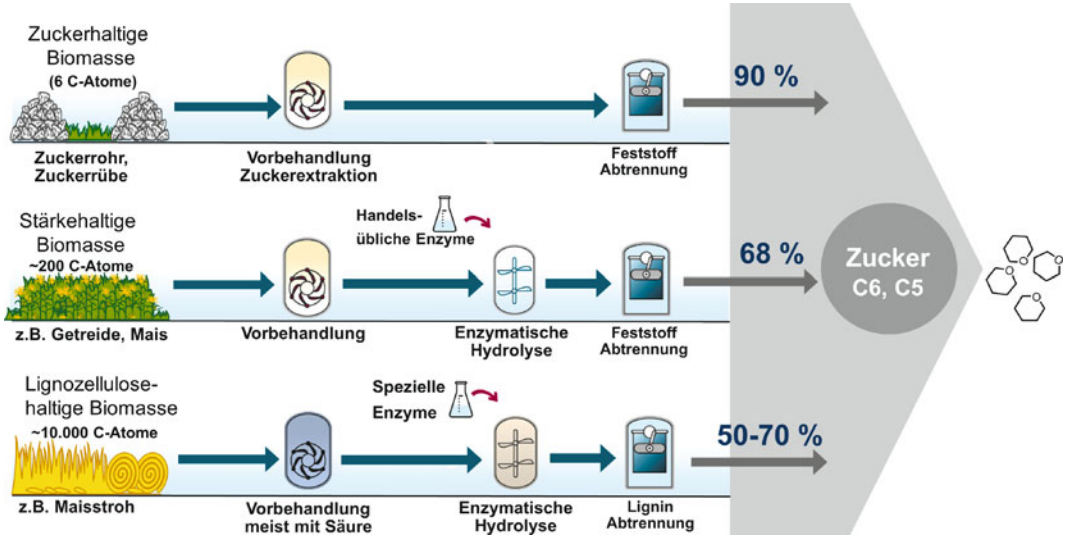



**Abb. 5.286** Wirkungsgradpfade: Rohstoff „Biomasse zu Zucker". (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

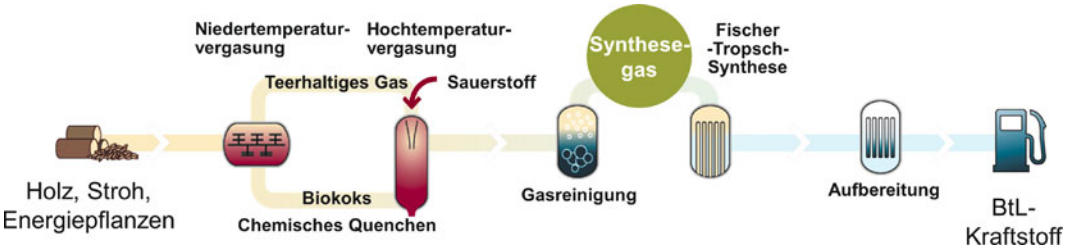



**Abb. 5.287** Produktionsverfahren von Biomass-to-Liquid Kraftstoffen. (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

Biogas erzeugt werden, die als biogene Substitute für den fossilen Ottokraftstoff dienen. Von großem Vorteil ist dabei, dass nasse Biomasse bei moderaten Druck- und Temperaturbedingungen direkt genutzt wird. Neue Verfahren in der mikrobiellen Fermentation sowie in der katalytischen Synthese ermöglichen die Produktion von Otto- und Dieselkomponenten.

Die zellulosehaltige Biomasse kann jedoch auch zu synthetischen Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen verarbeitet werden (vgl. Abb. 5.287). Dazu wird aus der Biomasse in einem Vergaser Synthesegas (CO, $H_2$) erzeugt, welches mit Hilfe des Fischer-Tropsch-Verfahrens in flüssige Biokraftstoffe umgesetzt wird. Aufgrund der Flexibilität des Verfahrens kann ein breites Spektrum an Biomasse eingesetzt werden.

**Ölhaltige Biomasse** Aus Pflanzen mit ölhaltiger Biomasse wie Raps und Ölpalme wird Biodiesel (FAME) hergestellt. Dazu wird zunächst das Pflanzenöl aus der Biomasse extrahiert, bevor es in einer Umesterung mit Methanol zu Biodiesel weiterverarbeitet wird. Pflanzenöle bestehen aus einem Glycerin-Molekül an das drei Fettsäuren angelagert sind. Die Fettsäuren werden im Zuge der Umesterung vom Glycerin abgespalten, indem sie mit dem Methanol reagieren und bilden den Biodiesel, während das Glycerin-Molekül in einem Aufbereitungsschritt aus dem Biodiesel entfernt und als Nebenprodukt verkauft werden kann.

$$\text{Pflanzenöl} + \text{Methanol} \xrightarrow{\text{Katalysator}} \text{Biodiesel} + \text{Glycerin}$$

Zu den größten Nachteilen von FAME-Kraftstoffen zählen die – mit zunehmender Beimischung nötigen – Modifizierungen am Motor, der Kraftstoff- und Abgasanlage und die ungünstigen Kälteeigenschaften.

Pflanzenöle, auch in Form von Altfetten und -ölen (Used Cooking Oil), können durch eine katalytische Reaktion mit Wasserstoff, der sogenannten Hydrierung, zu HVO-Kraftstoffen verarbeitet werden, die beliebig mit Diesel mischbar sind und das Emissionsverhalten günstig beeinflussen. Der für diese Veredelung benötigte Wasserstoff, wird heute aus Kostengründen überwiegend aus fossilen Rohstoffen über Dampfreformierung gewonnen. Für die Erzeugung eines vollständig regenerativen Kraftstoffes müsste daher auf andere Wasserstoffquellen zurückgegriffen werden, wodurch die HVO-Kraftstoffkosten ansteigen würden.

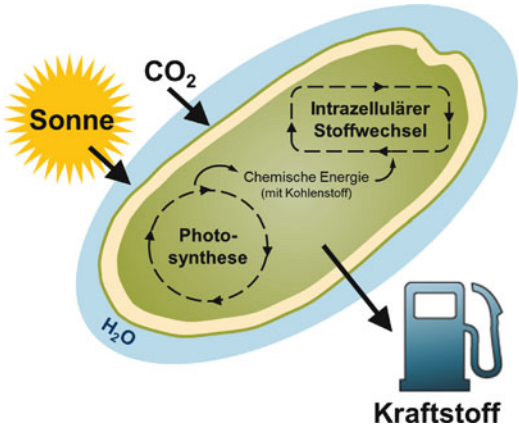



**Abb. 5.288** Direkte Kraftstoffsynthese über modifizierte, phototrophe Mikroorganismen. (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

### 5.9.2.2 Biokraftstoffe auf Basis von Licht und Kohlendioxid

Ausgewählte Mikroorganismen betreiben genau wie Pflanzen Fotosynthese und nutzen somit Lichtenergie als Energiequelle zur Produktion von Biomasse. Diese kann je nach Zusammensetzung wie die Biomasse von Landpflanzen weiterverarbeitet werden. Daneben besteht bei Mikroorganismen die Möglichkeit in die sehr komplexen Stoffwechselwege, die der Energiebereitstellung für die Zelle selbst und auch der Synthese aller Zellbestandteile dienen, einzugreifen. Die gezielte Veränderung der Pfade des Stoffwechsels durch Einbringung neuer Pfade oder die Abschaltung, erlaubt es spezifische Komponenten zu erzeugen, die als Kraftstoff verwendet werden können. Beispiele dafür sind Ethanol, Butanol und langkettige Alkane, welche als Dieselsubstitut geeignet sind. Auf diese Weise kombiniert eine Zelle alle energiegewinnenden und umwandelnde Stoffwechselwege in sich, wodurch die direkte Produktion von Kraftstoffen möglich wird und nur noch die Abtrennung aus dem wässrigen Medium erfolgen muss. Ein zukünftiges Ziel ist es, weiterhin den Stoffwechsel der Mikroorganismen soweit herunterzufahren, dass nur noch eine kontinuierliche Produktion der gewünschten Komponenten erfolgt. Dadurch würde jeder der wenige tausendstel Millimeter großen Mikroorganismen als „Miniaturfabrik“ zur direkten Kraftstoffproduktion aus Sonnenlicht und Kohlendioxid in wässriger Umgebung fungieren ◘ Abb. 5.288. Gegenwärtig stellt die Stabilität und die Langlebigkeit der modifizierten Mikroorganismen die größte Herausforderung aus biologischer Sicht dar und verhindert eine biomassefreie Produktion. Darüber hinaus sind noch Herausforderungen im Bereich der Verfahrenstechnik zu klären, um eine wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen. Darunter fallen zum einen das Kultivierungssystem und zum anderen die Abtrennung der Produkte, welche durch geringe Produktkonzentrationen im wässrigen Kultivierungsmedium derzeit nur unter hohem Energieaufwand möglich ist.

Gesamtheitlich betrachtet bietet das Konzept der mikrobiellen „Miniaturfabrik“ zur direkten Herstellung von Kraftstoffen aus Sonnenlicht, $CO_2$ und Wasser ein großes Potenzial hohe Hektarerträge für den Kraftstoff zu erzielen. Derzeit realisierte Prozesse zur Herstellung von Ethanol aus Zuckerrohr in Brasilien weisen einen Kraftstoff-Hektarertrag von ca. 3 Tonnen Benzinäquivalent pro Hektar und Jahr auf und gelten als Benchmark [294]. Im Vergleich zu Pflanzen mit einem Wirkungsgrad von ca. 1 % liegt bei Fotosynthesebetreibenden Mikroorganismen der Wirkungsgrad mit um die 5 % deutlich höher [280]. Für die direkte Produktion von Kraftstoffkomponenten unter herunterfahren des restlichen Stoffwechsels sind wei-

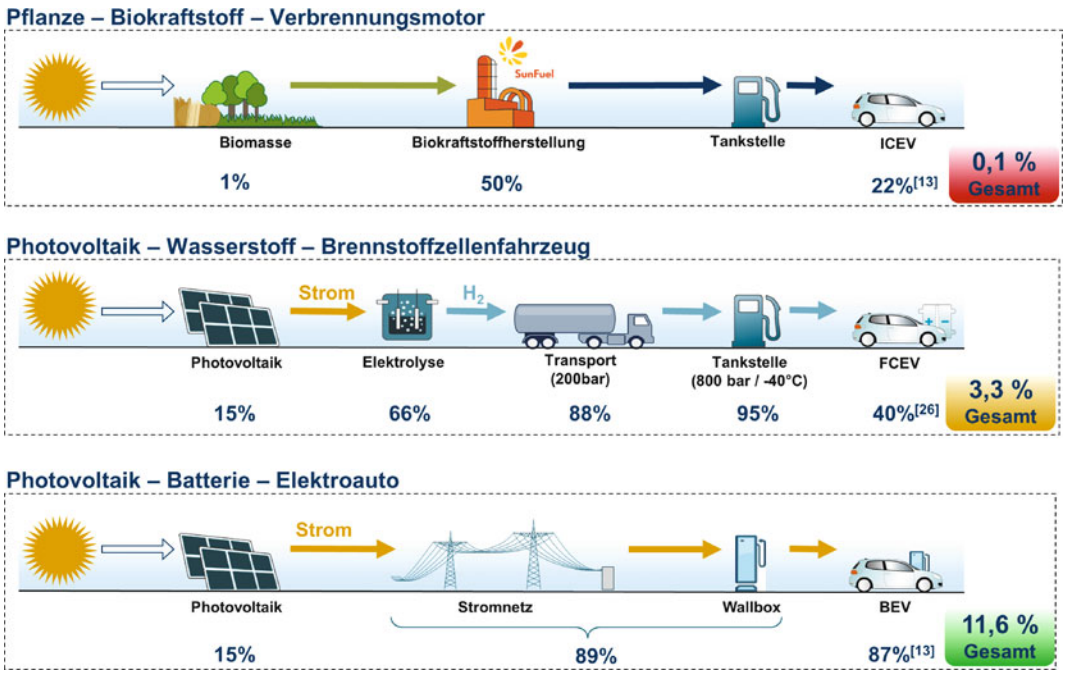



**Abb. 5.289** Wirkungsgrade der Sonnenenergienutzung (Quellen: eigene Abschätzung, [283, 295])

ter Steigerungen des Wirkungsgrades anzunehmen. Folglich weist der direkte Weg zu Kraftstoff theoretisch ein höheres Potenzial an erzielbarem Flächenertrag auf, bedarf aber noch viel Forschungsarbeit um eine wirtschaftliche Produktion zu gewährleisten.

### 5.9.2.3 Mobilität auf Basis von Elektrizität

Theoretisch lässt sich der gesamte Energiebedarf der Mobilität durch regenerativ erzeugten Strom aus Wind, Wasser und Sonne sowie Erdwärme und Gezeitenenergie decken. Als ein Beispiel hierzu soll das Potenzial der Fotovoltaik beleuchtet werden. Selbst in mittleren Breiten von 50° Nord besitzt die Fotovoltaik handelsüblicher Solarmodule einen Wirkungsgrad von 15 % [286] und somit eine Energieausbeute, die um den Faktor 15 größer ist als die der Pflanzen-Biomasse. Wird in den Vergleich auch die Umwandlungs- und Nutzungskette einbezogen, so erreicht der Energiepfad der Fotovoltaik bis hin zu Batteriefahrzeugen ein 100fach größeres flächenbezogenes Substitutionspotenzial als Biomasse und Verbrennungsmotorfahrzeuge Abb. 5.289.

Für ein Batteriefahrzeug würden ca. 20 $m^2$ Fotovoltaikfläche (50° Nord) für die Energieversorgung ausreichen, wenn ein Strombedarf von 20 kWh/100 km und eine Laufleistung von 10.000 km/a angenommen wird. Hinzu kommt, dass diese Fotovoltaikanlage nicht auf dem Acker stehen muss und somit nicht beim Flächenbedarf mit der Nahrungsmittelversorgung konkurriert. Erkauft wird dieses Energiesubstitutionspotenzial durch die Notwendigkeit einer neuen Fahrzeugtechnologie und Infrastruktur und durch eine Einschränkung des Mobilitätsangebotes. Noch sind keine Batterietechnologien verfügbar, die heute vorausgesetzte Reichweiten von mindestens 400 km und akzeptable Ladezeiten weniger Minuten zu massenmarkttauglichen Preisen ermöglichen.

Neben allen technischen Herausforderungen die bei der flächendeckenden Elektrifizierung des Antriebs von Pkw zu überwinden sein werden, spielen insbesondere auch psychologische Effekte auf Kundenseite eine wichtige Rolle für den zukünftigen Markterfolg. Sei es die Bereitschaft für neue Mobilitätsmodi oder beispielsweise die Verabschie-

dung von der heute etablierten Erwartung, dass ein Fahrzeug ein „Alleskönner" sein muss.

Schnell aufladbare Batteriefahrzeuge stoßen heute nicht nur bei der Batterie, sondern auch bei der Stromversorgung an Grenzen. Flächendeckende Schnellladestationen für Elektrofahrzeuge wären nicht nur mit hohen Investitionen verbunden, sondern würden auch an die Grenzen der vorhandenen Leistung der Kraftwerke und der Stromverteilung stoßen. Ohne Verlustleistungen zu berücksichtigen, wäre eine Ladeleistung von 600 kW notwendig, wenn der angenommene Energiebedarf von 20 kWh für 100 km Reichweite innerhalb von 2 Minuten aufgeladen werden müsste. Zum Vergleich sei hier angemerkt, dass ein heutiger Tankvorgang von 50 Litern Diesel innerhalb von 2 Minuten einer Tankleistung von 15 MW entspricht.

Batteriewechselstationen könnten diese Begrenzungen aufheben, würden aber großes totes Kapital verursachen. Sie erzwingen statt einer Batterie pro Fahrzeug ein mehrfaches Vorhalten von Batterien für ein Fahrzeug. Mehrfach deshalb, da wegen der begrenzten Reichweite von Batteriefahrzeugen das Wechselstationennetz eng geknüpft sein müsste und wegen der beschriebenen Begrenzung in der Ladeleistung, die zur Überwindung von Spitzenzeiten beim Wechselbetrieb nur durch eine zusätzliche Anzahl vorgehaltener Batterien begegnet werden kann [287].

Wenn die meisten Aufladevorgänge der Elektrofahrzeuge, wie erwartet, zukünftig in der Nacht mit niedrigen Ladeleistungen stattfinden werden, dann wird nicht nur der Energie- sondern auch der Leistungsbedarf der Elektrofahrzeuge bis 2020 vernachlässigbar und darüber hinaus beherrschbar sein. Die in Deutschland für 2020 angestrebten 1 Mio. Elektrofahrzeuge würden einen Energiebedarf von 2 TWh pro Jahr und damit 0,3 % der deutschen Stromerzeugung (630 TWh in 2012 [276]) benötigen sowie einen Leistungsbedarf von 3 GW, wenn alle Fahrzeuge über Nacht gleichzeitig mit 3 kW aufgeladen werden. Dagegen würde die Schnellladung dieser Fahrzeuge eine Leistung von 60 GW benötigen, wenn angenommen wird, dass nur 10 % der einen Million Elektrofahrzeuge mit 600 kW gleichzeitig geladen würden. Dies entspräche erheblichen Anteilen der Kraftwerksleistung Deutschlands von derzeit insgesamt ca. 194 GW und mehr als zwei Drittel der gesamten installierten Leistung erneuerbarer Energieerträge von knapp 87 GW [288].

Mit der perspektivisch weiterhin stark steigenden regenerativen Elektrizitätserzeugung ergeben sich allerdings auch ganz neue Möglichkeiten der Bereitstellung von Antriebsenergie für Mobilitätsanwendungen. Die intelligente Beladung von Batteriefahrzeugen im sogenannten „Demand Side Management" mit anschließender Nutzung der gespeicherten Energie für die Bereitstellung von Mobilität ist dabei gesamtheitlich betrachtet zwar die effizienteste aller Lösungen, aber die Umwandlung der elektrischen Energie in chemische Energieträger bringt entscheidende Vorteile mit sich. Diese sind beispielsweise eine Entlastung der Übertragungsnetze, einhergehend mit einer zumindest kurz- bis mittelfristigen potenziellen Kompensation des derzeit stockenden (aber notwendigen) Aufbaus von neuen Stromübertragungsleitungen. Langfristig (nach 2025) bietet diese Technologie darüber hinaus das Potenzial, Erzeugungsspitzen bzw. Überschüsse aus erneuerbaren Energien in erheblichem Umfang für den Verkehr nutzbar zu machen [284] und gleichzeitig als Langzeit-Stromspeicher zu fungieren.

Abb. 5.290 veranschaulicht die unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten für regenerative Elektrizität in Kombination mit dem Verkehrssektor.

Die technologische Kernkomponente eines elektrochemischen Speichersystems bildet die Wasserelektrolyse, bei der die Edukte Wasser und elektrische Energie unter Wärmeabgabe in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad solcher Anlagen liegt in Abhängigkeit unterschiedlicher Rahmenbedingungen, wie bspw. der verwendeten Technologie (PEM oder alkalisch) und der Produkteigenschaften (Druck, Reinheit, etc.), zwischen 60 % und 80 %. Der hergestellte Wasserstoff wird vor Ort gespeichert und anschließend ggf. zum Bestimmungsort transportiert, wo er zur Rückverstromung in angepassten Kraftwerken oder als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen eingesetzt werden kann. Allerdings ist die parallele Einführung einer neuen und investitionsintensiven Infrastruktur und einer neuen Fahrzeugtechnik als große Herausforderung für den Erfolg von Brennstoffzellenantrieben zu nen-

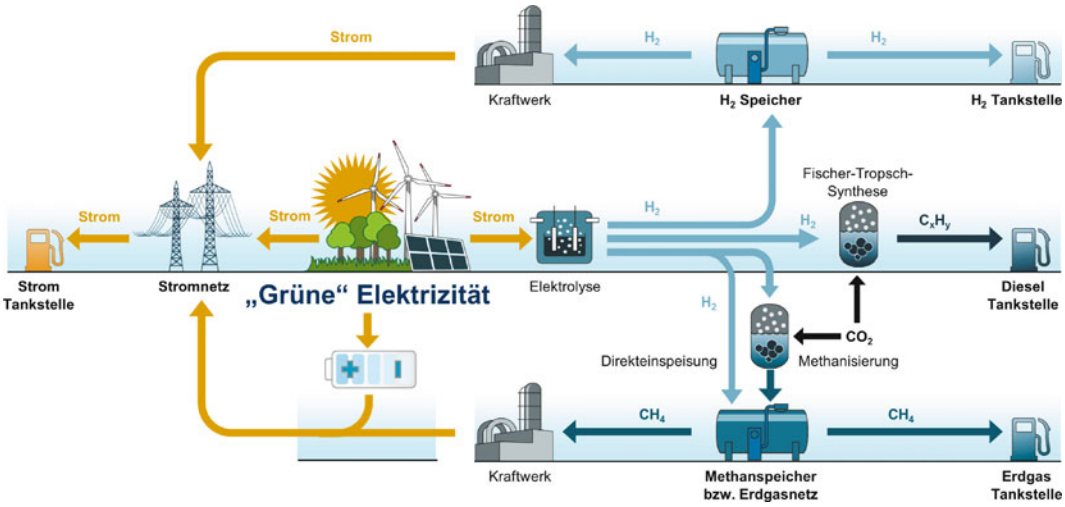



**Abb. 5.290** Energieträger auf Basis von „grüner" Elektrizität: Power-to-Fuel Technologie bietet vielseitige Optionen zur Herstellung von nachhaltigen Kraftstoffen. (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

nen. Dieses Henne-Ei-Problem hat sich in der Vergangenheit beispielsweise für die Kraftstoffe Wasserstoff und Erdgas als schwer überwindbar herausgestellt.

Die technischen und wirtschaftlichen Hürden zeigen, dass Wasserstoff und die Brennstoffzellentechnologie erst als Option verstärkt genutzt werden wird, bzw. sollte, nachdem die vorher genannten Optionen angegangen und umgesetzt wurden. Langfristig kann dieser Pfad durch die Nutzung von Erzeugungsüberschüssen erneuerbarer Energien allerdings von zentraler Bedeutung für die Verfügbarkeit einer nachhaltigen Langstreckenmobilität sein.

Aus Sicht der Mobilität verbleiben kurzfristig, auch bedingt durch die mangelnde Verfügbarkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen und Infrastruktur, zwei weitere interessante Pfade zur Nutzung des Wasserstoffs. Zum einen ist dies die Einspeisung ins Erdgasnetz am Ort der Elektrolyse und zum anderen die Umwandlung des Wasserstoffs in synthetische Kohlenwasserstoffverbindungen, welche in konventionellen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können.

Die direkte Einspeisung ist allerdings durch gesetzliche Rahmenbedingungen beschränkt, die auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen der Endnutzer (Haushalte, Industrie, Mobilität, Kraftwerke, etc.) und der Gasnetzbetreiber (Dichtungen, Schweißnähte, Versprödung, Kompressoren) bestehen. Begründen lassen sich die geltenden Grenzwerte zur Beimischung mit den unterschiedlichen Stoffeigenschaften von Wasserstoff und Erdgas bspw. hinsichtlich Brennwert, Wobbe-Index, Flammentemperatur, Zündgrenzen, Permeabilität und Kompressibilität.

Alternativ kann der mit Hilfe der Elektrolyse gewonnene Wasserstoff in einem weiteren Schritt katalytisch unter Zugabe eines Kohlenstoffträgers (Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid) weiter zu flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffen/Kraftstoffen veredelt werden.

Ein möglicher Pfad zur Bildung von synthetischen Kohlenwasserstoffen liegt in der Methanisierung von Wasserstoff mit Kohlendioxid. Das Produktgas erfüllt die Anforderungen zur unbegrenzten Beimischung zum Erdgasnetz und kann somit als vollwertiges Erdgassubstitut genutzt werden. Die ganzheitliche Bewertung der Emissionen dieses SNG (Subsitute Natural Gas) hängt auch von der Herkunft des verwendeten Kohlendioxids ab, welches entweder aus fossilen oder erneuerbaren Quellen stammen kann. Als fossile Quellen für $CO_2$ kommen unter anderem Kraft-, Zement- oder

Stahlwerke in Frage, während als erneuerbare Quellen beispielsweise Biogas- und Bioethanolanlagen sowie Brauereien fungieren können.

Das weltweit erste Beispiel für diese Technologie in industrieller Dimension ist die sogenannte „e-gas Anlage" der Firma Audi, welche im Jahr 2013 in niedersächsischen Werlte in Betrieb genommen wurde und seitdem im industriellen Maßstab (sechs Megawatt elektrische Anschlussleistung) aus Windstrom und $CO_2$ aus einer Abfall-Biogasanlage nachhaltiges SNG (Produktbezeichnung „e-gas") herstellt. Das e-gas kann von Audi-Kunden, mittels einer speziellen Tankkarte, als Kraftstoff für Erdgas-Pkw erworben werden und ermöglicht bereits heute eine nachhaltige Mobilität mit Verbrennungsmotoren auf Basis von grünem Strom [289].

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzbarmachung „grüner" Elektrizität mit Hilfe von Kohlendioxid sind synthetische flüssige Kraftstoffe aus der Fischer-Tropsch-Synthese („Power-to-Liquid", PtL). Diese Synthese ist, verglichen mit der Methanisierung, verfahrens- und prozesstechnisch komplexer. Entsprechende Anlagen befinden sich derzeit zumeist noch im Forschungsstadium. Eine erste Pilotanlage der Firma sunfire hat im Jahr 2015 den Betrieb aufgenommen, wobei hier neben der Synthese auch eine neu entwickelte Hochtemperatur-Elektrolyse zum Einsatz kommt, die eine erhebliche Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades der Wasserstofferzeugung verspricht [290].

Die technologischen Hürden sind für SNG und PtL-Kraftstoffe im Vergleich zu den wirtschaftlichen eher gering. Der wirtschaftliche Reiz dieser Technologien wird in der Möglichkeit liegen, zeitliche und örtliche Überangebote an regenerativem Strom, nicht nur in speicherbare, sondern vielmehr direkt handelbare Produkte umzusetzen. Diese könnten somit helfen die Importabhängigkeit bei Erdgas und Mineralöl zu reduzieren. Eine teure Langzeit-Speicherung von Wasserstoff oder anderen Energieträgern wird auf Grund des hohen Substitutionspotenzials der Power-to-Fuel Produkte hinsichtlich der fossilen Energieträger umgangen.

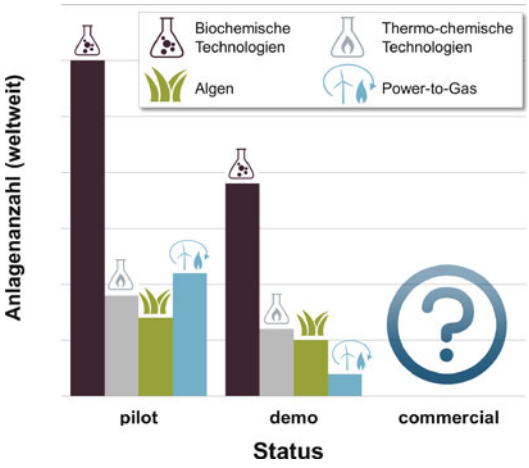



**Abb. 5.291** Abschätzung des aktuellen Bestandes an Produktionsanlagen für „Advanced Fuels" im Jahr 2014. Lediglich 1. Generation-Ethanol, FAME, HVO und Biomethan bisher großtechnisch realisiert. Markteintritt von Advanced Fuels nicht erkennbar. (Quellen: [291–293], eigene Abschätzungen)

### 5.9.2.4 Evaluation der Potenziale regenerativer Energiequellen für die Mobilität

Welche der oben beschriebenen regenerativen Energieträger sich langfristig regional oder sogar global durchsetzen werden ist aus heutiger Sicht völlig offen und hängt von einer Vielzahl von Rahmenbedingungen ab.

Eine Prognose wird auch dadurch erschwert, dass keine potenziellen Technologien und Firmen bisher über den Pilot- oder Demonstrationsmaßstab hinaus gekommen sind ◘ Abb. 5.291.

Bis heute werden lediglich Biokraftstoffe der sogenannten ersten Generation (vgl. ◘ Abb. 5.285), wie Ethanol, FAME und HVO im industriellen Maßstab produziert. Lediglich bei der Biogasproduktion werden bereits heute teilweise Reststoffe wirtschaftlich als Teil-Substitut auf der Rohstoffseite eingesetzt.

Maßgeblich für diesen Umstand ist die mangelnde Investitionssicherheit, welche nur mit Hilfe bindender, langfristiger politischer Rahmenbedin-

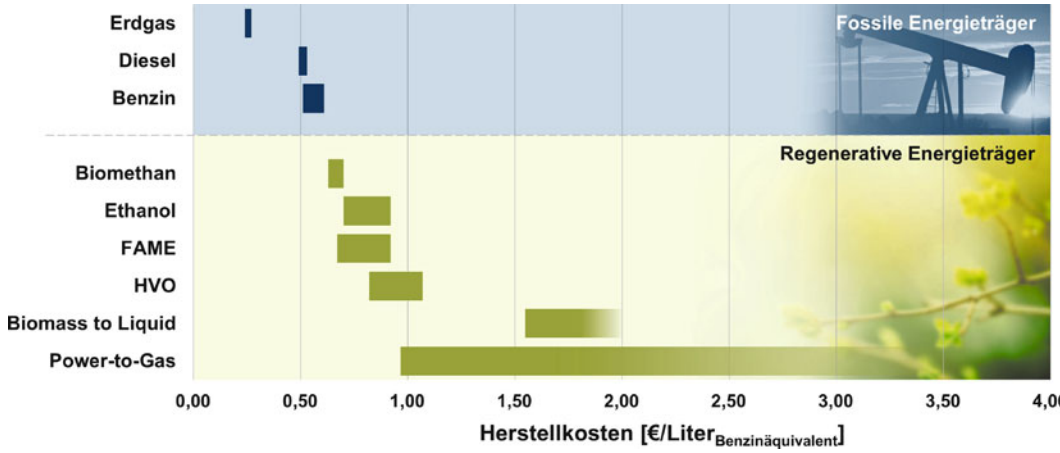



**Abb. 5.292** Vergleich der Herstellungskosten alternativer und konventioneller Kraftstoffe (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

gungen ermöglicht werden kann, welche der ökologischen Notwendigkeit des Einsatzes von Biokraftstoffen Rechnung tragen.

Weiterhin sind für den Erfolg von alternativen Energieträgern Ihre Herstellkosten von entscheidender Bedeutung. Abb. 5.292 zeigt die Bandbreite prognostizierter Herstellkosten ausgewählter regenerativer Energieträger bis zum Jahr 2020 und ermöglicht den Vergleich mit den Kosten konventioneller Kraftstoffe.

Es gibt keinen Biokraftstoff (außer Ethanol in Brasilien) der auf absehbare Zeit ohne politische Förderung mit fossilen Energieträgern konkurrieren kann. Diese Aussage gilt auch bei steigenden Ölpreisen, weil die Kosten für Biokraftstoffe leicht gedämpft, kausal an den Ölpreis gekoppelt sind.

Der Staffelung der Kosten in Abb. 5.292 kann man prinzipiell auch die unterschiedliche verfahrenstechnische Komplexität und die Wirkungsgrade der Umwandlungsketten bis zum regenerativen Energieträger entnehmen, weil diese Faktoren mit steigenden Investitionskosten und steigenden Betriebskosten der Anlagen einhergehen.

Dennoch darf man die Notwendigkeit der vermehrten Nutzung von fortschrittlichen Biokraftstoffen in keinem Fall negieren. Abb. 5.293 zeigt am Beispiel Deutschland, dass Biokraftstoffe noch für mehr als 15 Jahre eine wichtigere Rolle bei der $CO_2$-Reduktion des Pkw-Verkehrs spielen werden als Elektromobilität. Das Potenzial von Elek-

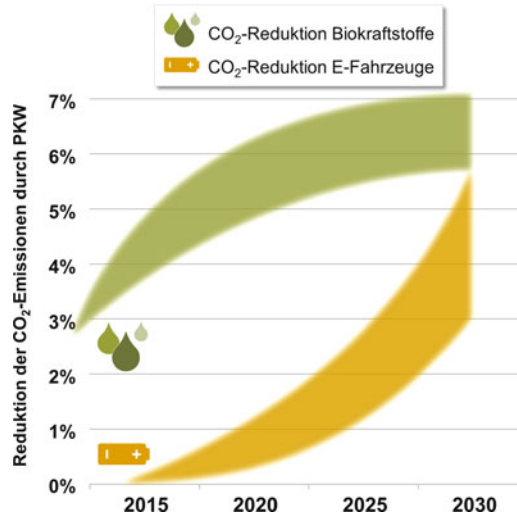



**Abb. 5.293** Bedeutung von Biokraftstoffen relativ zu Elektromobilität: $CO_2$-Ausblick für Deutschland im Vergleich. (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

tromobilität zur $CO_2$-Reduktion ist zwar erheblich, kann aber erst langfristig mit einer Dekarbonisierung der Stromerzeugung und einer erheblichen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen einen relevanten Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit im Verkehrssektor liefern. Selbst Biokraftstoffe der ersten Generation leisten bereits heute einen Beitrag von 3 % zur $CO_2$-Reduktion und können – die richtigen Rahmenbedingungen vorausge-

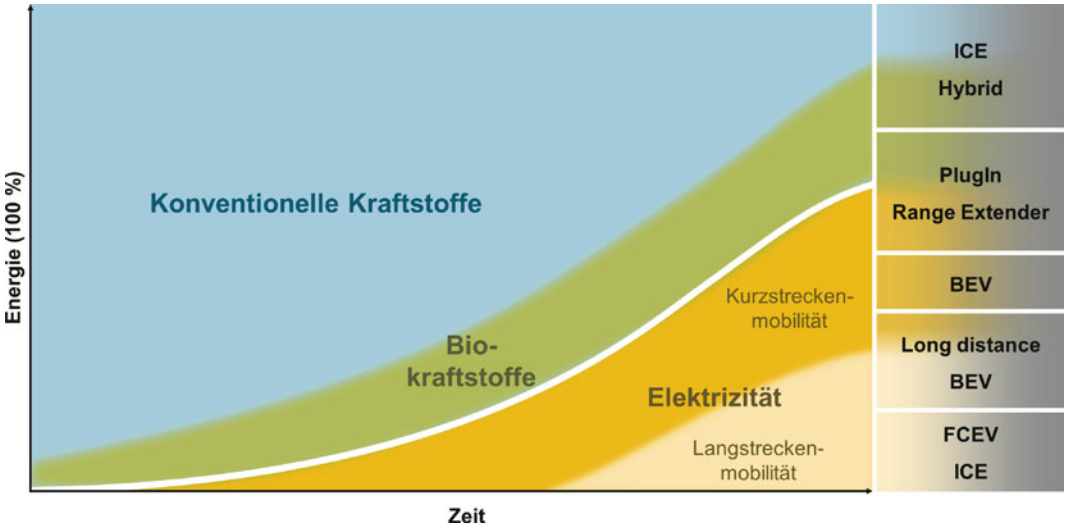



**Abb. 5.294** Mögliche Entwicklung nachhaltiger Energien und Antriebe im Automobilsektor (Quelle: Volkswagen Konzernforschung)

setzt – zunächst deutlich schneller zur Steigerung der $CO_2$-Reduktion beitragen, wenn der Markteintritt fortschrittlicher Biokraftstoffe ermöglicht wird und man das Potenzial nutzt die Vorteile auf die Gesamtheit der Pkw-Bestandsflotte ausrollen zu können.

## 5.9.3 Zusammenfassung

Unter der Prämisse der Reduktion mineralölstämmiger Kraftstoffe muss das zukünftige Energieportfolio für Pkw die effiziente Nutzung aller Alternativen für die Kurz- und Langstreckenmobilität beinhalten. Als Alternativen mit hohem Potenzial zeichnen sich aus heutiger Sicht CNG bzw. Biomethan in effizienten Erdgasfahrzeugen, Biokraftstoffe, „grüne“ Elektrizität für die Mobilität mit batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen sowie die Umwandlung von regenerativem Strom zu gasförmigen oder flüssigen chemischen Energieträgern ab.

Die Integration der Elektromobilität mit Brennstoffzellen- und Elektrofahrzeugen ermöglicht auf lange Sicht den vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien. Hohes Potenzial für den Einsatz von „grüner“ Elektrizität in der Langstreckenmobilität zeigen die derzeit in Demonstration befindlichen „Power-to-Fuel“ Technologien, welche durch weitreichende Speicherung von Elektrizität in Form von chemischen Energieträgern in Zukunft auch als nachhaltiges Kraftstoffsubstitut in modernen Verbrennungsmotoren genutzt werden können.

Abb. 5.294 zeigt eine qualitative, aus den Ausführungen dieses Kapitels abgeleitete, mögliche zukünftige Entwicklung der Energieträger im Automobilsektor zusammen mit den zugehörigen Antriebssystemen. Aus Sicht der Volkswagen Konzernforschung stellt sich die Frage eines „entweder oder“ hinsichtlich Energieträgereinsatz und Antriebstechnologie zukünftig nicht mehr. Alle in der Grafik genannten Technologien werden zum Einsatz kommen müssen, um langfristig weltweit nachhaltige Mobilität auf Basis regenerativer Energieträger zu ermöglichen.

Auf Grund der vielversprechenden Potenziale der Power-to-Fuel Technologien und der vergleichsweise hohen Energiedichte kohlenstoffbasierter Energieträger werden auch Verbrennungsmotoren auf absehbare Zeit noch eine wichtige Rolle spielen. Zudem wird die Bedeutung von Biokraftstoffen im Vergleich zur heutigen Situation weiter zunehmen. Die absolute Menge wird allerdings durch Nachhaltigkeitskriterien und Reststoff-

verfügbarkeit begrenzt sein. Allerdings könnte sich die verfügbare Menge durch Biokraftstoffe auf Basis von Licht und Kohlendioxid erheblich erhöhen.

Erdöl und die daraus gewonnenen Kraftstoffe werden zumindest bis 2030 nicht ihre Dominanz, jedoch sehr wohl ihre Monopolstellung verlieren.

Langfristig werden die regenerativen Energien und insbesondere die regenerative Elektrizität in den drei vorgestellten Nutzungsformen – Batterie, Brennstoffzelle, Strom zu Kraftstoff – dominieren. Eine direkte Nutzung von Strom in Batteriefahrzeugen wird in den nächsten 5 bis 10 Jahren etabliert werden, aber nicht nur wegen der Beschränkung in der Mobilitätsperformance kaum einen Marktanteil von über 5 % in 2020 erreichen. Ab 2020 könnten zunehmend Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge das Straßenbild beleben. Eine breite Einführung von größer 5 % Marktanteil ist aber voraussichtlich nicht vor 2030 zu erwarten. Die Umwandlung von Strom in synthetische Kraftstoffe wird erst nach 2020 substanziell an Bedeutung gewinnen. Diese Option wird insbesondere für die Mobilitätsmodi von großem Wert sein, die auf Kraftstoffe mit hoher Energiedichte angewiesen sind.

Kurz- und mittelfristig werden Biokraftstoffe, trotz ihres begrenzten Substitutionspotenzials, wegen ihrer einfachen Herstellung und Nutzung, die wichtigsten regenerativen Energieträger der Mobilität sein. Bis 2020 werden insbesondere Ethanol weltweit und Biodiesel in Europa dominieren. Neue Biokraftstoffe wie Zellulose-Ethanol werden voraussichtlich nach 2020 verstärkt in den Markt kommen. Eine Ablösung der Dominanz der etablierten Biokraftstoffe wird erst in der zweiten Hälfte der 20er Jahre möglich sein. Lernkurven bei der Entwicklung neuer Technologien sowie deren breiten Markteinführung zeigen, dass die ersten 10 Jahre für einen Marktanteil von ca. 1 % erforderlich sind, weitere 10 Jahre führen zu einem Marktanteil von ca. 10 %. Nicht nur die Technik sondern auch die Finanzierung sowie das Gewinnen der Kundenakzeptanz führen zu solch langen Zeithorizonten. Daher werden sicherlich selbst nach 2030 rohölbasierte Kraftstoffe zunächst noch mehr als 50 % der Mobilität bedienen.

Kein alternativer Kraftstoff kann die Herausforderungen der Mobilität hinsichtlich Energieversorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Klimaneutralität mittelfristig alleine lösen. Es wird ein buntes Nebeneinander von Kraftstoffen geben, die langfristig jedoch mit Sicherheit dominierend regenerativ erzeugt werden. Deshalb ist es wichtig alle weiteren neuen Kraftstoffe im Rahmen von international akzeptierten Normen und Standards für Blendkraftstoffe einzuführen. Nur damit kann die Nutzung in der bestehenden Flotte mit einem gleitenden Übergang zu neuen Fahrzeuggenerationen gewährleistet werden.

Es ist anzunehmen, dass die Zwänge zum Wandel wegen der Erdölreichweite oder -förderkapazität sowie wegen der Klimaerwärmung nach 2020 sehr wahrscheinlich deutlich zunehmen werden. Es gilt daher, in den kommenden Jahren eine möglichst breite technologische Basis von Alternativen, mit dem langfristigen Ziel der gänzlichen regenerativen Energienutzung, zu etablieren, um den Zwängen effektiv und flexibel begegnen zu können.

Die häufig geführten Diskussionen, welcher Kraftstoff der beste sei, werden kaum zum Ziel führen können. Das Denken im „entweder oder" muss einem Denken im „sowohl als auch" weichen. Die Elektromobilität zeigt aber auch, dass möglicherweise die größte Herausforderung bei uns selbst liegen wird. In der Bereitschaft, die Mobilität neu zu definieren.

## 5.10 Kraftstoffsystem

### 5.10.1 Aufgaben und Komponenten

Das Kraftstoffsystem hat die Aufgabe den Kraftstoffvorrat im Fahrzeug unter Einhaltung strenger Anforderungen an Emissionen und Sicherheit zu speichern und dem Verbrennungsmotor gefiltert, in der erforderlichen Menge und mit dem erforderlichen Systemdruck zur Verfügung zu stellen.

Vom Kunden wird ein wartungsfreies und problemlos befüllbares System ohne Störgeräusche erwartet.

Die wesentlichen Komponenten eines Kraftstoffsystems sind in ◘ Abb. 5.295 am Beispiel eines aktuellen Dieselfahrzeugs zu sehen.

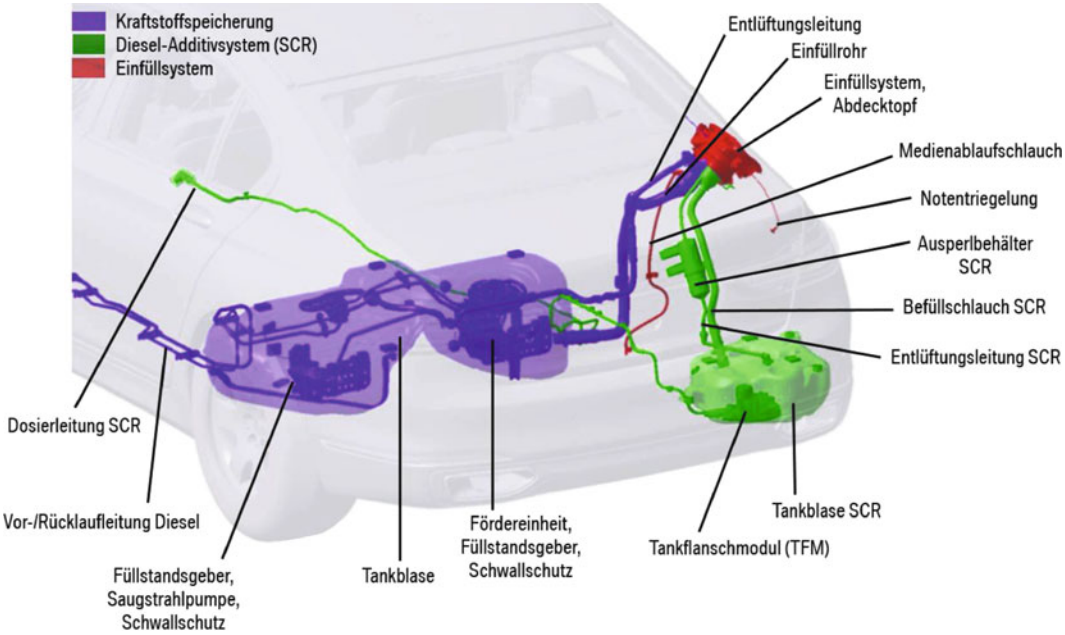



**Abb. 5.295** Komponenten eines Diesel Kraftstoffsystems (Quelle: BMW)

Im Wesentlichen ist ein Benzinfahrzeug ähnlich aufgebaut. Anstelle des dieselspezifischen SCR Systems (= selective catalytic reduction) sind jedoch Aktivkohlefilter und je nach Länderausführung ein Leckdiagnosesystem verbaut.

Das SCR-System ist ein Additivsystem zur Abgasnachbehandlung bei Dieselfahrzeugen und für die Versorgung des Diesel-Katalysators in der Abgasanlage mit einer wässrigen Harnstofflösung erforderlich.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Anforderungen (Befüllung, Speicherung, Förderung und Überwachung) ist es ähnlich komplex zu einem Kraftstoffversorgungssystem aufgebaut. Da die Flüssigkeit bei −11,5 °C gefriert, muss sie zusätzlich mittels Heizelementen im Winterbetrieb förderbar gemacht werden.

Aufgrund der strengen Emissionsvorschriften haben heutige Kraftstoffsysteme eine hohe Integrationsdichte um möglichst viele Emissionsschwachstellen in Form von Öffnungen und Verbindungen zu vermeiden.

## 5.10.2 Gesetzliche und kundenspezifische Vorschriften

### 5.10.2.1 Gesetzliche Vorschriften

Steigendes Umweltbewusstsein und damit einhergehende schärfere Emissionsgesetzgebungen sowie zunehmende Anforderungen an die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer stellen die Entwickler von Kraftstoffversorgungsanlagen laufend vor neue Herausforderungen. Die Einhaltung der dafür in Gesetzen und Richtlinien vorgeschriebenen Grenzwerte wird darüber hinaus über eine immer höhere Lebensdauer gefordert.

Gesetzliche Vorschriften haben grundsätzlich einen nationalen oder einen mehrere zusammengeschlossene Staaten umfassenden Geltungsbereich. Allerdings kann ein Erfüllungsnachweis gleicher oder ähnlicher Anforderungen als Basis zur Zertifizierung in anderen Ländern herangezogen werden, trotzdem bleibt eine Harmonisierung der gesetzlichen Anforderungen das Ziel, um die derzeit wich-

tigsten Vorschriften aus den USA, dem ECE-Raum und Japan zu vereinheitlichen.

**StVZO § 45 und § 46 (D)** Diese nationale Vorschrift ist bei ausschließlich auf die Bundesrepublik Deutschland beschränkten Zulassungen anwendbar. Für die Typgenehmigung in der Europäischen Union wird sie durch die entsprechende EU-Richtlinie ersetzt.

**70/156 EWG** Gemäß dieser Rahmenrichtline wird in der europäischen Union die Betriebserlaubnis für Gesamtfahrzeuge erteilt. Darin wird hinsichtlich der Anforderungen an die einzelnen Fahrzeugsysteme (wie z. B. Kraftstoffanlage, Emissionen, Bremsen, Geräuschentwicklung) auf EG-Richtlinien bzw. äquivalente ECE-Regelungen verwiesen, in denen sich dann die jeweils einzuhaltenden Grenzwerte und Prüfanforderungen wieder finden.

**70/221/EWG** Diese Richtlinie befasst sich unter anderem mit den Anforderungen an Kraftstoffbehälter und legt einige konstruktive Grundsätze fest. Der Tank muss korrosionsfest sein, einen Überdruck von 0,3 bar aushalten und ein Druckausgleichssystem besitzen. Der Kraftstoffbehälter darf nicht im Insassenraum liegen, die Einfüllöffnung darüber hinaus nicht im Gepäck- oder Motorraum. Aus dem Tank oder Einfüllstutzen austretender Kraftstoff darf nicht in den Innenraum gelangen, entweichender Kraftstoff ist so abzuleiten, dass er sich nicht an heißen Bauteilen entzünden kann. Während eines normalen Betriebs des Fahrzeugs darf aus dem Tankverschluss oder Entlüftungssystem kein Kraftstoff austreten, bei einem Überschlag ist ein geringes Austropfen zulässig. Der Kraftstoffbehälter muss so im Fahrzeug verbaut sein, dass er bei einem Front- oder Heckaufprall geschützt ist. Am gesamten Tank und Einfüllstutzen darf es zu keiner elektrostatischen Aufladung kommen.

Für aus Kunststoff hergestellte Kraftstoffbehälter existieren eine Reihe weiterer Prüfungen, bei denen die Dichtheit am Ende des Tests nachzuweisen ist.

1. Aufprallversuch mit einem pyramidenförmigem Stahlpendel bei −40°C und 30 N m.
2. Mechanische Festigkeit: 5 Stunden mit 0,3 bar Überdruck bei 53°C.
3. Kraftstoffdurchlässigkeit eines im Permeationsgleichgewicht befindlichen Tanks bei einer 8-wöchigen Lagerung bei 40°C (Grenzwert: Massenverlust von 20 g/24 h).
4. Kraftstoffbeständigkeit: Nach der Prüfung 3 müssen die Prüfungen 1 und 2 wiederholt werden.
5. Brandtest: Der zu 50 % mit Kraftstoff befüllte Behälter wird für 2 min einer definierten Beflammung ausgesetzt.
6. Formbeständigkeit des zu 50 % mit Wasser befüllten Kraftstofftanks bei 95°C für 1 Stunde.

**TRIAS 42** Diese japanische Verordnung entspricht inhaltlich weitestgehend der europäischen Richtlinie 70/221/EWG.

**GB 18296** Zusätzlich zu den Anforderungen der 70/221/EWG wird in dieser chinesischen Verordnung eine Rüttelprüfung mit definierten Amplituden und Beschleunigungen verlangt.

**49 CFR 571.301 (FMVSS 301)** Diese US-Vorschrift behandelt die Unversehrtheit (Dichtheit) der Kraftstoffanlage nach definierten Crashversuchen. Die Anforderungen beinhalten Frontalaufprall-Konfigurationen im Bereich von −30° bis +30° mit jeweils 48 km/h gegen eine starre Barriere, einen Heckaufprall mit einer beweglichen deformierbaren Barriere mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h, sowie einen Seitenaufprall mit beweglicher deformierbarer Barriere in Krebsgangkonfiguration mit einer Geschwindigkeit von 53 km/h. Anschließend an jeden Aufprallversuch muss ein statischer Roll-Over-Test (Drehung um die Fahrzeuglängsachse) absolviert werden. Der Kraftstoffbehälter ist bei jedem Test zu 90 % bis 95 % mit Ersatzflüssigkeit gefüllt und darf nach Ende jedes Tests nur eine definierte Menge an Flüssigkeit verlieren.

**TRIAS 33** In dieser japanischen Vorschrift werden ebenfalls Crash-Versuche zur Überprüfung der Kraftstofftankdichtheit beschrieben. Allerdings

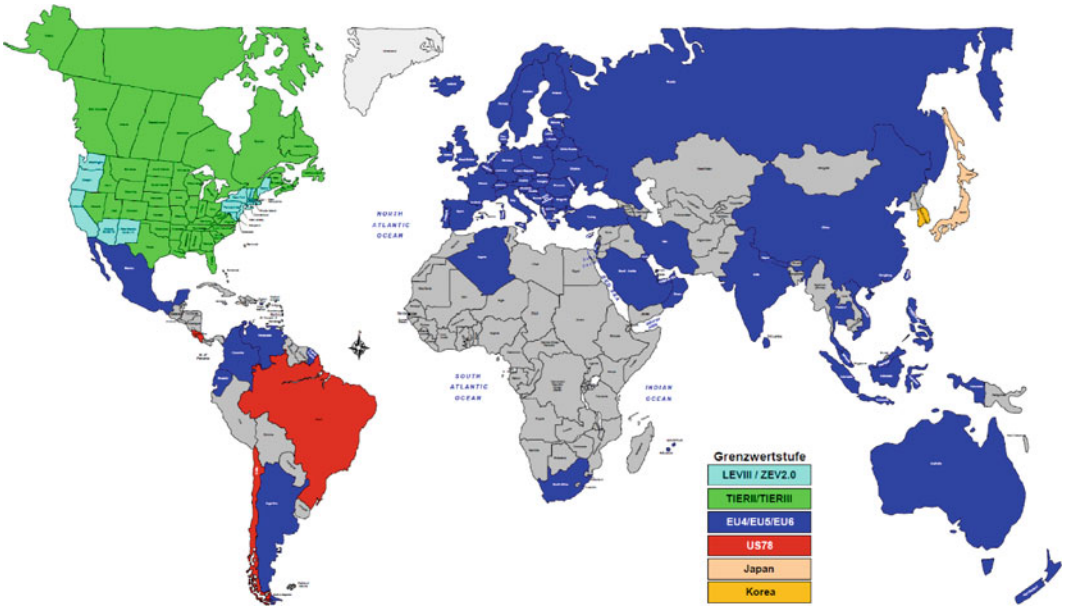



**Abb. 5.296** Überblick der weltweiten Vorschriften zur Begrenzung der Verdunstungsemissionen von Kohlenwasserstoffen aus PKW (Stand 2015) (Quelle: BMW)

stellt die FMVSS 301 die härtere Anforderung dar.

**ECE R34** Diese Regelung (Insassenschutz im Frontalaufprall) enthält ebenfalls Anforderungen an die Dichtheit der Kraftstoffanlage nach einem Frontalaufprall mit 56 km/h gegen eine deformierbare Barriere mit nur 40 % Überdeckung. Eine Leckagemenge von mehr als 30 g/min ist nach dem Aufprall nicht zulässig.

**Verdunstungs-Emissionen** Die Vorschriften zur Begrenzung der Emissionen sind die wohl umfangreichsten und auch die größte Herausforderung in der Entwicklung von Kraftstoffversorgungsanlagen. Mittlerweile gelten nahezu weltweit Vorschriften zur Begrenzung der Verdunstungsemissionen von Kohlenwasserstoffen aus Pkw. Die folgende Darstellung soll die Gesamtsituation vereinfacht darstellen, Abb. 5.296.

Die USA haben mit TIERIII (EPA) und LEVIII (Kalifornien und 7 weitere Nordoststaaten) die wohl schärfsten gesetzlichen Anforderungen. Hier soll zusätzlich über ein sogenanntes ZEV-Mandat der Anteil der Elektro-und Hybridfahrzeuge deutlich erhöht werden. China ist nicht zuletzt aufgrund massiver Umweltprobleme auf dem Weg neue gesetzliche Anforderungen zu bringen und orientiert sich hierbei an den US Vorschriften. Auch Korea hat einen LEVIII Standard eingeführt.

LEV steht für Low Emission Vehicle. Mit LEVIII wurden die Standards gegenüber LEVII die Grenzwerte wesentlich verschärft. (z. B. LEVII < 650 mg Kraftstoffemissionen/Tag auf LEVIII < 300 mg/Tag). Zusätzlich sind neue Testverfahren und Nachweise eingeführt worden. Mit dem sogenannten Bleed Emission Test werden die schleichenden Emissionen durch den Aktivkohlefilter an die Atmosphäre zusätzlich überprüft.

Die emissionsrelevanten Funktionen und Komponenten sollen im Fahrzeug auch während des Betriebs überwacht werden. Bei der On Board Diagnose werden z. B. Lecks von 0,5 mm in der Kraftstoffversorgungsanlage überprüft. Die Behörden fordern zur Überprüfung der OBD Funktionen im Zuge der Fahrzeugzulassung einen Test, bei dem entsprechende Lecks an Tankdeckel und eine weitere Stelle am Einfüllrohr durch das Fahrzeug erkannt und dem Kunden angezeigt werden müssen.

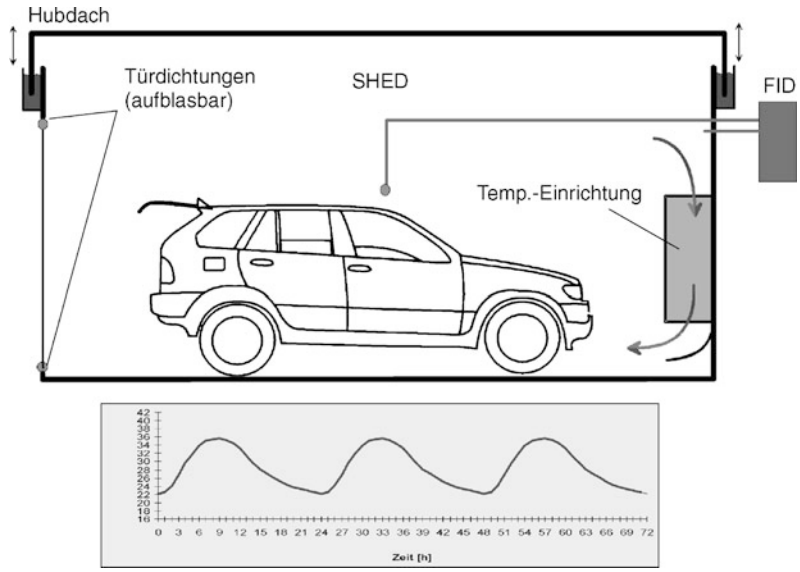



**Abb. 5.297** VT-SHED. (VT = Variable Temperature) (Quelle: BMW)

In der EU wird aktuell intensiv über die Gesetzesvorlage zu EU-6 diskutiert. Hier zeichnet sich in ersten Entwürfen ebenfalls eine deutliche Verschärfung der Vorschriften und Grenzwerte ab. Neue Fahrzyklen, die WLTP-Zyklen werden die bisherigen ersetzen und das Kundenverhalten repräsentativer abbilden.

Bei der Regulierung der Emissionen soll das Ziel sein, die Kohlenwasserstoffemissionen durch das Verdunsten des Kraftstoffes bei Fahrzeugbetrieb und auch Fahrzeugstillstand zu begrenzen. Dadurch werden die für die Atmosphäre schädlichen HC's wesentlich reduziert (Verdunstungs-Emissionen).

Die Emissionen des Gesamtfahrzeuges werden im sogenannten SHED-Test (Sealed Housing for Evaporative Determination) in einer gasdichten Prüfkammer gemessen. Die Prüfabläufe dieser SHED-Tests sind national unterschiedlich, bestehen jedoch immer aus einer Vorkonditionierung und dem eigentlichen Emissionstest.

Die Vorkonditionierung dient dazu, das Fahrzeug in einen reproduzierbaren Zustand zu bringen. Im Emissionstest, werden sowohl die Emissionen in einer einstündigen Heißabstellphase als auch in einem oder mehreren 24 h-Abstellzyklen gemessen, Abb. 5.297.

Zur Zeit sind die Vorschriften in den USA am umfangreichsten und die Grenzwerte, besonders LEV III und TierIII (0,3 g/Test) und BleedEmissionTest (0,02 g/Test) die strengsten. Die kalifornischen Vorschriften sind mittlerweile von weiteren Bundesstaaten übernommen worden (z. B. New York, Massachusetts, Maine, Vermont, …). Eine weitere Besonderheit an der amerikanischen Gesetzgebung ist der sog. ORVR-Test (On Board Refueling Vapour Recovery). Im Gegensatz zu den europäischen Anforderungen muss hier das Fahrzeug die bei der Betankung entstehenden Kraftstoffdämpfe auffangen. In Europa ist Stage2 als Maßnahme zur Reduzierung der HC-Emissionen bei der Fahrzeugbetankung vorgeschrieben. Hier werden die Gase beim Betanken über die Zapfpistole von der Tankstelle abgesaugt (Gaspendelverfahren).

All diese Vorschriften reglementieren stets die Emissionen des gesamten Fahrzeuges. Für die Fahrzeug-, bzw. Komponentenentwicklung unterteilt man die Emissionsquellen in zwei Gruppen.

Dies sind zum ersten die „Fuel-Emissionen", also Emissionen aus verdampfendem Kraftstoff. Kraftstoffdampf kann im Fahrzeug aus allen kraftstoff- und kraftstoffdampfführenden Komponenten

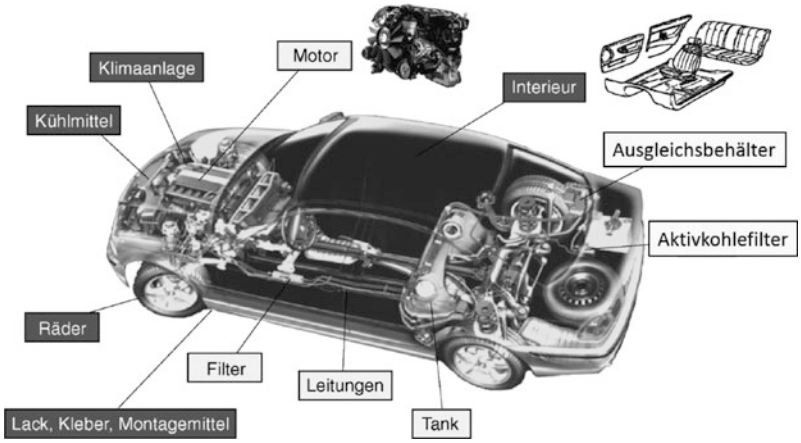



**Abb. 5.298** Quellen von Kohlenwasserstoffemissionen am Pkw (Quelle: BMW)

emittieren. Hierbei unterscheidet man drei Quellen:

- Mikroleckagen (aus den Verbindungsstellen),
- Permeation (durch die Wände der Bauteile),
- Migration (z. B. über die Aktivkohle im Aktivkohlebehälter).

Der zweite Teil sind die „Non-Fuel Emissionen", also Emissionen, die nicht vom Kraftstoff herrühren. Zu diesen zählen Kohlenwasserstoffe aus Betriebsmitteln wie der Kühlflüssigkeit, dem Kältemittel der Klimaanlage, Ölen und Schmierstoffen. Des Weiteren können neben Lacken, Klebstoffen und Konservierungsstoffen auch Kunststoffe, wie z. B. Reifen, Interieur-Bauteile, Dämmmaterialien und Verkleidungen, Kohlenwasserstoffe emittieren, Abb. 5.298.

Bei der Entwicklung von Teilsystemen werden von den gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzeug-Tests abgeleitete Komponenten-Tests in Mini-SHEDs (= Prüfvorrichtung für Komponenten und Teilsysteme) durchgeführt. Die gesetzlichen Grenzwerte werden für diese Tests in herstellerspezifische Komponenten- und Teilsystem-Zielwerte aufgeteilt.

**OBD II (On-Board-Diagnosis)** Diese offiziell als „§1968. Malfunction and Diagnostic System, California Code of Regulations (CCR)" bezeichnete Verordnung trat in Kalifornien ab Modelljahr 1988 in Kraft und wurde seitdem kontinuierlich auf den möglichen Stand der Technik aktualisiert.

Zweck dieser Verordnung ist die Reduzierung von Emissionen, indem Fehlfunktionen des Katalysators und des Motors, Kraftstoffverdunstungsemissionen sowie andere, Emissionen verursachende Komponenten ständig kontrolliert werden und dies im Versagensfall schnellstmöglich über eine Warnlampe am Armaturenbrett angezeigt wird.

Es sollen also nicht nur Totalausfälle von elektrischen Bauteilen detektiert werden, sondern es findet auch eine Überwachung des Arbeitsbereiches und eine Plausibilisierung des Signals statt.

Für die Überwachung ist jeweils zu unterscheiden:

**Input components – Sensoren** Für Sensoren sind drei Arten von Überwachungen umzusetzen:

- elektrische Überwachung – circuit continuity OBD I,
- Überwachung des Arbeitsbereiches – out of range OBDII,
- Plausibilisierung des Signals – rationality OBDII.

**Output components – Aktuatoren** Für Aktuatoren sind zwei Arten von Überwachungen umzusetzen:

- elektrische Überwachung – circuit continuity OBDI,
- Funktionsüberprüfung – functional check OBDII.

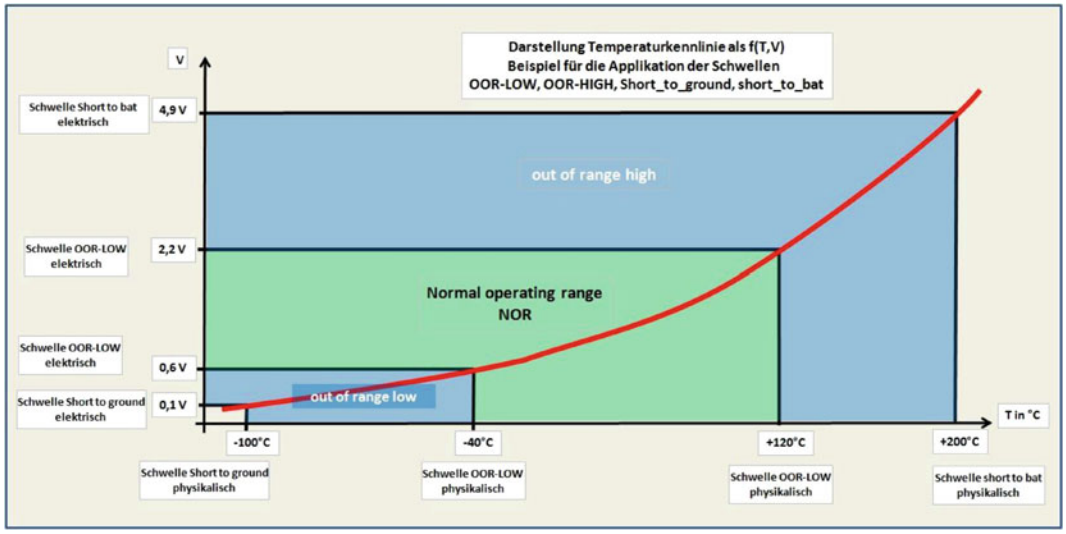



**Abb. 5.299** Randbedingungen für Diagnosen (Quelle: BMW)

In Abb. 5.299 sind die geforderten Randbedingungen dargestellt, unter denen eine Diagnose stattfinden muss.

Als Beispiel für eine OBD Diagnose ist im Bereich der Kraftstoffversorgungsanlage die Tankleckdiagnose zu nennen. Dort wird eine physikalische Systemfunktionen wie die Kraftstoffsystemdichtheit kontinuierlich kontrolliert. Die Umsetzung im Kraftstoffsystem erfolgt über Unter- oder Überdrucksysteme im Fahrbetrieb oder in der Abstellphase des Fahrzeuges. Mit der Tankleckdiagnose muss ein Leck von $> 0{,}5$ mm Durchmesser im Kraftstoffsystem erkannt werden. Wie oft eine Diagnose ablaufen muss ist gesetzlich vorgeschrieben.

#### 5.10.2.2 Kundenspezifische Anforderungen

Neben den gesetzlichen Vorschriften haben natürlich auch die Anforderungen des Kunden einen erheblichen Einfluss auf die Ausführung des Produktes. Diese Anforderungen sind allgemeiner Art und in Lastenheften (LH), in technischen Lieferbedingungen (TL), Qualitätsvorschriften (QV), Prüfvorschriften (PV) und Versuchsrichtlinien (VR), herstellerinternen Normen und Spezifikationen definiert.

Typische Kundenanforderungen sind Betankungskomfort und Betankungszeit. Der Kunde wird unzufrieden sein, wenn beim Betanken die Zapfpistole wiederholt abschaltet, obwohl der Tank noch nicht voll ist oder es gar zum Rausspritzen (spit-back) führt. Das ist angesichts der Vielzahl an Zapfpistolen, unterschiedlichen Kraftstoffen, und unterschiedlichen Betankungsraten an den Tankstellen weltweit eine große Herausforderung an die Entwickler.

Auch die Vermeidung von Kraftstoffgeruch ist ein sehr kundenrelevantes Thema. Insbesondere in heißen Regionen kann durch die starke Erwärmung des Kraftstoffs ein enormer Gasanfall entstehen, den der AKF nicht mehr bewältigen kann. Hier ist in der Auslegung ein adäquates Wärmemanagement der Kraftstoffversorgungsanlage zu beachten.

### 5.10.3 Kraftstoffbehälter

Die Anordnung ist im Wesentlichen für die Crashsicherheit und die Raumausnutzung entscheidend. Die Wahl des Behälterwerkstoffes hat hohen Einfluss auf die Belastbarkeit und die Emissionen. Kraftstoffbehälter werden heute überwiegend aus Stahl oder aus Kunststoff hergestellt. Die Hauptvorteile von Kunststoffkraftstoffbehältern liegen im Gewicht und in der guten Formbarkeit. Aus Emissionsgründen ist es heute auch üblich, möglichst viele

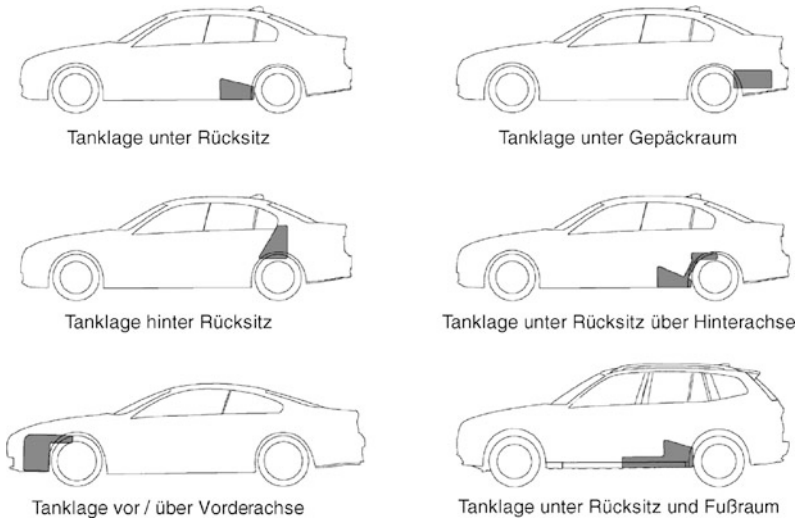



**Abb. 5.300** Beispielhafte Anordnung von Kraftstoff-Behältern

Bauteile und Verbindungen, wie Kraftstoffpumpe, Ventile, Druckregler und Filter in den Kraftstoffbehälter zu integrieren.

### 5.10.3.1 Anordnung im Fahrzeug

Die Anordnung des Kraftstoff-Behälters im Fahrzeug (Abb. 5.300) erfolgt unter Berücksichtigung folgender Punkte:

- Lage Motor-Getriebeeinheit (Front-/Heck- bzw. Mittelmotor),
- Karosserievariante (Limousine, Kombi, Roadster usw.),
- Sicherheitsaspekte (z. B. Einbaulage außerhalb der primären Knautschzonen usw.),
- Hybridisierung.

Der Kraftstoff-Behälter muss außerhalb des Fahrzeug-Innenraumes angeordnet sein. Bei Fahrzeugen mit hochgesetzter Fahrgastzelle, Unterflurmotoranordnung, (z. B. Mini-Vans) sind auch Anordnungen hinter der Vorderachse unter dem Bodenblech verwirklicht. Bei der Anordnung hinter den Rücksitzen im Gepäckraum sind geeignete Sicherheitsvorrichtungen, z. B. dichte Trennwand aus Stahlblech oder sonstige geeignete Materialien zum Fahrzeug-Innenraum vorzusehen; die Kombination mit einer Durchladevorrichtung ist nicht realisierbar, der Einsatz eines Skisacks ist erschwert.

### 5.10.3.2 Behälterwerkstoff

#### 5.10.3.2.1 Metall Kraftstoffbehälter

Der Metall-Kraftstoff-Behälter weist eine lange Historie auf. Schon die ersten Autos und Motorräder fuhren mit Metalltanks. Nach dem Umformungsprozess werden die Schalen durch ein automatisches Schweißverfahren gasdicht miteinander verbunden. Die meistverbreiteten dieser Verfahren sind:

- 2D-/3D-Rollnahtschweißen,
- Laserschweißen,
- Induktionsschweißen,
- Löten.

#### 5.10.3.2.2 Kunststoff Kraftstoffbehälter (KKB)

In den 70er-Jahren begann die Automobilindustrie mit der Entwicklung des Kunststofftanks. Aufgrund der immer komplizierteren Geometrien wurden zusammen mit der kunststoffverarbeitenden Industrie und den Produzenten von Kunststoffmaterialien ein Extrusionsblasverfahren und entsprechende Materialien neu entwickelt. Dabei handelt es sich um ein Hochdruck-Polyethylen (HDPE), welches so modifiziert wurde, dass es gegen den Einfluss von allen weltweit handelsüblichen Kraftstoffen resistent ist.

Aufgrund der bei Kunststoffen gegenüber Metall auftretenden Kraftstoffpermeation, insbesonde-

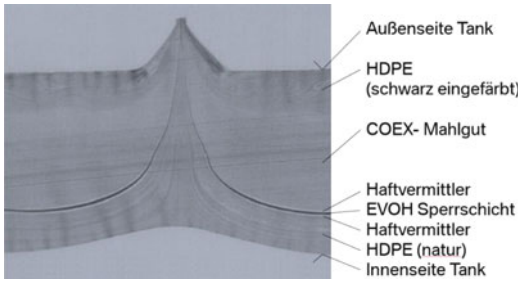



**Abb. 5.301** Wandaufbau und Quetschnaht eines coextrudierten Kraftstoff-Behälters (Quelle: KAUTEX)

re bei Ottokraftstoffen, mussten für die Verschärfung der Emissionsgesetzgebung zusätzlich Diffusionssperren entwickelt werden. Zuerst wurde die Tankblase mit Fluorgas ($F_2$) behandelt. Dies kann entweder im Extrusionsblasprozess erfolgen – man spricht von Inline-Fluorieren – oder nach dem Blas und Schweißkomplettierungsprozess, genannt Offline-Fluorieren. Beim Fluorieren wird der Behälter nach einer Inertisierung mit einem $F_2{=}N_2$-Gasgemisch beaufschlagt. Dadurch entsteht eine polare Oberfläche, welche die Löslichkeit und damit die Permeation von unpolaren Medien im Basispolymer deutlich verringert. Im Vergleich zu unbehandelten HDPE-Kraftstoff-Behältern werden die Permeationsverluste bei Benzin um mehr als 99 % reduziert.

Die Fluorierung erfüllt aber die an aktuelle Kraftstofftanks gestellten Anforderungen nicht mehr.

Allgemein üblich ist heute die Verwendung von Mehrschichttanks – Multilayertanks.

In den 90er-Jahren wurde ein bis dahin nur von der Verpackungsindustrie genutztes Verfahren, das Blasverfahren mit coextrudierten Kunststoffmaterialien, für die Herstellung von Kunststofftanks entwickelt. Hierbei werden bis zu 6 Schichten unterschiedlicher Kunststoffe während des Blasvorgangs miteinander verbunden. Eine spezielle Sperrschicht aus polarem EVOH (Ethylenvinylalkohol-Copolymer) bildet dabei eine Permeationssperre (siehe Abb. 5.301).

Um den steigenden Komplexitätsgrad und der weiteren, enormen Reduktion der Emissionsgrenzwerte Rechnung zu tragen, wurde das Extrusionsblasverfahren, bei dem eine schlauchförmige Schmelze in eine Form geblasen wird, weiterentwickelt. Dabei wird entweder der extrudierte Kunststoffschlauch vor dem Formprozess in zwei Streifen aufgetrennt oder es werden gleich 2 Platten über Breitschlitzdüsen erzeugt. Mittels Vakuum werden die Kunststoffplatten dann im noch plastischen Zustand tiefgezogen.

In die noch heiße Kunststoffmasse der Halbschalen werden dann die Intankkomponenten (Entlüftungssystem, Tankanzeige, Fördereinheit) eingebracht.

Anschließend werden die Formhälften zusammengefahren, die immer noch plastische Trennfuge verschweißt sich, und der Tank wird analog zum konventionellen Blasverfahren mit Innendruck beaufschlagt, um die endgültige Geometrie zu erhalten (siehe Abb. 5.302).

Dieses Verfahren ermöglicht es, Kraftstofftanks mit hochkomplexen Geometrien darzustellen, die gleichzeitig mit einer reduzierten Anzahl von Schnittstellen gefertigt werden können, da keine reinen Montageöffnungen für diverse Tankeinbauten, wie Ventile und Entlüftungsleitungen benötigt werden.

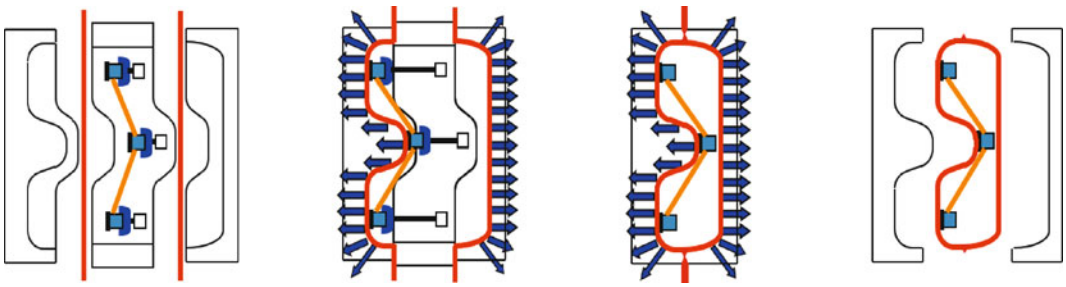


**Abb. 5.302** Wandaufbau und Quetschnaht eines coextrudierten Kraftstoff-Behälters (Quelle: KAUTEX)

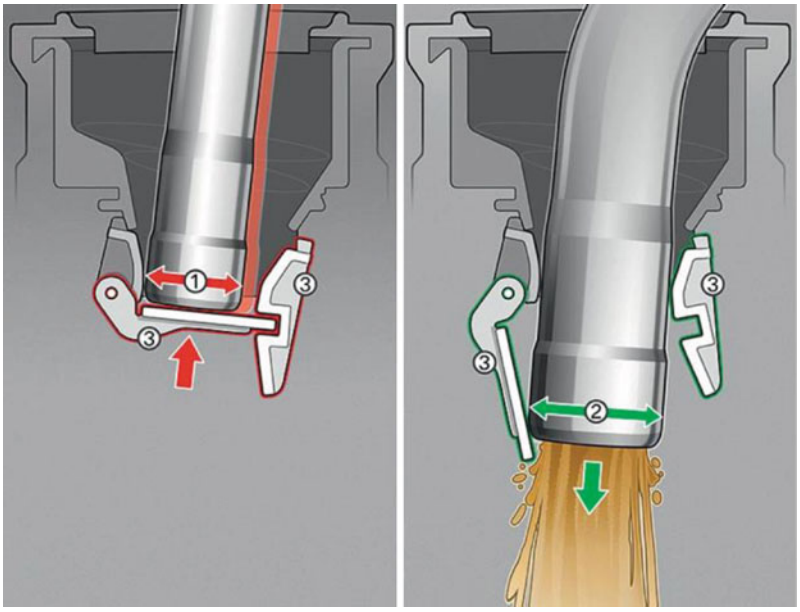



**Abb. 5.303** Diesel Fehlbetankungsschutz (Quelle: BMW)

Bei der Komplettierung des extrusionsgeblasenen Tanks mit Bauteilen wie z. B. Stutzen, Halter usw. verwendet man verschiedene Schweißverfahren. Einige der bekanntesten sind:

- Vibrationsschweißung,
- Ultraschallschweißung,
- Heizelementschweißung,
- Laserschweißung.

## 5.10.4 Befüllsystem

Das Befüllsystem besteht aus Tankklappe, Einfülltopf, Einfüllrohr mit Verschluss und Befüllbegrenzung im Tank.

Mittlerweile ist unter der Tankklappe häufig auch die Befüllung für das Diesel Additiv integriert.

Die Steuerung der Betankungsmenge im Kraftstoffbehälter erfolgt mit Ventilen, bzw. durch den Verschluss der Betankungsentlüftung über den Kraftstoff-Spiegel.

Ein wesentlicher Kundennutzen wurde durch die bei manchen Herstellern eingeführte Falschbetankungsverhinderung bei Diesel Fahrzeugen im Einfüllrohroberteil erreicht (siehe Abb. 5.303). Dabei werden durch ein mechanisches Entriegelungssystem (3) das Einführen der dünneren Benzinpistole (1) und durch Fehlbetankung verursachte, nennenswerte Schäden am Einspritzsystem des Motors verhindert. Die Dieselpistole (2) entriegelt das System beim Einführen automatisch.

## 5.10.5 Ausgleichsvolumen und Be-/Entlüftungssystem

Die Auslegung des Systems erfolgt unter Berücksichtigung der Emissionsanforderungen, der Wärmeausdehnung des Kraftstoffes und dem Verhalten im statischen und dynamischen Betrieb. Im statischen Verfahren werden die maximalen Schräglagen (Kenngrößen herstellerspezifisch) des Fahrzeuges überprüft, wobei ein Austritt von Kraftstoff nicht zulässig ist. Das dynamische Verfahren entspricht dem kundentypischen Fahrzyklus auch unter extremen Randbedingungen (z. B. hohe Außentemperaturen mit Winterkraftstoffen). Zur Vermeidung von Kraftstoffdampf Austritt erfolgt die Verbindung zur Atmosphäre über ein Aktivkohlefilter.

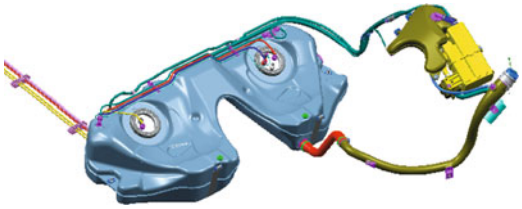


**Abb. 5.304** Kraftstoffsystem mit externem Ausgleichsvolumen (Quelle: BMW)



### 5.10.5.1 Externes Ausgleichsvolumen

Diese Systemvariante ist auf einen zusätzlichen Kraftstoff-Ausgleichsbehälter angewiesen (Abb. 5.304), der im Idealfall mittig über dem Kraftstoffbehälter angeordnet ist. Da eine solche Anordnung bei den meisten Fahrzeugen nicht realisierbar ist (Beeinträchtigung des Fahrzeuginnenraums), wird eine Anordnung des Kraftstoff-Ausgleichsbehälters im Bereich der hinteren Radhäuser realisiert. Als erforderliches Ausgleichsvolumen werden 3 bis 5 % des Kraftstoff-Behältervolumens vorgesehen. Über diesen Kraftstoff-Ausgleichsbehälter erfolgt auch die Betriebsent-/belüftung des Systems.

### 5.10.5.2 Internes Ausgleichsvolumen

Diese Variante erleichtert durch den Entfall von Bauteilen (externer Ausgleichbehälter, Leitungen und Verbindungen) die Einhaltung der gestiegenen Emissionsanforderungen. Jedoch ist abhängig von der Tankform ein größeres Ausgleichsvolumen vorzuhalten.

### 5.10.5.3 Aktivkohlefilter (AKF)

Um die gesetzlichen Verdunstungsemissions-Grenzwerte und die Kundenanforderungen bezüglich Kraftstoffgeruch zu erfüllen, werden die Kohlenwasserstoff-Dämpfe aus der Tankentlüftung in einem Aktivkohlefilter (AKF) aufgefangen. Zur Regenerierung des AKF wird ein Teilstrom der Motoransaugluft durch den Filter geleitet und die Kohlenwasserstoffe somit der Verbrennung zugeführt.

Es wird zwischen zwei verschiedenen Ausführungen des AKF unterschieden, der US und der ECE-Ausführung. Darüber hinaus sind die AKF oft als Mehrkammersysteme aufgebaut. Diese können mit verschiedenen Kohlesorten befüllt sein, um besonders niedrige Emissionswerte zu erreichen. Um die besonders niedrigen Emissionsgrenzwerte bei PZEV-Systemen (Partial Zero Emission Vehicle) erreichen zu können, werden auch noch nachgeschaltete Aktivkohleelemente verwendet, die aus wabenförmig extrudierten Monolithen bestehen. Diese Monolithen haben zwar eine niedrige absolute Aufnahmekapazität für Kohlenwasserstoffe, lassen sich aber auch mit begrenzten Spülluftmengen gut regenerieren und weisen ein extrem niedriges Restemissionsniveau auf (sog. Bleed Emissions).

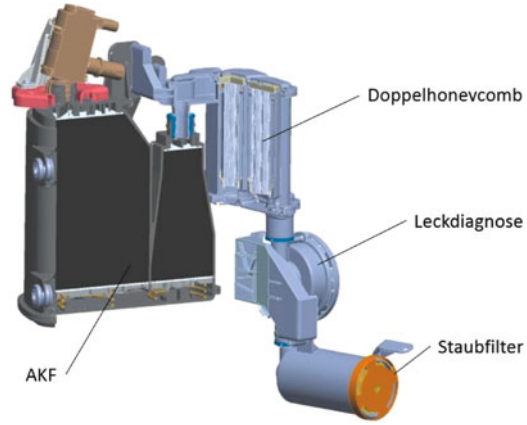



**Abb. 5.305** Aktivkohlefilter 2 Kammer mit Doppelhoneycomb (Quelle: KAYSER)

Die US-Variante hat ein größeres Kohlevolumen, da sie neben den Verdunstungsemissionen bei Fahrzeugstillstand auch die Benzindämpfe bei der Betankung (ORVR; Onboard Refueling Vapour Recovery) aufnehmen muss.

Hierbei ist auf eine optimale Durchströmung des Aktivkohlebetts zu achten, um vorzeitiges Abschalten der Zapfpistole bei der Betankung durch zu hohen Druckverlust im AKF zu verhindern (Abb. 5.305).

## 5.10.6 Füllstandserfassung

Zur Messung des Kraftstoffinhaltes sind grundsätzlich verschiedene Prinzipien möglich:

- Füllhöhenermittlung über
  - Schwimmer und Abgriff einer Widerstandsbahn,

- optische Messung,
- kapazitive Messung,
- Ultraschallmessung,
- Ermittlung des Kraftstoffgewichtes.

Unter der Bewertung von Adaptierbarkeit an verschiedene Tankgeometrien, Montage und nicht zuletzt der Kosten hat sich bis heute die Füllhöhenmessung in fast allen Fahrzeugen durchgesetzt.

Neben der optimalen Positionierung des Füllstandsgebers möglichst im Schwerpunkt der Flüssigkeit sind auch Tank- und Bauteilveränderungen bei Kraftstoffquellung und Temperatur, sowie das Verhalten im dynamischen Fahrbetrieb zu beachten.

Bei der Aufbereitung des Füllstandsgebersignales zum Anzeigewert können heute durch betriebsabhängige, dynamische Dämpfungsparameter und Einbeziehung der Motorverbräuche Schwankungen durch Fahrmanöver weitgehend ausgeglichen werden.

Durch die deutlichen Verbrauchsreduzierungen, die komplexen Bauformen der Tanks und die Anzeige der Restreichweite in Kilometern werden die Anforderungen an die Messgenauigkeit und sichere Erkennung der Restmengen immer wichtiger.

### 5.10.6.1 Hebelgeber

Der Hebelgeber mit unterschiedlich aufwändigem Signalabgriff (offenes oder gekapseltes Abgriffsystem) ist der derzeit am häufigsten verwendete Füllstandsgeber. Beim Hebelgeber (Abb. 5.306) ist ein Schwimmer am Ende eines drehbar gelagerten Drahthebels befestigt. Durch die Gestaltung des Hebels als auch der Schwimmerform (z. B. quaderförmig oder kugelig) lässt sich der Messbereich entscheidend beeinflussen. Über Schwimmer und Hebel wird in der Regel ein Potentiometer betätigt. Die Potentiometer sind in offener und gekapselter Form gebräuchlich und setzen die Füllhöhe in ein elektrisches Signal zur Weiterverarbeitung im Kombiinstrument um. Die unbedingt erforderliche Dämpfung des Signals bei Schwappbewegungen des Kraftstoffs und die Erzeugung einer Reservewarnung erfolgt in der Regel elektronisch mittels der Software im Kombiinstrument.



**Abb. 5.306** Hebelgeber mit Bodenabstützung (Quelle: BMW)

Bei der Befestigung der Füllstandsgeber unterscheidet man grundsätzlich zwischen der bodenabgestützten und der deckelabgestützten Ausführung. Ausschlaggehend für die Auswahl ist neben der Formbeständigkeit des Behälters auch die gewünschte Erfassungsgenauigkeit des jeweiligen Füllstandes.

### 5.10.6.2 Tauchrohrgeber

Diese, heute nicht mehr gebräuchliche Art der Höhenmessung hat Ihren Vorteil darin, dass der Flutraum für den Schwimmer gut über ein Zulauflabyrinth bedämpft werden kann und damit direkt ohne Zusatzelektronik ein gedämpftes Anzeigesignal und ein Warnkontakt realisierbar ist. Bei diesen Gebern (Abb. 5.307) gleitet der Schwimmer in Form eines Zylinders in einem senkrecht stehenden Rohr über einen Führungsstab. Am Schwimmer befestigte Kontakte greifen an gespannten Widerstandsdrähten den Füllstandswert ab.

### 5.10.6.3 Füllstandssensor ohne bewegliche Teile

Nachdem mechanische Systeme immer einem gewissen Verschleiß unterliegen und auch durch

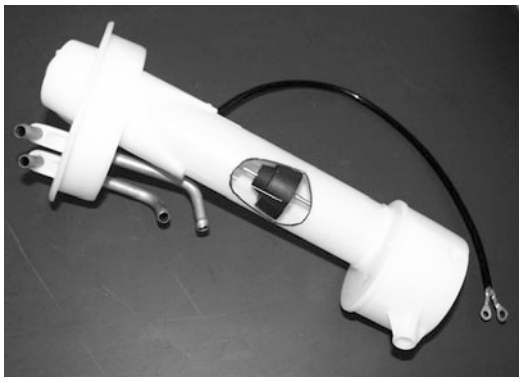


**Abb. 5.307** Tauchrohrgeber (geschnitten), (Quelle: BMW)



**Abb. 5.308** Planarer kapazitiver Füllstandssensor, (Quelle: Hella)

Quellung des Tanks und seiner Einbauten in ihrer Bewegung gestört werden können, wurden zwischenzeitlich auch Sensoren ohne bewegliche Teile entwickelt.

Eine Ausführung davon ist der kapazitive Sensor (Abb. 5.308), der den Füllstand über die Änderung der elektrischen Kapazität zwischen zwei Messelektroden beim Eintauchen in die Flüssigkeit misst. Nach der analogen Vorverarbeitung des rohen Messsignals (Verstärkung, Filterung) in der integrierten Elektronik wird dieses digitalisiert. Die Digitalisierung muss nah an den Messelektroden erfolgen, um den Signalverlust gering, sowie Störeinflüsse minimal zu halten. Das digitalisierte Signal wird in einem Mikrocontroller weiterverarbeitet, der aus den Kapazitätswerten den Füllstand berechnet und über eine standardisierte Schnittstelle (z. B. LIN, SENT) dem Kombiinstrument übergibt.

Neben der Messung des Füllstandes können weitere, für die Applikation interessante Größen bestimmt werden. So kann z. B. optional auch die Temperatur des Kraftstoffes ermittelt werden. Es ist ebenso möglich, über die geeignete Wahl des Elektrodendesigns und der Messschaltung den Ethanolgehalt von Benzin zu bestimmen.

Die Länge dieses kapazitiven Sensors wird bestimmt durch die Messhöhe sowie den Einbauwinkel im Tank, wobei der Sensor vorrangig bodennah befestigt ist, um bis in den unteren Füllstandsbereich messen zu können.

## 5.10.7 Kraftstoffförderung

Die grundsätzliche Aufgabe des Fördersystems ist es, den Motor in allen Betriebszuständen mit einer ausreichenden Kraftstoffmenge und dem geforderten Systemdruck zu versorgen.

Das Fördersystem besteht im Wesentlichen aus Kraftstoffpumpe mit Ansaugsieb, Schwalltopf, Kraftstofffilter, Druckregler und Leitungssystem. Da packagebedingt die Tankformen häufig kompliziert ausfallen, sind auch noch Saugstrahlpumpen zur vollständigen Nutzung des Behälterinhaltes erforderlich.

Das in Abb. 5.309 dargestellte System zeigt ein heute gebräuchliches rücklauffreies System für Benzinmotoren.

Bei Dieselantrieben ist der Aufbau ähnlich, jedoch gibt es hier einen Kraftstoffkreislauf vom Tank zur Hochdruckpumpe und zurück. Dies ist erforderlich um bewusste Leckagen der Hochdruckpumpe wieder zum Tank zurückzuführen und damit auch einen Beitrag zur Hochdruckpumpenkühlung zu leisten. Der Kraftstofffilter und die Druckregelung sind dabei auch in Motornähe angeordnet.

### 5.10.7.1 Elektrokraftstoffpumpe (EKP)

Bei Elektrokraftstoffpumpen gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Funktionsprinzipien.

Die **Verdrängerpumpen** wie Zahnring-/Trochoiden-, Flügelzellen- bzw. Rollenzellen- und Schrauben-Pumpen.

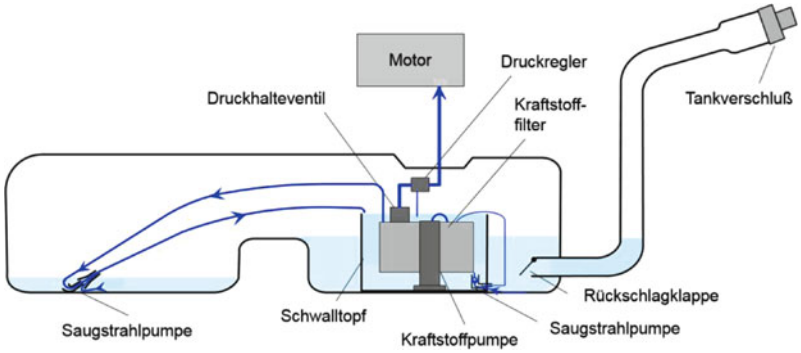



**Abb. 5.309** Fördersystem eines Benzinkraftstoffbehälters

Verdrängerpumpen zeichnen sich durch gutes Niederspannungsverhalten und Eignung für hohe Systemdrücke aus.

Die **Strömungspumpen** wie Seitenkanal und Peripheralkanal-Pumpen.

Strömungspumpen zeichnen sich durch ihren kontinuierlichen Druckaufbau mit sehr geringen Pulsationen und damit durch bessere Laufruhe aus.

Bezüglich ihres maximalen Druckaufbaus und des Wirkungsgrades sind sie gegenüber Verdrängerpumpen jedoch im Nachteil.

Strömungspumpen können bei erhöhten Anforderungen an das Heißförderverhalten auch als Vorstufe in Kombination mit einer zweiten Pumpenstufe eingesetzt werden.

Dabei sind zwei Pumpensysteme auf der gleichen Antriebswelle in Reihe geschaltet.

Typische Systemdrücke sind bei Benzin von 2 bis ca. 6 bar (rel.) und bei Diesel um die 5 bar (rel.).

Während früher die Kraftstoffpumpen generell inline unter dem Fahrzeugboden konzipiert waren, ist mittlerweile die Integration im Tank die bevorzugte Lösung. Die Vorteile sind besseres Ansaugverhalten, Funktionseinheit mit Schwalltopf, bessere Geräuschdämpfung, Schutz vor Umwelteinflüssen, Emissionen und kostengünstige Integration. Die In-Tank-Pumpe wird entweder am Verschlussflansch hängend oder im Schwalltopf befestigt und in beiden Fällen mit Dämpfungselementen vom Behälter schwingungsentkoppelt.

Aufgrund der Empfindlichkeit von offenen Kommutatoren (speziell bei Kupferkollektoren) der antreibenden Elektromotoren auf wechselnden Kraftstoffzusammensetzungen, Additive und der steigenden biogenen Anteile (Ethanol und FAME) mit deren Sekundärprodukten setzen sich immer mehr medienunabhängige, elektronisch kommutierte Varianten (Drehstrommotoren) durch. Um diese EC-Pumpen (electric commutated) betreiben zu können, muss die Gleichspannung des Fahrzeug-Bordnetzes über ein Steuergerät zu einer Dreiphasen-Wechselspannung umgerichtet werden.

Bei der Dimensionierung der Kraftstoff-Pumpe müssen folgende Gesichtspunkte besonders beachtet werden:

- Der maximale Volumenstrom einer EKP muss aus nachfolgenden Gründen immer höher als der maximale Kraftstoffbedarf des Motors sein und muss daher folgende Zuschläge berücksichtigen:
  - Betrieb von Saugstrahlpumpen, die zur einwandfreien Funktion, eine Mindestdurchflussmenge von ca. 15–25 l/h benötigen,
  - Mindestdurchflussmenge des Kraftstoffdruckreglers von ca. 15 l/h, um in einen stabilen Regelbereich zu gelangen,
  - Zuschläge für Bordnetzschwankungen, Heißförderabfall und Kraftstofffilterverschmutzung.
- Beim Kaltstart muss die EKP auch bei verminderter Betriebsspannung und damit verminderter Drehzahl, genügend Kraftstoff bei vorgegebenem Systemdruck zum Verbrennungsmotor fördern.

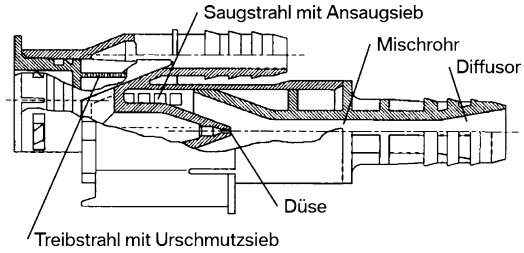



**Abb. 5.310** Saugstrahlpumpe rücklaufgetrieben (Quelle: BMW)

In der EKP sind häufig ein Druckbegrenzungsventil und ein Systemdruckhalteventil enthalten. Wird die Kraftstoffleitung abgequetscht, so verhindert das Druckbegrenzungsventil einen Druckaufbau über den zulässigen Berstdruck der Kraftstoffleitung hinaus. Das Systemdruckhalteventil soll nach dem Abstellen des heißen Fahrzeugs den Druck zwischen Pumpe und Druckregler für eine gewisse Zeit aufrechterhalten und damit Gasbildung in der Vorlaufleitung, ggf. Hochdruckpumpe und Einspritzleiste verhindern, um den Heißstart des Motors zu verbessern.

### 5.10.7.2 Schwalltopf

Hauptaufgabe des Schwalltopfes ist, bei geringen Behälterinhalten die Restmengen bei Fahrdynamik am Absaugort der Pumpe zurückzuhalten, so dass die einwandfreie Funktion des Motors gewährleistet bleibt.

Je nach Ausführung können noch zusätzliche Funktionen wie Niveauanhebung durch Saugstrahlpumpen, Füllstandsgeberbefestigung und Pumpen-/Filterhalterung in den Schwalltopf integriert werden.

Die Befestigung am Tankboden erfolgt durch:

- Verschweißung des Schwalltopfes mit dem Behälter,
- nachträgliche Verbindung durch Bajonettverschluss, Schnappverbindung etc.,
- Andrücken des in der Tankeinbaueinheit integrierten Schwalltopfes auf dem Tankboden mittels Federelementen.

### 5.10.7.3 Saugstrahlpumpe (SSP)

In Abb. 5.310 ist der Aufbau einer Saugstrahlpumpe dargestellt. Eine SSP ist eine Pumpe ohne bewegte Bauteile nach dem Venturi-Prinzip und wird durch den Kraftstoff der Vor- oder Rücklaufleitung angetrieben. Mit ihr wird bei Mehrkammerbehältern der in entlegenen Kammern vorhandene Kraftstoff in den Haupttankbereich mit Schwalltopf und EKP gefördert oder das Füllstandsniveau im Schwalltopf angehoben.

Die Dimensionierung variiert je nach Verfügbarkeit von Druckniveau und Menge des Treibstrahls.

Es gibt sowohl treibende (SSP im zu fördernden Bereich) als auch saugende Ausführungen (nur der Sauganschluss ist zum fördernden Bereich verlängert.)

### 5.10.7.4 Aufbereitung des Kraftstoffs

Zum Schutz der empfindlichen Hochdruckpumpen und Einspritzdüsen muss der Kraftstoff von Verunreinigungen gereinigt werden.

Der Schmutz kann unterschieden werden in Urschmutz, der fertigungsbedingt während der Produktion in den Kraftstoffkreislauf gelangen kann und Einbringung über den Betankungsvorgang und Verschleiß. Die erste Filtrierung erfolgt normalerweise an der Saugseite der EKP. Hier ist bei der Maschenweite zwischen Schutz des Pumpenwerkes und Beeinträchtigung des Ansaugverhaltens (insbesondere Dieseltieftemperatur) abzuwägen (typisch ca. 30–300 µm). Stützkörper im Filtergewebe stellen sicher, dass die ganze Gewebefläche wirksam bleibt.

Die zweite Filtrierung erfolgt in einem Feinfilter nach der EKP (typisch ca. 5 µm).

Diese unterscheiden sich in ihrer Auslegung deutlich nach den verwendeten Kraftstoffarten für Diesel- und Ottomotoren. Filter für Ottomotoren sind aufgrund der gestiegenen Emissionsanforderungen zunehmend im Kraftstofftank integriert (Reduktion von Schnittstellen).

Filter für Dieselkraftstoff sind wesentlich aufwendiger. Bei tiefen Temperaturen, d. h. unterhalb des Trübungspunktes, kann das im Kraftstoff enthaltene Paraffin kristallisieren und so den Filter verstopfen. Dies kann durch Heizsysteme vermieden werden, die sich selbstständig in vorgegebenen Temperaturbereichen zuschalten. Dieselfilter sind in der Regel inline außerhalb des Kraftstoffbehälters angeordnet.

Um an den Einspritzventilen oder an der Hochdruckpumpe unabhängig von der abgenommenen Kraftstoffmenge einen konstanten Systemdruck zu erhalten, werden Kraftstoffdruckregler eingesetzt. Diese sind in der Regel bei Benzin hinter dem Kraftstofffilter im Tank angeordnet bzw. bei Diesel in Form von Abströmventilen in den Hochdruckpumpen integriert. Eine weitere Form der Druckregelung ist bei geregelten Systemen über Drucksensor und entsprechende Ansteuerung der EKP möglich.

### 5.10.8 Elektrische/elektronische Systemeinbindung

Das Aussenden von Spannungsspitzen auf Stromversorgungs-, Signal-, Daten- und Steuerleitungen ist durch geeignete Entstörmaßnahmen zu unterbinden um negative Auswirkungen auf andere Systeme zu verhindern.

Besondere Beachtung bedarf die Materialbeständigkeit der Isolation von Leitungen und deren mechanische Entlastung bei Schwappbewegungen. Auch die Qualität aller elektrischen Verbindungen (z. B. Stecker- und Crimpqualität), sind sowohl bei geringen Signalströmen wie bei hohen Übertragungsleistungen von hoher Relevanz.

Zur Senkung des Stromverbrauchs und damit des $CO_2$-Ausstoßes eines Fahrzeugs wird mittlerweile die hydraulische Leistung der elektrischen Kraftstoffpumpe (EKP) bedarfsgerecht geregelt. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie z. B.: Drehzahlregelung und Druckregelung oder Kennfeldsteuerung.

Bei der Drehzahlregelung/Kennfeldsteuerung wird die EKP-Drehzahl entsprechend der Solldrehzahl unabhängig von der hydr. Belastung eingeregelt bzw. über ein Kennfeld gesteuert. Die Solldrehzahl ergibt sich aus der im EKP-Steuergerät hinterlegten Kennlinie, die abhängig ist von der Charakteristik der EKP, der benötigten Kraftstoffmenge des Verbrennungsmotors und der Saugstrahlpumpen im Tank.

Bei der Druckregelung wird der Kraftstoffdruck idealerweise direkt vor der Kraftstoff-Hochdruckpumpe bzw. Einspritzleiste gemessen und mit dem Solldruck verglichen. Bei Abweichungen wird die EKP-Spannung vom EKP-Steuergerät entsprechend angepasst und somit die hydraulische Leistung reguliert.

Neben dieser Konstantdruck-Regelung gibt es noch die Möglichkeit, einen variablen Vorlaufdruck einzustellen. Dies ermöglicht eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades der Kraftstoffversorgung, da der Verbrennungsmotor dann neben der minimalen Menge auch noch mit dem jeweils niedrigst möglichen Druck versorgt werden kann.

Durch die Strömung des Kraftstoffes im System können abhängig von der Leitfähigkeit des Kraftstoffes und klimatischer Umgebungsbedingungen elektrostatische Aufladungen an den Bauteilen entstehen. Daher muss beim Systemaufbau auf die Ableitfähigkeit der Komponenten geachtet werden, um das Ladungspotenzial sicher abzuleiten.

Dies erfolgt z. B. über Erdungsleitungen, leitfähige Werkstoffe oder leitfähige Beschichtungen.

### 5.10.9 Besondere Anforderungen an die KVA bei hybridisierten Fahrzeugen

Um die Anforderungen von Hybrid-Fahrzeugen erfüllen zu können, sind weitere Schritte zur Optimierung des Be- und Entlüftungssystems und damit des Kraftstoffspeichers erforderlich.

Die Besonderheit bei hybridisierten Fahrzeugen ist, dass durch die elektrischen Fahranteile vom Verbrennungsmotor nicht mehr genügend Spülluft zur Regeneration des AKF zur Verfügung gestellt werden kann. Damit ist es notwendig die Belastung des AKF durch Benzindämpfe zu reduzieren, und die verbleibende Spülluftmenge optimal auszunutzen.

Ersteres kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass ein geschlossenes Kraftstoffspeichersystem realisiert wird. Dabei handelt es sich um einen druckfesten Kraftstofftank (−100 mbar bis +350 mbar) mit einem Absperrventil im Entlüftungspfad. Hierdurch wird das Ausgasen des Kraftstoffs in den meisten Betriebszuständen verhindert und der AKF nicht beladen. Bei US-Systemen ist der AKF dann nur für die Betankungsemissionen nötig. Während der Abstellphasen des Fahrzeugs wird durch den Überdruck im Tank das Ausgasen

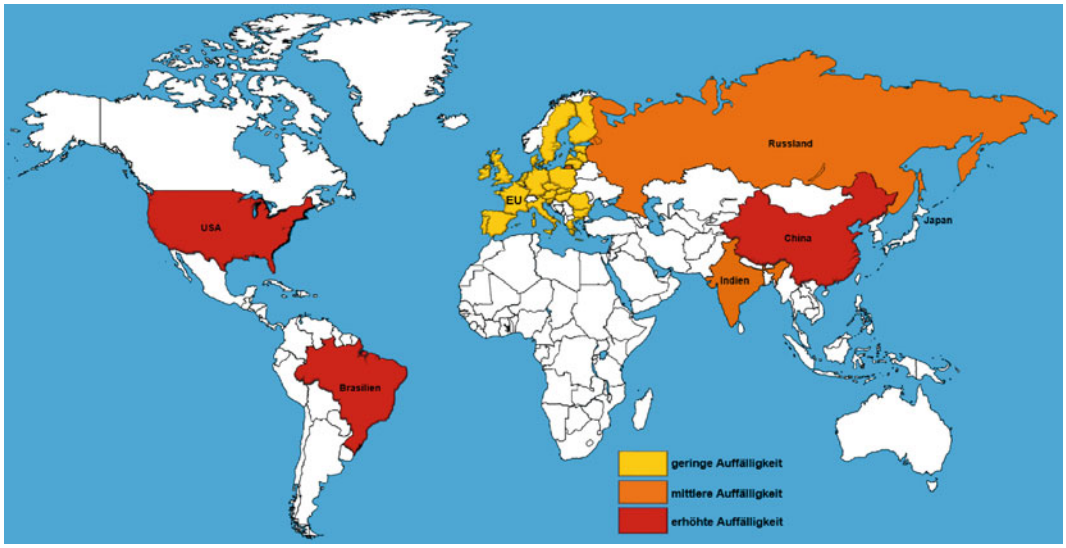



**Abb. 5.311** Verteilung der Auffälligkeiten durch Kraftstoffqualitäten (Quelle: BMW)

des Kraftstoffs unterdrückt. Solch ein Tankkonzept ermöglicht, dass komplette Emissionszyklen ohne bzw. mit sehr geringem verbrennungsmotorischem Fahranteil gefahren werden können. Dies hat aber zur Folge, dass z. B. bei einem Betankungswunsch erst der Tankinnendruck reduziert werden muss, bis die Tankklappe geöffnet werden kann.

Für die optimale Ausnutzung der Spülluftmenge muss die Betriebsstrategie des Fahrzeugs so ausgelegt werden, dass die elektrischen Fahranteile in Bereichen, die für die Ausgasung des Kraftstoffs kritisch sind, eingeschränkt werden. So kann es beispielsweise notwendig sein, das Abschalten des Verbrennungsmotors bei hohen Umgebungstemperaturen und stark beladenem AKF zu unterdrücken, um ein Durchschlagen des AKFs zu vermeiden, was zu einer Geruchsbelästigung führen kann.

Konstruktiv lässt sich eine optimale Spülluftausnutzung durch mehrere Maßnahmen am AKF erreichen.

Zum einen ist es notwendig, die Durchflusswiderstände im Spülluftpfad zu minimieren, da das zur Verfügung stehende Druckgefälle zwischen Verbrennungsmotor und AKF aufgrund der Entdrosselung moderner Motoren sehr gering ist.

Zum anderen muss der Bereich im Spülluftpfad des Aktivkohlefilters zwischen Kraftstofftank und Verbrennungsmotor konstruktiv so gestaltet sein, dass ein Puffer für Kraftstoffdämpfe entsteht.

Durch die Dämpfung der Konzentrationsänderungen der Kohlenwasserstoffe in der Spülluft wird damit das Spülluft-Regelverhalten des Verbrennungsmotors schneller und das zur Verfügung stehende Spülluftvolumen steigt.

Schließlich kann der Aktivkohlefilter selbst für niedrige Spülluftmengen ausgelegt werden. Dazu wird die in ► Abschn. 5.10.5.3 erwähnte Möglichkeit der Reihenschaltung mehrerer Aktivkohle-Monolithen realisiert. So lässt sich durch die Verwendung eines zweiten Monolithen der Spülluftbedarf eines bestehenden AKF um bis zu 20 % reduzieren.

Da bei Hybridfahrzeugen der Hochvoltspeicher viel Bauraum benötigt und beim Kraftstoffbehälter auf Volumen verzichtet werden kann, ist für Hybrid-Fahrzeuge in der Regel neben der Druckbeständigkeit auch aus Bauraumsicht ein eigener Kraftstoffbehälter erforderlich.

## 5.10.10 Ausblick

Aufgrund der endlichen fossilen Energieträger werden der weltweite Einsatz alternativer Kraftstoffe und neuer Additive auch weiterhin Herausforde-

rungen für die Kraftstoffversorgungsanlagen darstellen.

Weiterhin stellen die enorm wachsenden Märkte in Schwellenländern besondere Herausforderungen bereit. Besonders in Brasilien, Russland, Indien und China hinkt die Versorgung mit hochwertigen Kraftstoffen der Nachfrage weit hinterher. Die Kraftstoffe in diesen Ländern schwanken stark in ihren Eigenschaften (Dampfdruck, Klopffestigkeit), sind stellenweise stark mit Feststoffen verunreinigt und enthalten aggressive Substanzen (Säure, Wasser, freier Schwefel), die Komponenten des Kraftstoffsystems schädigen können (siehe ◘ Abb. 5.311).

Da bei der Fahrzeugauslegung aber nicht alle über der Betriebszeit des Fahrzeuges zu erwartenden Kraftstoffqualitäten bekannt sein können, wird es immer wichtiger medienunabhängige Komponenten (z. B. elektronisch kommutierte Pumpen, gekapselte Füllstandsgeber oder diagnosefähige Komponenten) einzusetzen um kundenrelevante Störungen zu vermeiden.

Auch die kontinuierliche Verschärfung der Emissionsvorschriften wird es erforderlich machen, die Systeme weiter zu verbessern.

Trotz der Bestrebungen hin zur Elektromobilität wird es wohl noch auf längere Zeit die Notwendigkeit für Kraftstoffsysteme in Fahrzeugen geben.

## 5.11 Kraftstoffversorgungsanlagen für alternative Energieträger

### 5.11.1 Anforderungen

Das Spektrum der alternativen Energieträger und ihr jeweiliges Potenzial für eine Verwendung als Kraftstoff werden in ► Abschn. 5.9 behandelt. Im Hinblick auf die Handhabung und Speicherung von alternativen Kraftstoffen ist davon auszugehen, dass die Anforderungen der Kunden sich an den Gewohnheiten im Umgang mit Benzin und Diesel orientieren und Nachteile kaum akzeptiert werden.

Wie in vorstehenden Abschnitten ausgeführt, können Methanol und Rapsmethylester (RME, auch Biodiesel genannt) grundsätzlich zu den alternativen Kraftstoffen gezählt werden. Beimengungen, wie von 5 % bis zu 10 % RME im Dieselkraftstoff sind in Europa schon üblich bzw. geplant. In einigen Ländern, insbesondere in Brasilien und in den USA, sind Kraftstoffe mit hohen Anteilen von Ethanol am Markt. Da der Ethanol-Anteil variiert („Flexible Fuel“) ist ein Sensor notwendig, der das jeweilige Mischungsverhältnis von Ethanol und Benzin ermittelt, um den Motorbetrieb an das aktuelle Mischungsverhältnis anpassen zu können. Die Speicherung von Methanol, Ethanol und RME erfolgt in Kraftstoffversorgungsanlagen, wie sie oben beschrieben wurden, wenn bei der Wahl der Werkstoffe die besonderen chemischen Eigenschaften von Methanol, Ethanol und RME berücksichtigt wurden.

Wie ► Abschn. 5.9 weiterhin zeigt, sind Erdgas und langfristig auch Wasserstoff für den mobilen Einsatz geeignet. Die Speicherung dieser beiden Energieträger erfolgt gasförmig in Druckspeichern oder verflüssigt bei tiefen Temperaturen in sogenannten Kryospeichern. Beim Erdgas unterscheidet man daher zwischen CNG (Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas) und LNG (Liquified Natural Gas, verflüssigtes Erdgas). Letzteres ist bei rund −160 °C flüssig, während Wasserstoff ($LH_2$) bei Temperaturen um −250 °C flüssig gespeichert werden kann. Tiefkaltes, überkritisches Wasserstoffgas ($CcH_2$, „Cryocompressed Hydrogen“) lässt sich auch bei Temperaturen größer −240 °C und Drücken oberhalb von 13 bar speichern. Umgebungswarm gespeicherter Druckwasserstoff wird als $CGH_2$ bezeichnet (Compressed Gaseous Hydrogen, −40 °C bis +85 °C).

### 5.11.2 Gesetzliche Vorschriften

Die bei der Speicherung von Erdgas und Wasserstoff eingesetzte Technik muss dem heute gültigen Sicherheitsbedürfnis und den aktuellen Standards entsprechen. So sind die zu treffenden Maßnahmen umfangreicher als bei Benzin- und Dieselkraftstoff, die bereits vor etwa einem Jahrhundert eingeführt wurden und zu denen viele Erfahrungen vorliegen. Es existieren sowohl für die Speicherung in Druckbehältern als auch in Kryospeichern eine Vielzahl von Vorschriften.

Es müssen, anders als bei einer Kraftstoffversorgungsanlage für Benzin oder Diesel, alle Bauteile



**Abb. 5.312** Volkswagen up EcoFuel

der Druckbehälter oder Kryospeicher sowie das gesamte Speichersystem noch eine behördliche Zulassung besitzen.

Die Bestimmungen für die Zulassungen sind in den verschiedenen Ländern unterschiedlich, aber zumindest im Bereich der Europäischen Union vereinheitlicht.

Für mit komprimiertem Erdgas betriebene Fahrzeuge wurde im Jahr 2000 eine ECE Regelung in Kraft gesetzt, die die Typgenehmigung von CNG Fahrzeugen regelt [313] Für Wasserstofffahrzeuge gibt es auf europäischer Ebene seit 2009 eine Verordnung (EC 79/2009) [331] mit der sowohl Fahrzeuge mit Flüssig- als auch mit Druckwasserstoffspeicherung typgenehmigt werden können. Dabei können sowohl Tanksysteme als auch Einzelkomponenten nach der EC79 zertifiziert werden.

Im Rahmen der weltweiten Harmonisierung von Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen unter dem Dach der UNO wurde in 2015 die UN ECE R134 veröffentlicht, nach der in Zukunft Wasserstofffahrzeuge zugelassen werden sollen [332].

## 5.11.3 Anordnung im Fahrzeug

Die im Fahrzeug verwendeten Druck- und Kryospeicher sind von gleichartigen, stationären Speichern oder Transportbehältern, wie sie in der Logistik von technischen Gasen verwendet werden, abgeleitet und weiterentwickelt. Neben dem erforderlichen Platzbedarf müssen die Anforderungen zur Crashsicherheit, Montierbarkeit und auch bezüglich der Gewichtsverteilung im Fahrzeug berücksichtigt werden. Zudem verbleibt bei Konzepten mit Verbrennungsmotoren der Benzintank im Fahrzeug, damit dieses als Bi-Fuel-Fahrzeug, auch bei nur wenigen vorhandenen Tankstellen für Erdgas oder Wasserstoff, alltagstauglich bleibt [314].

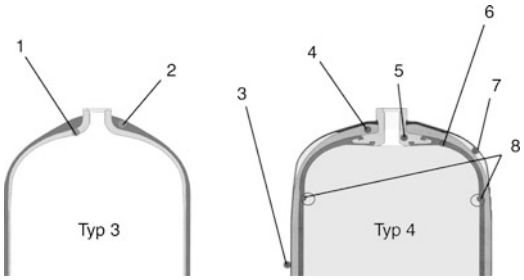
Während die Gasspeicher bei ursprünglich nicht dafür ausgelegten Fahrzeugkonzepten oft im Gepäckraum eingebaut wurden und damit erhebliche Gebrauchseinschränkungen in Kauf genommen wurden, werden bei serienmäßig konzipierten Erdgas- und Wasserstofffahrzeugen die Speicher in der Regel im Unterflurbereich installiert, wie zum Beispiel im Volkswagen up (Abb. 5.312).

Bei Speicherung von kryogenem Erdgas oder Wasserstoff können durch die erheblich höheren Dichten die jeweiligen Speichergrößen im Vergleich zu Druckspeichern reduziert werden, was deren Integration erleichtert. Wird die Speichergröße belassen, ermöglichen Kryospeicher im Vergleich zur Druckspeicherung bei 700 bar eine bis zu 60 % größere Reichweite des Fahrzeuges. Allerdings ist bei kryogenen Speichern zu beachten, dass bei Standzeiten über mehrere Tage ein Wärmeeintrag aus der Umgebung in den Kraftstoff mit entsprechendem Druckaufbau im Speicher erfolgt. Um diesen Druckaufbau zu begrenzen, muss während längerer Standphasen Kraftstoff abgeblasen werden. Der abgeblasene Kraftstoff sollte idealerweise nicht ungenutzt in die Umgebung abgegeben werden, sondern einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden, beispielsweise im Falle des Wasserstoffs durch den Betrieb einer im Fahrzeug vorhandenen Brennstoffzelle.

## 5.11.4 Kraftstoffbehälter und Kraftstoffsysteme für Druckgas

### 5.11.4.1 Kraftstoffbehälter

Druckspeicher für Erdgas werden in der Regel mit 200 bis 250 bar, Druckspeicher für Wasserstoff mit 350 oder 700 bar betrieben. Dabei haben die Entwicklungstendenzen der vergangenen Jahre gezeigt, dass sich für die Speicherung von Wasserstoff kurz- bis mittelfristig ein Speicherdruck von 700 bar gegenüber 350 bar durchsetzen wird. Ausgehend von Stahlbehältern, wurden in den letzten Jahren Speicher aus neuen Werkstoffen entwickelt, die leichter und weniger korrosionsanfällig sind. So werden heute Speicher aus Kohlefaser-Verbundwerkstoffen mit Linerwerkstoffen aus Aluminium oder PE/PA entwickelt. Das Gewicht eines Speichers aus kohlefaserverstärktem Verbundwerkstoff mit Aluminiumliner beträgt nur noch ein Drittel des Gewichtes eines reinen Stahlspeichers [315] (◘ Abb. 5.313, ◘ Tab. 5.18). Eine weitere Gewichts- und auch Kostenreduzierung ergibt sich durch den Einsatz eines Kunststoffliners, weshalb der Typ IV Druckbehälter auch die präferierte Lösung für einen Serieneinsatz in der Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug ist.




◘ **Abb. 5.313** Aufbau Druckgasbehälter. 1 Nahtloser Metall-Innentank, 2 Faserverbund, 3 Schutzschicht, 4 Faserverbund-Umwicklung, 5 Anschlussstück aus Metall, 6 Kunststoffliner, 7 Stoß-Schutz, 8 Schweißnaht Liner

Auch wenn es immer wieder Experimente mit unterschiedlichen Geometrien gibt [316], die den Anforderungen aus dem Package besser entsprechen würden, werden heute nach wie vor ausschließlich zylinderförmige Speicher eingesetzt.

### 5.11.4.2 Kraftstoffsysteme

Als für den Betankungsvorgang von Wasserstoff-Druckgasspeichersystemen maßgebliche Vorschrift hat sich der Surface Vehicle Technical Information Report SAE J 2601 etabliert. Er beschreibt die Anforderungen an eine Druckwasserstoff-Tankstelle und das Verfahren, nach dem eine sichere und schnelle Betankung erfolgen soll.

Es wird hierbei zwischen 350 bar und 700 bar, sowie die jeweils zu erreichende Vorkühlungstemperatur des Wasserstoffs am Austritt des Betankungsstutzens unterschieden. Der Temperaturbereich liegt dabei zwischen −40 °C und Umgebungstemperatur, wobei nur mit einer Vorkühlung auf −40 °C die gewünschte Betankungsdauer von drei Minuten erreicht wird. Höhere Gaseintrittstemperaturen führen aufgrund der im Tank entstehenden Kompressionswärme zu längeren Betankungszeiten, da ein Überhitzen des Druckbehälters vermieden werden muss. Unter ungünstigen Bedingungen (ungekühltes Gas und hohe Umgebungstemperatur) kann die Betankung auch bis zu einer Stunde dauern, damit die Wärme ausreichend schnell aus dem Druckbehälter in die Umgebung abfließen kann. Eine weitere Unterteilung besteht darin, ob zwischen Fahrzeug und Tankstelle ein Datenaustausch stattfindet oder nicht. Mithilfe des Aus-

**Tabelle 5.18** Druckgas Behältertypen

| Behältertyp | I | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| Material Innenbehälter (Liner) | Metall | Metall | Metall | Kunststoff |
| Material Tankstruktur | Metall | Umfangbewickelt (Nur zylindrischer Bereich) | Vollständig bewickelt | Vollständig bewickelt |



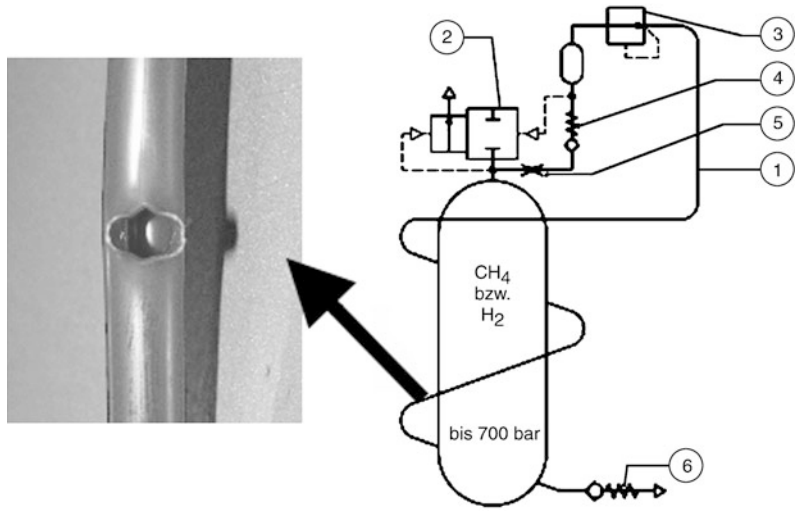



**Abb. 5.314** Schema Lineare Thermosicherung. 1 Thermopositiver Polymerschlauch mit charakteristischem Berstbild, 2/2 Wegeschaltventil, 3 Druckregler, 4 Rückschlagventil, 5 Drossel, 6 federbelastetes Sicherheitsventil (Quelle: Rotarex)

tauschs von Informationen während der Betankung kann ein höherer Befüllgrad erreicht werden. Die standardisierte Kommunikationsschnittstelle ist in der SAE J2799 definiert und wird als Infrarotschnittstelle ausgeführt (IrDA). Die Gewährleistung einer sicheren Betankung auch ohne Kommunikation soll durch die Verwendung von Tabellen erfolgen, die in Abhängigkeit von der aktuellen Außentemperatur sowie dem gemessenen Initialdruck und Füllstand des Tanks den zu verwendenden Druckgradienten für den Betankungsvorgang liefern. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Tank und sein Inhalt umgebungswarm sind. Da diese Annahme nicht unter allen Umständen gültig ist, wird bei der Auswahl des entsprechenden Betankungsdruckgradienten ein um einen Sicherheitsabschlag niedrigerer Wert angesetzt und damit ein Überdrücken des Tanks verhindert. Besteht ein Datenaustausch, so wird die tatsächliche Tanktemperatur an die Tankstelle übermittelt und automatisch ein Druckgradient gewählt, der eineBetankung mit maximalem Befüllgrad ermöglicht. Der erreichbare Befüllgrad je nach Umgebungstemperatur und Initialdruck für eine Betankung ohne Kommunikation liegt zwischen 84 % und 94 %, mit Datenaustausch sind zwischen 92 % und 100 % Füllstand erreichbar.

Eine Thermosicherung am Speicher verhindert, dass der Druck im Speicher im Brandfall über das zulässige Maß hinaus ansteigt, indem diese das Gas aus dem Speicher entweichen lässt. Diese Sicherung kann punktuell durch Schmelzlotsicherungen, Glasampullen oder umfassender durch eine lineare Thermosicherung dargestellt werden [317] (Abb. 5.314).

Da die Dichte gasförmiger Kraftstoffe stark von deren Temperatur abhängt, reicht die einfache Druckmessung zur genauen Bestimmung des

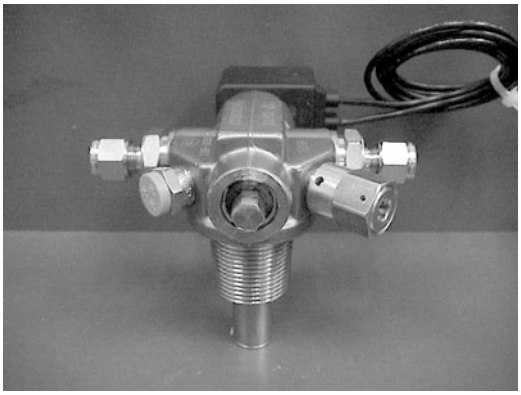


**Abb. 5.315** Absperreinheit für Druckgas (Quelle: Rotarex)

Füllstandes bei Druckspeichern nicht aus. Neben dem Druck wird auch die Temperatur des Gases gemessen und daraus der Kraftstoffinhalt im Speicher berechnet.

Um zu verhindern, dass große Mengen Gas aus dem Speicher austreten, falls die Leitung vom Speicher abreißen sollte, sind die Druckspeicher mit einem Durchflussbegrenzer ausgestattet. Alle notwendigen Armaturen, also Sicherheitsventile sowie Betankungs-, Absperr- und Magnetventile und Druckregler werden in einem einzigen Ventilkopf (Abb. 5.315), der direkt an der Flasche angeordnet ist, integriert. Aus Bauraumgründen werden Hochdruckspeichersysteme für Wasserstoff oft als Mehrtanksysteme ausgeführt, um einerseits vorhandenen Einbauraum optimal zu nutzen und andererseits die geforderten Reichweiten darstellen zu können. Ein aktuelles Beispiel für ein Zweitanksystem mit 700 bar Betriebsdruck ist das des Toyota Mirai (Abb. 5.316).

## 5.11.5 Kraftstoffbehälter und Kraftstoffsysteme für tiefkalt flüssige Gase

### 5.11.5.1 Kraftstoffbehälter

Kryobehälter bestehen für gewöhnlich aus zwei Hüllen (siehe Abb. 5.317), zwischen denen sich eine Vakuum-Superisolation befindet. Durch das Vakuum werden die Konvektion, durch die reflektierenden Aluminiumfolien und Glasfasermatten zur Abstandshaltung der Folien die Strahlung minimiert. Dadurch können die Werte des Wärmeeintrags abhängig von der Größe der Behälter auf ca. 1–2 W begrenzt werden. Über die Aufhängung des Innentanks und die Rohrleitungen werden zusätzlich jeweils ca. 1 W Wärme eingetragen. Auch bei diesem geringen Wärmeeinfall siedet das flüssige Erdgas bzw. der flüssige Wasserstoff und der Druck im Kryobehälter steigt an. Dasselbe gilt bei der Erwärmung



**Abb. 5.316** Toyota Mirai

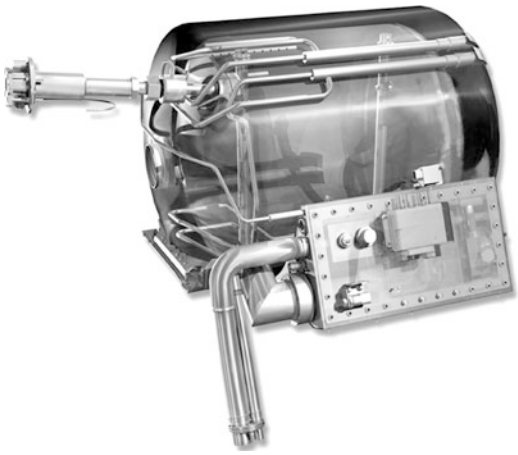


**Abb. 5.317** Kryospeicher (Quelle: BMW AG)

von überkritischem Wasserstoff. Bei Erreichen des maximal zulässigen Betriebsdruckes entweicht das Gas über ein Überströmventil [318]. Das Gas kann dann primär in einer Brennstoffzelle genutzt oder in einem Boil-off-Managementsystem oxidiert oder in die Atmosphäre abgegeben werden (Abb. 5.317). Kryobehälter sind mit zwei voneinander unabhängigen Druckbegrenzungseinrichtungen ausgerüstet, die den Speicher öffnen, falls der höchstzulässige Druck überschritten werden sollte [319].

### 5.11.5.2 Kraftstoffsysteme

Die Betankung von kryogenen Flüssig-Systemen erfolgt mit unterkühltem Kraftstoff. Der Kraftstoff wird in den Tank eingesprüht. Dadurch kommt es an den unterkühlten Tröpfchen zur Kondensation des Gases im Tank. Die Rückgasmenge wird dadurch erheblich reduziert oder kann bei flüssigem Erdgas sogar fast vollkommen verhindert werden. Die Betankung erfolgt deshalb meist über zweiflutige Kupplungen, die es zulassen, dass gleichzeitig flüssiger Kraftstoff aufgenommen und Rückgas abgegeben werden kann. In Rahmen eines internationalen Konsortiums wurde eine nutzerfreundliche Kupplung für Flüssigwasserstoff entwickelt, die weltweit standardisiert werden soll [320].

Die Messung der Füllhöhe erfolgt in Systemen mit Flüssigkeiten über kapazitive Sonden oder über die Änderung des temperaturabhängigen Widerstandes einer Sonde. Baugruppen, bei denen Leckagen von Kraftstoff möglich sind, wie zum Beispiel Ventile oder Sensoren, werden in einer gasdichten Nebensystemkapsel untergebracht. So können Kraftstoffleckagen aufgefangen, detektiert und gezielt entsorgt werden.

Die Förderung des Gases erfolgt bei Kryobehältern in der Regel über das Druckgefälle zwischen dem Speicher und dem Gemischaufbereitungssystem der Brennstoffzelle oder des Motors. Der Kraftstoff kann dem Tank flüssig oder gasförmig entnommen werden. Der Druck im Kryobehälter kann aufgebaut oder aufrecht erhalten werden, indem durch eine Heizung der Kraftstoff kontrolliert verdampft und erwärmt wird. Dies kann als elektrische Heizung oder mit erwärmtem Kraftstoff indirekt über einen Wärmetauscher erfolgen. Für alle Systeme ist eine tanknahe Absperrvorrichtung erforderlich. Dies bedeutet bei kryogenen Systemen, dass Ventile im Bereich des tiefkalten Kraftstoffs anzuordnen sind. Derartige Ventile, deren Verschleißteile austauschbar sind, wurden für niedrige Drücke entwickelt und sind jetzt verfügbar.

Die Kraftstoffsysteme sind für Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb und verbrennungsmotorischem Antrieb prinzipiell identisch. Beim BMW Hydrogen 7, dem ersten Serienfahrzeug mit Verbrennnungsmotor und Flüssigwasserstoffspeicher, ist die Kraftstoffversorgungsanlage im Heck des Fahrzeugs untergebracht. Der Tank befindet sich im crashgeschützten Bereich über oder vor der Hinterachse, die Kraftstoffaufbereitungseinrichtungen (Ventile, Sensoren, Wärmetauscher) in einer direkt am Tank integrierten Nebensystemkapsel (Abb. 5.318).

Zum Antrieb führt eine Wasserstoffleitung für gasförmigen Wasserstoff mit etwa Umgebungstemperatur, sowie Kühlwasserleitungen, die über das Kühlwasser die Energie zur Erwärmung des Wasserstoffs bereitstellen.

## 5.11.6 Speichersysteme für tiefkalte superkritische Gase

Eine weitere Möglichkeit der Gasspeicherung ist die kryogene Druckspeicherung, bei der ein tiefkaltes

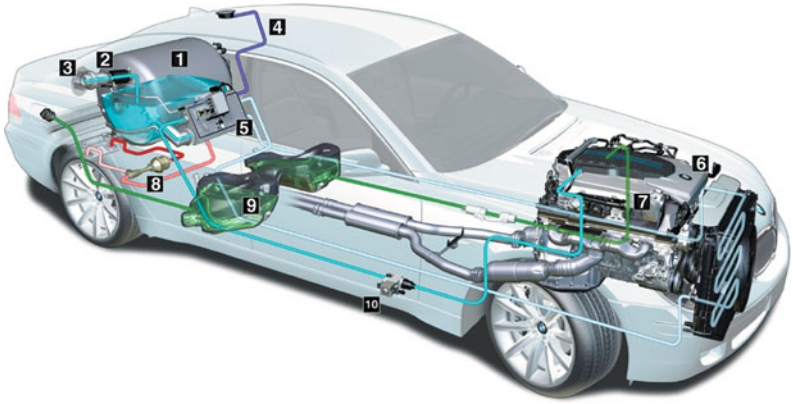



**Abb. 5.318** Wasserstoff-Versorgungssystem in einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Quelle: BMW AG). 1 Flüssigwasserstoff-Behälter, 2 Tankklappe Wasserstoff, 3 Tankkupplung, 4 Sicherheitsabblaseleitung, 5 Nebensystemkapsel, 6 Bivalenter Verbrennungsmotor, 7 Sauganlage mit H2 Rail, 8 Boil-off-Management-System, 9 Benzintank, 10 Druckregler

Gas unter superkritischem Druck gespeichert wird. Die Kryodruckgasspeicherung bei Temperaturen oberhalb der kritischen Temperatur (33 K) in einem kohlefaserverstärkten superisolierten Drucktank weist interessante Potenziale bzgl. einer hohen Speicherkapazität (1,1 kWh = l Systemvolumen, 1,8 kWh = kg Systemgewicht) bei gegenüber einem Flüssigspeicher deutlich verlängerten verlustfreien Druckaufbauzeiten (10 Tage bei typischen Ausgangszuständen des Tanksystems vor langen Fahrzeugstandzeiten), sowie einer schnellen verlustfreien Betankung bei gleichzeitiger Reduktion der Komplexität der Tankstelle auf [323–330]. Voraussetzung für die schnelle verlustfreie Betankung mit hochdichtem Kryodruckgas ist die Verfügbarkeit einer leistungsfähigen LH2-Hochdruckpumpe. Seit 2010 stehen hocheffiziente LH2-Hochdruckpumpen zur Verfügung, die bei 300 bar Ausgangsdruck kryogenes Druckgas mit einer Dichte von 80 g = l bei 100 kg = h Massenstrom bereitstellen können und für die Kompression von 1 bar auf 300 bar einen elektrischen Energiebedarf von weniger als 1 % des unteren Heizwerts des Wasserstoffs aufweisen [325]. Die Auslegung des Kryodruck-Speichersystems auf einen Betriebsdruck von bis zu 350 bar erlaubt es, einen Kryodruck-Speicher mit $CGH_2$-Druckgas bis 350 bar zu betanken und somit in der Anfangsphase neben ersten Kryodruck-Tankstellen auch



**Abb. 5.319** Kryodrucktank

350 bar Druckgastankstellen nutzen zu können. BMW hat ein solches Tanksystem im Jahr 2015 in einem Prototypenfahrzeug vorgestellt (Abb. 5.319 und Abb. 5.320).

## 5.11.7 Entwicklungstendenzen

Grundsätzlich sind zwei Hauptgebiete der Entwicklung sichtbar, die Integration von Tankssystemen in das Fahrzeug und die Entwicklung automobilgerechter Komponenten [321]. Kraftstoffsysteme für unter Normalbedingungen gasförmige Medien haben bezogen auf den Energieinhalt einen mehrfachen Bauraumbedarf, beispielsweise ca. 4-fachen Raumbedarf für Flüssigwasserstoff gegenüber Benzin. Für künftige Fahrzeuggenerationen sind deshalb Konzepte zu entwickeln, die dem großen

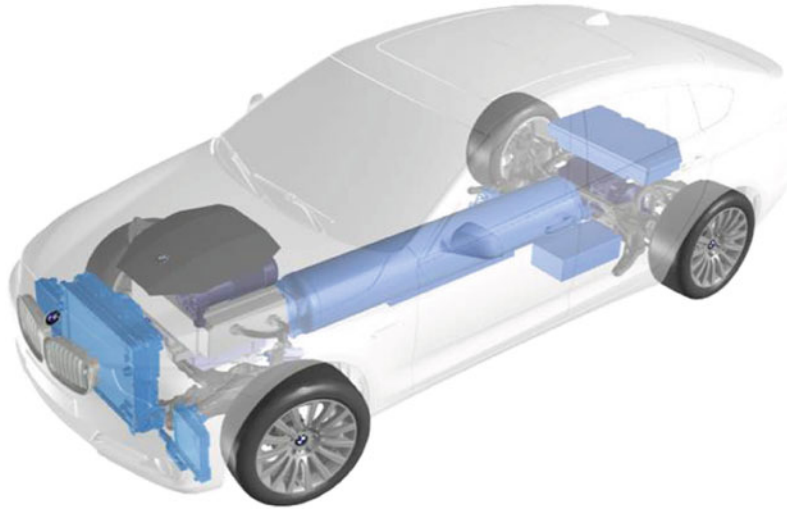


**Abb. 5.320** BMW 5 GT FCEV

Raumbedarf des Tanks Rechnung tragen, den Nutzwert des Fahrzeugs sicherstellen und zugleich eine sichere Unterbringung im Fahrzeug gewährleisten [322].

Sowohl für Systeme mit kryogener Speicherung als auch für Drucksysteme mit Drücken bis zu 700 bar werden Bauteile entwickelt, die einen sicheren und uneingeschränkten Einsatz im Fahrzeug zulassen und gleichzeitig kostengünstig sind. Weiter sind Betankungseinrichtungen und -Verfahren zu entwickeln und weltweit zu standardisieren um einen reibungslosen Betrieb der neuen Technologie sicherzustellen. Weitere Forschung im Bereich matrialgebundener Speicherformen bietet für die Zukunft Potenziale, über die Speicherdichte heutiger physikalischer Gasspeicher hinaus die Energiedichte zu erhöhen, ohne den Betriebsdruck weiter steigern zu müssen. Noch sind aber viele Fragen auf diesem Gebiet ungelöst oder für den mobilen Einsatz nicht zufriedenstellend beantwortet, insbesondere das thermische Management solcher Speicher, ihre Betankungszeiten und die noch zu geringen Wirkungsgrade.

## Literatur

**Literatur zu Abschnitt 5.1.1 bis 5.1.4**


1. Baehr, H.D.: Thermodynamik, 11. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2002)
2. Baehr, H.D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung, 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (1998)
3. Pischinger, R., Klell, M., Sams, T.: Thermodynamik der Verbrenungskraftmaschine, 3. Aufl. Der Fahrzeugantrieb. Springer, Wien, New York (2002)
4. Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W.: Verbrennung (Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung), 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2001)
5. Maass, H., Klier, H.: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine. In: List, H., Pischinger, A. (Hrsg.) Die Verbrennungskraftmaschine Neue Folge. Bd. 2. Springer, Wien (1981)
6. Zima, S.: Kurbeltriebe (Konstruktion, Berechnung und Erprobung), 2. Aufl. ATZ-MTZ-Fachbuch. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden (1999)
7. Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 27. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
8. van Basshuysen, R., Schäfer, F.: (Hrsg.) Handbuch Verbrennungsmotor. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010)
9. Wakayama, N.: Entwicklung des Premacy Hydrogen RE Hybrid. 31. Int. Wiener Motorensymposium. VDI Forschrittsbericht, Bd. 716. (2010)

10. Köhler, E., Flierl, R.: Verbrennungsmotoren. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
11. Pischinger, S.: Schneller zum Markt durch virtuelle Motorenentwicklung. ATZ/MTZ Int. Congress Virtual Product Creation, Stuttgart, 2004
12. Landerl, C., Klauer, N., Klüting, M.: Die Konzeptmerkmale des neuen BMW Reihensechszylinder Ottomotors. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004
13. Thomas: Analyse des Betriebsverhaltens von Kurbelwellengleitlagern mittels TEHD-Berechnung. Dissertation, RWTH Aachen (2003)
14. Dohmen: Untersuchungen zum reibungsoptimierten Triebwerk an Pkw-Verbrennungsmotoren. Dissertation, RWTH Aachen (2003)
15. Röhrle, M.D.: Kolben für Verbrennungsmotoren (Grundlagen der Kolbentechnik), 2. Aufl. Die Bibliothek der Technik, Bd. 98. Verlag moderne Industrie (2001)
16. Cierocki, Ermert: Topografischer Stopper für Zylinderkopfdichtungen. MTZ Motortechnische Zeitschrift **64**(1) (2003)
17. Schneider, Schnurrenberger, Ludwig, Unseld, Weiß: Funktionserweiterung von Zylinderkopfdichtungen – Weiterentwicklungen beim Wellenstopper. MTZ Motortechnische Zeitschrift **64**(10) (2003)
18. Schmidt, Flierl, Hofmann, Liebl, Otto: Die neuen BMW-6-Zylindermotoren. 19. Internationales Wiener Motorensymposium, 1998
19. Wurms, R., Dengler, S., Budack, R., Mendl, G., Dicke, R., Eiser, A.: Audi valvelift system – ein neues innovatives Ventiltriebssystem von Audi. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006
20. Flierl, Klüting, Unger, Poggel: Drosselfreie Laststeuerung mit vollvariablen Ventiltriebskonzepten. 4. Symposium Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren, Technische Akademie Esslingen, 1998
21. Kreuter, Heuser, Reinicke-Murmann: The meta VVH system – A continuously variable valve timing system. SAE 980765
22. Hannibal, Bertsch: VAST: A new variable valve timing system for vehicle engines. SAE 980769
23. Salber: Untersuchungen zur Verbesserung des Kaltstart- und Warmlaufverhaltens von Ottomotoren mit variabler Ventilsteuerung. Dissertation, RWTH Aachen (1998)
24. Möller, U.J., Nassar, J.: Schmierstoffe im Betrieb, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2002)
25. Kessler, F., Sonntag, E., Schopp, J., Simionesco, L., Keribin, P., Bordes, F.: Die neue kleine 4-Zylinder Motorenfamilie der BMW/PSA Kooperation. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006
26. Wurms, R., Budack, R., Böhme, J., Dornhöfer, R., Eiser, A., Hatz, W.: Der neue 2.0L TFSI mit Audi Valvelift System für den Audi A4 – die nächste Generation der Audi Turbo FSI Technologie. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008
27. Bernard, L., Ferrari, A., Rinolfi, R., Vafidis, C.: Fuel economy improvement potential of UNIAIR throttleless technology. ATA Paper **02A5012**
28. Harada, J., Yamada, T., Watanabe, K.: Die neuen 4-Zylindermotoren mit VALVEMATIC System. 29. Int. Wiener Motorensymposium. VDI Fortschrittsbericht, Bd. 672 (2008)
29. Automobilwoche: Premiere in Tokio 2017: Mazda bringt neuen Sportwagen mit Wankelmotor. http://www.automobilwoche.de/article/20150127/AGENTURMELDUNGEN/301279961/mazda-bringt-neuen-sportwagen-mit-wankelmotor. Zugegriffen: 27.01.2015
30. Langen, P.: The BMW i3 and the BMW i8 – Start in the Era of Electromobility. 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2013. Aachen (2013)
31. Andert, J., Köhler, E., Niehues, J., Schürmann, G.: Range Extender von KSPG – Ein neuer Wegbereiter der Elektromobilität. MTZ Motortechnische Zeitschrift **73**(5), 368–377 (2012)
32. Ernst, R. et al.: „The New 3 Cylinder 1.0L Gasoline Direct Injection Turbo Engine from Ford"; 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011; Aachen 2011
33. Vent, G. et al.: „The New 2.0l Turbo Engine from the Mercedes-Benz 4-Cylinder Engine Family"; 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2012; Aachen 2012

**Literatur zu Abschnitt 5.1.5**

34. Goldbeck, G.: Kraft für die Welt, 1864–1964 Klöckner-Humboldt-Deutz AG. Econ, Düsseldorf, Wien (1964)
35. Pischinger, Hagen, Salber, Esch: Möglichkeiten der ottomotorischen Prozessführung bei Verwendung des elektromechanischen Ventiltriebs. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1998
36. Salber: Untersuchungen zur Verbesserung des Kaltstart- und Warmlaufverhaltens von Ottomotoren mit variabler Ventilsteuerung. Dissertation, RWTH Aachen (1998)
37. Gerhardt, Kassner, Kulzer, Sieber: Der Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direktstart – Möglichkeiten und Grenzen. 24. Internationales Wiener Motorensymposium, 2003
38. Tsuji, N., Sugiyama, M., Abe, S.: Der neue 3.5L V6 Benzinmotor mit dem innovativen stöchiometrischen Direkteinspritzsystem D-4S. 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006
39. Laubender, J., Kassner, U., Hartmann, S., Heyers, K., Benninger, K., Gerhardt, J.: Vom Direktstart zum marktattraktiven Start-Stopp-System. 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005
40. Kneer, Befrui, Weiten, Adomeit, Geiger, Ballauf, Vogt: Strahlgeführtes BDE Brennverfahren mit naher Anordnung von Einspritzdüse und Zündkerze: Anwendbarkeit einer nach außen öffnenden

Hochdruck-Einspritzdüse. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2002
41. Lückert, P., Waltner, A., Rau, E., Vent, G., Schaupp, U.: Der neue V6-Ottomotor mit Direkteinspritzung von Mercedes-Benz. MTZ Motortechnische Zeitschrift **67**(11) (2006)
42. Kume, Iwamoto, Iida, Murakami, Akishino, Ando: Combustion control technologies for direct injection SI engine. SAE 960600
43. Hohenberg: Vergleich zwischen Direkteinspritzung und Saugrohreinspritzung am Mitsubishi GDI. 19. Internationales Wiener Motorensymposium, 1998
44. Sawada, Tomoda, Sasaki, Saito: A study of stratified mixture formation of direct injection SI engine. 18. Internationales Wiener Motorensymposium, 1997
45. Heil, Enderle, Karl, Lautenschütz, Mürwald: Der neue aufgeladene Mercedes-Benz 4-Zylinder-Ottomotor M 271 mit Direkteinspritzung. 23. Internationales Wiener Motorensymposium, 2002
46. Wolters, Grigo, Walzer: Betriebsverhalten eines direkteinspritzenden Ottomotors mit luftgeführter Gemischbildung. 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1997
47. Adomeit, P., Pischinger, S., Graf, M., Aymanns, R.: Zyklische Schwankungen beim direkteinspritzenden Ottomotor. 7. Int. Symp. Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 18./19. Mai 2006
48. Krebs, Spiegel, Stiebels: Ottomotoren mit Direkteinspritzung von Volkswagen. 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1999
49. Krebber-Hortmann, K.: Untersuchung eines strahlgeführten ottomotorischen Brennverfahrens in Kombination mit einem vollvariablen Ventiltrieb. Dissertation, RWTH Aachen (2009)
50. Adolf, Houben, Mergenthaler, Tridico, Wunderlich: Stabzündmodul für den V8-Motor von Porsche. MTZ Motortechnische Zeitschrift **65**(6) (2004)
51. Firmenschriften AUDI, BERU, DaimlerChrysler, EMITEC, Kolbenschmidt KS, MAHLE, SIEMENS, VOLKSWAGEN
52. Gross, Kubach, Spicher, Schiessl, Maas: Laserzündung und Verbrennung im Ottomotor mit Direkteinspritzung. MTZ – Motortechnische Zeitschrift **71**(08) (2010)
53. Welter, A., Unger, H., Hoyer, U., Brüner, T., Kiefer, W.: Der neue aufgeladene BMW Reihensechszylinder Ottomotor. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006
54. Kerkau, M., Knirsch, S., Neußer, H.-J.: Der neue Sechszylinder-Biturbo-Motor mit Variabler Turbinengeometrie für den Porsche 911 turbo. 27. Internationales Wiener Motorensymposium, 2006
55. Middendorf, H., Krebs, R., Szengel, R., Pott, E., Fleiß, M., Hagelstein, D.: Der weltweit erste doppeltaufgeladene Otto-Direkt-Einspritzmotor von Volkswagen. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005
56. Schwaderlapp, Pischinger, Yapici, Habermann, Bollig: Variable Verdichtung – eine konstruktive Lösung für Downsizing-Konzepte. 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2001
57. Weinowski, R., Wittek, K., Haake, B., Dieterich, C., Seibel, J., Schwaderlapp, M.: $CO_2$-potential of a two-stage VCR system in combination with future gasoline powertrains. 33. Wiener Motorensymposium, Wien, 2012
58. Indra, F.: Zylinderabschaltung für alle Hubkolbenmotoren. Motorentechnische Zeitschrift MTZ **72**(10) (2011)
59. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill (1988)
60. Dahle, Brandt, Velji, Hochmuth, Deeba: Abgasnachbehandlung bei magerbetriebenen Ottomotoren – Stand der Entwicklung. 4. Symposium Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren, Technische Akademie Esslingen, 1998
61. Strehlau, Höhne, Göbel, v. d. Tillaart, Müller, Lox: Neue Entwicklungen in der katalytischen Abgasnachbehandlung von Magermotoren. AVL-Tagung Motor und Umwelt 1997
62. Krebs, Stiebels, Pott: Das Emissionskonzept des Volkswagen Lupo FSI. 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2000
63. Enderle, Heil, Schön, Ried: Das Abgasssystem des neuen Mercedes-Benz CLK 200 CGI mit mechanisch aufgeladenem Motor M 271 mit Benzindirekteinspritzung. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2002
64. Quissek, König, Abthoff, Dorsch, Krömer, Sebbeße, Stanski: Einfluss des Schwefelgehaltes im Kraftstoff auf das Abgasemissionsverhalten von Pkw. 19. Internationales Wiener Motorensymposium, 1998
65. Lüders, Backes, Hüthwohl, Ketcher, Horrocks, Hurley, Hammerle: An urea lean $NO_x$ catalyst system for light duty diesel vehicles. SAE 952493
66. Isermann, Müller: Modeling and adaptive control of combustion engines with fast neurol networks. European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their Implementation on Smart Adaptive Systems, Tenerife, Spain, 13.–15. Dezember 2001
67. Isermann, Hartmanshenn, Schwarte, Kimmich: Fehlerdiagnosemethoden für Diesel- und Ottomotoren. 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2003
68. Schürz, Ellmer: Anforderungen an das Motormanagement bei Anwendung von $NO_x$-Speicherkatalysatoren. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1998
69. Moser, Küsell, Mentgen: Bosch Motronic MED7 – Motorsteuerung für Benzin-Direkteinspritzung. 19. Internationales Wiener Motorensymposium, 1998
70. Hagen: Einfluss variabler Ventilsteuerzeiten auf das transiente Betriebsverhalten eines Ottomotors mit Abgasturboaufladung. Dissertation, RWTH Aachen (2003)

71. Urlaub: Verbrennungsmotoren, Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (1995)
72. Moser, Mentgen, Rembold, Preussner, Kampmann: Benzin-Direkteinspritzung, eine Herausforderung für künftige Motorsteuerungssysteme. MTZ **58**(9/10) (1997)
73. Wurms, R., Kuhn, M., Zeilbeck, A., Adam, S., Krebs, R., Hatz, W.: Die Audi Turbo FSI Technologie. 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004
74. Hirsch, N., Gallatz, A.: Neuartiges Raumzündverfahren mittels Mikrowellenstrahlung. MTZ – Motortechnische Zeitschrift **70**(03) (2009)
75. Pischinger, S., Stapf, K.G., Seebach, D., Bücker, C., Ewald, J., Adomeit, P.: Controlled Auto-Ignition: Kontrolle der Verbrennungsrate durch gezielte Schichtung. Proceedings 29th Int. Vienna Motor Symposium. VDI Fortschrittsbericht. Bd. 672 (2008)
76. Königstedt, Eiser, Fitzen, Hatz, Heiduk, Hermann, Müller, Reeker, Worret: V10 BiTurbo und V10 HDZ – Das neue High Performance Duo von Audi. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2008
77. Mastrangelo, G., Micelli, D., Sacco, D.: Extremes Downsizing durch den Zweizylinderottomotor von FIAT. MTZ Motorentechnische Zeitschrift **72**(02) (2011)
78. Adomeit, P., Sehr, A., Glück, S., Wedowski, S.: Zweistufige Turboaufladung – Konzept für hochaufgeladene Ottomotoren. MTZ Motorentechnische Zeitschrift **71**(05) (2010)
79. Dietsche, K.-H., Klingebiel, M.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 26. Aufl. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag (2007)
80. Pischinger, S., Uhlmann, T., Sehr, A., Krebber-Hortmann, K.: Potential vollvariabler Ventiltriebe bei hoch aufgeladenen Ottomotoren. Congress „Haus der Technik". Variable Ventilsteuerung. Essen, 2009

**Literatur zu Abschnitt 5.2**

81. Arcoumanis, C., Schindler, K. P.: Mixture formation and combustion in the DI diesel engine. SAE 972681 (1997)
82. Blessing, M.: Untersuchung und Charakterisierung von Zerstäubung, Strahlausbreitung und Gemischbildung aktueller Dieseleinspritzsysteme. Dissertation, Universität Stuttgart (2004)
83. Pischinger, F., et al.: Grundlagen und Entwicklungslinien der dieselmotorischen Brennverfahren. VDI Berichte, Bd. 714 (1988)
84. Pflaum, S., et al.: Wege zur Rußbildungshypothese. 31. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 29./30. April 2010
85. Predelli, O., et al.: Kontinuierliche Einspritzverlaufsformung in Pkw-Dieselmotoren – Potentiale, Grenzen und Realisierungschancen. 31. Wiener Motorensymposium, Wien, 29./30. April 2010
86. Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 27. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
87. van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor, 4. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2007)
88. Schnell, M., et al.: Neue Magnetventiltechnik für Common Rail Systeme von Bosch für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 5./7. Oktober 2009, Bd. 1, S. 249
89. Schöppe, D., et al.: Delphi's new direct acting common rail injection system. 30. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 7./8. Mai 2009
90. Meyer, S., et al.: Ein flexibles Piezo-Common-Rail-System. MTZ **2** (2002)
91. Engeler, W., et al.: MTZ **58**(11), 670–675 (1997)
92. Heeb-Keller, A.: Neue Aufladekonzepte – alte Aufladekonzepte im Vergleich. 15. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 23./24. September 2010
93. Bechmann, O., et al.: Partikelemission und -messung aus Sicht des Anwenders: heute und morgen. Wiener Motorensymposium, Wien, 2002
94. ACEA Programmes on the emissions of fine particles from passenger cars. ACEA Report, Brüssel (1999/2002)
95. Mohr, M.: Comparison study of PMP instrument candidates at EMPA. ETH Conference on Nanoparticle Measurement, Zürich, 2002
96. Schindler, K.-P., et al.: Wege zur weiteren Reduzierung der Dieselmotoremissionen und deren Messung. VDA Technischer Kongress, Bd. 2, S. 21 (2003)
97. Industry comments on proposed particulate measurement techniques. OICA contribution to PMP, Informal document Nr. 7, 45th GRPE, 2003
98. Sasaki, S., et al.: Neues Verbrennungsverfahren für ein „Clean-Diesel-System" mit DPNR. MTZ **11** (2002)
99. Hilzendeger, J., et al.: Anforderungsprofil an zukünftige Schmierstoffe für PKW-Dieselmotoren mit aktiver Abgasbehandlung. VDI-Berichte, Bd. 1808 (2003)
100. Chigapov, et al.: $NO_x$ aftertreatment catalyst development for future emission standards. 5th Emission Control Conference, Dresden, 10./11. Juni 2010
101. Schütte, T., et al.: Erfahrungen mit AdBlue-Aufbereitung und daraus abgeleitete Anforderungen an zukünftige Systeme. 8. FAD-Konferenz, Dresden, 3./4. November 2010
102. ACEA: World-wide Fuel Charter. Brüssel (1996). http://www.acea.be
103. Quissek, et al.: Wiener Motorensymposium, 1998
104. Steiger, W., Warnecke, W., Louis, J.: Potenziale des Zusammenwirkens von modernen und künftigen Antriebskonzepten. ATZ **2** (2003)
105. Steiger, W.: Die Volkswagen-Strategie zum hocheffizienten Auto. 22. Wiener Motorensymposium, Wien, 26./27. April 2001
106. Ohata, A.: Strategic innovation for engine control system development. 31. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 29./30. April 2010
107. Clever, S., Isermann, R.: Modellgestützte Fehlerdiagnose für Pkw-Dieselmotoren. 18. Aachener Kolloquim Fahrzeug- und Motorentechnik, Bd. 1, S. 281, Aachen, 5./7. Oktober 2009
108. Duesterdiek, T., et al.: Strategien zur $CO_2$- und Emissionsoptimierung von Diesel-

Abgasnachbehandlungssystemen. 5th Emission Control Conference, Dresden, 10./11. Juni 2010
109. Dorenkamp, R.: 10 Jahre Dieselmotorenentwicklung. 8. FAD-Konferenz, Dresden, 3./4. November 2010
110. MIT: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (2003)
111. Dick, M.: Der 3-l-Lupo – Technologien für den minimalen Verbrauch. VDI-Bericht, Bd. 1505. Düsseldorf (1999)

5

**Literatur zu Abschn. 5.2.7**

112. Neußer, H.-J., et al.: Die neue modulare TDI®-Generation von Volkswagen, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, Tagungsband (2012)
113. Weiß, U. et al.: The new EU6 R4 and V6 TDI Engines from Volkswagen and Audi: Integration of SCR Functionality in a Close-Coupled Diesel Particulate Filter. 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology (2013)
114. Neußer, H.-J., et al.: Die EU6-Motoren des Modularen Dieselbaukastens von Volkswagen – innovative motornahe Abgasreinigung für weitere NOx- und $CO_2$-Minderung. 34. Internationales Wiener Motorensymposium. Tagungsband (2013)
115. Dorenkamp, R. et al.: Der neue 2,0 l TDI-Motor von VOLKSWAGEN zur Erfüllung niedrigster Abgasgrenzwerte in Europa. 17. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. Tagungsband (2008)
116. Volkswagen AG: Der katalytisch beschichtete Dieselpartikelfilter – Aufbau und Funktion, Selbststudienprogramm (2005)
117. Schütte, T.: Ablagerungs- und Alterungsverhalten wässriger Harnstofflösung bei selektiver katalytischer Reduktion von Stickoxidemissionen. Dissertation, (2010)
118. Volkswagen AG: Interne Abbildung, Präsentation

**Allgemeine Literatur zu Abschnitt 5.2**

119. Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1997)
120. von Fersen, O.: Ein Jahrhundert Automobiltechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf (1986)
121. Pölzl, H.-W., et al.: Die evolutionäre Weiterentwicklung des Automobils. Der neue V8 TDI-Motor mit Common Rail. Eurotax International AG (11) (1989)
122. Hack, G.: Der schnelle Diesel. Motorbuchverlag, Stuttgart (1985)
123. Bauder, R.: Die Zukunft der Dieselmotoren-Technologie, X–XVII. MTZ **59**(7/8) (1998)
124. Basshuysen, G., et al.: Zukunftsperspektiven des Verbrennungsmotors. MTZ (60 Jahre Sonderheft) (1999)
125. van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotoren. Teubner, Wiesbaden (2010)
126. MTZ Sonderheft: 25 Jahre Dieselmotoren von Volkswagen. Vieweg, Wiesbaden (Mai 2001)
127. Steinparzer, F., et al.: Die Dieselantriebe der neuen BMW 7er Reihe. MTZ **10** (2002)
128. Brüggemann, H., et al.: Dieselmotoren für die neue E-Klasse. MTZ **4** (2002)
129. Hadler, I., et al.: Der weltweit stärkste Seriendieselmotor für einen PKW. ATZ/MTZ Sonderheft. Vieweg, Wiesbaden (2002)
130. VDI: Innovative Fahrzeugantriebe. Tagungsband, Dresden. VDI-Berichte, Bd. 1565. Düsseldorf (2000)
131. VDI: Innovative Fahrzeugantriebe. Tagungsband, Dresden. VDI-Berichte, Bd. 1704. Düsseldorf (2002)
132. VDI: Innovative Fahrzeugantriebe. Tagungsband, Dresden. VDI-Berichte, Bd. 1852. Düsseldorf (2004)
133. Borgmann, K.: Evolution oder Revolution – der PKW-Antrieb der Zukunft. VDI-Berichte, Bd. 1852.
134. Hadler, J.: Der Dieselmotor im Spannungsfeld zwischen Fahrspaß, Verbrauch, Emissionen und Kosten. TZ/MTZ-Tagungsband. Vieweg, Wiesbaden (2005)
135. Der Antrieb von morgen. ATZ/MTZ-Tagungsband, Ingolstadt, 17./18. Februar 2005. Vieweg, Wiesbaden (2005)
136. Dorenkamp, R., Garbe, T.: Einsatz moderner Motorentechnik im Zielkonflikt mit landesspezifischen Rahmenbedingungen. 4. FAD-Konferenz „Herausforderung – Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren", Dresden, 8./9. 11. 2006
137. Hadler, J.: Die neue 5-Zylinder-Dieselmotoren-Generation für leichte Nutzfahrzeuge. 27. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 27./28. April 2006
138. 30. Internationales Wiener Motorensymposium, 7.–8. Mai 2009. Fortschritt–Berichte VDI. VDI Verlag, Düsseldorf (2009)
139. 31. Internationales Wiener Motorensymposium, 29./30. April 2010. Fortschritt–Berichte VDI. VDI Verlag, Düsseldorf (2010)
140. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 4.-6. Oktober 2010, www.aachen-colloquium.com

**Literatur zu Abschnitt 5.3**

141. Baines: Fundamentals of Turbocharging, Concepts NREC
142. Golloch: Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Springer
143. Schweizer, B., Sievert, M.: Nonlinear oscillations of automotive turbocharger turbines. J. Sound Vibration **321**, 955–975 (2009)
144. Schicker, J., Sievert, R., Fedelich, B., Noak, H.-D., Kazak, F., Matzak, K., Kühn, H.-J., Klingelhöfer, H., Skrotzki, B.: TMF Lebensdauerberechnung ATL-Heißteile. Abschlussbericht über Vorhaben Nr. R 542, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Bd. 902. Frankfurt am Main (2010)
145. Kaufmann, M., et al.: The new cornerstones of the BMW diesel engine portfolio. 21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2012
146. Eißler, W.: Optimierung des Abgasturboladers für den 6-Zylinder Diesel von Mercedes-Benz. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 2011
147. Lei, V.-M. et al.: Dual boost compressor development. IMechE Turbocharging Conference, London, 2012

**Literatur zu Abschnitt 5.4**

148. Förster, H.-J.: Automatische Fahrzeuggetriebe. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1990)
149. Förster, H.-J.: Die Kraftübertragung im Fahrzeug vom Motor bis zu den Rädern, Handgeschaltete Getriebe. Verlag TÜV Rheinland, Köln (1987)
150. Neunheimer, H., Bertsche, B., Lechner, G., Naunheimer, H.: Fahrzeuggetriebe-Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2007)
151. Pierburg, B., Amborn, P.: Gleichlaufgelenke für Personenkraftfahrzeuge. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (1998)
152. Schmidt, G.: Schwingungen in Pkw-Antriebssträngen. VDI-Berichte, Bd. 1220. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
153. Hafner, K.E., Maass, H.: Die Verbrennungskraftmaschine. Bd. 1 bis 4. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1981/1984)
154. Duditza, F.: Kardangelenkgetriebe und ihre Anwendungen. VDI-Verlag, Düsseldorf (1973)
155. Jonckheere, L., Abeska, M.: Funktionsanforderungen an das Doppelkupplungssystem für Schwere Nutzfahrzeuge. VDI-Berichte 2245. Düsseldorf (2015)
156. Drexl, H.-J.: Kraftfahrzeugkupplungen. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (1997)
157. Wittmann, C., Tikhomolov, A., Häßler, M.: Moderne Kupplungskonzepte für Fahrzeuge. VDI-Berichte 2139. Düsseldorf (2011)
158. Neumann, K., Groganz, O.: Verschleißverhalten von organischen Kupplungsbelägen. VDI-Berichte 2245. Düsseldorf (2015)
159. Ersoy, M.: Entwicklungstendenzen für Getriebe-Außenschaltungen. VDI-Berichte, Bd. 1393, S. 273–286. VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
160. Rüchardt, C., Jäger, T., Heinzelmann, K., Bodenmüller, M.: Highly-Integrated Automatic Commercial Vehicle Transmissions. VDI-Berichte 2245. Düsseldorf (2015)
161. Eberspächer, R., Göddel, T., Wefers, C.: Das Schaltgetriebe und Schaltungskonzept der Mercedes-Benz A-Klasse. VDI-Berichte, Bd. 1393, S. 491–511. VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
162. Mertinkat, R., Krieg, W.-E.: Die neuen 6-Gang-Handschaltgetriebe von ZF. VDI-Berichte, Bd. 1610. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
163. Ottenbruch, P., Leimbach, L.: Die zukunftsweisende Automatisierung des Konventionellen Antriebsstranges. VDI-Berichte, Bd. 1323. VDI-Verlag, Düsseldorf (1997)
164. Looman, J.: Zahnradgetriebe, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1988)
165. Dach, H., Gruhle, W.-D., Köpf, P.: Pkw-Automatgetriebe, 2. Aufl. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (2001)
166. Göddel, T., Hillenbrand, H., Hopff, C., Jud, M.: Das neue Fünfgang-Automatikgetriebe W5A. Sonderausgabe ATZ und MTZ: Mercedes A-Klasse **180**, 96–101 (1997)
167. Flegl, H., Wüst, R., Stelter, N., Szodfridt, I.: Das Porsche-Doppelkupplungs-(PDK-)Getriebe. ATZ **89**(9), 439–452 (1987)
168. Schreiber, W., Rudolph, F., Becker, V.: Das neue Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen. ATZ **105**(11), 1022–1039 (2003)
169. Wagner, G.: Gestaltung und Optimierung von Bauteilen für automatische Fahrzeuggetriebe. Konstruktion **49**(6), 31–35 (1997)
170. Wagner, G., Lepelletier, P.: Das Lepelletier 6-Gang-Planetengetriebesystem. VDI-Berichte, Bd. 1704, S. 329–348. VDI-Verlag, Düsseldorf (2002)
171. Rösch, R., Wagner, G.: Elektrohydraulische Steuerung und äußere Schaltung des automatischen Getriebes W5A330/580 von Mercedes-Benz. ATZ **97**(10), 698–706 (1995)
172. Maier, U., Petersmann, J., Seidel, W., Strohwasser, A., Wehr, T.: Porsche Tiptronic. ATZ **92**(6), 308–319 (1990)
173. Rösch, R., Wagner, G.: Die elektronische Steuerung des automatischen Getriebes W5A330/580 von Mercedes-Benz. ATZ **97**(11), 736–748 (1995)
174. Tinschert, F., Wagner, G., Wüst, R.: Arbeitsweise und Beeinflussungsmöglichkeiten von Schaltprogrammen automatischer Fahrzeuggetriebe. VDI-Berichte, Bd. 1175, S. 185–203. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
175. Katou, N., Taniguchi, T., Tsukamoto, K., Hayabuchi, M., Nishida, M., Katou, A.: AISIN AW New Six-Speed Automatic Transmission for FWD Vehicles. SAE-Paper 2004-01-0651
176. Wagner, G., Bucksch, M., Scherer, H.: Das automatische Getriebe 6 HP 26 von ZF – Getriebesystem, konstruktiver Aufbau und mechanische Bauteile. VDI-Berichte, Bd. 1610, S. 631–654. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
177. Greiner, J., Indlekofer, G., Nauerz, H., Dorfschmid, J., Gödecke, T., Dörr, C.: Siebengang-Automatikgetriebe von Mercedes-Benz. ATZ **105**(10), 920–930 (2003)
178. Förster, H.-J.: Stufenlose Fahrzeuggetriebe. Verlag TÜV Rheinland, Köln (1996)
179. Gott, P.G.: Changing Gears, The Development of the Automotive Transmission. SAE historial series 90-21369, Warrendale (1991)
180. Boos, M., Krieg, W.-E.: Stufenloses Automatikgetriebe Ecotronic von ZF. ATZ **96**(6), 378–384 (1994)
181. Nowatschin, K., Fleischmann, H.P., Gleich, T., Franzen, P., Hommes, G., Faust, H., Friedmann, O., Wild, H.: Multitronic – das neue Automatikgetriebe von Audi. ATZ **102**(7/8), 548–553 (2000)
182. Wagner, G., Remmlinger, U., Fischer, M.: Das stufenlose Getriebe CFT30 von ZF – Ein CVT mit Kettenvariator für 6-Zylinder-Motoren für Front-Quer-Antrieb. VDI-Berichte, Bd. 1827, S. 461–478. VDI-Verlag, Düsseldorf (2004)
183. Hall, W., Pour, R., Mathiak, D., Gueter, C.: Das stufenlose Automatikgetriebe für den neuen Mini. ATZ **104**(5), 458–463 (2002)

184. Pieper, D.: Automatic Transmission – An American Perspective. VDI-Berichte, Bd. 1175, S. 25–39. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
185. Neuffer, K.: Elektronische Getriebesteuerung von Bosch. ATZ **94**(9), 442–449 (1992)
186. Fuchs, R. D. et al.: Full Torodial IVT Variator Dynamics SAE 2002-01-0586
187. Förster, B., Steinel, K.: ConAct – Kupplungsbetätigungssystem für Nutzfahrzeuge mit automatisierten Schaltgetrieben. ATZ **109**(02) (2007)
188. Wagner, G., Naunheimer, H., Scherer, H., Dick, A.: Neue Automatgetriebegeneration der ZF. 28. Internationales Wiener Motorensymposium, 26./27. April 2007
189. Kimmig, K., Wagner, U., Berger, R., Bührle, P., Zink, M.: Kupplungssysteme für hocheffiziente Doppelkupplungsgetriebe. VDI-Berichte, Bd. 2029. VDI-Verlag, Düsseldorf (2008)
190. Resch, R., Müller, J., Leesch, M.: Neue strukturoptimierte Getriebesysteme für zukünftige Nutzfahrzeuge. VDI-Berichte, Bd. 2071. VDI-Verlag, Düsseldorf (2009)
191. Gutmann, P., Gehring, A.: 8HP70H – the mild-hybrid transmission from 2F. VDI-Berichte, Bd. 2081. VDI-Verlag, Düsseldorf

**Literatur zu Abschnitt 5.5.1**

192. Stockmar, J.: Das große Buch der Allradtechnik. Motor-Buch Verlag, Stuttgart (2004)
193. Grazer Allradkongress (Veranstalter Magna Steyr): Tagungsbände 2000 bis 2009
194. Mohan S., Sharma A.: Torque Vectoring Axle and Four Wheel Steering: A Simulation Study of Two Yaw Moment Generation Mechanisms. SAE 2006-01-0819
195. Shibahata Y., Tomari T.: Direct Yaw Control Torque Vectoring Auto Technology, Bd. 6. (Juni 2006)
196. Double Differential Unit with Torque Sensing Locking Device. SAE paper No. 2005-26-067
197. VDI-Bericht 2081. VDI-Verlag, Düsseldorf (2010)
198. Höhn B.-R., Wirth C., Kurth F.: Aktives Differential mit Torque-Vectoring-Funktion. Automobiltechnisches Kolloquium, München (2009)
199. Getriebe aktuell, 5. Ausgabe, Juni 2015
200. Michael Höck: GKN Driveline. 12th International CTI Symposium. December 2013, Berlin
201. Dacchettini, P.: TORSEN Center Differential. 7. Grazer Allradkongress, Graz, 2006

**Literatur zu Abschnitt 5.5.2**

202. Schöpf, H.-J.: Mercedes-Benz Fahrdynamik-Konzept. ASR, ASD und 4MATIC. Autec 1986
203. Sagan, E., Stickel, T.: Der neue BMW 525iX-Permanentallradantrieb mit elektronisch geregelten Sperrdifferentialen. ATZ **94**(4) (1992)
204. Müller, A., Heißing, B.: Das Fahrwerk des Audi A4. 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, Oktober 1995
205. Leffler, H.: Entwicklungsstand der ABS-integrierten BMW Schlupfregelsysteme ASC und DSC. ATZ **96**(2) (1994)
206. Gaus, H., Schöpf, H.-J.: ASD, ASR und 4MATIC: Drei Systeme im „Konzept Aktive Sicherheit" von Daimler-Benz. ATZ **88**(5, 6) (1986)
207. Kohl, G., Müller, R.: Bremsanlage und Schlupfregelsysteme der neuen 3er-Baureihe von BMW – Teil 1. ATZ **100**(9) (1998)
208. Fischer, G., Müller Kurz, R.G.: Bremsanlage und Schlupfregelsysteme der neuen 5er-Reihe von BMW. ATZ **98**(4) (1996)
209. Debes, M., Herb, E., Müller, R., Sokoll, G., Straub, A.: Dynamische Stabilitäts Control DSC der Baureihe 7 von BMW. ATZ **99**(3, 4) (1997)
210. Fennel, H.: ABS plus und ESP – Ein Konzept zur Beherrschung der Fahrdynamik. ATZ **100**(4) (1998)
211. Jonner, W.-D., Winner, H., Dreilich, L., Schunck, E.: Electrohydraulic brake system – The first approach to brake-by-wire technology. SAE Paper 960991
212. Bill, K.-H., Semsch, M.: Translationsgetriebe für elektrisch betätigte Fahrzeugbremsen. ATZ **100**(1) (1998))
213. Rittmannsberger, N.: Der Drehratensensor für die Fahrdynamikregelung. ATZ/MTZ Sonderausgabe System Partners (1997)
214. Fischer, G., Heyken, R., Trächtler, A.: Aktive Gespannstabilisierung beim X5. ATZ **104**(4) (02)
215. Schopper, M.: Sensotronic Brake Control (SBC) – die elektrohydraulische Bremse von Mercedes-Benz, Bremsen und Bremsregelsysteme. Haus der Technik e.V., Essen, 25./26. September 2002
216. Leffler, H.: Electronic brake management – A possible approach for brake and control system integration. FISITA, Prag, 1996
217. Leffler, H.: Traktions- und Stabilitätsregelung des BMW X5. Allradtechnik. Haus der Technik e.V., Graz, 10./11. Februar 2000
218. Ayoubi, M., Leffler, H.: Elektronisches Chassis Management am Beispiel des neuen 7er BMW. Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – Autoreg 2002, 15./16. April 2002
219. Ayoubi, M., Köhn, P., Leffler, H.: Fahrwerksregelung – Systeme und ihre Vernetzung. 4. Braunschweiger Symposium „Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel", Braunschweig, 11. Dezember 2002
220. Beiker, S.: Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenwirkende Regelsysteme. In: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. Fortschritt-Berichte, VDI Reihe 12, Bd. 418. VDI (2000)
221. Brösicke, G.: Das Parkbremssystem des neuen 7er BMW. BremsTech 2002, München, 12./13. Dezember 2002
222. Ayoubi, M., Leffler, H.: Elektronische Fahrwerks-Regelsysteme am Beispiel des neuen 7er BMW. 6. Tagung der Sächsischen Zulieferindustrie, Chemnitz, 10. Oktober 2002
223. Foag, W., Leffler, H.: Prospects and aspects of an integrated chassis management. SAE Automotive Dynamics & Stability Conference, 15.–17. Mai 2000

224. Fischer, G., Müller, R.: Das elektronische Bremsenmanagement des BMW X5. ATZ **102**(9), 764–773 (2000)
225. Ertl, C., Müller, R., Schenkermayr, G.: Der neue BMW 330d – Fahrdynamik und Stabilitätsregelung. ATZ **101**(10), 792–80 (1999)
226. Leffler, H.: BMW Fahrwerksregelsysteme – Status und Ausblick. 4. Grazer Allradkongress, 13./14. Februar 2003
227. Foag, W., Ayoubi, M., Zimprich, W., Leffler, H.: High End Brems-Regelsysteme: Wohin geht die Reise? BremsTech 2004, München, 9./10. Dezember 2004
228. Leffler, H.: Der fahrdynamische Allrad von BMW. 6. Grazer Allradkongress, Graz, 03./04. Februar 2005
229. Leffler, H., Ayoubi, M., Billig, C.: xDrive: die Allradtechnik im 3er BMW. 15. Aachener Kolloquium, 2006
230. Pfau, W., Rastel, H., Nistler, G., Billig, C., Straub, M.: BMW xDrive in der 3er und 5er Reihe. Der BMW Allradantrieb für Limousinen. ATZ **10** (2005)
231. Leffler, H., Schnabel, M.: Automotive applications of mechatronic systems: State of the art and future prospects. IFAC Congress on Mechatronic Systems, Heidelberg, 12.–14. September 2006
232. Leffler, H.: BMW 3er und 5er mit xDrive+. 7. Grazer Allradkongress, 2006
233. Kemper, H., Ruetten, O., Jentges, M., Schlosser, A.: Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen, Funktionen und Applikationen. 15. Aachener Kolloquium, 2006
234. Meder, K.: Innovative Bremsregelsysteme – Verbindung von Sicherheit, Dynamik und Komfort. 57. Internationales Motor Presse Kolloquium, Robert Bosch GmbH, Boxberg, 2005
235. The regenerative braking system (Prius). Auto Technology (Special: Toyota Prius) **60** (Feb. 2005)
236. Kurz: Das Fahrwerk des neuen 5er BMW, geprägt durch moderne Kundenanforderungen. Vortrag. „chassis.tech", 2010

**Literatur zu Abschnitt 5.6**

237. Garcia, P., et al.: Sound Qualität einer Abgasanlage. FVV Workshop Geräuschgestaltung „Über die Kundenzufriedenheit zur Psychoakustik", April 1996
238. Zwicker, E., Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models. Springer (1999)
239. Munjal, M.L.: Acoustics of Ducts and Mufflers – With Application to Exhaust and Ventilation System Design. Wiley, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore (1987)
240. Davies, P.O.A.L.: Piston engine and exhaust system design. J. Sound Vibration **190**(4), 677–712 (1996)
241. Sealamet, A., Dickey, N.S.: Theoretical, computational and experimental investigation of Helmholtz resonators with fixed volume: lumped vs. distributed analysis. J. Sound Vibration **187**(2), 358–367
242. Veit, I.: Technische Akustik. 5., durchgesehene Aufl. Vogel (1996)
243. Davies, P.O.A.L.: Practical flow duct acoustics. J. Sound Vibration **124**(1), 91–115 (1988)
244. Alfredson, R.J., Davies, P.O.A.L.: The radiation of sound from an engine exhaust. J. Sound Vibration **13**(4), 389–408 (1970)
245. Beranek, L., et al.: Noise and Vibration Control Engineering. Wiley (1992)
246. Kaiser, R., et al.: Optimierung von Abgasanlagen mit gekoppelter 1D/3D Simulation. MTZ 260–267 (2005)
247. Garcia, P., Wiemeler, D., Brand, J.-F.: Oberflächenschallabstrahlung von Abgasanlagen. MTZ **11**, 852–859 (2006)

**Literatur zu Abschnitt 5.7**

248. Pötzl, Kornhaas, Karch, Huart: Anforderungen an zukünftige Lenksysteme bis zur Fahrzeugoberklasse. VDI Berichte. Bd. 1907 (2005)
249. Knapp: Elektrisches Energiemanagement – Funktionen im Energiebordnetz. Euroforum, Elektronik-Systeme im Automobil 2004
250. Frey, Aumayer, Buchholz, Fink, Knapp: Die Zukunft des 14 V Bordnetzes. VDI-Berichte, Bd. 1789 (2003)
251. Zuber, Sterner: Funktionsentwicklung für moderne Energiemanagement-Systeme. 2. Aachener Elektronik Symposium 2004, 23./24. September 2004
252. Mäckel: Trends in der Batterieüberwachung. „Energiemanagement und Bordnetze". Haus der Technik e.V., Essen, 12./13. Oktober 2004
253. Iske: Erfahrungen und Entwicklungslinien von Batteriemanagement und -diagnostiksystemen. „Energiespeicher für Bordnetze und Antriebssysteme". Haus der Technik e. V., Essen, 1./2. März 2006
254. Frey, Häffner, Merkle, Schiller: Batteriesensorik und Batteriezustandserkennung. „Energiemanagement und Bordnetze". Haus der Technik e.V., Essen, 12./13. Oktober 2004
255. Bosch, A., Butzmann, S., Fetzer, J., Fink, H.: Battery system development at SB LiMotive. Erster Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn, 16. Juni 2009
256. Sirch, O., Immel, G.: Zukunft Energiebordnetz. 14. Internationaler VDI-Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, 2009
257. Groß, J., Hartmann, S., Merkle, M.: Entwicklungstrends und zukünftige Lösungen für Start/Stopp Systeme. VDI-Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug, 2009
258. Weber, R.: Auslegung des 12 V-Energiebordnetzes in batterieelektrischen Fahrzeugen. HdT-Tagung „Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen", TU München, 23. März 2010
259. Naunin, D. et al.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Kontakt & Studium Bd. 255
260. Sirch, O. et al.: Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Haus der Technik, München, Oktober 2008

**Literatur zu Abschnitt 5.8**

261. Blair, G.P.: The Basic Design of Two-Stroke Engines. Queen's University of Belfast

262. Krickelberg, T.: Zukünftige Chancen des 2-Takt-Motors als Pkw-Antrieb, unveröffentlichter Vortrag. TU Wien/TU Graz, Nov. 1995
263. Königs, M.: Der Zweitakt-Motor, Präsentation. Ford Technologie, Köln (1991)
264. Elements of two-stroke engine development, Collected Paper. SAE-SP-988 (1993)
265. Two-stroke engines theoretical and experimental investigations, Collected Paper. SAE-SP-1019 (1994)
266. Two-stroke engine design and emissions, Collected Paper. SAE-SP-1049 (1994)
267. Progress in two-stroke engines and emission control, Collected Paper. SAE-SP-1131 (1995)
268. Design, modelling and emission control for small two-stroke engines, Collected Paper. SAE-SP-1195 (1996)
269. Design and application of two-stroke engines, Collected Paper. SAE-SP-1254 (1997)
270. Meinig, U.: Standortbestimmung des Zweitaktmotors als Pkw-Antrieb. MTZ Motortechnische Zeitschrift **62**(7/8, 9, 10, 11) (2001)


**Literatur zu Abschnitt 5.9**


271. Hentschel, J., Muth, J., Erdmann, G.: Power-to-Gas-Forecast of Sustainable Potentials in 2030. Tagungsband des Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR, , S.1675–1688. Aachen (2013)
272. IEA: *Extended world energy balances*, IEA World Energy Statistics and Balances (database). (2014)
273. Feenstra, R. C., Inklaar, R., Timmer, M. P.: The Next Generation of the Penn World Table. www.ggdc.net/pwt. Zugegriffen: 08.01.2015 (2013)
274. Schafer, A.: The global demand for motorized mobility. Transpn Res.-A **32**(6), 455–477 (1998)
275. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2013 – Endenergieverbrauch des Verkehrs – 2012. http://www.ag-energiebilanzen.de Zugegriffen: 25.03.2015 (2014)
276. International Energy Agency: World Energy Outlook 2014. IEA/OECD (2014)
277. European Commission: Directive 2009/28/ec of the european parliament and of the council of 23 April 2009. (2009)
278. EPA: Renewable Fuels Standard II. USA: s.n. (2013)
279. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. DERA Rohstoffinformationen 2013. (2013)
280. Posten, C., Schaub, G.: Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels – A process view. Journal of Biotechnology **142**(1), 64–69 (2009)
281. US Energy Information Administration: Annual Energy Outlook 2014 with projections to 2040. eia. (2014)
282. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: DERA Rohstoffinformationen 2011. (2011)
283. de Haan, P., Zah, R.: Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich (2013)
284. Hentschel, J.: Potenziale nachhaltiger Power-to-Gas Kraftstoffe aus Elektrizitätsüberschüssen im Jahr 2030. AutoUni- Schriftenreihe Band 61, Logos Verlag, Berlin, Technische Universität, Diss. (2014)
285. Barber, J.: Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. Chem Soc Rev. **38**(1), 185–196 2009
286. Agentur für Erneuerbare Energien: Der volle Durchblick in Sachen erneuerbare Energien. (2009)
287. Braess, BMW AG: Charging and infrastructure services as central link between automotive industry and energy supplier. evs25 (2010)
288. Bundesnetzagentur: Kraftwerksliste (Stand 29.10.2014). http://www.bundesnetzagentur.de. Zugegriffen: 27.03.2015. (2014)
289. Audi AG: Audi e-gas Projekt. http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a3/a3-sportback-g-tron/layer/power-to-gas-anlage.html. Zugegriffen: 27.03.2015. (2015)
290. sunfire GmbH: sunfire produziert erstmals Diesel-Kraftstoff aus Wasser und $CO_2$, Pressemitteilung, Dresden/Berlin, 21.04.2015. http://www.sunfire.de/wp-content/uploads/Betankung-Dienstwagen-der-Ministerin.pdf. Zugegriffen: 10.02.2016. (2015)
291. F.O. LICHTS: Plants & Projects Database. http://www.agra-net.net. (Data Resources > Plants & Projects) Zugegriffen: 10.09.2014. (2014)
292. Bacovsky, D., Ludwiczek, N., Ognissanto, M., Wörgetter, M.: Status of Advanced Biofuels Demonstration Facilities in 2012 – A REPORT TO IEA BIOENERGY TASK 39, 18.03.2013
293. Hart Energy: Global Biofuels Center Special Report – Global: Were Expectations Too High for Next-Generation Biofuels Development?, 17.05.2012
294. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Biokraftstoffe. 4. Aufl., Rostock (2014)
295. Jöhrens, J., Helms, H.: Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 95/2013


**Literatur zu Abschn. 5.10**


296. Meinig, U., Heinemann, J.: Neue Anforderungen für Tankentlüftungssysteme. Automobiltechnische Zeitschrift **03** (1999)
297. Saechtling, H.-J.: Verarbeitungsverfahren. Kunststoff Taschenbuch, 26. Aufl., S. 305–317. Hanser, München (1995)
298. Sievert, H., Thielen, M.: Trends beim Coextrusionsblasformen. Kunststoffe **8**, 1218–1221 (1998)
299. Strahlpumpen. Techniker Handbuch, S. 1184. Vieweg, Braunschweig (1995)
300. Entwurf der „Economic Commission for Europe (ECE)" TRANS/WP.29/1998/33 (1999)
301. California Environmental Protection Agency, Manufacturers Advisory Correspondence MAC #99-01 (1999)
302. Hämmerl, A., Kramer, F., Langen, P., Schulz, G., Schulz, T.: BMW-Automobile für den wahlweisen Benzin- oder Erdgasbetrieb. Automobiltechnische Zeitschrift **12** (1995)

303. Wozniak, J.J.: The John Hopkins University Applied Physics Laboratory, Advanced Natural Gas Vehicle Project (1998)
304. Gase Handbuch, 3. Aufl. Messer, Griesheim (1989)
305. Pehr, K.: Experimentelle Untersuchungen zum Worst-Case-Verhalten von LH2-Tanksystemen. VDI-Berichte, Bd. 1201, S. 57–72. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
306. Klee, W., et al.: Barrieretechnologien: Ein Beitrag zur Emissionsreduzierung von Kraftstoffanlagen. In: Kunststoffe im Automobilbau, S. 309–335. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (2000)
307. Berry, G.D., Martinez-Frias, J., Espinosa-Loza, F., Aceves, S.M.: Hydrogen Storage and Transportation. Encyclopedia of Energy. Academic Press, in Vorbereitung
308. European Integrated Hydrogen Project EIHP. http://www.eihp.org/
309. N.N.: Visteon, Intelligente Tanksysteme der Zukunft. ATZ **6**, 590–596 (2003)
310. Kroiss, H.: Entwicklung der Anforderung an die Kraftstofffförderung. Tanktech, Plenarvortrag 2003
311. N.N.: Das Kraftstoffsystem der nächsten Generation. ATZ **11**, 834–839 (2011)
312. Colemann Jones, C., Schulz, M.: GM perspektive on ethanol. Tanktech, Plenarvortrag 2007

**Literatur zu Abschn. 5.11**

313. Übereinkommen über die Annahme einheitlicher technischer Vorschriften für Radfahrzeuge, Ausrüstungsgegenstände und Teile, die in Radfahrzeuge eingebaut und/oder verwendet werden können, und die Bedingungen für die gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen, die nach diesen Vorschriften erteilt werden, Regelung Nr. 110: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der I. Speziellen Bauteile von Kraftfahrzeugen, in deren Antriebssystem komprimiertes Erdgas (CNG) verwendet wird, II. Fahrzeuge hinsichtlich des Einbaus spezieller Bauteile des genehmigten Typs für die Verwendung von komprimiertem Erdgas (CNG) in ihren Antriebssystemen. (ECE-R-110) vom 28. Dezember 2000
314. Hämmerl, A., Kramer, F., Langen, P., Schulz, G., Schulz, T.: BMW-Automobile für den wahlweisen Benzin- oder Erdgasbetrieb. Automobiltechnische Zeitschrift **12** (1995)
315. Sirosh, N.: High pressure hydrogen storage: Lessons-learned and the path forward. The 2003 Hydrogen Production & Storage Forum 2003
316. Wozniak, J.J.: The John Hopkins University Applied Physics Laboratory, Advanced Natural Gas Vehicle Project (1998)
317. Andreas, T.E.: Neues Sicherheitssystem für H2 Druckgasbehälter. HZwei **04** (2006)
318. N.N.: Gase Handbuch, 3. Aufl. Messer Griesheim (1989)
319. Pehr, K.: Experimentelle Untersuchungen zum Worst-Case-Verhalten von LH2-Tanksystemen. VDI-Berichte, Bd. 1201, S. 57–72. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
320. Danner, S.: Liquid hydrogen refueling coupler – Series production status as a premise for standardization. hydrogen.tech, München, 2006
321. Brunner, T.: Liquide hydrogen storage for passenger car application – Roadmap to mass market. Hyderogen Production & Storage Forum, Vancouver, 2006
322. Lapetz J., Natkin R., Zanardelli V.: The design, development, validation and delivery of the Ford H2 ICE E-450 Shuttle Bus. International Symposium on Hydrogen Internal Combustion Engines, Graz, 2006
323. Aceves, S., Berry, G., Weisberg, A., Perfect, S., Espinosa, F.: Advanced concepts for vehicular containment of compressed and cryogenic hydrogen. 16th World Hydrogen Energy Conference, Lyon, 2006
324. Brunner, T., Kircher, O.: Herausforderung Wasserstoffspeicher – Perspektiven kryogener H2-Speicher. Booklet zur Konferenz „Erneuerbare Energien – Moderne Speichertechnologien als Voraussetzung?“, Forum für Zukunftsenergien, Berlin, 2007
325. Espinoza-Loza, F., Aceves, S., Ledesma-Orzco, E., Ross, T.O., Weisberg, A.H., Brunner, T., Kircher, O.: High density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels. Int. J. Hydrogen Energy **35**(3), 1219–1226 (2010)
326. Kircher, O., Brunner, T.: Advances in cryo-compressed hydrogen vehicle storage (CcH2). FISITA 2010 World Automotive Congress, Paper A018 2010
327. Kircher, O., Derks, M., Garth, I., Brunner, T.: Hochleistungscomposites für kryogene Wasserstoff Druckspeicher. Kongress Kunststoffe im Automobilbau, Tagungsband, S. 347–362. VDI (2010).
328. Kircher, O., Braess, H.: Challenges and requirements for car industry. In: Léon, A. (Hrsg.) Hydrogen Technology, S. 187–205. Springer, Berlin (2008)
329. Brunner, T., Kircher, O.: Cryogenic hydrogen vehicle storage – a viable option for future serial application? Conference Proceedings JSAE Annual Congress, Paper 134, Yokohama, Japan (2007)
330. Kircher, O., Greim, G., Burtscher, J., Brunner, T.: Validation of cryo-compressed hydrogen storage (CcH2) – a probabilistic approach. Proceeding of the International Conference on Hydrogen Safety, San Francisco, 2011
331. Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen powered motor vehicles and amending Directive 2007/46/EC, 14. Januar 2009
332. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2011/33. Draft global technical regulation (GTR) on Hydrogen Fuelled Vehicle, 28. November 2011

# Aufbau

*Univ.-Prof.i.R. Dr.rer.nat. habil. Heiner Bubb, Dipl.-Ing. Helmut Goßmann, Dr.-Ing. René Konorsa, Walter Pecho, Dipl.-Ing. (FH), Dr. Armin Plath, Jochen Reichhold, Prof. Dr. Rudolf Stauber, Dipl.-Ing. Lothar Teske, Dr. Klaus Werner Thomer, Dipl.-Ing. Heinrich Timm, Dr. Hans-Jörg Vögel und Dr. Markus Wawzyniak*

6.1 **Karosseriebauweisen** – **576**

6.2 **Materialien der Karosserie** – **620**

6.3 **Oberflächenschutz** – **645**

6.4 **Fahrzeuginnenraum** – **659**

**Literatur** – **727**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_6

## 6.1 Karosseriebauweisen

### 6.1.1 Selbsttragende Karosserie

*In der Anfangszeit des Automobils wurde die Karosserie – dem Beispiel des Kutschenbaus folgend – auf einem Rahmengestell befestigt. Diese Bauweise findet man heute nur noch bei Lastkraftwagen und großen Off-Road-Fahrzeugen. Im Bereich der Personenwagen hat sich die selbsttragende Karosserie durchgesetzt. Sie wurde 1935 von Opel erstmalig mit dem Modell Olympia in der Großserie eingeführt. Die Innovation bestand darin, dass die Karosserie für sich komplett vorgefertigt wurde. Anschließend wurden die restlichen Komponenten wie Motor, Kupplung, Getriebe, Vorder- und Hinterachse sowie der Auspuffanlage direkt an der Karosserie befestigt und zum Fahrzeug komplettiert. Damit ist die selbstragende Karosserie der wichtigste Aggregateträger, die zudem noch vielen Anforderungen gerecht werden muss [1].*

*Sie reichen von konsequentem Leichtbau über wirksamen Insassen- und Fußgängerschutz bis hinzu attraktivem Aussehen.*

#### 6.1.1.1 Entwicklungsanforderungen

Der Anforderungskatalog ist umfangreich: So stellen Form- und Farbgebung (Design), Platzverhältnisse sowie Insassenschutz und Versicherungseinstufung für den Kunden kaufentscheidende Kriterien dar. Hinzu kommen die firmeninternen Entwicklungsanforderungen, die sich die Automobilhersteller selbst auferlegen, ◘ Tab. 6.1, ▶ Abschn. 4.2.

Aufgrund der Komplexität – in der Praxis enthält das Lastenheft für eine Karosserie viele Hundert Anforderungen und Parameter – wird überwiegend rechnergestützt entwickelt. Dabei besteht die Aufgabe zunächst darin, jeder Anforderung ein realistisches Ziel zuzuordnen und diese Teilziele dann dem gewünschten Gesamtziel unterzuordnen.

Diese Ziele sind angesichts immer kürzer werdender Entwicklungszeiten nur durch einen eng verzahnten Entwicklungsprozess zu erreichen. Hierbei werden fast ausschließlich virtuelle Fahrzeugmodelle aufgebaut, berechnet und analysiert. Testaktivitäten haben heutzutage vor allem die Funktion, die mit analytischen Methoden gewonnenen Ergebnisse zu validieren, beziehungsweise die Rechenmethode zu verfeinern und abzustimmen.

#### 6.1.1.2 Außenhaut

Die Außenkontur eines Fahrzeuges wird durch vier Hauptfaktoren bestimmt: Das sind zunächst die Grundvorgaben aus dem Package und den notwendigen Abmessungen um gesetzliche Anforderungen wie den Fußgängerschutz zu erfüllen. Dazu kommen das Design und die Aerodynamik. Das Design ist, wie Marktuntersuchungen immer wieder zeigen, das kaufentscheidende Merkmal schlechthin.

##### 6.1.1.2.1 Design

Das Design (▶ Abschn. 4.1) und die Karosserieentwicklung erfolgen simultan in einem vernetzten Prozess, da Designvorgaben sich in aller Regel auf Abmessungen und Charakteristika der Karosserie auswirken. In diesem Prozess haben die Designer die überaus wichtige Rolle von Koordinatoren, die bereits in der Entwurfsphase die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien, Konstruktionsanforderungen und Produktionsgesichtspunkte zu berücksichtigen. Deshalb müssen sie sich von Anfang an die Fachkompetenz der Konstruktionsingenieure und Fertigungsplaner sichern.

Kurz: Das Design beeinflusst die Gestaltung einer Rohkarosserie erheblich. So werden heute bereits zum Beginn der Fahrzeugentwicklung alle gewünschten Varianten berücksichtigt. Limousine und Coupé derselben Baureihe sind dafür ein gutes Beispiel: bei Planung der Limousine muss bereits berücksichtigt werden, wenn ein geplantes Coupé keine B-Säule besitzen soll. Bei der Dimensionierung von Säulen und Streben ist zu berücksichtigen, inwieweit diese im späteren Fahrzeug sichtbar sind. Der Einbau von Innenraumteilen ist möglichst flexibel zu halten, um verschiedene Austattungslinien zu ermöglichen. Sichtbare Verbindungen und Fugen, zum Beispiel zwischen Seitenwand, Türen und Heckklappe, müssen sehr präzise ausgeführt werden, um den steigenden Anforderungen an die optische Fahrzeugqualität zu entsprechen.

##### 6.1.1.2.2 Aerodynamik und Aeroakustik

Eine erste aerodynamische Voroptimierung erfolgt bereits mit einem Simulationsmodell im Computer. Diese Berechnung wird mit ersten Plastilin-Model-

**Tabelle 6.1** Anforderungen an die Karosserieentwicklung

| Kundenrelevante Kriterien | Produktionsrelevante Kriterien |
|---|---|
| Gelungenes Design | Einfache Zusammenbaufolge |
| Maximale Sicherheit | Nutzung vorhandener Fertigungseinrichtungen |
| Geringer Kraftstoffverbrauch | Geringe Teilevielfalt |
| Hoher Komfort | Einfache Fügetechniken |
| Hohe Funktionalität | Leichte Herstellbarkeit |
| Hohe Qualität und Lebensdauer | Gute Schweißzugänglichkeit |
| Attraktiver Preis | Hohe Prozessgüte |
| Niedrige Reparaturkosten | Gleichteile- und Plattformlösungen |
| Niedriger Geräuschpegel | Optimierter Werkstoffeinsatz |
| Alltagstaugliche Abmessungen | Niedrige Fertigungskosten |
| … | … |

len im Maßstab 1 : 5 im Windkanal validiert und verbessert. Im weiteren Entwicklungsablauf müssen bei allen Änderungen die Belange von Design und Package immer wieder berücksichtigt werden. Die abschließende Gestaltung und Optimierung erfolgt mit einem Kunststoffmodell im Maßstab 1 : 1. Insbesondere die Bereiche der vorderen und hinteren Stoßfänger, Außenspiegel, A-Säulen, Dachleisten, Schwellerverkleidung, Unterbau und Unterbauabdeckungen werden dabei detailliert untersucht.

Die aerodynamische Optimierung umfasst eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen, Abb. 6.1 (► Abschn. 3.2). Folgende konstruktive Maßnahmen haben sich bei üblichen Grundkörpern als vorteilhaft herausgestellt [2], um einem möglichst geringen Luftwiderstandsbeiwert zu erzielen:

Die Umströmung des vorderen Fahrzeugbereiches sollte möglichst ablösefrei erfolgen. Dazu ist es notwendig, die Übergänge abzurunden. Vorteilhaft ist weiterhin eine starke Neigung der Windschutzscheibe – bei Berücksichtigung der Sichtverhältnisse – in Verbindung mit einer Rundung der A-Säulen. Die Strömung wird am günstigsten über ein gewölbtes Dach geführt, wobei die Wölbung konstant verlaufen sollte. Am Fahrzeugheck ist aerodynamisch eine definierte Ablösung der Strömung erforderlich. Ein Heckeinzug („Boat-Tailing“) hilft, das sogenannte Totwassergebiet möglichst klein zu halten, was sich auch auf die Verschmutzungsneigung positiv auswirkt. Ein solcher Einzug kann bei Stufenhecklimousinen durch das Herunterziehen des Daches gestaltet werden. Durch eine geeignete Neigung der Heckschräge kann vor allem bei Stufenheckfahrzeugen der durch Luftwirbel induzierte Luftwiderstand minimiert werden.

Deutlichen Einfluss auf den Luftwiderstand eines Fahrzeuges, aber auch auf die zu minimierenden Auftriebskräfte, hat die Gestaltung des Unterbodens. Ziel ist eine möglichst glatte Fahrzeugunterseite, wofür heute oft optimierte Unterbodenabdeckungen aus Kunststoff eingesetzt werden. Natürlich müssen dabei Kompromisse eingegangen werden, um zum Beispiel die Kühlung von Bremsen und Katalysator sicherzustellen. Einen großen Anteil am Gesamtluftwiderstand haben auch die Räder (bis zu $c_W = 0{,}06$). Versuche, diesen Anteil durch konstruktive Maßnahmen deutlich abzusenken, zum Beispiel mit zur Außenhaut bündigen Hinterrädern, brachten bislang nicht den gewünschten Erfolg.

In weiteren Entwicklungsschritten werden die durch die Umströmung der Karosserie entstehenden Windgeräusche und die Verschmutzung von Seiten- und Heckscheiben bei Regenfahrt reduziert.

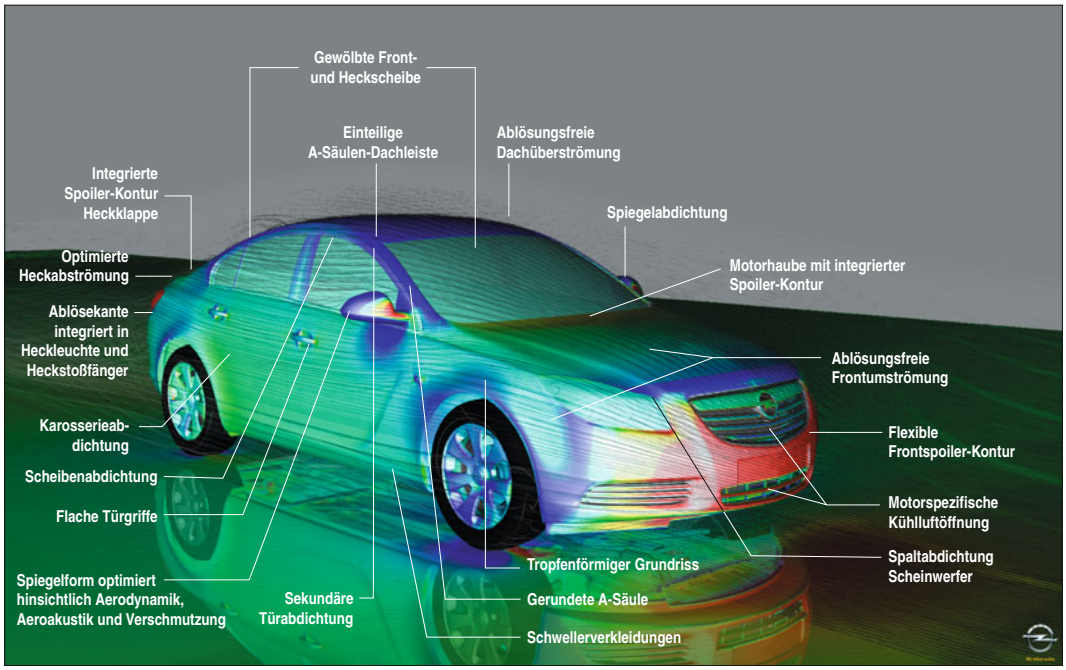



**Abb. 6.1** Maßnahmen zur Aerodynamikoptimierung der Außenhaut

Scharfen Kanten und Türfugen ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu widmen, weil sie die Windgeräusche mit zunehmender Geschwindigkeit progressiv erhöhen (► Abschn. 3.2 und ► Abschn. 3.4).

### 6.1.1.3 Package

Die Festlegung der Karosserieformen und -abmessungen definiert auch den Bauraum für alle einzubauenden Fahrzeugsysteme und -komponenten. Das Ergebnis dieses Festschreibungsprozesses, der sich parallel zur Design- und Aerodynamikentwicklung vollzieht, wird als Package bezeichnet (► Abschn. 4.2).

In der Regel stehen vor Beginn einer Fahrzeugentwicklung die wichtigen Schlüsselabmessungen als Sollwerte bereits fest, Tab. 6.2 und Abb. 6.2.

Dazu gehören nicht nur Länge und Breite über alles, sondern eine ganze Reihe weiterer markanter Fahrzeugkoordinaten, die die Karosserie beschreiben: beispielsweise der Übergang der Motorhaube zur Windschutzscheibe sowie zur Kühlerverkleidung, Böschungswinkel, Bodenfreiheit, Lage und Kontur der Stoßfänger, die Lage der Hüftpunkte vorne und hinten, Abstand des Lenkrades zum Fahrer oder das Kofferraumvolumen.

Das Package eines Fahrzeuges bestimmt das Raumgefühl der Insassen wesentlich. Positiv wirken sich vor allem folgende Eigenschaften aus:

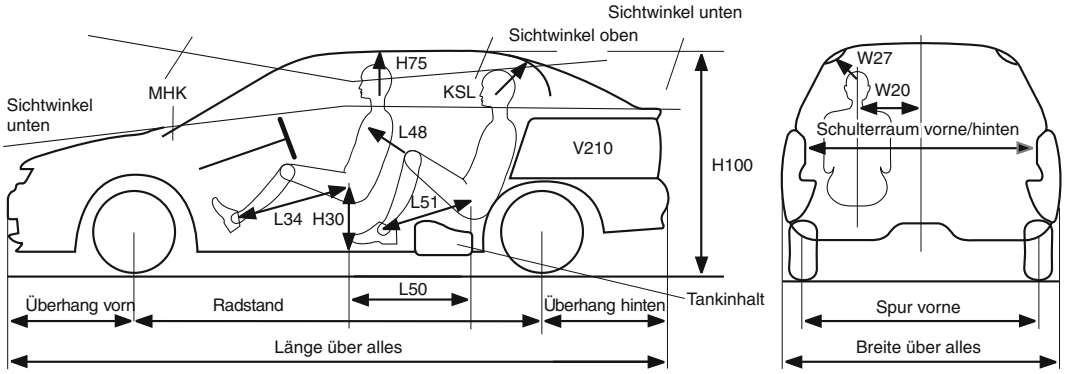
- hohes Dach,
- Übergang Motorhaube/Windschutzscheibe weit vorgezogen,
- langer Radstand,
- breite Spur.

Natürlich können diese Punkte nur soweit umgesetzt werden, wie dies Design, Aerodynamik und die von der festgelegten Fahrzeugklasse abhängigen Hauptabmessungen zulassen.

Basis der Innenraumauslegung ist die Sitzposition des Fahrers. Zunächst gilt es, den Verstellbereich für die Sitzlängen und -höhenverstellung festzulegen. Die Längenverstellung muss so gestaltet sein, dass der Fahrer ausreichend Platz hat: Er muss Lenkrad und Pedalerie bequem erreichen können und darf die Fondpassagiere nicht einengen. Bei der Sitzhöhenverstellung sind die Sicht über die Instru-

**Tabelle 6.2** Schlüsselabmessungen für das Package

| Außenmaße | Innenmaße |
|---|---|
| Länge über alles | Beinraum vorne/hinten (L34/L51) |
| Breite über alles | Knieraum Passagier hinten (L48) |
| Höhe (H100) | Abstand Hüftpunkt vorne zu Hüftpunkt hinten (L50) |
| Radstand | Kopfraum vorne/hinten/seitlich (H75, Kopfschwunglinie, W27) |
| Spur vorne/hinten | relative Höhe der Sitze vorn und hinten zu den Fersenpunkten (H30) |
| Kofferraumvolumen (V210) | Sichtwinkel nach vorne und hinten, jeweils nach oben und nach unten |
| Tankvolumen | Schulterraum vorne/hinten sowie Breite zwischen den Armauflagen der Türverkleidung |
| | Abstand Mitte Fahrersitz zur Fahrzeugmitte (W20) |




L = Länge
H = Höhe
W = Weite
V = Volumen

KSL = Kopfschwinglinie
MHK = Motorhauben-Hinterkante

**Abb. 6.2** Wichtige Fahrzeugabmessungen

mententafel, der Kopfraum H75, die Erreichbarkeit der Pedale, Ein- und Ausstieg sowie alle Sichtwinkel zu berücksichtigen.

Anschließend wird ein Referenzpunkt in der Sitzverstellung definiert, der Hüftpunkt (H-Punkt). Er entspricht der Sitzeinstellung des 95 %-Mannes (nur 5 % der Bevölkerung auf den Zielmärkten sind größer). Dessen Sitzposition wird durch die Sitzhöhe und den Hackenpunkt bestimmt. Die Fußsohle muss das Fahrpedal berühren (► Abschn. 6.4.1).

Der H-Punkt lässt sich rechnerisch oder messtechnisch bestimmen. Ausgehend vom ihm werden die übrigen Innenraummaße wie Bein- und Kopfraum ermittelt. Die Knie- und Beinfreiheit der Fondpassagiere werden wesentlich durch den Abstand zwischen H-Punkt Fahrer und H-Punkt Fondpassagier bestimmt.

Des weiteren wird durch das Package auch die Anordnung von Motor- und Getriebeeinheit samt aller weiteren Aggregate unter der Motorhaube festgelegt. Die Hauptauslegungskriterien hierbei sind die Freigängigkeit beim Einbau und Betrieb der Aggregate, der freie Verformungsweg zur Erfüllung einer guten Versicherungseinstufung (AZT-Typscha-

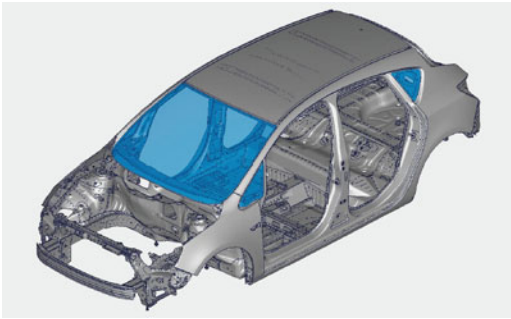


**Abb. 6.3** Rohkarosserie

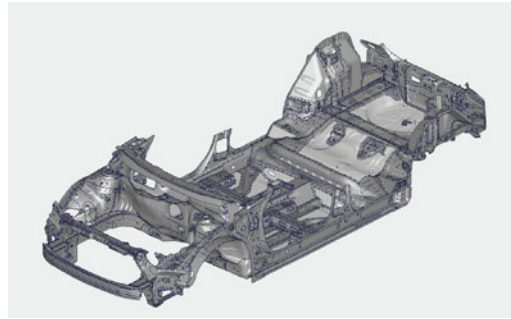


**Abb. 6.4** Unterbau



den) und genügend Freiraum von der Motorhaube zu „harten Teilen" um den Fussgängerschutz zu erfüllen.

### 6.1.1.4 Karosseriestruktur

Die Karosseriestruktur hat folgende Aufgaben:

- Aufnahme aller Kräfte und Momente,
- gestaltfester Innenraum,
- periphere Energieumsetzungszonen,
- Aufnahme aller Antriebsaggregate und der Achsmodule.

Im Folgenden wird die Konstruktion einer Rohkarosserie exemplarisch beschrieben (Abb. 6.3). Es handelt sich dabei um ein 2009 in Serie gebrachtes, fünftüriges Fahrzeug der Kompaktklasse [3]. Wenn auch abhängig von der Philosophie des Automobilherstellers, der Fahrzeugklasse und der Modellgeneration einzelne Konstruktionsumfänge von Hersteller zu Hersteller differieren, deckt die Schilderung doch viele Anwendungen ab. Die Reihenfolge der einzelnen Abschnitte entspricht dabei der Produktionssequenz im Karosserierohbau.

#### 6.1.1.4.1 Unterbau

Der Unterbau Abb. 6.4 – auch Plattform oder Architektur genannt – besteht aus drei Unterzusammenbauten:

- Vorderwagen Abb. 6.5a,
- Unterboden vorn Abb. 6.5b,
- Unterboden hinten Abb. 6.5c.

Basis des Unterbodens sind die Längs- und die Querträger. Sie werden vorn und hinten von Bodenblechen abgeschlossen. In die beiden vorderen Längsträger, die sich aus dem Vorderrahmen und dessen Verlängerung zusammensetzen, sind an der Stirnseite die Crashboxen mit dem Stoßfänger eingesteckt und verschraubt. Auf der rechten Seite sorgt eine eingeschweißte und mit einer Gewindeplatte versehene Verstärkung für die Aufnahme der anschraubbaren Abschleppöse. Im weiteren Verlauf der Längsträger sind an deren Unterseite die Aufnahmen für den Chassisträger angeschweißt. Außerdem sind auf dem Längsträger auch die Motorlager angebracht. An den Zusammenbau des Vorderrahmen werden zunächst die Frontteile befestigt. Das obere Frontteil muss Schloss und Verriegelung für die Motorhaube aufnehmen. Des Weiteren sind an dieser Komponente Puffer zum Einstellen der Spaltmaße für die Motorhaube sowie die Kühlerhalterungen befestigt. Es schließt sich der vordere Radkasten an – auch „Radeinbau" genannt. Er kann ein- oder mehrteilig ausgeführt werden. Auf dem Radeinbau ist die Aufnahme für das Federbein positioniert, die wegen ihrer Form „Federbeindom" heißt. Letzterer nimmt alle Reaktionskräfte des Federbeins auf. Um ausreichende Steifigkeit zu erzielen, muss der Radeinbau über ein möglichst gerades, als Zugstrebe wirkendes Element mit dem Vorderrahmen verbunden werden. Über dem Radeinbau befindet sich eine Strebe, die beim Frontalaufprall gezielt Kräfte in die A-Säule und in den Türschacht einleitet, bevor sie selbst durch kontrollierte Verformung Energie absorbiert. Der Radeinbau schließt hinten mit dem Seitenteil-Stirnwand ab. Quer dazu verläuft die Stirnwand selbst, die zusammen mit der Schließplatte und der Verlängerung des Vorderbodens den Motor- vom Fahrgast-

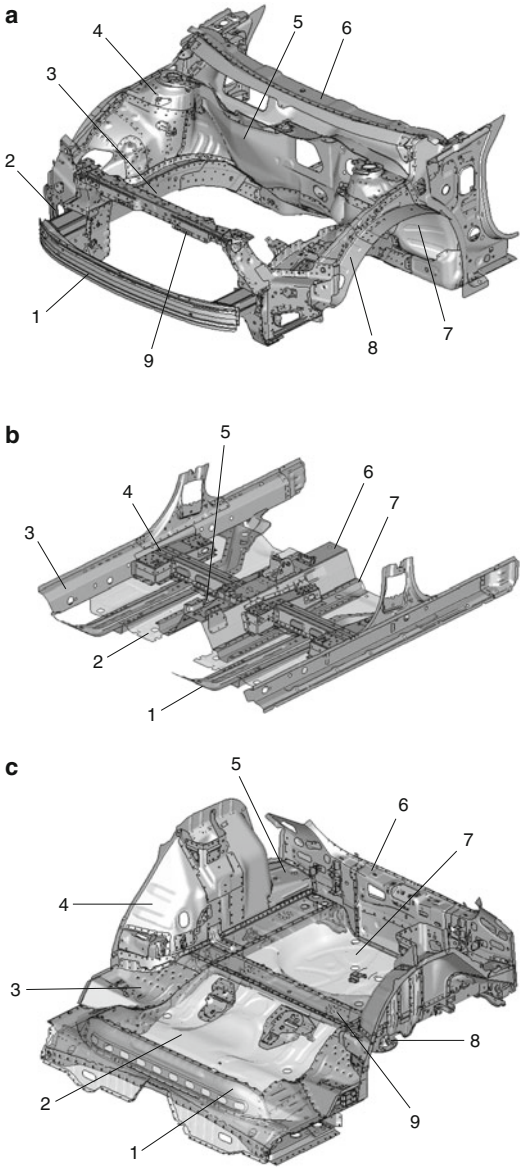



**Abb. 6.5** **a** Vorderwagen: 1 Stoßfänger; 2 Crashbox; 3 Vorderrahmen; 4 Federbeindom; 5 Stirnwand; 6 Querträger Scheibenauflage; 7 Radkasten; 8 Strebe Radeinbau; 9 Querträger Front oben; **b** Unterboden vorn: 1 Verlängerung Vorderrahmen; 2 Bodenblech vorn; 3 Boden seitlich; 4 Sitzauflage; 5 Querträger Vordersitz; 6 Tunnel; 7 Tunnelrandprofil; **c** Unterboden vorn: 1 Verlängerung Vorderrahmen; 2 Bodenblech vorn; 3 Boden seitlich; 4 Sitzauflage; 5 Querträger Vordersitz; 6 Tunnel; 7 Tunnelrandprofil

raum trennt. Stirnwand und Schließplatte dienen als Aggregateträger. Die Schließplatte schirmt die Fahrgastzelle zum einen vor Geräuschen und Verschmutzung ab, zum anderen verhindert sie bei einem Aufprall das Eindringen des Motors oder anderer Aggregate. Die Stirnwandeindringung nach einem Frontalaufprall gilt daher als Maß für die Strukturgüte einer Karosserie und wird oft zum Vergleich herangezogen. Über der Stirnwand befindet sich noch eine verstärkte Abdeckung, die den unteren Teil der Frontscheibenöffnung bildet.

Der Vorderrahmen, der nicht nur Motor und Vorderachse aufnehmen muss, sondern bei einem Frontalaufprall eine zentrale Rolle als energieaufnehmende Komponente spielt, wird gezielt an den Stellen mit den höchsten Lastbeaufschlagungen versteift.

Im gezeigten Beispiel mündet der Vorderrahmen in die Verlängerung Vorderrahmen im Unterboden vorn. Diese verläuft unter dem gesamten vorderen Bodenblech bis zum Fersenblech. Bei anderen Unterbaukonzepten kann sie aber auch am Sitzquerträger enden. Die Verlängerung dient vor allem dazu, im Fahrbetrieb und beim Aufprall das Durchbiegen des Bodens zu verhindern. Dafür wird zusätzlich noch eine hochfeste Verstärkung im Bereich der Verlängerung Vorderahmen auf dem Bodenblech aufgebracht. Der Sitzquerträger gewährleistet zusammen mit den auf dem Boden angebrachten Sitzauflagen eine steife Anbindung der Vordersitze. An der Sitzauflage wird auf der Oberseite auch das Schloss des Sicherheitsgurtes befestigt. Beim Frontalaufprall werden in das Schloss sehr hohe Kräfte eingeleitet, die dieser Träger gut aufnehmen kann.

Das Gerippe für den hinteren Unterboden wird aus den beiden Hinterrahmen-Längsträgern, deren Verlängerungen und den drei Querträgern für den Boden hinten, für die Hinterachse und für die Rückwand gebildet (Abb. 6.5c).

Um einen besseren Kraftfluss zu erhalten, wird der Hinterrahmen mit einem Knotenblech direkt mit dem Schweller und dem Fersenblech verbunden. Diese Anbindung ist bei einem Heckaufprall von Vorteil und erhöht die Steifigkeit der gesamten

Karosserie. In diesem Bereich befindet sich auch die am Hinterrahmen angebrachte Halterung für die Hinterachse. Die Rahmenmitte wirkt als Gegenlager für die Federung der Hinterachse. Hinten links wird die Abschleppöse befestigt; rechts die Halterung für das Endrohr der Abgasanlage. Der Einsatz eines Rollprofils aus einem hochfesten Dual-Phasen Stahl ermöglichte es, im hinteren Bereich des Unterbodens – im Gegensatz zum Vorderrahmen – auf Verstärkungen zu verzichten. Bei anderen Fahrzeugen erzielt man den gleichen Vorteil durch den Einsatz von Tailored Blanks oder Tailored Rolled Blanks.

Der Querträger am hinteren Boden sorgt während des Fahrbetriebes dafür, dass sich der Boden im Bereich der hinteren Sitze nicht zu stark durchbiegt. Entsprechend wirkt er bei einem Heckaufprall Deformationen des Unterbodens entgegen. In diesen Träger sind auch die Aufnahmepunkte für die vorderen Tankspannbänder integriert.

Der Querträger der Hinterachse ist sowohl für den Heckaufprall als auch für die Torsionssteifigkeit entscheidend.

So stabilisiert er bei einem Heckaufprall den Hinterrahmen und verhindert unkontrolliertes Ausknicken. Als Biegeträger wirkt er starken Verwindungen des Hinterrahmens entgegen, die durch gegenläufige Verformung der Hinterrahmenprofile entstehen können. Um dieses Verhalten des Hinterachsquerträgers optimal zu nutzen, ist die Anbindung an den Hinterrahmen entsprechend zu gestalten. Dazu ist es erforderlich, den Querträger sowohl in voller Profilhöhe seitlich mit dem Hinterrahmen zu verbinden als auch eine zusätzliche Lasche mit der Rahmenunterseite zu verschweißen. Die Breite des Anschlusses ist so zu wählen, dass die beiden Flanken des Querträgers den Hinterrahmen genau dort abstützen, wo er infolge eines Heckaufpralls ausbrechen oder verdrehen würde. Außerdem ist dieser Querträger ein wichtiges Befestigungselement: er nimmt die Schrauben des hinteren Tankspannbandes auf und an ihm werden die Rücksitzbank und der mittlere Sicherheitsgurt hinten befestigt.

Der Rückwand-Querträger soll ein Durchbiegen des Bodens im Bereich der Reserveradmulde verhindern. Das Gerippe des hinteren Unterbaus wird mit dem Boden geschlossen. In dem gezeigten Beispiel ist die Reserveradmulde direkt in das hintere Bodenblech integriert. Gängig sind aber auch Konstruktionen, bei denen die Mulde in das Bodenblech eingeschweißt wird.

Das Radgehäuse wird innen an den vertikalen Flansch des Hinterrahmens angeschweißt. Über ein Knotenblech wird das Radgehäuse mit der Verstärkung der Rückwand verbunden. Diese Knotenbleche sind wichtig für die Torsionssteifigkeit der Gesamtkarosserie und die lokale Steifigkeit der Hecköffnung. Für den Heckaufprall wird außerdem ein zusätzlicher Lastpfad geschaffen.

#### 6.1.1.4.2 Aufbau

Der Aufbau ◘ Abb. 6.6 besteht aus den Zusammenbauten der Seitenwand, ◘ Abb. 6.7a, des Dachs, sowie der Rückwand und der angeschraubten Kotflügel. Zum Schluss wird die Frontscheibe eingeklebt.

#### 6.1.1.4.3 Zusammenbau Seitenwand

Der Zusammenbau Seitenwand besteht im Wesentlichen aus einem inneren und einem äußeren Teil. Im Türöffnungsbereich bilden diese Schalen zusammen mit der A-Säule innen auch die Säulenquerschnitte. Zur Gewährleistung einer guten Rundumsicht soll der A-Säulenquerschnitt ◘ Abb. 6.7b, so schlank wie möglich ausgeführt werden. Dafür muss die Verstärkung entsprechend aufgedickt werden oder wie bei Cabriolets auch teilweise aus hochfesten Rohrquerschnitten bestehen. Während auf dem inneren Flansch der A-Säule die Windschutzscheibe befestigt ist, trägt der äußere Flansch die Türdichtung.

Der B-Säulenquerschnitt, ◘ Abb. 6.7c, ist beidseitig mit Türdichtungen ausgestattet. Zusätzlich sind an der B-Säule die Scharniere für die Hintertür angebracht. Das Beispiel zeigt geschraubte Scharniere. In einigen Fahrzeugen sind diese Komponenten auch angeschweißt. Die Wahl der Befestigung ist herstellerspezifisch. Im Bereich der Scharnieranbindungen für die Türen sind zusätzliche lokale Versteifungen notwendig. Die Versteifungen sind zwischen innerem und äußerem Seitenwandteil angebracht. Die Verstärkung der B-Säule ist für den Seitenaufprall sehr wichtig, weil sie Intrusionen in den Innenraum verringert. Sie besteht bei den meisten Fahrzeugen aus hoch- und höchstfesten Stählen mit Streckgrenzen bis zu 1500 MPa. Die

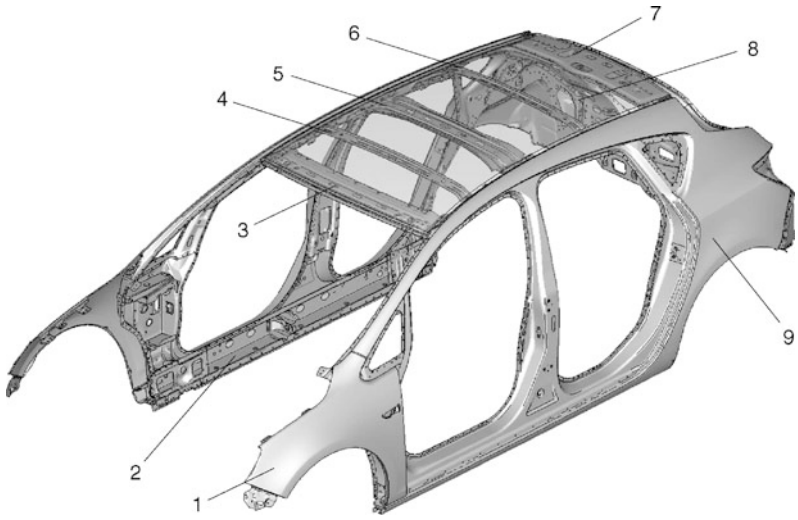



**Abb. 6.6** Aufbau: 1 Kotflügel; 2 Seitenwand innen; 3 Dachrahmen vorn; 4 Dachspriegel vorn; 5 Dachspriegel mitte; 6 Dachspriegel hinten; 7 Dachrahmen hinten; 8 Dach; 9 Seitenwand außen

Verstärkungen dienen aber auch der akustisch relevanten Reduzierung der Diagonalverformung in den Türöffnungen während des Fahrbetriebes. Im Heckbereich wird an der Seitenwand noch eine Verlängerung angebracht. Ein Ansatzstück umschließt die Öffnung für die Heckleuchten. Wie schon die Verbindung der Radgehäuse mit der Verstärkung Rückwand ist diese Maßnahme wichtig, um die Torsions- und Heckdiagonalsteifigkeit zu erhöhen.

#### 6.1.1.4.4 Dach

Der letzte Zusammenbau in der Produktionssequenz der gezeigten Rohkarosserie ist das Dach. Es besteht aus der Dachhaut, die durch eingeklebte Dachspriegel stabilisiert wird, sowie dem vorderen und hinteren Dachrahmen. Während der vordere und hintere Dachspriegel auf die Gesamttorsionssteifigkeit und das Crashverhalten der Karosserie keinen Einfluss haben, spielt der Mittelspriegel eine entscheidende Rolle für den Seitencrash und den Pfahlaufprall. Die Ausführung des vorderen und hinteren Dachrahmens beeinflusst sehr stark die Gesamttorsionssteifigkeit. Neben dem klassischen Stahldach – mit und ohne Schiebedach – gibt es heute eine Vielzahl von verschiedenen Dachmodulen (Abb. 6.7d). Neben Doppelschiebedächern vorn und hinten, sowie Spoiler-Glasdächern, die fast die gesamte Dachfläche öffnen, gibt es feststehende Glasdächer, über die halbe oder die komplette Dachfläche. Andere Modulvarianten zum Beispiel bei Vans und Minivans dienen eher dazu zusätzlichen Stauraum und Ablagefächer zu schaffen. Eine weitere Möglichkeit für eine verbesserte Sicht nach draußen bieten sogenannte Panoramascheiben. Hierbei wird die Frontscheibe weit ins Dach gezogen, teilweise sogar bis zur B-Säule.

#### 6.1.1.4.5 Anbauteile

Unter Anbauteilen versteht man alle zur Karosserie gehörigen Teile, die nicht mit der Rohkarosserie verschweißt werden, also unter anderem Türen, Klappen, Kotflügel und Stoßfänger. Die Entwicklung der Anbauteile ist von zwei Trends gekennzeichnet:

**Modularisierung** Durch die Vergabe von Entwicklung und Produktion an externe Unternehmen werden Anbauteile zunehmend als Komplettmodule an das Band des Automobilherstellers zugeliefert. Ein Beispiel hierfür stellt das Frontend-Modul dar, das neben vorderem Stoßfänger und Scheinwerfern auch den Kühler umfassen kann. Türmodule bestehen mittlerweile nicht nur aus der Außenhaut, dem Fenster und der Innenverkleidung, sondern

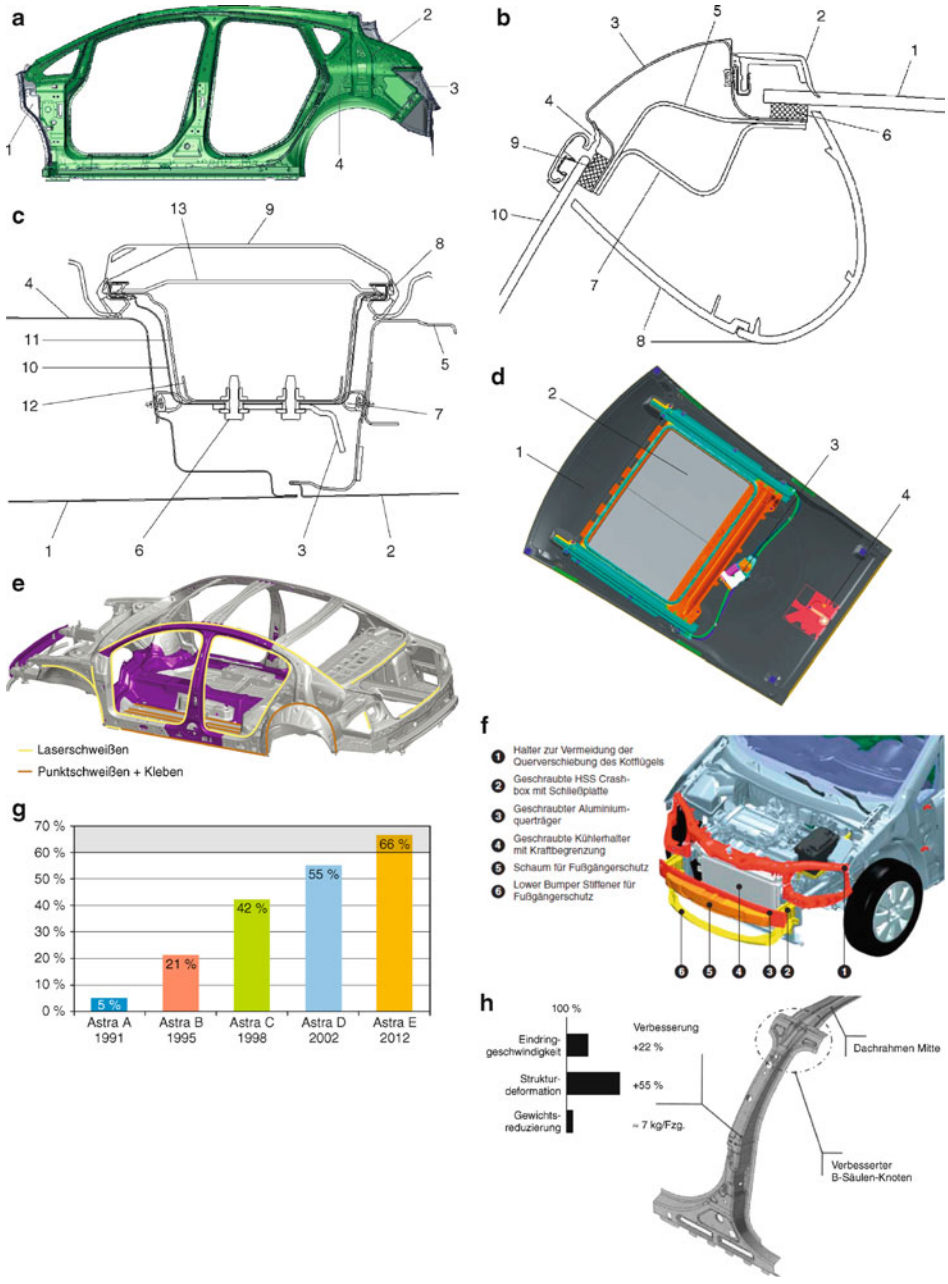



**Abb. 6.7** **a** Zusammenbau Seitenwand: 1 Seitenwand innen; 2 Verstärkung D-Säule; 3 Einsatzecke Heckleuchte ; 4 Seitenwand außen; **b** Schnitt A-Säule: 1 Frontscheibe, 2 Frontscheibeneinfassung, 3 A-Säule außen, 4 Dichtung Seitenscheibe, 5 Verstärkung A-Säule, 6 Kleber Frontscheibe, 7 A-Säule innen, 8 Verkleidung A-Säule (zweiteilig), 9 Kleber Seitenscheibe, 10 Seitenscheibe; **c** Schnitt B-Säule: 1 Türaußenhaut Vordertür, 2 Türaußenhaut Hintertür, 3 Türscharnier Hintertür, 4 Gerippe Vordertür, 5 Gerippe Hintertür, 6 Verschraubung Scharnier Hintertür, 7 Sekundärdichtung, 8 Primärdichtung, 9 Verkleidung B-Säule innen, 10 Seitenwand außen, 11 Verstärkung B-Säule, 12 Versteifung B-Säule, 13 Seitenwand innen; **d** Dachmodulbild: 1 Dach (PU-Schaum mit Folie beschichtet), 2 Glasschiebedach, 3 Schiebedachmotor, 4 Antennenmodul; **e** Laser- und Punktschweißen beim VW Passat [6]; **f** Schraubteile für kostengünstige Instandsetzung; **g** Leichtbauaktivitäten – Hochfeste Stähle und alternative Materialien in der Rohkarosserie; **h** Verstärkung B-Säule

auch aus der gesamten Mechanik und Elektronik für die Verriegelung, Scheibenbetätigung, Spiegel und Lautsprecher.

**Einsatz von Leichtbau-Werkstoffen** Der Einsatz neuer Karosseriewerkstoffe mit einem geringeren spezifischen Gewicht als Stahl (► Abschn. 6.2) hat in großen Stückzahlen vor allem bei den Anbauteilen begonnen [4]. So bestehen Stoßfänger fast ausschließlich und Kotflügel zunehmend aus Kunststoffen. Motorhaube und Heckklappe werden zunehmend aus Aluminium gefertigt. Für extrem sparsame Fahrzeuge (zum Beispiel das Drei-Liter-Auto) werden auch großflächige Klappen aus Magnesium eingesetzt.

#### 6.1.1.4.6 Verbindungstechnik

Die Auswahl des für die jeweilige Anwendung optimalen Fügeverfahrens ist entscheidend für die Güte einer Karosserie, da sie zum Beispiel auf Torsionssteifigkeit und Korrosionsbeständigkeit Auswirkungen zeigt [5]. Für die hier betrachtete Ganzstahlkarosserie ist das Punktschweißen mit Abstand das bedeutendste Fügeverfahren. Je nach Fahrzeugtyp wird die Karosserie mit 3000 bis 5000 Schweißpunkten gefügt, die heute fast ausschließlich automatisiert von Industrierobotern oder in Vielpunktschweißanlagen gesetzt werden. Die Festlegung der Schweißpunktlage mit Hilfe moderner CAE-Werkzeuge (► Abschn. 11.3) ist integraler Bestandteil der Karosserieentwicklung. Von den Schutzgas-Schweißverfahren wird im Karosseriebau das Metall-Aktivgas-Verfahren (MAG) eingesetzt. Es kommt für hochbeanspruchte Teile wie Gewindeplatten zur Aufnahme der Achsen sowie an Stellen, deren eingeschränkte Zugänglichkeit das Punktschweißen nicht erlauben, zur Anwendung. Weit verbreitet ist mittlerweile auch das Cold-Metal-Transfer (CMT) Schweißverfahren. Die Technologie ermöglicht das Fügen von Dünnstblechen ab 0,3 Millimetern, von verzinkten Blechen und von Mischverbindungen aus Aluminium und Stahl. Das Lichtbogen-Bolzenschweißen ermöglicht eine tragfähige Verbindung in Bereichen, die, zum Teil bedingt durch fertigungstechnische Abläufe, nur einseitig zugänglich sind. An einer Rohbaukarosserie werden durchschnittlich 150 stiftförmige Bolzen angeschweißt. Den größten Anteil hat dabei der Bodenbereich und die Stirnwand. In den letzten Jahren hat das Laserstrahlschweißen sich zunehmend Großserienanwendungen erobert [6]. Neben der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit erweist sich vor allem die bessere Oberflächenqualität als vorteilhaft. ◘ Abb. 6.7e zeigt die Verteilung des Laserschweißens und des Punktschweißens mit Kleben. So kann eine an der Oberfläche liegende Laserschweißnaht vor dem Lackieren mit wesentlich geringerem Zeitaufwand entfernt werden. Das heute schon erfolgreich eingesetzte Laserlöten liefert im Außenhautbereich Nahtoberflächen die eine Nacharbeit überflüssig machen. Hohe Reparaturfreundlichkeit und damit eine einhergehende niedrige Typschadenklasse (AZT-Typschaden) erfordern eine zerstörungsfreie Demontage und Montage der beschädigten Teile. Erreicht wird dies durch geschraubte Stoßfängersysteme und Frontmodule wie in ◘ Abb. 6.7f gezeigt ist, was mittlerweile Stand der Technik bei allen Fahrzeugherstellern ist. In Zukunft werden mechanische Fügeverfahren wie Durchsetzfügen und Stanznieten sowie die Kombination dieser Techniken mit Kleben an Bedeutung gewinnen [5]. Speziell die Klebeanwendungen werden zukünftig zunehmen, da sie eine ideale Möglichkeit darstellen, Werkstoffkombinationen von Stahl, Aluminium und Kunststoffen problemlos zu verbinden.

#### 6.1.1.4.7 Materialauswahl und Leichtbau

Die ständig steigenden Sicherheits- und Komfortanforderungen schlagen sich in immer höheren Rohkarosseriegewichten nieder. Die Automobilindustrie setzt sich diesem Trend mit intelligenten Leichtbaukonzepten entgegen. Eine Karosserie bestand in den achtziger Jahren fast ausschließlich aus Qualitätsstahl ST14. Dieser hat in den heutigen modernen Karosserien, wie in ◘ Abb. 6.7g gezeigt nur noch einen Anteil von deutlich weniger als fünfzig Prozent [10].

Im Zuge der knapper und teurer werdenden Kraftstoffe, sowie der von Gesetzgebern festgelegten $CO_2$ Grenzwerte nimmt der Einsatz von Aluminium, Magnesium und Kunststoffen in der Rohkarosserie zu. In der Großserie werden speziell Bauteile mit niedrigen Strukturanforderungen aus Aluminium oder Kunststoff hergestellt. Bei komplexer und schwieriger Geometrie der Teile bietet sich zudem

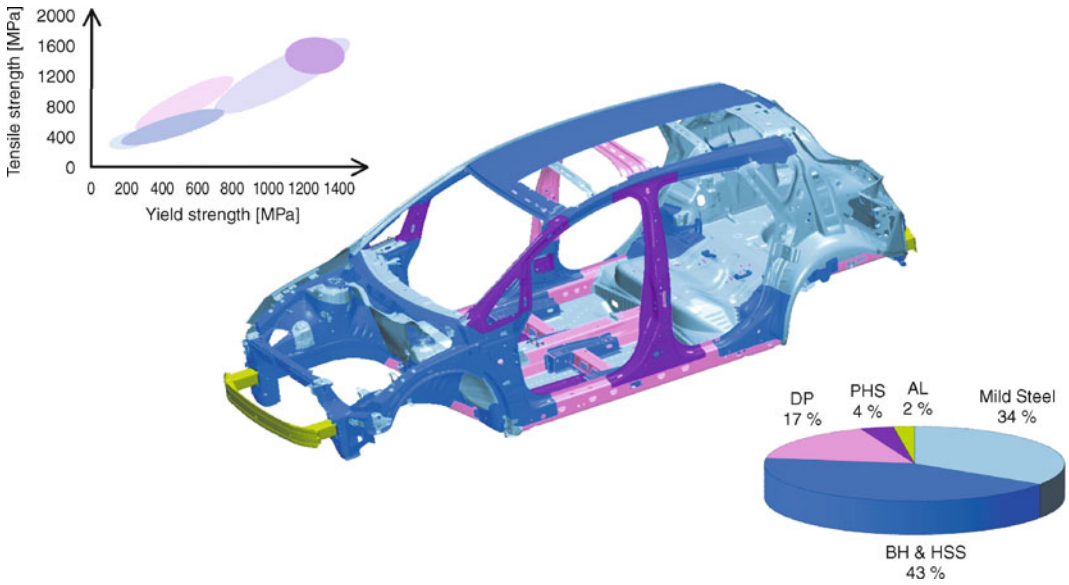



**Abb. 6.8** Leichtbauaktivitäten

das Aluminium- bzw. Magnesium-Duckguss-Verfahren an. Komplette Karosserien aus Leichtmetall wie beim Audi A8 oder Jaguar werden zukünftig noch die Ausnahme darstellen.

Kunststoffe hingegen können heute durch ihre chemische Zusammensetzung und der Zugabe von Glas- oder Kohlefasern exakt auf die Anforderungen des Bauteils zugeschnitten werden. Diese Kunststoffbauteile bieten die Möglichkeit viele Funktionen zu integrieren und damit verschiedene Stahlbauteile zu ersetzen. Der Einsatz dieser multifunktionalen Kunststoffbauteile wird deshalb in Zukunft steigen. Der größte Teil des ST14 wird aber wieder durch Stahl, jedoch mit teilweise deutlich höheren Streckgrenzen, ersetzt. Diese hochfesten Stähle nehmen beim Umformen z. B. im Crash, wesentlich mehr Energie auf als ein ST14 mit gleicher Blechdicke. In Abb. 6.7h ist die Verstärkung B-Säule eines Mittelklassefahrzeugs dargestellt. Sie wurde aus einem ultra-hochfesten Stahl im Warmumformprozess hergestellt (**P**ress **H**ardend **S**teel) und erreicht dadurch eine Streckgrenze von bis zu 1500 Mpa. Gegenüber einer konventionellen, ca. sieben Kilogramm schwereren Verstärkung aus St14, verringert sie die Eindringgeschwindigkeit beim Seitencrash um mehr als 20 Prozent und die Strukturdeformation sogar um über 50 Prozent.

In welchen Anteilen die einzelnen höherfesten Stahlsorten in einer Karosserie eines typischen Mittelklassefahrzeugs vorkommen, ist in Abb. 6.8 dargestellt [10].

Die Gewichtseinsparung die durch die Stahlsubstitution erzielt werden kann liegt zwischen 10 und 20 Prozent. Für Großserienfahrzeuge ist dies eine kostengünstigste Variante, um Gewicht zu sparen. Bei Karosserien von Nischenfahrzeugen und Kleinserien wie z. B. beim BMW i3 und i8 ist die Mischbauweise aus den unterschiedlichsten Materialien schon sehr weit fortgeschritten. Teilweise werden sogar schon komplette Karosserien ausschließlich aus Leichtmetallen und Kunststoff hergestellt (► Abschn. 6.1.2 und ► Abschn. 6.2). Neben der Materialsubstitution werden aber die Bauteile auch durch anforderungsgerechte Blechdickenverläufe optimiert. Das Verfahren der „Tailored Blank" Herstellung mittels Zusammensetzen von Platinen unterschiedlicher Dicke und Güte, ist schon lange bekannt und wird erfolgreich eingesetzt. Dieses Verfahren wird nun durch das „Tailored Rolled Blank" Verfahren ergänzt. Dabei wird der Walzspalt während des Kaltwalzprozesses ständig verändert um Bauteile mit einem optimalen Dickenverlauf zu erzeugen. Hierbei werden Gewichteinsparungen bis zu 25 % erreicht.

#### 6.1.1.4.8 Sicken und Verprägungen

Große Blechflächen, die nicht zur Karosserieaußenhaut gehören, werden mit Sicken und Verprägungen stabilisiert und ausgesteift. Die optimale Anordnung wird heute mittels Finite-Element Analysen ermittelt, um die maximalen Steifigkeits- und Frequenzerhöhungen zu erreichen (► Abschn. 11.3). Zusätzliche Verprägungen werden auch dort eingebracht, wo Blechflächen direkt aufeinander liegen oder ineinander geschachtelt sind um eine optimale Benetzung der Karosserie im KTL-Bad zu gewährleisten und Spaltkorrosion zu vermeiden (► Abschn. 6.3.2.2).

### 6.1.1.5 Karosserieeigenschaften

#### 6.1.1.5.1 Zusammenbautoleranzen

Allgemeines Ziel vieler Automobilhersteller ist es, Fugen (Spaltmaße), vor allem im sichtbaren Bereich, so klein wie möglich zu halten. Gleichzeitig müssen die Fugen weitestgehend parallel verlaufen. Ein entwicklungsbegleitendes Toleranzmanagement legt den Grundstein für einen qualitativ hochwertigen Rohbau.

Um eine konstante Reproduzierbarkeit im Karosseriebau sicherzustellen, werden bereits zu Entwicklungsbeginn von einer neuen Karosserie Zusammenbaustudien erstellt. Diese legen alle Mess-, Spann- und Aufnahmestellen für die Fertigungseinrichtungen, nicht nur für die Gesamtkarosserie, sondern auch für alle Einzelkomponenten fest. Dabei werden vor den möglichen Bauteiltoleranzen zunächst die Toleranzen für die Fugen festgelegt. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass sich die Spannstellen immer an denselben Positionen befinden, damit der Produktion gezielte Angaben zur Einarbeitung und später zur Qualitätssicherung gegeben werden können. Die Konstruktion der Werkzeuge und der Kontrolleinrichtungen erfolgt ausschließlich anhand der Zusammenbaustudien und der Produktzeichnungen. Fügestationen erlauben die hohen Qualitätsanforderungen unter Produktionsbedingungen. Diese Station erlaubt es, die Unterbodengruppe mit den Seitenwänden und dem Dach mit gleich bleibender Präzision zu verschweißen. Dies ist möglich durch den Spannrahmen der Station, der ein in sich geschlossenes, von äußeren Einflüssen unabhängiges System bildet und gewährleistet, dass die Karosseriekomponenten immer nach den Vorgaben der Zusammenbaustudie gespannt werden.

#### 6.1.1.5.2 Karosseriesteifigkeiten

Entwicklungsziel ist stets eine steife Karosserie mit einer homogenen Struktur, die die Grundlage für ein Fahrzeug mit gutem dynamischen Geräuschverhalten und guten Fahreigenschaften bildet. Die Steifigkeitsauslegung erfolgt weitgehend mit Hilfe rechnerischer Methoden (► Abschn. 11.3).

Unter *Torsionssteifigkeit* versteht man die Verwindung der Karosserie um eine Achse bei Beaufschlagung mit einem Moment. Im Fahrbetrieb kommt es, zum Beispiel durch Fahrbahnunebenheiten, häufig zur Einleitung solcher Momente und dabei zu Relativbewegungen zwischen der Karosserie und deren Anbauteilen. Diese Verformungen können zu unerwünschten Schwingungen und Geräuschen führen, weshalb man sich um möglichst hohe Torsionssteifigkeit bemüht (siehe auch ► Abschn. 3.4).

Maßnahmen hierzu sind unter anderem:

- optimierte Profilübergänge und -verbindungen (Strukturknoten),
- Profilaufbau von Quer- und Längsträgern,
- Vermeidung von Gelenken und Profileinschnürungen,
- multifunktionale Verstärkungen,
- optimierte Anordnung der Schweißpunkte und Klebenähte,
- Einsatz von Tailored Blanks und Tailored Rolled Blanks,
- zusätzliche Querträger und Knotenbleche.

Folgende Torsionssteifigkeiten werden von modernen Karosserien erreicht:

- Limousinen: 15 bis 30 kNm/deg (und mehr),
- Schrägheck: 15 bis 20 kNm/deg (und mehr),
- Kombi: 15 bis 20 kNm/deg (und mehr),
- Vans: 15 bis 25 kNm/deg (und mehr).

Die Crashanforderungen von Fahrzeugen sind in den letzten Jahren stark angestiegen. Notwendige Verstärkungen wurden auch zur Erhöhung der Steifigkeiten genutzt Das hat zu Zuwächsen von ca. 40 bis 50 % geführt. Allerdings darf nie allein die Gesamtsteifigkeit betrachtet werden. Der Konstrukteur sollte für jedes Bauteil die lokale Steifigkeit op-

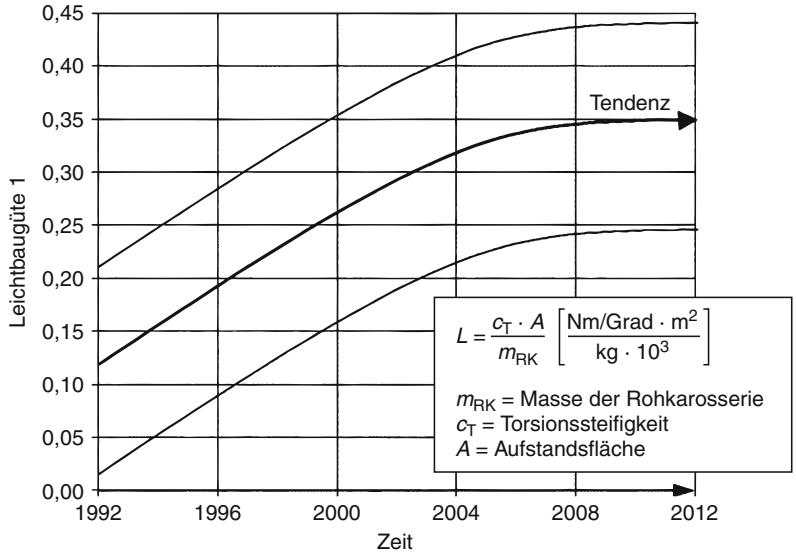



**Abb. 6.9** Leichtbaugüte von Rohkarosserien

timieren. Der absolute Wert für die Torsionssteifigkeit $c_T$ ist ebenso von nur relativer Aussagekraft. Er muss in Verbindung mit der Masse $m$ und der Aufstandsfläche $A$ eines Fahrzeuges gesetzt werden, da zwischen Leichtbau und Steifigkeit ein Zielkonflikt besteht. Ein typischer Wert für die Leichtbaugüte, Abb. 6.9, kann dann folgendermaßen definiert werden:

$$L = \frac{c_T A}{m}$$

Hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen ist insbesondere bedingt durch noch höhere Crashanforderungen (Beispiel: Euro-NCAP) mit dem verstärkten Einsatz von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen, wie etwa Versteifungen, zu rechnen [3]. Die daraus resultierenden Gewichtserhöhungen kompensieren die positive Entwicklung der Leichtbaugüte zum Teil.

Die *Biegesteifigkeit* gibt an, welche Kraft (kN) man aufbringen muss, um die Karosserie zwischen den beiden Achsen um einen bestimmten Betrag, zum Beispiel 1 mm abzusenken. Diese Belastungen treten im Fahrbetrieb insbesondere beim Durchfahren von Bodenwellen auf. Hohe Steifigkeit erreicht man, wenn die Längsträger, Vorder- und Hinterrahmen sowie der Schweller in ihrer Profilhöhe aufgebaut werden oder eine Verstärkung eingebracht wird.

Für die Anschraubpunkte von Fahrwerksteilen wie Achsen, Dämpfer und Federn benötigt man steife Anlenkpunkte an der Karosserie, sogenannte *Koppelpunkte*. Diese Forderung ergibt sich, da man bei der Fahrwerkabstimmung die Nachgiebigkeit der Karosserie so weit wie möglich ausschalten möchte. Um diese hohen Steifigkeiten zu erreichen, muss man an soliden Rahmenteilen anschließen und teilweise zusätzlich mit lokalen Verstärkungen arbeiten.

Die *Torsionseigenfrequenz* eines Gesamtfahrzeuges sollte zwischen 24 und 27 Hz liegen (siehe auch ▶ Abschn. 3.4). Um diese zu erreichen, beträgt der Zielwert für die Rohkarosserie 38 bis 40 Hz bezogen sowohl für die erste symmetrische Eigenfrequenz (Biegung) und die erste asymmetrische Eigenform. Je höher der Wert ausfallen soll, desto steifer und entsprechend leicht muss die Karosserie sein. Wichtig ist aber auch eine sich über die gesamte Karosserie erstreckende ausgewogene Steifigkeit, um die auftretenden Schwingungsamplituden niedrig zu halten.

#### 6.1.1.5.3 Aufprallverhalten

Wesentliches Karosserie-Entwicklungsziel ist selbstverständlich ein optimales Verhalten bei al-

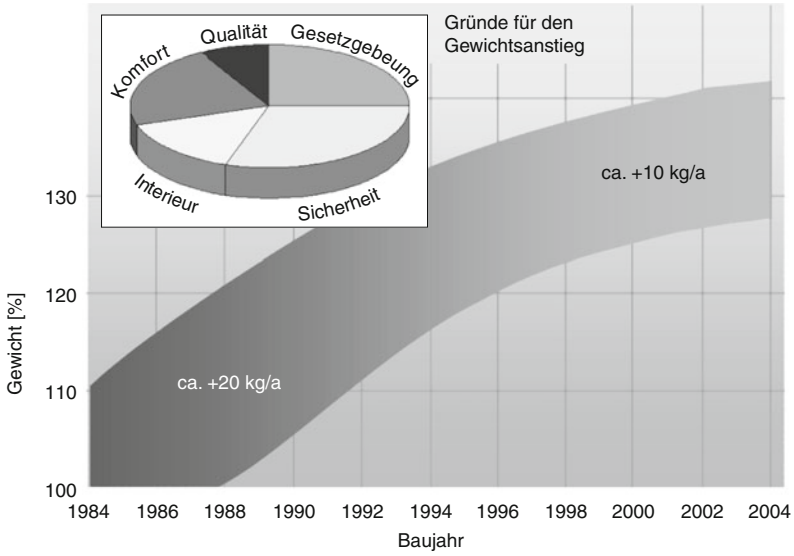



**Abb. 6.10** Gewichtsentwicklung im Automobilbau

len Aufprallarten. Dabei gilt es in erster Linie, die Fahrgastzelle stets intakt zu halten. Intrusionen von Karosserieteilen oder Aggregaten sind unbedingt zu vermeiden. Der Energieabbau, der nötig ist, um die Insassenbeschleunigungen durch den Aufprallimpuls zu begrenzen, sollte vor allem beim Frontalaufprall in der Vorderwagenstruktur und den Längsträgern erfolgen. Einzelne Maßnahmen sind im ▶ Abschn. 6.1.1.4 zur Karosseriestruktur bereits ausgeführt, weitere Einzelheiten (auch zum Fußgängerschutz) finden sich in ▶ Kap. 9.

#### 6.1.1.6 Ausblick

Der Karosseriebau der Zukunft ist vor allem durch den Zwang zu weiteren Gewichtseinsparungen gekennzeichnet, um den Kraftstoffverbrauch und $CO_2$-Ausstoß zu reduzieren.

Nach [8] kann man bei der Verringerung des Karosseriegewichtes um 100 kg mit sekundären Gewichtseinsparungen an anderen Aggregaten wie Motor, Getriebe und Bremsen in Höhe von 16 kg rechnen. Die Ganzstahl-Karosserie wird aufgrund ihrer erwiesenen Prozessfähigkeit und der günstigen Materialkosten auch weiterhin einen hohen Marktanteil halten. Während sich allerdings der Anteil des Qualitätsstahles deutlich verringert, steigen die Anteile von höher- und höchstfesten Stahlsorten weiter an. Auch die Substitution von Stahl durch Aluminium, Magnesium und Kunststoff wird in Zukunft deutlich zunehmen.

### 6.1.2 Aluminium Space Frame – ASF

#### 6.1.2.1 Einleitung

Weltweit betrug die Gewichtszunahme in allen Fahrzeugklassen von den 70er Jahren bis ca. 2005 im Durchschnitt bis zu 15 kg pro Jahr. Im Einzelnen war die stetige Gewichtszunahme auf höhere Sicherheitsanforderungen, verschärfte Gesetzgebungen, gestiegene Komfortansprüche, zunehmend umfangreicher werdende Zusatzausstattungen und die Universalität der Fahrzeuge zurückzuführen (Abb. 6.10).

Diese Gewichtszunahmen erforderten, um gleiche Fahrleistungen zu erreichen, Anpassungen der Motorleistungen, des Getriebeaggregates und damit verbunden stärkere Fahrwerke und Bremsanlagen sowie ein größeres Tankvolumen.

Die oben genannten Gewichtszunahmen bilden eine Gewichtsspirale, die zu einer Steigerung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastung führte (Abb. 6.11). So werden üblicherweise für 100 kg Mehrgewicht – unter Berücksichtigung ei-

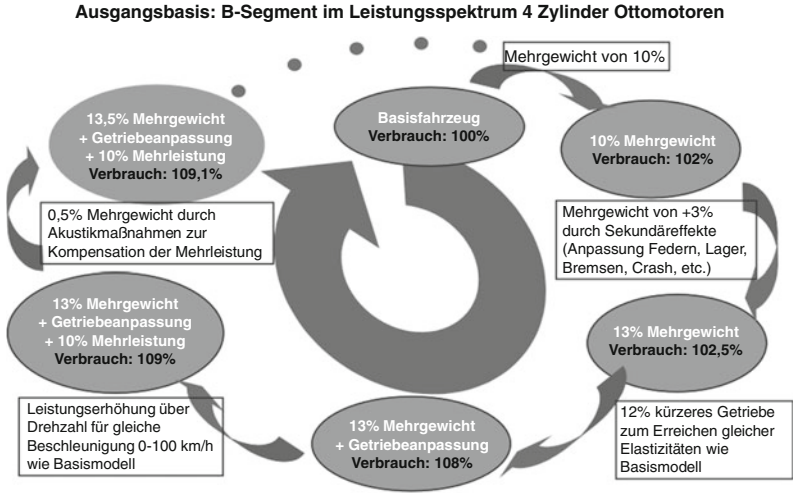



**Abb. 6.11** Kompensation über Leistungssteigerung

ner Motor- und Getriebeanpassung – etwa 0,35 l Kraftstoffmehrverbrauch pro 100 km in Ansatz gebracht, das entspricht einem $CO_2$-Äquivalent von etwa 9 g/km.

Der Energieverbrauch eines Fahrzeuges wird während der Laufzeit vom Gesamtfahrwiderstand und dem Energieverbrauch an Bord bestimmt. Danach ist die Masse eine wesentliche, den Fahrwiderstand beeinflussende Größe. In drei der vier Elemente der Fahrwiderstandsformel geht die Masse direkt ein (Abb. 6.12).

Nicht nur aus ökologischen Gründen ist Leichtbau in modernen Kraftfahrzeugen erstrebenswert. Neben niedrigeren Kraftstoffverbrauch und geringeren Emissionen werden damit wesentliche Kundenwerte geschaffen. Aus Kundensicht wird eine kontinuierliche Verbesserung der Fahreigenschaften wie Fahrzeugdynamik oder Fahrzeugagilität gewünscht. Bei gleichbleibender Motorisierung wird dies durch eine Reduzierung des Fahrzeuggewichts erzielt.

### 6.1.2.2 AUDI-Aluminium Space Frame – ASF

Das größte Gewichtsmodul im Fahrzeug bildet die Karosserie. Karosserieleichtbau als primärer Schritt z. B. in Form einer Vollaluminiumkarosserie sollte als Enabler für einen Gesamtfahrzeug-Leichtbau genutzt werden. Eine werkstoffgerecht konzipierte Vollaluminium-Karosserie bietet funktionsgleich eine Gewichtsreduzierung von über 40 % zum Stahlleichtbau. Diese Größenordnung ermöglicht sekundäre Leichtbaumaßnahmen, die ökonomisch wie ökologisch unbedingt genutzt werden müssen. So sind ohne Abstriche bei den Fahrleistungen kleinere Motoren einsetzbar. Weitere Gewichtserleichterungen resultieren aus geringeren Belastungen für Fahrwerk, Getriebe, Räder, Reifen, Bremsen, einer verkleinerten Tankanlage und einer angepassten Abgasanlage.

Die Analyse möglicher Leichtbauwerkstoffe bezüglich spezifischem Gewicht, Festigkeit, Steifigkeit, Crashverhalten, Verfügbarkeit und Energiebedarf zeigt im Kfz-Karosseriebau deutliche Vorteile für den Werkstoff Aluminium.

Der prozentuale Anteil von Aluminium im Karosseriebau hat ein starkes Wachstum. Viele Karosserien von Premiumanbietern, wurden und werden in materialhybrider Bauweise konzipiert. Der Materialmix von je ca. 50 % Gewichtsanteil für Aluminium und Stahl hat sich als funktional und wirtschaftlich gute Kombination für die Großserie etabliert. Mit der Einführung einer neuen Technologie müssen die Werkstoffeigenschaften zum Funktionsanspruch analytisch abgeglichen werden. Ein wesentlicher Dimensionierungsanspruch für Karosseriestrukturen ist der Erfüllung der Steifigkeitsansprüche geschuldet, die die Basis für ein gutes




**Abb. 6.12** Auswirkung der Fahrzeugmasse (Quelle: Carbon Composites)

Komfortniveau für Noise & Vibration bildet. In der Rahmenstruktur einer Karosserie, wird die Gesamtsteifigkeit des Fahrzeugs dimensioniert, der wesentliche Materialparameter zur Steifigkeitsdimensionierung ist nicht die Materialfestigkeit, sondern der Elastizitätsmodul. Dieser beträgt für Aluminium 70.000 N/mm$^2$ und das ist nur ein Drittel des Stahlwertes mit 210.000 N/mm$^2$. Mit einem Substitutionskonzept von Stahlblech zu Aluminiumblech können die Ansprüche an Steifigkeit, Akustik und Komfort demzufolge absolut nicht erreicht werden, wenn ein kundentaugliches Package und Leichtbau ebenfalls als Ziel definiert wurden.

Die Suche nach Lösungen zur Kompensation der großen E-Modul Differenz von Stahl zu Aluminium führte zu einem ganz neuen Konstruktionsprinzip, dem Audi-Aluminium Space Frame Konzept, genannt ASF*. In diesem Konzept werden möglichst alle Knotenbereiche in der Karosseriestruktur durch Aluminium Druckgussknoten gebildet, wodurch eine Steifigkeitserhöhung um gut 30 % erreicht wird. Zusätzlich werden die Anbindungen für Aggregate- und Fahrwerksteile an die Karosserie als Aluminium Gussteile ausgeführt. Die geometrische Freiheit in Rippenvarianten und Wandstärken bei der Auslegung von Gussteilen ermöglicht hohe örtliche Steifigkeiten in den Krafteinleitungsstellen. Damit wird die Geräuschanregung am Entstehungsort durch geringe Amplituden minimiert.

Im ASF-Konzept werden des Weiteren die Trägerprofile bevorzugt als geschlossene Strangpressprofile ausgeführt. Aufgrund nicht erforderlicher Verbindungsflansche sind mit Strangprofilen im gegebenen Package entsprechend höhere Trägheitsmomente gestaltbar, die zweite wichtige Einflussgröße für die Steifigkeitsdimensionierung. Die Freiheit von profilinternen Verstärkungsstegen in Stranggepressten Profilen ist ein weiteres Potenzial zur Kompensation des geringen E-Moduls.

Bevorzugt sollten die Aluminium Druckgussteile und die Aluminium Strangpressprofile durch geometrischen Kraftfluss verbunden werden. Auf diese Weise entsteht ein äußerst steifer und gleichzeitig leichter Gitterrohrrahmen mit hohem Sicherheitsniveau. Die offenen Flächen im ASF Gitterrohrrahmen werden mit Aluminiumblechen geschlossen. Diese dienen als steifigkeitswirksame Schubflächen.

Dieses Konstruktionsprinzip kann als Aluminium werkstoffgerechte Bauweise bezeichnet werden.

Das Ergebnis dieses werkstoffgerechten Konzeptes im Audi A8 führte zu einer außergewöhnlichen Produktqualität und der besten Leichtbaugüte. Die Leichtbaugüte ist wie folgt definiert:

$$\text{Leichtbaugüte } L = \frac{m_{\text{Ger}}}{c_1 \cdot A} \left( \frac{\text{kg}}{\text{Nm/Grad} \cdot \text{m}^2} \right) \cdot 10^3$$

$m_{Ger}$ – Gerippegewicht (ohne Türen und Klappen),

$c_1$ – Torsionssteifigkeit,

$A$ – Aufstandsfläche (Spur · Radstand).

Sie ist ein Maßstab dafür, mit wie wenig Masse bei gegebener Radaufstandsfläche welche Steifigkeit erreicht wurde. Mit 231 kg Karosseriegewicht ohne Türen und Klappen und einer Torsionssteifigkeit von 37.600 Nm/Grad erreicht die A8 ASF-Karosserie der dritten Generation eine Leichtbaugüte von 1,2 und ist damit eindeutig Klassenprimus. Die erreichte Gewichtseinsparung liegt gegenüber einer funktionsgleichen Stahlblechkarosserie bei ca. 45 %. Zu diesem Quantensprung primärer Gewichtsreduzierung sollten zwingend die zuvor genannten dadurch entstandenen sekundären Reduzierungsmaßnahmen ergänzt werden. Die sekundären Gewichtsreduzierungen können den Mehrpreis des Werkstoffs in etwa kompensieren.

Über diese Vorteile des Audi-ASF-Konzeptes bezüglich der Gewichtsreduzierungspotentiale und den damit verbundenen ökonomischen, ökologischen und fahrdynamischen Konsequenzen zeichnet sich die Aluminiumstruktur mit ausgezeichnetem Energieabsorptionsvermögen, idealen Recyclingvoraussetzungen und sehr günstiger energetischer Bilanzierung aus. Derivate können mit erheblich reduziertem Aufwand gegenüber einer konventionellen Karosseriebauweise realisiert werden.

### 6.1.2.3 Das Karosseriekonzept des Audi-ASF

Der Audi-Aluminium Space Frame wurde mit dem AUDI A8 im Jahr 1994 erstmals für ein Serienfahrzeug eingeführt. Dieses Karosseriekonzept wurde dann im A2, der 1999 auf den Markt kam, für den Großserieneinsatz weiterentwickelt. Das Produktportfolio der Fahrzeuge mit einer ASF-Karosserie umfasste bei Audi bis 2010 folgende Fahrzeugmodelle: Lamborghini Gallardo Coupé, Lamborghini Gallardo Spider, Audi TT Coupé, Audi TT Roadster, Audi R8, Audi R8 Spider und im A8-Segment die erste, zweite und dritte Generation. Aktuell sind ASF-Konzepte und/oder Komponenten dieser Bauweise bei allen Premiummarken im Karosseriebau im Einsatz. Die vorderen Federbeinaufnahmen werden zwischenzeitlich selbst in Stahlblechkarosserien bevorzugt in Aluminium Druckguss Konstruktionen ausgeführt.

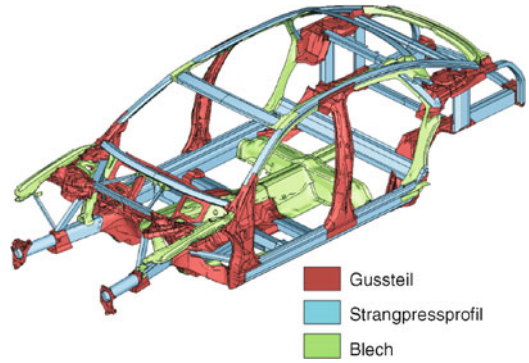



**Abb. 6.13** Spaceframe Audi A8 (D3). Das Materialkonzept

Der Material-Halbzeug-Mix beträgt bei einer Vollaluminium-Karosserie ca. je ein Drittel Gewichtsanteil für Druckgussteile, Strangpressprofile und Aluminiumbleche. Der ASF verwirklicht mit wenig Masse eine maximale Stabilität. Er wurde für höchste Steifigkeits-, Komfort- und Sicherheitsanforderungen dimensioniert. Konstruktive Merkmale sind multifunktionale Großgussteile, lange durchgehende Profile und ein hoher Anteil von geraden Strangpressprofilen.

Es werden nur an den Stellen gebogene Profile eingesetzt, wo die Außenhautform dies notwendig macht (Abb. 6.13).

Über die genannten konstruktiven Maßnahmen wird eine deutliche Reduzierung der Teilezahl erreicht. Dies verbessert einerseits den Komfort, weil weniger und steifere Verbindungsstellen zwischen den Bauteilen, andererseits wirkt es sich günstig auf die Kosten und die Fertigungsprozesse aus. Die bekannten Verbindungstechniken wie MIG-Schweißen, Nieten und Laserschweißen werden stetig weiter optimiert. Das Laserhybridschweißen vereint die Vorteile der beiden thermischen Fügetechnologien – MIG-Schweißen und Laserschweißen. Das MIG-Schweißen toleriert gewisse Toleranzbreiten und die geringere Wärmezufuhr des Laserschweißens bei gleichzeitig höheren Prozessgeschwindigkeiten führt zu guten Festigkeiten und mehr Effizienz.

Aluminiumlegierungen, die durch eine Wärmebehandlung auf ihre Sollfestigkeit getrimmt werden, haben bei thermischen Verbindungstechnologien grundsätzlich eine Wärmeeinflusszone mit reduzierter Streckgrenze. Im modernen Karosse-

rieleichtbau mit dem Werkstoff Aluminium geht der Trend zu kalten Verbindungstechniken. In der Großserie bei Audi haben sich als robuste und voll automatisierbare Verbindungstechniken folgende Technologien etabliert: das Stanznieten mit Halbhohlniet, das Vollstanznieten, das automatisierte Direktverschrauben auch FDS (Flow Drill Screws) genannt. Der FDS Prozess benötigt keine beidseitige Zugänglichkeit und ist somit ideal für Anbindungen an geschlossene Querschnitte.

### 6.1.2.4 Der Aufbau der ASF Karosserie A8 (D3)

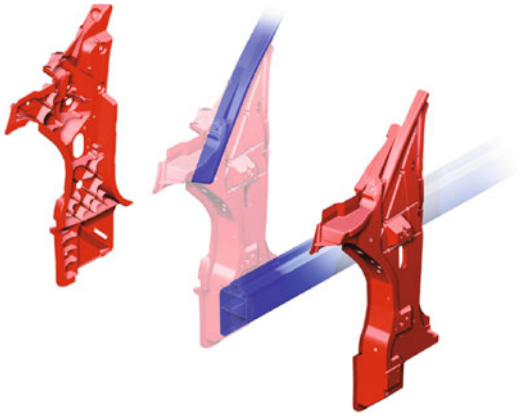
Der Aufbau beginnt mit dem Vorder- und Hinterwagen. Diese beiden Baugruppen werden zusammen mit dem Unterboden zu einem Spaceframe zusammengebaut. Zuletzt werden die einteilige Seite und das Dach mit der Struktur verbunden. Dann folgen die Hang On Teile wie Kotflügel, Türen und Klappen, bevor die komplettierte Karosserie nach dem Finish in den Lackierungsprozess eingesteuert wird.

Der Vorderwagen enthält als zentrales Bauteil das Großgussteil Wasserkasten. Dieses Bauteil hält die Klimaanlage, den Pedalbock, den Scheibenquerträger und es verbindet die beiden Säulen A rechts und links. Die Säule A wird aus zwei gossen Gusshalbschalen gebildet. Sie umschließen unten den Schweller und oben den durchgehenden Dachrahmen seitlich.

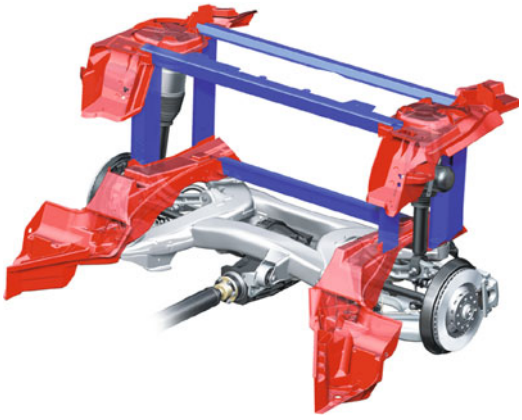
Diese beiden Strangpressprofile sind neben der Tunnelstruktur die zentralen Bauteile für die Biegesteifigkeit der Karosserie (◘ Abb. 6.14).

Die Längsträger sind in einen vorderen und hinteren Abschnitt unterteilt und werden durch ein Druckgussteil verbunden. Das Druckgussteil ermöglicht durch seine hohe Gestaltungsfreiheit die Vereinigung verschiedener Funktionen, wie die Aufnahmen des Hilfsrahmens, der Motortraverse, der Kotflügelbankabstützung und der Federbeinaufnahme. Der vordere Längsträger ist wie beim Vorgänger geschraubt ausgeführt, um eine einfache, in allen Werkstätten durchführbare, Reparatur zu ermöglichen.

Im Hinterwagen dominieren zwei zentrale Großgussteile, das Verbindungsteil Schweller/Längsträger und das Verbindungsteil Säule C/D.



◘ **Abb. 6.14** A-Säule



◘ **Abb. 6.15** Das Portal der Luftfederung hinten

Das Verbindungsteil Schweller/Längsträger ist das größte Druckgussteil. Es nimmt den kompletten hinteren Hilfsrahmen auf und verbindet den Längsträger hinten mit dem Schweller. Seine hohe Steifigkeit schützt beim Heckcrash den dazwischenliegenden Tank. Das Verbindungsteil Säule C/D nimmt die Luftfederung oben auf und an seiner Vorderseite den Gurtroller. Es bildet das Portal für die Federbeinaufnahme der Luftfederung (◘ Abb. 6.15).

Der Vorderwagen und der Hinterwagen werden mit dem Dachrahmen seitlich, dem Schweller, den Sitzquerträgern, dem Pfosten B und den Bodenblechen zu einem geschlossenen Space Frame zusammengeführt. Der Dachrahmen seitlich ist

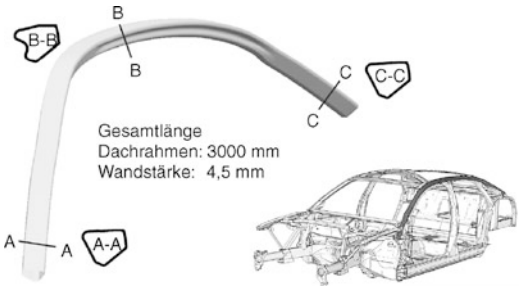



**Abb. 6.16** Hydrogeformter Dachrahmen seitlich, 3D gebogen

ein IHU (Innen-Hochdruck-Umformung) geformtes Strangpressprofil (Abb. 6.16).

Es bildet an den unterschiedlichen Stellen, je nach Notwendigkeit, verschiedene Querschnitte aus. Der Pfosten B ist ein multifunktionales großes Druckgussteil, dass neben den Scharnieranbindungen für die hintere Türe und der Anbindung des Schließbügels für die vordere Tür auch die hohen Anforderungen aus den Seitencrashdisziplinen erfüllen muss. Weiterhin ist der Pfosten B ein zentrales Bauteil für den Komfort. Zum Abschluss werden die einteilige Seite und das Dach zugeführt. Der A8 hat eine einteilige Seite, die ebenso wie das Dach über Laserschweißen mit der Struktur gefügt wird.

#### 6.1.2.4.1 Fortschritte in der ASF Architektur nach zwanzig Jahren Produktionserfahrung

Audi hat das ASF Konzept zu einer Reife entwickelt, die es ermöglicht, durch Definition des spezifischen Halbzeugmixes das jeweils produktspezifische Optimum in Funktion und Wirtschaftlichkeit zu bauen.

Aus den zehn im Markt befindlichen Audi Modellen mit dem ASF Karosseriekonzept soll diese Aussage an drei Beispielen erklärt werden (Abb. 6.17).

Im Vergleich stehen die Karosserien des Audi R8, des Audi A8 und des Audi TT, d. h. ein Sportwagen mit kleinen Produktionsvolumen, ein Premiumfahrzeug der oberen Komfortklasse und ein sportliches Alltagsfahrzeug in Großserie. Die ASF Struktur des Audi R8 hat das ideale Konzept einer investitionsarmen Karosserie für eine Manufakturfertigung. Hier sind 70 % des Strukturgewichtes in Strangpressprofilen hergestellt. Strangpressprofile sind die Aluminium Halbzeuge mit dem günstigsten Investitionsniveau. Das Steifigkeitsniveau konnte durch die große Flexibilität in den Rippenstrukturen der Profile optimal erreicht werden.

Die ASF Struktur der Audi A8 Karosserie bildet mit den Großen multifunktionalen Druckgussknoten die ideale Basis für Fahrzeuge des höchsten Komfort- und Sicherheitsanspruchs. Die ASF Struktur des Audi TT stellt bereits einen nächsten Trendsetter dar. Hier wurde erstmals ein ASF-Materialhybrid Konzept realisiert. Mit dem integrierten Hinterwagen in Stahlblech wird für dieses Sportfahrzeug die ideale Achslastverteilung definiert. Das TT Packagekonzept mit dem relativ kurzem Radstand und dem Frontmotorkonzept bedarf für sportliches Handling einen tief liegenden Schwerpunkt und Gewicht auf der Hinterachse. Statt zusätzliche Massen im Heck zu positionieren konnte Audi mit dem know how zu Materialhybridkonzepten einen harmonischen Kraftfluss und das gewünschte Achslastverhältnis mit einem Stahlblechhinterwagen in der ASF-Karosseriestruktur erreichen. Materialien unterschiedlicher Dichte zur jeweils besten Achslastverteilung am richtigen Ort zu platzieren, kann in allen Karosseriebereichen realisiert werden.

In der ASF-Karosserie des Audi A8, Modelljahr 2010, wird das Hybridkonzept aus funktionalen Gründen zum Einsatz gebracht. Der B-Pfosten benötigt zur Erfüllung der Beanspruchungen der Seitencrashanforderungen ein höchstfestes Material das für ein optimales Crashmanagement über die Bauteilhöhe unterschiedliche Dehnwerte oder Duktilitäten bedarf. Die Entscheidung fiel auf 22 MN 55, ein Warmumformstahl der durch partielle thermische Behandlung das Anforderungsprofil erbringt.

In den ASF Konzepten der Zukunft sind Integrationen aller Materialtechnologien zu erwarten. Magnesium und CFK haben den feasibilityproof bereits erledigt.

Wirtschaftlicher Leichtbau bedeutet: „Den richtigen Werkstoff funktionsabhängig in kleinster Menge werkstoffgerecht am richtigen Platz."

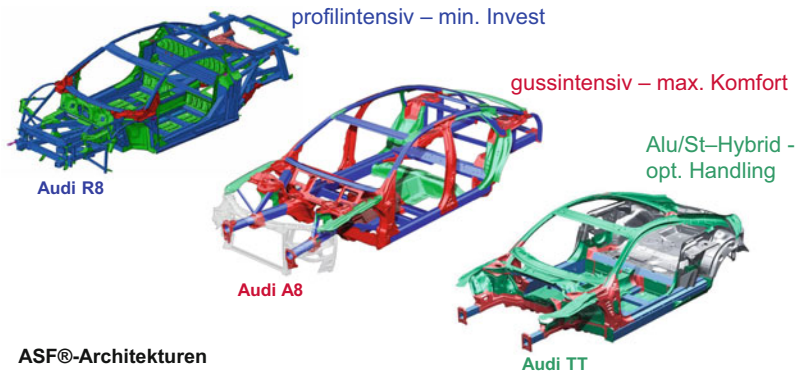



**Abb. 6.17** Materialeffizienz durch produktspezifische Karosseriekonzepte

### 6.1.2.5 Werkstoffe und Fertigungstechnologien

#### 6.1.2.5.1 Blechteile und Verfahren

Warmaushärtende Legierungen werden wegen der von Fließfiguren freien Oberfläche hauptsächlich für die Außenhaut verwendet. Entsprechende Legierungen werden jetzt auch im Strukturbereich eingesetzt und bieten dort höhere Festigkeiten und ein höheres Energieaufnahmepotenzial als die naturharten Legierungen.

Mit Umsetzung einer neuen Prozesskette, ohne gesonderte Warmauslagerung der Karosserie, kamen erstmalig neuentwickelte, schnellaushärtende Legierungen im Außenhautbereich zum Einsatz (Abb. 6.18).

Diese Legierungen auf Basis der AA 6016 A erreichen bei geringeren Temperaturen und Zeiten ein vergleichbares Festigkeitsniveau wie die herkömmlichen AA 6016 A-Legierungen. Im Innenbereich werden Legierungen nach AA 6181 A eingesetzt. Die Warmbehandlung erfolgt jetzt im Zuge der KTL-Trocknung in der Lackiererei (Tab. 6.3).

Weiterhin wird mit teilweisem Verzicht von Entfettungs- und Passivierumfängen der Aufwand

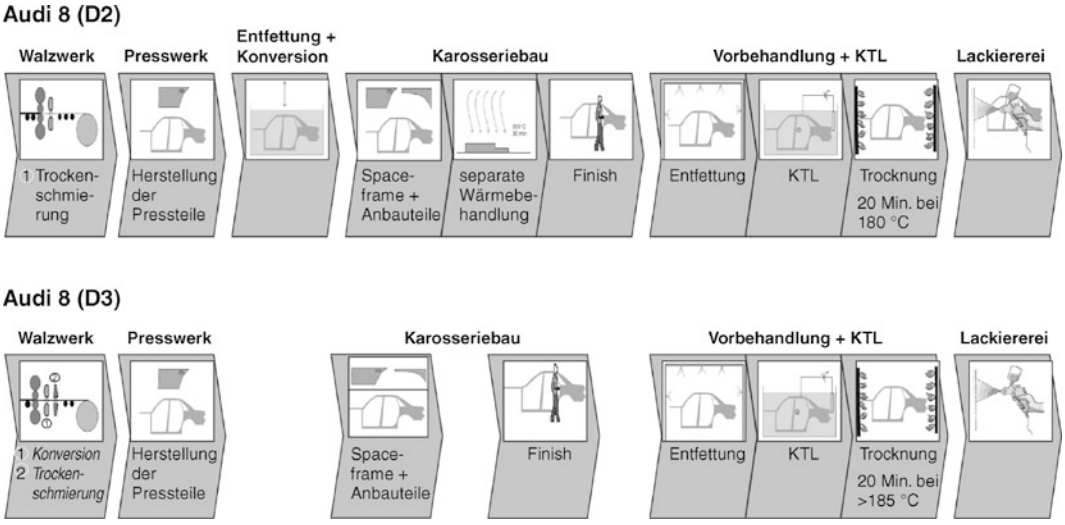



**Abb. 6.18** Fertigungsprozess Audi A8 – D3

**Tabelle 6.3** Wärmebehandlung in der Lackiererei

| Halbzeug | Legierung/Zustand | Zugfestigkeit $R_m$ in MPa | Dehngrenze $R_{p\,0,2}$ in MPa | Bruchdehnung $A_{80}$ in % |
|---|---|---|---|---|
| Blech | AA6016/T4 | $\leq 235$ | $\leq 130$ | $A_{80\,mm} \geq 24$ |
| | AA6016/T6 | $\geq 240$ | $\geq 200$ | $A_{80\,mm} \geq 12$ |
| | AA6016 schnellhärtend/T4 | $\leq 235$ | $\leq 130$ | $A_{80\,mm} \geq 24$ |
| | AA6016 schnellhärtend/T6* | $\geq 240$ | $\geq 200$ | $A_{80\,mm} \geq 12$ |
| | AA6181 A/T4 | $\leq 240$ | $\leq 140$ | $A_{80\,mm} \geq 23$ |
| | AA6181 A/T6 | $\geq 280$ | $\geq 210$ | $A_{80\,mm} \geq 10$ |

T6*: Wärmebehandlung mit 2 % Vordehnung bei > 185 °C/20 min



zur Herstellung der Karosserie weiter optimiert. Alle Blechlegierungen werden im Zustand T4 als Platine oder Coil angeliefert. Nach Umformung und Warmbehandlung wird die Streckgrenze auf über 200 MPa erhöht, was gegenüber einer nichtausgelagerten Außenhaut zusätzliche Gewichtspotenziale erschließt.

Gleichzeitig werden bleibende Beulen durch Hagelschlag oder lokale Beulen vom Zudrücken der Klappen oder vom Polieren vermieden.

Aluminiumbleche sind gegenüber den im Stahlbereich gebräuchlichen Tiefziehblechen in ihrer Umformbarkeit eingeschränkt. Die Erfahrungen aus vorangegangenen Audi-Aluminium-Karosserien erlaubte es aber, sehr komplexe Bauteilgeometrien, wie die der einteiligen Seitenwand zu realisieren (Abb. 6.19).



**Abb. 6.19** Seitenwand Audi A8–D3

#### 6.1.2.5.2 Strangpressprofile und Verfahren

Die hohe Gestaltungsfreiheit bezüglich der Profilquerschnittsgeometrie erschließt den Konstrukteuren eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, die weit über die konventionelle Blechbauweise hinausgehen. Strangpressprofile sind ideale Tailored Tubes.

Durch die Möglichkeiten von Wanddickenvariationen im Querschnitt, integrierten Flansche zur Anbindung anschließender Bauteile, oder der integrierbaren Stege bieten Strangpressprofile eine große gestalterische Freiheit für topologische Optimierungen und gute Leichtbaugüte. Somit sind die Strangprofile neben den Druckgussknoten ideale Kompensatoren zum geringen E-Modul und ein Muss in den aluminiumgerechten ASF Strukturen. Schließlich ergibt sich aus den geschlossenen Strangpressprofilen mit den realisierbaren Geometrie- und Funktionsintegrationen eine deutliche Reduzierung der Anzahl der Einzelteile einer Karosserie. Dies wirkt sich positiv bei der Reduzierung der Fügelängen aus.

Beachtet werden muss aber, dass das Fügen von Hohlprofilen typischerweise Fügeverfahren mit einseitiger Zugänglichkeit benötigt, es sei denn, die Verbindung wird über einen angepressten Flansch vorgenommen. Das Audi-ASF-Konzept bedingt ein anderes Aufbau- und Fügekonzept als eine

Blechschalenlösung. Voraussetzung für eine serienensichere, vollautomatisierte Aluminium-Verbindungstechnologie ist ein maximaler Spalt von etwa einem Drittel der minimalen Wanddicke der Profile zwischen den Fügestellen zweier Bauteile. Im Mittel weisen die ASF-Halbzeuge des A8 eine Wanddicke von 2,0 mm auf. Berücksichtigt man die Vorrichtungs- und Robotertoleranzen sowie den Schweißverzug aufgrund der Wärmeeinbringung, liegen die Toleranzanforderungen des Karosserieentwicklers hinsichtlich Formlinie und Profilquerschnitt im Bereich von ±0,3 mm.

Die Profile besitzen im Gegensatz zu den Blechhalbschalen des konventionellen Stahlkarosseriebaus bereits als Einzelteile eine sehr hohe Bauteilsteifigkeit und bieten damit keine Möglichkeit, in den Spannvorrichtungen die notwendige Spaltgeometrie im Verbindungsbereich sicherzustellen. Die erhöhten Anforderungen einer vollmechanisierten Fügetechnik im Karosseriebau bedingen Toleranzen, wie sie von den Strangpressprofilherstellern im Großserienmaßstab nur bedingt erzielt werden können. Daher müssen die Strukturbauteile des Audi-ASF teilweise durch einen nachgeschalteten Kalibrierprozess „in Form" gebracht werden.

Als Bauteilwerkstoffe kommen ausschließlich Legierungen aus dem Legierungssystem AlMgSi, ähnlich der EN-AW 6106, zum Einsatz. Die Abschreckung der Profile nach dem Strangpressen geschieht mit den Medien Luft, Wasser oder einem nebligem Gemisch. Nach der Warmbehandlung erreichen Bauteile aus Legierungen dieser Spezifikation Zugfestigkeiten um 200 MPa, Streckgrenzen von zirka 100 MPa und Dehnungen (A5) um 25 %.

**Kalibrierung und Innenhochdruckumformung** Die Toleranzanforderungen von ±0,3 mm an den Profilquerschnitt, aber auch an die Formlinie, bedingen einen an das Strangpressen anschließenden Kalibrierprozess. Das Innenhochdruckumformen gehört zu den wirkmedienunterstützten Verfahren. Die Strangpressprofile werden in einem in Ober- und Unterteil geteilten Werkzeug, welches der Endkontur des Bauteils entspricht, mit einem Innendruck bis zu 1500 bar beaufschlagt. 4-Säulen Pressen mit einer Schließkraft bis zu 5500 t übernehmen die Zuhaltung der Werkzeuge.

**Neue Verfahren: Runden im Strangpressen** Als neues Verfahren wird im A8 erstmals ein Strangpressprofil eingesetzt, welches direkt im Extrusionsprozess gerundet wurde und einen separaten Streckbiegevorgang überflüssig macht. Beim Runden im Extrusionsprozess wird das auslaufende, rund 550 °C heiße Strangpressprofil durch Führungsrollen auf die gewünschte Biegekontur gebogen.

Dieses Verfahren hat neben den einfachen, kostengünstigen Formgebungswerkzeugen den Vorteil, dass durch den Rundungsvorgang keine inneren Spannungen entstehen, die das Potenzial weiterer notwendiger Umformungen oder die Belastbarkeit reduzieren würden. Des Weiteren erzeugt der Prozess keine Einfallstellen in der Profiloberfläche. Der mögliche Verzicht auf einen nachfolgenden Streckbiegevorgang reduziert zusätzlich die Fertigungskosten.

### 6.1.2.5.3 Gussteile und Verfahren

Der prozentuale Gewichtsanteil der Gussteile in der A8-Struktur stieg im Gegensatz zum Vorgängermodell von zirka 27 % auf etwa 34 % an. Dies gelang bei einer deutlich reduzierten Teilezahl. Die im A8 (D3) eingesetzten multifunktionalen Großgussteile stellen eine konsequente Weiterentwicklung der Druckgussteile dar. Es wurde großes Augenmerk auf die Funktionsintegration und der Verringerung der Teileanzahl gelegt. Vorteile der Teilereduktion liegen insbesondere im reduzierten Logistikumfang. Weitere Kostenersparnisse werden durch den reduzierten Fügetechnikbedarf erzielt. Durch die Integration vieler Bauteile einer Schweißgruppe auf ein oder zwei Druckgussteile werden Fügetoleranzen vermieden und die Baugruppengesamttoleranz wesentlich verbessert.

**Vakuum-Druckguss** Dünnwandige Formgussteile für den Automobilbau, hergestellt in einem Vakuum-Druckgussverfahren, werden bei Audi seit 1993 in Karosseriestrukturen verbaut. Die Vorteile liegen auf der Hand. Durch das beanspruchungsgerechte, dreidimensional mögliche Anpassen der Wanddicken an die Betriebslastanforderungen und durch die lokale Versteifung durch angegossene Rippen ist es möglich, eine optimale Kombination von Gewicht und Funktionalität zu erzielen. Das

**Tabelle 6.4** Guss-Werkstoffe im A8-Spaceframe

| Halbzeug | Legierung/Zustand | Zugfestigkeit $R_m$ in MPa | Dehngrenze $R_{p\,0,2}$ in MPa | Bruchdehnung $A_5$ in % |
|---|---|---|---|---|
| Guss | GD-AlSi10Mg | ≥ 180 | 120–155 | ≥ 15 |
| | GD-AlMg3Mn | ≥ 180 | 120–155 | ≥ 15 |
| | AlSi7Mg Sandguss | ≥ 200 | ≥ 160 | ≥ 7 |



Verfahren zur Herstellung dünnwandiger duktiler Strukturgussteile ist der Vakuum-Druckguss. Dieses Verfahren ermöglicht ein Materialgefüge das kaum Lunker und Poren hat und schweißbar ist. Das vergossene Material ist eine wärmebehandelbare Legierung, die Teile mit guten mechanischen Eigenschaften ermöglicht.

Das Verfahren verbindet zudem eine hohe Produktivität mit der Fähigkeit zur Herstellung von „near-netshape"-Teilen. Eine Übersicht über die verwendeten Gusswerkstoffe gibt folgende Tab. 6.4.

### 6.1.2.6 Fügeverfahren

Das Fügen der Einzelteile zur Karosseriestruktur gehört zum Kerngeschäft eines Automobilherstellers. Da das Audi Space Frame-Konzept sich grundsätzlich von einem selbsttragenden Blechkonzept unterscheidet, ist naturgemäß sowohl die Aufbaufolge als auch die Fügetechnik unterschiedlich. Gegenüber den im ersten A8 (D2) eingesetzten Fügeverfahren wurden im neuen A8 (D3) weiterentwickelte Technologien, wie das MIG-Schweißen, Stanznieten und Rollfalzkleben, aber auch neue Fügetechnologien, wie das Laserstrahl- und das Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen, eingesetzt. Die beim ASF angewandten Verfahren sollen hier mit ihren spezifischen Eigenschaften näher erläutert werden.

#### 6.1.2.6.1 MIG-Schweißen mit Impulslichtbogen

Beim MIG-Schweißen wurde ein Automatisierungsgrad von > 80 % erreicht. Mit der neuen Stromquellengeneration wird die Reproduzierbarkeit der Güte von Schweißverbindungen deutlich erhöht. Die Impulstechnik erlaubt auch bei Dünnblechen ($t$ = 0,9–1,5 mm) die Verwendung von verhältnismäßig dicken Drahtelektroden (∅ 1,2 mm), wodurch die Drahtförderung verbessert und somit prozesssicherer wird. Durch den Einsatz von Großspulgeräten zur Förderung des Zusatzwerkstoffes wird die Rüstzeit zum Wechseln der Drahtrollen verringert. Gleichzeitig wird mit konstanten Eigenschaften der großen Gebinde die Stabilität des Schweißprozesses positiv beeinflusst. Ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Prozesssicherheit liegt in der Anwendung von Systemen zur automatischen Brennervermessung und Korrektur des Roboterprogramms. Mit diesen Systemen werden eventuelle Veränderungen im laufenden Schweißprozess online erfasst und in der Ablaufsteuerung des Roboters berücksichtigt. Das MIG-Schweißen wird vorwiegend zum Fügen von Strangpressprofilen, Druckgussbauteilen und zum Verbinden von Strangpressprofilen mit Gussbauteilen eingesetzt. Die Fügegeschwindigkeit kann je nach Wanddicken bis auf zirka 1 m/min erhöht werden. Die durch diesen Prozess erreichte Verringerung der ins Bauteil eingebrachten Energie wirkten sich positiv auf die Maßhaltigkeit der Baugruppen aus.

#### 6.1.2.6.2 Stanznieten mit Halbhohlniet

Das Stanznieten hat sich als punktförmige Verbindungstechnik bereits 1993 bei der ersten Audi A8 Aluminium-Space-Frame-Karosserie gegenüber Widerstandspunktschweißen und Clinchen durchgesetzt. Als kraft- und formschlüssige Verbindung bietet das Stanznieten gegenüber anderen punktförmigen Fügeverfahren deutlich höhere statische und dynamische Verbindungsfestigkeiten mit sehr hohem Arbeitsaufnahmevermögen. Weitere Vorteile sind das Herstellen von wärmearmen Verbindungen mit geringem Verzug der Bauteile. Mit 2400 Stanznieten kommen in der neuen A8 (D3) Al-Space-Frame Karosserie nun mehr als doppelt so viele Verbindungen als in der ersten ASF-Karosserie zum Einsatz. Die Technologie wird großflächig sowohl in der Karosseriestruktur als auch bei

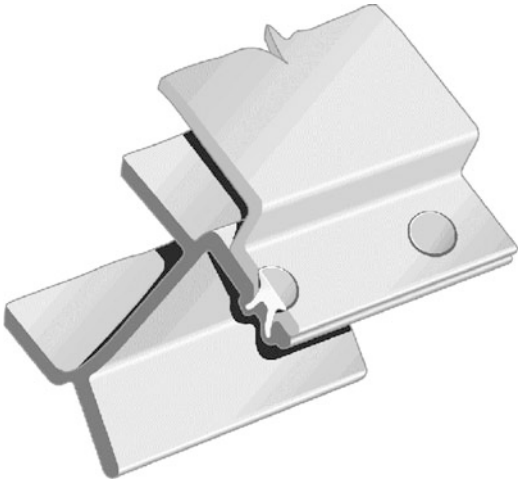


**Abb. 6.20** Stanznieten mit Halbhohlniet

der Fertigung von Türen, Front- und Heckklappe zum Einsatz gebracht.

Dabei müssen Bleche, Strangpressprofile und Druckgussteile in Kombination der unterschiedlichen Legierungen in einer Gesamtmaterialstärke von 2,0–6,0 mm verbunden werden. Für die rund 100 verschiedenen Werkstoff- und Materialstärkenkombinationen mit unterschiedlichen Oberflächen kommen lediglich drei unterschiedliche Nietgeometrien mit gleicher Härte zum Einsatz. Bei einigen Anwendungen werden die Verbindungen dreilagig ausgeführt (Abb. 6.20).

Um die hohen Qualitätsstandards im Serienprozess einhalten zu können, wurde die Stanzniettechnologie über die Jahre kontinuierlich weiterentwickelt. Durch Optimierungen des Stanznietequipments und gezielter Online-Prozessüberwachung kann heute eine nahezu hundertprozentige Prozesssicherheit gewährleistet werden. Die Störhäufigkeit bei der Nietzuführung liegt dabei unter 0,25 ‰. Im Karosseriebau des neuen Audi A8 wurde gezielt die Automatisierung und die Fertigungsflexibilität in der Stanzniettechnik weiterentwickelt. Weiterhin werden bei automatisierten Anwendungen erstmalig auch klappbare C-Rahmen zum Einsatz gebracht, um das Einschwenken der Fügezangen in komplexe Bauteilstrukturen zu erleichtern und Störkonturen in der Anlage zu verringern.

#### 6.1.2.6.3 Vollstanznieten

Wirtschaftlicher Leichtbau sollte berücksichtigen, dass zusätzliche Abdeckungen über Verbindungsnähte vermieden werden können. Mit diesem Ziel wurde die Verbindungstechnik der Vollstanznieten entwickelt. Dieser Niettyp kann an der Sichtseite völlig bündig zur zu verbindenden Bauteiloberfläche ausgeführt werden. Im Falle einer gezielten Anwendung konnten die großen Kunststoffabdeckungen der Wasserrinnen eines Sportback Fahrzeugs entfallen. Der Nietprozess verlangt eine beidseitige Zugänglichkeit. Die Nieten werden aktuell spanend gefertigt und haben demzufolge hohe Stückkosten.

#### 6.1.2.6.4 Automatisiertes Direktverschrauben (FDS – Flow Drill Screws)

Ein besonderes Funktionsmerkmal der ASF-Bauweise ist die Bildung einer stabilen Rahmenstruktur aus steifen leichten Aluminium-Druckgussteilen und im Wesentlichen geschlossenen Strangprofilen. Die freien Flächen werden mittragend durch Schubfelder geschlossen. In dieser Bauweise ist mit dem Werkstoff Aluminium die beste Leichtbaugüte erzielbar. Im ASF Konzept entstanden viele Verbindungen gegen geschlossene Querschnitte. Dies verlangt Verbindungstechniken mit einseitiger Zugänglichkeit. Anfang 2003 setzte Audi erstmals eine neue für diese Prämissen hervorragend geeignete Verbindungstechnologie ein, die Flow Drill Screw Technologie.

Basis ist eine hochfeste Zink Nickel beschichtete Stahlschraube deren Spitze nach einem Patent der Firma EJOT als Bohrspitze ausgebildet ist. Das klemmseitige Bauteil ist vorgebohrt bzw. gelocht, das untere Teil ist jeweils Aluminium.

Mit einer Schrauberdrehzahl von etwa 3000 Upm und einem Anpressdruck von größer 1000 N schmilzt die Schraubspitze das Aluminium auf und das Gewinde furcht sich sein Gegengewinde direkt in das Aluminium.

Die Vorteile dieser Verbindungstechnologie sind:

- automatisierbarer Prozess,
- Verbindung für einseitige Zugänglichkeit,
- das klemmseitige Bauteil ist frei in der Materialwahl (Alu., Stahl, CFK, etc.),
- flexibles Materialspektrum,

- Vermeidung von Wärmeeinbringung in die Bauteile,
- Vermeidung von Verzug im Bauteil.

Die belastenden Kriterien sind das Zusatzgewicht der Verbindungselemente, die derzeit noch notwendigen Vorlöcher in den klemmseitigen Bauteilen und die hohen Steifigkeitsanforderungen sowohl am Basisbauteil als auch in der Roboteranlage.

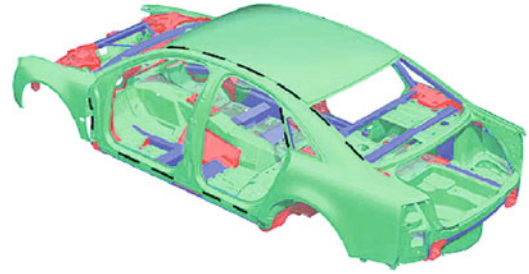


#### 6.1.2.6.5 Laserstrahl-Schweißen

Im Audi A8 werden Nd:YAG-Festkörperlaser mit 4 kW Ausgangsleistung eingesetzt. Neben dem günstigen Absorptionsverhalten des Laserstrahls gegenüber Aluminiumoberflächen bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1064$ nm ist diese spezifische Wellenlänge zur Strahlführung mittels flexibler Glasfaserkabel vom Strahlerzeuger zum Bauteil geeignet. Damit ist dieses Lasersystem sehr gut mit Industrierobotern kombinierbar. Die hauptsächlichen Vorteile des Laserstrahlschweißens gegenüber mechanischen Fügeverfahren sind linienförmige anstelle punktförmiger Verbindungen, geringere Flanschbreite bei Überlappverbindungen und einseitige Zugänglichkeit beim Fügen. Verglichen mit anderen Schweißverfahren ist der Laser-Prozess aufgrund der bei den gegebenen Blechdicken höheren, erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten (3,3–5,5 m/min), der geringeren Wärmeeinbringung und damit geringerem Bauteilverzug und den geringeren Anforderungen an einen definierten Oberflächenwiderstand vorteilhaft. Insgesamt werden rund 20 m Laser-Verbindungslänge im A8-Spaceframe realisiert. Beispiele hierfür sind die Anbindung der Bodenbleche an die MIG-geschweißte Strangpressprofil-Rahmenstruktur, die Anbindung der einteiligen Seitenwand an Dachrahmen und Schweller und die Anbindung des Daches an die Dachrahmen (◘ Abb. 6.21).

#### 6.1.2.6.6 Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen

Über die Kombination der beiden Fügeverfahren MIG- und Laserstrahlschweißen lassen sich diverse synergetische Effekte erzielen, welche im Anwendungsfall die fertigungstechnischen Grenzen heutiger thermischer Fügeverfahren hinsichtlich Nahtqualität, Produktivität und Wirtschaftlichkeit erweitern. Im Vergleich zum Laserstrahlschweißen



◘ **Abb. 6.21** Laserstrahl-Schweißen

wird die Prozesssicherheit und die Überbrückung von Spalten mit Zusatzwerkstoff gesteigert, woraus sich hohe Schweißnahtqualitäten ergeben. Der Zusatzwerkstoff wird prozesstechnisch trivial über die abschmelzende Drahtelektrode des MIG-Prozesses dem Schmelzgut zugeführt.

Im Vergleich zum konventionellen MIG-Schweißen wird die Schweißgeschwindigkeit und die Einschweißtiefe signifikant gesteigert und der Lichtbogenprozess stabilisiert. Im Anwendungsfall wird die Anbindung von diversen Blechteilen auf das Strangpressprofil Dachrahmen mittels Hybridschweißen umgesetzt (◘ Abb. 6.22).

Insgesamt werden zirka 5 m Nahtlänge je Fahrzeug realisiert. Bei der notwendigen hohen Materialdickenpaarung von 2 auf 4 mm kann selbst gegenüber dem Laserstrahlschweißen der Energieeintrag in das Bauteil über die Steigerung der Schweißgeschwindigkeit reduziert werden, woraus minimierte thermische bedingter Verzug der Baugruppe resultiert.

#### 6.1.2.6.7 Rollfalzen + Kleben

Die Verbindung von Innen- und Außenblech bei Türen und Klappen wird im A8 (D3) durch Rollfalzen und Kleben mittels robotergeführter Werkzeuge realisiert. Vorteile des Verfahrens sind die kurze Einarbeitungszeit, die hohe Flexibilität und eine bessere Qualität und Anmutung des Falzes. Erstmalig wird eine Vorhärtung des Klebers durch ein integriertes induktives Gelieren vorgenommen.

### 6.1.2.7 Reparaturkonzept

Für die bisher entwickelten Aluminiumfahrzeuge der Audi AG wurden die Belange des Kundendienstes direkt ins Karosseriekonzept integriert.



**Abb. 6.22** Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen

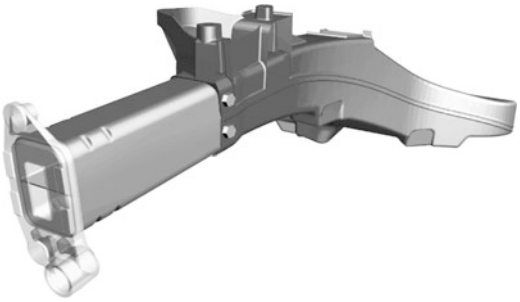


**Abb. 6.23** Reparaturlösung – geschraubter Längsträger

Damit war es möglich, konsequent ein auf schnellen und kostengünstigen Service ausgerichtetes Gesamtkonzept zu realisieren.

Steifigkeitsstaffelungen in den unfallgefährdetsten Karosseriebereichen sollen die Schadenseindringtiefe möglichst gering halten. Die Deformationskraft des geschraubten vorderen Längsträgers liegt unter der Deformationskraft des anschließenden hinteren Längsträgers und diese wiederum unter der Deformationskraft der Fahrgastzelle (Abb. 6.23).

Im Bereich der Fahrzeugseite wurde die Karosseriestruktur unter anderem durch das Großgussteil Säule B so steif ausgelegt, dass die Verformungstiefe bei einem Seitenaufprall gering bleibt.

Die Auslegung der Karosseriestruktur mit vorprogrammierten, definierten Verformungszonen minimiert nach einem Unfall Richtvorgänge am Fahrzeug und gibt die Reparaturabschnitte konstruktiv vor. Hierdurch werden die Reparaturzeiten verringert und die Instandsetzungskosten liegen trotz neuer Karosserietechnik günstiger oder im gleichen Rahmen wie bei üblichen Stahlkarosserien.

Für die Instandsetzung der Space-Frame-Karosserie des A2 kommen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Halbzeugarten Blech-, Guss- und Strangpressteile unterschiedliche Konzepte zum Einsatz: Blechteile mit geringen Verformungen können rückverformt werden. Die Rückverformung geschieht unter gezielter Wärmezufuhr. Beulen lassen sich mit einem neu entwickelten Werkzeug durch ein dem Bolzenschweißen ähnliches Verfahren problemlos beseitigen. Hierzu wird ein Bolzen im Bereich der Beule aufgeschweißt und die Beule mit dem Bolzen herausgezogen. Anschließend wird der Bolzen durch Abschleifen entfernt.

Stärker verformte Bleche lassen sich entweder komplett oder auch abschnittsweise austauschen. Als Verbindungstechniken werden Nieten in Verbindung mit Kleben (kaltaushärtende Zweikomponentenkleber) eingesetzt. Das Spachteln und Lackieren entspricht der Vorgehensweise bei Stahlblechfahrzeugen. Blechreparaturen können von jedem dafür ausgerüsteten und ausgebildeten AUDI-Händlerbetrieb durchgeführt werden.

Beschädigte Gussteile müssen generell erneuert werden. Aus Festigkeitsgründen ist eine Rückverformung nicht zugelassen, da aufgrund der hohen Steifigkeit die Gefahr einer Rissbildung besteht. Als Fügeverfahren kommen Schutzgasschweißen (MIG), Nieten und Kleben zum Einsatz.

Strangpressprofile müssen bei Beschädigung ausgetauscht werden, da eine Rückverformung hier unkontrolliert abläuft. Der Austausch findet je nach

Art der Beschädigung abschnittsweise unter Verwendung von Muffen im Trennungsbereich oder aber komplett statt. Die ausgetauschten Profilabschnitte bzw. komplette Profile werden wiederum durch Schutzgasschweißen (MIG) gefügt.

Laserstrahl-Schweißnähte werden im Reparaturfall durch MIG-Schweißen oder durch Blindnieten mit zusätzlichem Kleben ersetzt. Zum Entfernen der Lasernaht wird diese ausgeschliffen und die so voneinander getrennten Teile gelöst.



#### 6.1.2.8 Energiebilanz

Die Verbesserung der Umweltverträglichkeit steht heute, insbesondere bei Kraftfahrzeugen, im Mittelpunkt des Interesses. Hierzu ist es erforderlich, den gesamten Produktlebenszyklus zu betrachten und zu optimieren. Dabei gilt es durch effiziente Nutzung regenerativer Ressourcen und niedrige Schadstoffemissionen die Umweltauswirkungen zu minimieren. Dies betrifft den gesamten Produktzyklus, von der Werkstoffgewinnung und Produkterzeugung über die Produktnutzung bis zum Recycling für den nächsten Zyklus bzw. zur umweltschonenden Entsorgung.

Studien zeigen, dass der überwiegende Energieverbrauch eines Fahrzeuges durch den Fahrbetrieb bestimmt wird.

Das $CO_2$ Äquivalent von einem kg Stahlblech zu einem kg Primär-Aluminiumblech ist 1 : 6. Unter Berücksichtigung der Leichtbaunutzung des Aluminiums von mehr als 40 % pro Karosserie, dem Produktionsschrott im Walzwerk und dem Produktionsschrott im Presswerk, ist das $CO_2$ Äquivalent für die Herstellung einer Pkw-Karosserie aus Primäraluminium etwa doppelt so hoch wie das einer vergleichbaren Stahlblechkarosserie. Durch den Fahrzeugminderverbrauch von ca. 0,35 Liter/100 km liegt die Amortisationsstrecke je nach Szenario zwischen vierzigtausend und neunzigtausend Kilometern. Am Fahrzeuglebensende liegt bei diesem Szenario bereits eine sehr positive Energiebilanz vor. Der Energiebedarf zur Wiederaufbereitung des Aluminiums für eine zweite bis $n$-te Nutzung beträgt nur bis zu 15 % der Ersterzeugung und liegt damit günstiger als die Stahlwiederaufbereitung. Damit ist in jeder Zweitnutzung des Werkstoffs die Energiebilanz schon zum Gebrauchsbeginn besser als die konventionelle Bauweise und die Verbrauchsreduzierung über die Lebenszeit wiederholt sich mit jedem Recycling mit dem erneuten Einsatz des Materials.

Der Materialleichtbau sollte ab einer lohnenswerten Größe als Initiator einer sekundären Gewichtsreduzierung genutzt werden. Mit diesem konzeptionellen Ansatz werden viele Kilogramm Material erst gar nicht erzeugt. Dies ist in eine ganzheitliche Energiebilanz einzubeziehen. Ökologisch ist der Karosserieleichtbau mit Aluminium ausschließlich sehr positiv im Vergleich zum konventionellen Karosseriebau mit Stahlblech.

### 6.1.3 Leichtbaulösungen im Karosseriebau

In den letzten beiden Dekaden wurden sehr unterschiedliche Konzepte für Leichtbaulösungen im Karosseriebau entwickelt und teilweise in Serienfahrzeugen umgesetzt. Dabei reichen die Konzepte von klassischen Stahlschalenkonstruktionen, bei denen immer weiter ausdifferenzierte Stahlgüten verwendet werden, bis hin zu aus Kunststoffen und Metallen hergestellten bionischen Strukturen, basierend auf generativen Fertigungsverfahren.

#### 6.1.3.1 Die Zukunft der Stahlkarosserie „FutureSteelVehicle“

Die weltweit am meisten hergestellten Fahrzeugkarosserien, gemessen über alle Fahrzeughersteller, beruhen auch weiterhin auf einem Stahlschalenkonzept. Durch die Verfügbarkeit neuer Stahlsorten, wie Dual- und Komplexphasenstähle sowie warmumgeformte Güten, sind in den letzten Fahrzeuggenerationen signifikante Gewichtseinsparungen in der Karosserie von ca. 10 % und mehr erzielt worden. Mit den daraus resultierenden Sekundäreffekten ergibt sich trotz zunehmender Anforderungen an Komfort, Sicherheit und Fahrzeugausstattung die Möglichkeit, das Gesamtgewicht des Fahrzeuges zu reduzieren. Die dabei erzielten Gewichtseinsparungen in der Karosserie werden zukünftig allerdings nicht ausreichen, nachdem zur Erreichung gesetzlicher Emissionsanforderungen (Verbrauchsanforderungen) weitere 20 % Gewicht in der Karosserie zu reduzieren sind. Dies gilt auch unter Einbeziehung weiter gestiegener Sicherheitsan-

forderungen an die Karosserie, wie dem US NCAP Small Overlap Test.

Die im Wettbewerb stehenden Strukturvarianten, von der Stahlschalen- über die Aluminiumkarosserie, bis hin zu Faserverbundkarossen und deren Mischformen, werden nachfolgend hier besprochen.

Ein weltweites Konsortium von Stahlfirmen hat in einer Vielzahl von Studien den Werkstoff Stahl im Hinblick auf Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Kosten und sein Leichtbaupotential bewerten lassen. Dazu wurden im Rahmen der ULSAB-Studien drei eng verzahnte Einzelentwicklungsprojekte über den Zeitraum von 1994 bis 2001 durchgeführt.

ULSAB ([54]) ist das erste Projekt, das 1994 von einem Konsortium aus 35 Stahlfirmen in Auftrag gegeben wurde. Auf dem Package einer viertürigen, fünfsitzigen Mittelklasse-Limousine wurden die Möglichkeiten des Einsatzes von modernen Stahlwerkstoffen für den Karosserierohbau zur Erreichung einer maximalen Gewichtserleichterung untersucht. Zur Definition der funktionalen Ziele und zur Ermittlung von Vergleichswerten wurde ein Benchmark von insgesamt 32 Fahrzeugen bezüglich Gewicht, Steifigkeit, Package und Konzept durchgeführt.

1997 startete das Projekt ULSAC ([55]) mit gleicher Aufgabenstellung für Fahrzeugtüren undklappen. Die Entscheidung fiel bei diesem Konzept zugunsten einer rahmenlosen Tür und eines modularen Montagekonzepts. Dieser Ansatz wurde mit einer weiteren Studie (ULSAS) für Fahrwerkskomponenten im Jahr 2000 ergänzt (Ultra-light Steel Auto Suspension), und ([56]) im Jahr 2001 vorläufig abgeschlossen.

In den folgenden Jahren wurde mit der Studie „FutureSteelVehicle“ ([57]) eine Untersuchung zu Fahrzeugkonzepten mit alternativen Antriebssystemen angestoßen, die im Jahr 2011 veröffentlicht wurde. Dabei wurde ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, in dem fortschrittliche Antriebstechnologien in einer neuen, vollständig in Stahlgüten konstruierten, gewichtsoptimierten Karosseriearchitektur realisiert wurden.

Dabei wurden die Rahmenbedingungen entsprechend neuer und zusätzlicher Ziele angepasst und Abgasgesetze sowie erweiterte Sicherheitsanforderungen für das Jahr 2020 berücksichtigt. Die Projekte fokussierten, neben der Entwicklung, Planung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auf die Herstellung von Prototypen zu Versuchs- und Demonstrationszwecken und zur Validierung der Simulationsergebnisse.

**Zielsetzung** Durch den Einsatz moderner Stahlwerkstoffe, der zugehörigen Formgebungs- und Fügeverfahren, gewichtsorientierter Packageauslegung und nicht zuletzt durch werkstoffgerechte Konstruktion soll der Nachweis erbracht werden, dass eine erhebliche Gewichtserleichterung gegenüber dem Durchschnitt der Benchmark-Karosserien realisierbar ist.

In der Studie FutureSteelVehicle ([57]) wurde nach den erfolgreichen Projekten ULSAB und ULSAB-AVC die Annahme getroffen, dass batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) größere Anforderungen an das umzusetzende Leichtbaupotential setzen, als Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben (◘ Abb. 6.24) Dies ist zumindest richtig, soweit sich diese Anforderung auf die Kompensation der zusätzlichen Massen, resultierend aus der Batterie für langstreckentaugliche BEVs, bezieht.

Umgesetzt wurde in der FutureSteelVehicle Studie eine Stahl-Leichtbaukarosserie für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug mit 3 Derivaten als BEV[1], PHEV[2] und FCEV[3].

Im Rahmen dieses Projektes wurde der gesamte Entwicklungszyklus einer konventionellen Serienfahrzeugentwicklung für den Karosseriebereich durchlaufen. Basierend auf der Spezifikation für eine 4-türige Stufenheck- bzw. Schrägheckklimousine wurde ein Package ausgelegt und in einem modernen Styling umgesetzt. Das Projekt umfasste die Konstruktion und rechnerische Simulation des Steifigkeits-, Festigkeits- und Crashverhaltens sowie die Optimierung der Aerodynamik mittels Computational Fluid Dynamics (CFD). ([57])

Die globalen Anforderungen für die gesetzlichen Grenzwerte beim 0°-Frontcrash nach US-NCAP[4], 50% Offset Crash nach EURO-NCAP[5],

[1] Battery Electric Vehicle.
[2] Plug-in Hybrid Electric Vehicle.
[3] Fuel Cell Electric Vehicle.
[4] US New Car Assessment Program.
[5] European New Car Assessment Program.

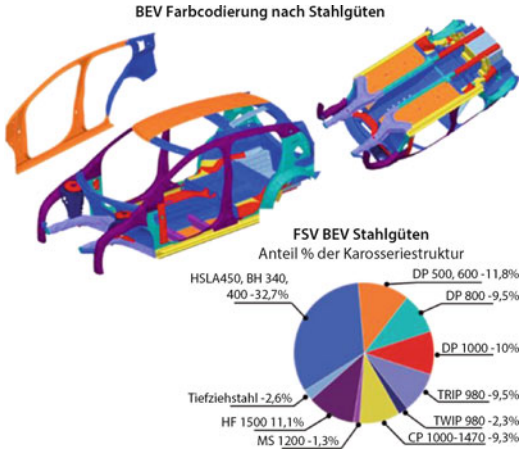



**Abb. 6.24** Stahlgüten für FutureSteelVehicle (FSV) Konzept für eine BEV Karosserievariante [Quelle Worldautosteel.org (BEV, FCEV, PHEV)]

dem Heckcrash mit 70 % Überdeckung (FMVSS 301 Rear) und dem Heckcrash nach ECE R32 sowie dem Seitencrash mit der Barriere (IIHS Side) und dem Seitenaufprall mit Pfahl nach FMVSS 214 wurden erfüllt. Weiterhin sind die Anforderungen des Dacheindrücktests (FMVSS 216a) und der Front- und Hecktest für die Versicherungseinstufung bei niedrigen Geschwindigkeiten zu bestehen.

Die Struktur wurde mittels linearer/statischer und nicht-linearer/ dynamischer Topologieoptimierung und weiteren Verbesserungen in den Subsystemen soweit rekursiv überarbeitet, bis die oben genannten globalen Crashanforderungen erzielt wurden. Aus diesem Ergebnis wurde die detaillierte Auskonstruktion des Fahrzeugs abgeleitet und das finale Design bestätigt.

In einem weiteren Schritt wurde die Auswahl der Stahlgüten optimiert und die Blechdicke auf ein die Kriterien erfüllendes Minimum hin optimiert. Durch die Optimierung der ausgewählten Stahlgüten konnte die mittlere Festigkeit der Blechgüten vom Projekt ULSAB (Rm 413 MPa) zum FutureSteelVehicle auf (Rm 789 MPa) gesteigert werden. Dies führte zu einer Reduktion der mittleren Blechstärke von 1,16 mm im ULSAB auf einen Wert von 0,98 mm im FutureSteelVehicle. Dies entspricht einer Reduzierung um gut 15 %, die sich in der Fahrzeugmasse wiederfindet.

Erzielt wurden diese Reduzierungen durch den sogenannten 3G-Entwicklungsansatz (**G**eometry, **G**rade, **G**auge), mit dem die Stahlgüten und Materialdicken entlang der Lastpfade in den verschiedenen Belastungsfällen optimiert wurden. Heraus kam ein Fahrzeugdesign für ein batterieelektrisches Fahrzeug, das mit einem Gewicht von 188 kg für die Rohbaukarosse ca. 35 % leichter ist, als die vergleichbaren Benchmark-Fahrzeuge ([57]). Dabei werden mit dem Fahrzeugdesign die Anforderungen an die Crash-Sicherheit für das Jahr 2020 mit einer 5-Star Einstufung erfüllt.

Bei der Lebenszyklusanalyse für die $CO_2$ Emissionen wird die $CO_2$eq von der Gewinnung und Herstellung des Werkstoffs bis zu den Fahremissionen im Betrieb und dem anschließenden Recycling am Ende des Lebenszyklus betrachtet.

Für die Herstellung von Stahl werden nach den Angaben von worldautosteel.org im Mittel $CO_2$ Emissionen im Umfang von ca. 2 kg $CO_2$eq[6] pro kg hergestelltem Stahlblech emittiert. Basierend auf den Ergebnissen aus diesem Projekt, werden mit der Reduzierung des Gewichts der Rohbaukarosserie um 35 % in der Herstellungsphase bereits um einen ähnlichen Anteil geringere $CO_2$eq Emissionen emittiert. Selbstverständlich führt die Gewichtsreduzierung zu einer Reduzierung der $CO_2$eq Emissionen aufgrund der Verbrauchsabhängigkeit im Fahrbetrieb gegenüber einer vergleichbaren Benchmark-Karosserie aus dem gleichen Werkstofftyp. Die Einsparung von 100 kg führt ohne die Berücksichtigung von Sekundäreffekten zu einer Emissionsreduzierung von 3,4 g $CO_2 km^{-1}$. Berücksichtigt man die Sekundäreffekte, die sich aus der Möglichkeit ergeben, z. B. einen kleineren Antriebsstrang oder Fahrwerksgewicht zu reduzieren, ergibt sich eine resultierende $CO_2$ Einsparung, die 2 bis 3 mal ([61]) so hoch sein kann.

Für Karosserien aus alternativen Konstruktionswerkstoffen, wie Aluminium, Magnesium oder Faserverbundwerkstoffen, wird der Vergleich über den gesamten Lebenszyklus deutlich schwieriger, weil typischerweise für die Herstellung dieser Werkstoffe deutlich höhere $CO_2$ Emissionen bei der Primärherstellung der Werkstoffe anfallen und

[6] $CO_2$-Äquivalent Treibhauspotenzial einer chemischen Verbindung.

die $CO_2$ Emissionen bei der Primärherstellung bis zu 30 mal höher liegen können ([59]). Eine vergleichende Betrachtung des Lebenszyklus erfordert jedoch eine detaillierte Kenntnis über die Herstellungsroute und die Bewertung der Verwendung von Wiedereinsatzmaterial und den vergleichenden Fahrzyklus in der Nutzungsphase, um eine endgültige Bewertung unterschiedlicher Werkstoffkonzepte und eine Lebenszyklusanalyse vornehmen zu können. Für ein werkstofflich monolithisches Werkstoffkonzept spricht allerdings die vergleichsweise einfache Rezyklierbarkeit der Fahrzeugkarosserie.

Um die zuvor genannte Gewichtseinsparung von 35 % erzielen zu können, wurden überwiegend Stahlsorten höherer Festigkeit in der Konstruktion verwendet. Ein Anteil von ca. 97 % wurde in höherfesten Stahlgüten realisiert und nur ein kleiner verbleibender Anteil in einfachen Tiefziehgüten. Für die höherwertigen Stahlgüten wurden zu einem Drittel (33 %) High Strength Low Alloy Steels (HSLA) ausgewählt und für knapp ein Drittel (31 %) der Karosserie wurden Dualphasenstähle ausgewählt. Das verbleibende letzte Drittel (33 %) setzen sich zu etwa gleichen Teilen aus TWIP/TRIP Stählen, Komplexphasenstählen (CP) und warmumgeformten Bor-Stählen zusammen, mit Zugfestigkeiten $R_m$ von jeweils über 1000 MPa bis 1500 MPa.

Eine Weiterentwicklung für die Herstellung der Einzelkomponenten stellen die verschiedenen Lieferformen von Stahlblechen und deren Verarbeitung dar. Neben dem konventionellen Kaltumformen kommt das Warmumformen zum Einsatz. In speziellen Bereichen sind auch rollgeformte, offene Profile bzw. geschlossene Profile mittels Hydroforming verwendet worden. Neben monolithischen Blechen wurden die Einsparpotentiale für Multistahlplatinen als „Laser Welded Blanks“ oder Stahlgüten mit variablen Dicken als Tailor Rolled Blanks eingesetzt.

Weiterhin war es eine Zielsetzung im Projekt, die Anforderungen an Noise, Vibration und Harshness (NVH) und die statischen bzw. dynamischen Steifigkeitsanforderungen an eine Karosserie im A/B Segment zu erfüllen. Ebenso wurden die Anforderungen an Dauerbelastung, Fahrverhalten und Handhabung durch Tests nachgewiesen.

Die Herstellkosten der Karosserie wurden mit einem Kostenmodell des MIT (Massachusetts Institute of Technology) ermittelt, das alle relevanten Einflussgrößen, vom Material, Arbeits- und Investitionskosten, bis hin zu den Werkzeugen und der Logistik berücksichtigt. Die berechneten Kosten für die Rohkarosse ohne Türen liegen dann nach diesem Modell bei ca. 1100 US$ (Preisbasis 2011).

**Neue Karosseriekonzepte in Faserverbund-Bauweise**

In der Vergangenheit waren Karosserien mit einem hohen Anteil an Karbonfaser-Verbundwerkstoffen exklusiven Kleinserien vorbehalten und häufig vom sichtbaren Prestige-Leichtbau motiviert. So besitzen Fahrzeuge wie der Lamborghini Aventador eine Voll-CFK Karosserie und das 1l Fahrzeug XL1 von Volkswagen besitzt eine grundsätzlich ähnliche Struktur. Für sportliche Performance-Fahrzeuge gibt es eine Vielzahl von Beispielen, bei denen eine CFK-Karosserie verwirklicht wurde. Mit dem Einsatz von hochbelastbaren Karbonfasern lassen sich gegenüber Aluminiumkarosserien bis zu weiteren 30 % an Gewicht einsparen. Mit dem BMW i3 ist im Jahr 2014 ein Fahrzeug in Serie gegangen, das eine Voll-CFK Karosserie besitzt und eine mittlere Produktionsstückzahl von deutlich mehr als 10.000 Einheiten/Jahr erreichen soll. Dies ist im Vergleich zur Großserie immer noch eine kleine Zahl, verlangt jedoch gleichzeitig einen hochautomatisierten Produktionsprozess ähnlicher Ausprägung wie in der Großserie.

Die Möglichkeiten eine Leichtbauweise mit Karbonfaser-Verbundwerkstoffen darzustellen, sollen anhand zweier Beispiele diskutiert werden, die in unterschiedlichem Umfang Karbonfasern in der Karosserie zum Einsatz bringen.

Der BMW i3 besitzt eine vollständig aus Karbonfaser-Verbundwerkstoffen hergestellte Karosserie und erreicht ein Karosseriegewicht von ca. 150 kg. Ein Fahrzeugkonzept in etwas anderer Ausprägung, aber im gleichen Größensegment, stellt der InEco dar, der am Leichtbauzentrum Sachsen GmbH gemeinschaftlich mit dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik und der ThyssenKrupp Steel Europe AG entwickelt wurde. Im Fahrzeugkonzept InEco wurde eine Faserverbundintensive Multi-Material Fahrzeugstruktur umgesetzt, die ebenso eine Masse von 150 kg erreicht.

Die Karosseriestruktur im BMW i3 wird in einer Schalenbauweise aus ca. 40 FVK Einzelbauteilen mit einem Epoxidklebstoff gefügt. Die FVK Bauteile werden dafür in verschiedenen Verfahren hergestellt. Nachdem die Karbonfasern zu textilen Halbzeugen als Gelege oder Gewebe hergestellt werden, werden diese Halbzeuge in einem thermisch aktivierten Preformprozess in ihre endgültige Form gebracht und die Textillagen zueinander mit einem Bindermaterial vorfixiert. Wesentliche Strukturbauteile des i3 werden im Hochdruck RTM Verfahren hergestellt, bei dem bei ca. 100 °C ein Epoxidharz mit bis zu 200 bar Druck im Werkzeug ausgehärtet wird. Taktzeiten von <10 min sind dabei großtechnisch darstellbar. Für die weitere Optimierung des Fertigungsprozesses befinden sich auf dem Markt schnellere Harzsysteme, die ein Aushärten des Matrixwerkstoffs innerhalb weniger Minuten ermöglichen und somit die Taktzeit deutlich verkürzen können[7].

Großbauteile wie der Seitenrahmen am BMW i3 werden vor dem RTM Prozessschritt aus einzelnen, in einer Vorrichtung zueinander positionierten Preformbauteilen assembliert und prozesssicher für den nachfolgenden Schritt im RTM Prozess gefügt. Weitere Verfahren wie das Nasspressen oder auch die Verarbeitung thermoplastischer CFK Halbzeuge kommen ebenso zum Einsatz. Für die Herstellung geschlossener Profile müssen z. B. für den Seitenrahmen das Außen- und Innenteil in einem Zwischenschritt geklebt werden.

Die teilweise vorgefertigten Einzelteile der gesamten Karosserie werden mit speziellen, automatisierten Montagehilfsmitteln passgenau zueinander positioniert. Mit einem nominellen Klebespalt von 1,5 mm können durch das positionsgenaue Platzieren der Einzelbauteile kleinere Maßabweichungen kompensiert werden.

Um die geforderten Taktzeiten von 90 s in der Fertigung einzuhalten, wird die Klebstoffaushärtung, wo erforderlich, thermisch oder durch anderen Energieeintrag (z. B. Induktion, etc.) initiiert, um die Handhabungsfestigkeit der Karosserie vor einem nächsten Prozessschritt sicherzustellen ([48]).

[7] Z. B. VORAFORCE™ 5300 ultra-fast cure composite epoxy system.

Die BMW *Project i* Fahrzeuge erfüllen selbstverständlich die Anforderungen der Zulassungsbehörden in Bezug auf ihre Crashsicherheit. Eine besondere Herausforderung ist der Dacheindrücktest bei dem ein Kraft- und Wegniveau vorgegeben ist, das aufgrund der Versagensart des CFK-Werkstoffs mit nur geringer Verformung nur schwer innerhalb der Vorschriften darstellbar ist. Das ist in diesem Fall allerdings eher eine Fragestellung der für die metallischen Werkstoffe definierten Kriterien, als eine Verschlechterung für die Insassen. Beim CFK Werkstoff werden dagegen deutlich höhere Kraftniveaus erreicht, bei gleichzeitig geringeren Verformungen.

Der Karbonfaserwerkstoff ist herstellungsbedingt vergleichsweise teuer. Der aufwendige Konversionsprozess aus der Polyacrylnitrilfaser (PAN) und die hohen Rohstoffkosten für die PAN Faser ermöglichen nur Kostenoptimierungen in engen Grenzen. Aus diesem Grunde ist es sehr wichtig, einen hohen Grad der Werkstoffausnutzung zu erreichen. Aufgrund der Fertigungstechnologie, bei der aus ebenen Textilien konturierte Bauteile hergestellt werden müssen, ergeben sich im ungünstigen Fall Ausnutzungsgrade von weniger als 50 % oder 100 % Materialverschnitt. Eine Optimierung der textilen Halbzeuge auf die optimalen Einsatzbreiten für die Bauteilherstellung führt allerdings zu steigender Lagerhaltung und ineffizienten Prozessen in der Halbzeugherstellung. Um die vom Werkstoffverschnitt verursachten Kosten zu minimieren, wird die trockene Verschnittfaser einem Recyclingprozess zugeführt, bei dem aus Wirrfasern ein neues textiles Halbzeug entsteht, welches im RTM Verfahren verarbeitet werden kann und für den Einsatzzweck (z. B. das Dach) adäquate Eigenschaften aufweist. Für die verharzten Faserreste, die prozessbedingt entstehen oder aus Altfahrzeugen zurückkommen, ist der Wiedereinsatz des Materials deutlich herausfordernder. Es gibt die Möglichkeit, Faser und Harz entweder in der Pyrolyse zu trennen oder mit superkritischen Flüssigkeiten auszuwaschen ([58]). Beide Verfahren sind aufwendig und führen gegenwärtig zu keiner positiven Kostenbilanz für den Wiedereinsatz im Vergleich zur Neufaser. Allerdings ist die thermische Verwertung des Faserverbundwerkstoffs aufgrund gesetzlicher Anforderungen ebenso keine sinnvolle Alternative. Zu

berücksichtigen ist dabei noch, dass in der konventionellen thermischen Verwertung ein Verklumpen des Verbundstoffes erfolgt und keine vollständige Verbrennung des Matrixmaterials möglich ist, was den Betrieb von Verbrennungsanlagen gegebenenfalls beeinträchtigt.

Eine Karosseriestruktur aus einem Verbundwerkstoff zu konstruieren und mechanisch sowie akustisch optimal auszulegen ist eine technologische Herausforderung, weil die Eigenschaften in der Komponente richtungsabhängig sind und die Materialkarten im Werkstoffverbund nur begrenzt zur Verfügung stehen. Eine weitere Herausforderung ist mit dem Einsatz einer quasi monolithischen CFK Struktur verbunden. Der Karbonfaser-Verbundwerkstoff ist, obwohl die C-Faser elektrisch leitfähig ist, nicht elektrisch leitend. Um diese Eigenschaft zu kompensieren müssen zusätzliche, gewichtserhöhende Maßnahmen ergriffen werden, weil die Fahrzeugstruktur, nicht wie in der metallischen Bauweise üblich, als Massepunkt genutzt werden kann.

Neben den Herstellkosten der Faser und deren Weiterverarbeitung treten in den weiteren Prozessschritten durchaus bemerkenswerte Änderungen gegenüber dem Prozessablauf für metallische Strukturen auf. Die Karbonfaserkarosserie bedarf keiner Elektrotauchlackierung und damit kann für diesen Umfang auf einen investitionskostenintensiven Teilschritt der Automobilfertigung im Fahrzeugwerk verzichtet werden. Auch die deutlich verringerte Teileanzahl im Karosseriebau reduziert Logistikaufwendungen und einzelne Prozessschritte.

Es ist davon auszugehen, dass die Herstellkosten für einen serientauglichen Prozess für die Herstellung der Karosserie gegenwärtig noch deutlich über den von vergleichbaren, metallischen Karosserievarianten liegen. Bei einer Annahme, dass die Bauteilvollkosten bei ca. 40 €/kg liegen ([49]), ergäben sich demnach bei ca. 150 kg Karosseriegewicht deutlich höhere Kosten gegenüber einer vergleichbaren metallischen Struktur die Kosten im niedrigen einstelligen €/kg Bereich aufweist.

Aus diesem Grund wird die monolithische CFK-Karosserie vor einer erheblichen Kostendegression weiterhin entsprechenden Nischenbereichen vorbehalten bleiben, die in der Lage sind, die aufgerufenen Mehrkosten durch andere Maßnahmen zu kompensieren.

Die Studie InEco ([52]) zeigt eine mögliche Weiterentwicklung von der monolithischen CFK-Struktur in eine CFK-intensive Multimaterial-Mischbauweise auf. Insbesondere im crashrelevanten Bereich zeigen CFK-Bauteile, bei entsprechendem Intrusionsweg, eventuell kritisches Materialverhalten. Aus diesem Grunde wurde ein Stahl/CFK Materialhybridverbund entwickelt, der im Crashfall ein gefälligeres Verhalten als reine CFK Bauteile zeigt. In einer vergleichenden Untersuchung wurde, angelehnt an die Anforderungen der maßgeblichen Crashlastfälle im EuroNCAP, eine Balkenkonfiguration entwickelt, an der das Versagensverhalten demonstriert wurde.

Die Balkenkonfiguration, hergestellt aus monolithischen CFK, zeigt eine hohe Initialquersteifigkeit mit hohem Energieaufnahmevermögen für die ersten 20 mm Intrusionsweg auf der im Crashfall innenliegenden Balkenseite. Danach bilden sich scharfkantige Risse aus, die eine Gefährdung der Insassen darstellen können. Im Weiteren flacht die Energieaufnahme über den Intrusionsweg deutlich ab. Der Stahl/CFK Hybridbalken zeigt dagegen ein splitterfreies Umformverhalten, ohne einen extremen Peak der Energieaufnahme bei beginnender Intrusion zu aufzuweisen ([53]). Mit den Stahl/CFK Hybridbauteilen für die Sicherheitsfahrgastzelle lässt sich in Leichtbauweise eine Karosserie mit zulässiger Verformung, ähnlich wie bei rein metallischen Strukturen, konstruieren. Dies führt zu einer kosteneffizient umgesetzten Leichtbaukarosserie unter Ausnutzung unterschiedlicher Werkstoffcharakteristika bei metallischen und Faserverbundwerkstoffen.

In diesem Kontext ist die evolutionäre Weiterentwicklung der bei BMW umgesetzten Faserverbundtechnologie zu bewerten. Der im Jahr 2015 in den Markt eingeführte BMW der 7er Baureihe zeigt eine Multimaterialkarosseriebauweise mit Stahl/CFK Hybridbauweise in den wesentlichen Strukturen der Sicherheitsfahrgastzelle, wie z. B. den Mitteltunnel, den A, B und C-Säulen und dem Schweller und weiteren Bauteilen (◘ Abb. 6.25).

Mit dem Einsatz dieser Bauweise lassen sich erhebliche Gewichtseinsparungen erzielen und eine –

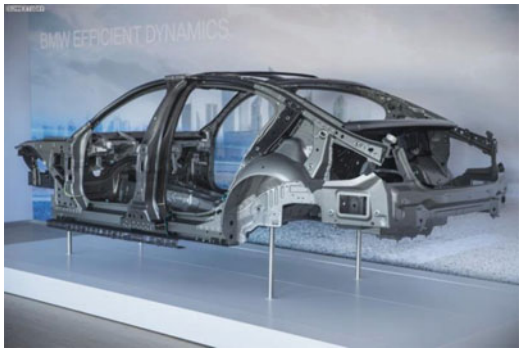



**Abb. 6.25** Der BMW 7er 2015 mit Carbon Core-Technik [Quelle BMW]

den unterschiedlichen Märkten und ihren Anforderungen an die Crashsicherheit – angepasste Fahrzeugstruktur konstruieren, ohne länderderivatspezifische erhebliche Mehraufwendungen.

Diese Bauweise erfordert einen in wesentlichen Bereichen des Karosseriebaus angepassten Herstellprozess. Aufgrund der stark abweichenden Ausdehnungskoeffizienten von Karbonfaserverbundstrukturen, mit praktisch keiner Ausdehnung ($\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$) und der Stahlstruktur mit einem Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 11{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$, ergeben sich erhebliche Verschiebungen zwischen den Bauteilen.

Während konventionelle Stahlkarosserien weitgehend fertig gefügt in die kathodische Elektrotauchlackierung zur Verbesserung des Korrosionsschutzes und die anschließende thermisch aktivierte Trocknung der Tauchlackschicht eingeschleust werden, ist diese Vorgehensweise hier nur teilweise möglich. Zur Vermeidung von thermischen Spannungen kann ein Teil der Fügeoperationen erst nach dem vollständigen Durchlauf durch den Prozessschritt der Elektrotauchlackierung erfolgen.

In Bereichen der Karosserie, wo sich aufgrund des Trocknungsprozesses nur geringe $\Delta\alpha$ Verschiebungen ergeben, genügt die Anpassung des Aufheiz- bzw. Abkühlprofils in der Trocknerstrecke, während bei $\Delta\alpha$ Verschiebungen oberhalb einer ertragbaren Grenze Klebstoffversagen eintritt oder bleibender Verzug der Bauteile zueinander die Folge ist. In diesen Fällen muss der finale Fügeprozess nach dem Durchlauf durch den KTL Trockner in einer nachgelagerten Fügestation erfolgen, in der z. B. das Dach als Moduldach eingeklebt wird.

Neben den fertigungstechnischen Herausforderungen muss das potentiell erhöhte Korrosionsrisiko berücksichtigt werden. Das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe ist aufgrund der Potentialdifferenz zwischen den Werkstoffen begleitet von einem inhärenten Korrosionsrisiko. Um dies sicher zu vermeiden, müssen entsprechende Maßnahmen zur galvanischen Trennung der Oberflächen getroffen werden.

**Industrie 4.0 und die nächste Generation von Karosseriekonstruktionen** Neben der klassischen Blechschalenbauweise für Karosserien, gibt es auch eine Vielzahl von Beispielen, bei denen eine Spaceframe Karosserie verwirklicht wurde. Wichtige Vertreter sind der AUDI A8, bei dem bereits in den 80iger Jahren eine erste industrialisierte Aluminium Spaceframe Karosserie verwirklicht wurde. Eine Spaceframe Karosserie mit Stahlprofilen wurde von Gordon Murray mit dem iStream® Konzept[8] realisiert, bei dem überwiegend Standardprofile verwendet und im Orbitalschweißverfahren gefügt wurden.

Das Spaceframe Konzept lässt sich mit neuen Fertigungsverfahren flexibilisieren und verfeinern. Insbesondere durch die Einführung des 3D-Druckens lassen sich bionische Leichtbaustrukturen konstruieren, die mit bisherigen Fertigungsverfahren nicht darstellbar waren. Im Konzept Car EDAG Light Cocoon (Abb. 6.26) wird mit dieser Technologie eine funktionsintegrierte, bionische Leichtbaustruktur für flexible Produktionsvolumen dargestellt ([51]), die folgende Merkmale erfüllt:

- Spaceframe-Profile, die mittels Wandstärkenvariation und Laserbeschnitt funktional optimiert sind,
- bionisch optimierte und generativ gefertigte Knoten für die Aufnahme der Profile,
- variantenflexible, skalierbare und werkzeugarme Fertigung der Spaceframe-Profile.

Die Profile werden dabei entweder aus einem gewöhnlichen Baustahl S235 in den niedrig belas-

[8] http://www.istreamtechnology.co.uk.

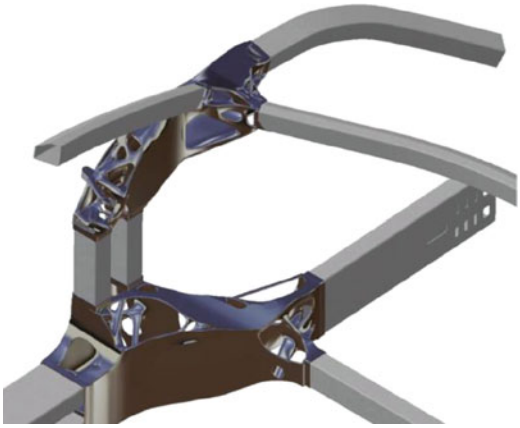


**Abb. 6.26** Spaceframe-Knoten im Bereich der A-Säule [Quelle EDAG]

teten Bereichen oder in den höher belasteten Bereichen aus einem höherfesten Stahl gefertigt. Die Verwendung von Stahl für die Spaceframe-Profile ermöglicht die Ausnutzung der höheren Steifigkeit und Festigkeit gegenüber Aluminium und weiterhin niedrigere Materialkosten. Die im EDAG Light Cocoon vorgesehenen Spaceframe-Knoten können mit konventionellen Fertigungstechnologien wie dem Stahlguss nicht hergestellt werden. Mittels Selective Laser Melting (SLM) wurden die bionisch optimierten, zur optimalen Lastaufnahme komplex gestalteten Knoten aus der Nickelbasislegierung IN718 hergestellt. Gegenwärtig steht nur ein eingeschränktes Materialspektrum für das SLM Verfahren zur Verfügung und mit der Auswahl dieses Werkstoffs ist die Kompatibilität zu den Spaceframe-Profilen gegeben.

Für das Fügen mittels Laser ([60]) ist eine enge Toleranzführung der Schweißfugen erforderlich. Der in diesem Konzept vorgesehene Ansatz zeigt einen durchgängig flexibel geplanten Industrie 4.0 Ansatz. Die Konstruktions- und Fertigungsparameter für die Knoten und Profile können, wenn erforderlich, auf Losgröße 1 gesteuert werden. Das Ergebnis wird vermessen, fließt erneut in die Prozesssteuerung ein und ermöglicht ein toleranzarmes Fügen der Bauteile. Diese Vorgehensweise lässt sich bei umgesetzter Vernetzung durchgängig bis zu den Lieferanten fortführen, wo z. B. Anbauteile



**Abb. 6.27** „STRATI", 3D-gedrucktes Fahrzeug von Local Motors [Quelle Local Motors, US]

ebenso in Losgröße 1 gefertigt und zugeliefert werden können.

Erwähnung soll in diesem Zusammenhang noch ein weiteres elektrisch angetriebenes Fahrzeugkonzept finden, das ebenso die generative Fertigung nutzt. Bei dem im Jahr 2014 zum ersten Mal vorgestellten, komplett in 3D-Druck gefertigten, Fahrzeug von Local Motors wird die Karosserie vollständig aus kohlefaserverstärkten Thermoplasten generativ gefertigt ([62]) (Abb. 6.27). Auch wenn die teilweise rohen Oberflächen im Exterieur die Konventionen üblicher Fahrzeugkonzepte sprengen, lässt sich mit diesem Herstellverfahren eine neue Ästhetik im Fahrzeugdesign verwirklichen. Mit diesem Fahrzeug zeigt sich eine weitere äußerst interessante Entwicklung.

Während Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor im Zusammenspiel von Getriebe und Motor einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen, sind beim elektrisch angetriebenen Fahrzeug viel simplere Technologien möglich. Damit ist der Weg für ein individualisiertes Marktsegment für zukünftige Fahrzeuge geöffnet.

**Zusammenfassung** Es ist davon auszugehen, dass alle zuvor diskutierten Karosseriekonzepte, in verschiedenen Ausprägungen, in zukünftigen Fahrzeugkonzepten wiederzufinden sind. Die Herstellung einer Karosserie aus dem Werkstoff Stahl ist in der Großserie weiterhin unschlagbar kostengünstig, erfordert jedoch hohe Investitionen in Werkzeuge und Fertigungseinrichtungen. Gleichzeitig sind bei der Reduzierung der Massen Grenzen gesetzt und eine Stahlkarosserie wird auch bei Verwendung neuer und verbesserter Stahlgüten ca. 25 % schwerer

sein als eine Konstruktion aus Leichtbauwerkstoffen oder Multimaterialkonstruktionen.

Insbesondere eine Flexibilisierung der Fahrzeugkonzepte, hin zu kleineren Stückzahlen mit zunehmenden Derivaten und Ländervarianten, unterstützt eine zunehmende Materialvielfalt in der Karosserie. Vor dem Hintergrund geringerer Investitionskosten und den Möglichkeiten flexibler Fertigung mit durchgängigen Datenmodellen, basierend auf den Möglichkeiten von Industrie 4.0, wird der Weg in eine zukünftige, flexiblere Fahrzeugstruktur aufgezeigt.



## 6.1.4 Cabriolet

### 6.1.4.1 Einführung

„Cabriolet" (aus dem Franz. *cabrioler* = Luftsprünge machen) nannte man schon vor dem Zeitalter des Automobils leichte, offene Pferdewagen, die zumeist für Vergnügungsausfahrten genutzt wurden. Heute bezeichnet man als Cabriolet – kurz: Cabrio – Fahrzeuge, deren Konstruktion es ermöglicht, das Dach wegzuklappen oder abzunehmen.

Traditionell steht der Begriff Cabriolet für Fahrzeuge mit einem Stoffdach, das zurückgeklappt werden kann. In den 90er Jahren entstanden erstmalig wieder Fahrzeuge mit versenkbarem, mehrteiligen Stahl-Klappdach, so genannte „Retractable Hardtops", kurz RHT (1996: Mercedes SLK), die auch als Coupé-Cabrios bezeichnet werden.

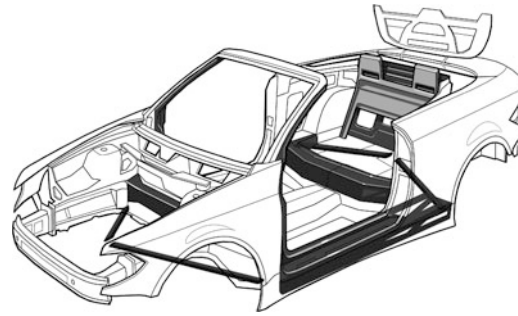
Offene Fahrzeuge werden je nach Karosseriebauart unterschieden in:

- Cabrio-Limousine: zwei- oder viersitzig; B- und C-Säule bleiben beim Öffnen stehen,
- Cabriolet: meist viersitzig mit zwei Türen, mit Stoff- oder Metalldach, oft basierend auf Coupé-Variante (◘ Abb. 6.28),
- Roadster: zweisitzige Sportwagen mit Stoffdach oder RHT und
- Spider, Spyder oder Speedster: Fahrzeug ohne Dach.

1,8 Millionen offene Fahrzeuge waren zum 1. Januar 2012 in Deutschland zugelassen, was rund 3,5 % des Gesamt-Pkw-Bestandes in Deutschland ausmacht [63].



◘ **Abb. 6.28** Ansicht eines BMW 3er Cabrios (Quelle: BMW Group)



◘ **Abb. 6.29** Rohbau eines Cabriolets mit spezifischen Versteifungen

### 6.1.4.2 Rohbau

Da Cabriolets als Nischenfahrzeuge meist nur in kleinen Stückzahlen gefertigt werden, entstehen sie aus Kostengründen in der Regel konstruktiv auf der Plattform bzw. als Karosserievariante eines Großserienmodells. Bei Cabriolets entfällt das Dach als tragende Komponente der Gesamtkarosserie. Deshalb ist es erforderlich, die Cabriolet-Karosserie vor allem im Bereich des Unterbodens und des Frontscheibenrahmens entsprechend zu verstärken, um die fehlende Versteifung durch Dach und eingeklebte Heckscheibe zu kompensieren. In ◘ Abb. 6.29 ist der Rohbau eines Cabriolets dargestellt. Die cabriospezifischen Änderungen im Karosseriebau sind markiert.

Bei Solitärkonstruktionen, die nicht auf einem Großserienmodell bzw. einer Coupé-Variante basieren (z. B. BMW Z4, Ferrari California), werden häufig selbsttragende Konstruktionen, auch in Space-Frame-Technologie, eingesetzt. Letztere stellt eine Rahmenkonstruktion dar, in die gezielt

zur Erhöhung der Steifigkeit der offenen Variante zusätzliche Strukturen (z. B. Profile) eingebracht werden können.

In der Auslegung der Cabrio-Karosserie muss die Unterbringung des Dachs berücksichtigt werden. Dies erfolgt bei den meisten Modellen in einer in die Karosseriestruktur integrierten Verdeckwanne oder im Kofferraum, der dafür über den Kofferraumdeckel oder einen separaten Verdeckdeckel im Heck zugänglich gemacht werden muss.

#### 6.1.4.2.1 Karosseriesteifigkeit

Der Entfall des Daches führt bei einer selbsttragenden Limousinenkarosserie zu einem Steifigkeitsverlust von bis zu 85 Prozent. Wie hoch der Bedarf an zusätzlichen Maßnahmen zur Sicherung der Karosseriesteifigkeit werden kann, zeigen aktuelle Cabrios, deren Gesamtgewicht bis zu 250 Kilogramm über dem einer Limousine und bis zu 220 Kilogramm über dem eines Coupés liegen kann [64].

Durchschnittlich liegt der Gewichtszuwachs durch Versteifungsmaßnahmen bei einer Cabriokarosserie gegenüber der modellgleichen Limousine bei 120 Kilogramm.

Die Karosseriesteifigkeit von Cabriolet-Karosserien wird heute mit folgenden Maßnahmen optimiert:

- vergrößerte Längsträger-Querschnitte zum Beispiel im Bereich des Türschwellers,
- zusätzliche oder stärkere Querwände,
- steifere Auslegung der Übergänge vom Längsträger auf A- und B-Säule,
- Einbringen von Diagonalstreben vorne und hinten,
- Einbinden von Anbauteilen in den Torsions-Kraftfluss, z. B. vorderer Hilfsrahmen, Motorunterfahrschutz.

Die Karosseriesteifigkeit beeinflusst Sicherheit, Komfort und Haltbarkeit eines Automobils. Je weniger sich ein Fahrzeug auf unebenen Fahrbahnen oder in schnell gefahrenen Kurven „verwindet", desto sicherer ist das Fahrverhalten. Daneben bildet eine hohe Karosseriesteifigkeit auch die Grundlage für die Crashsicherheit und die Reduzierung von Innenraumgeräuschen [65].

Ziel der Konstrukteure ist es, die Eigenfrequenzen der Karosserie von denen der schwingungsfähigen Komponenten, wie Motor, Achsen, Abgasanlage, Lenksäule, aber auch Dachsystem, zu entkoppeln.

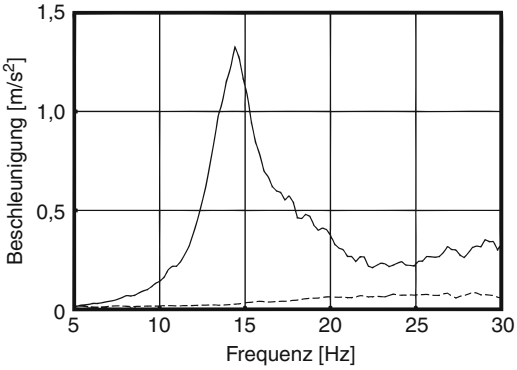



**Abb. 6.30** Querbeschleunigung des Rückspiegels auf Hydropulsprüfstand —: Cabriolet; - - -: Coupé

**Statische Steifigkeit** Die statische Steifigkeit gewährleistet, dass Türen, Klappen wie auch das Cabriodach sich auch dann problemlos öffnen und schließen lassen, wenn das Fahrzeug auf unebenem Grund, wie z. B. an einem Hang oder mit einem Rad auf dem Bordstein, steht.

**Dynamische Steifigkeit** Die dynamische Steifigkeit nimmt Einfluss auf das Schwingungsverhalten eines Fahrzeugs. Torsionsschwingungen bestimmen den Komfort eines Fahrzeuges. Rückspiegel- und Lenkradzittern können durch Torsionsschwingungen der Karosserie verursacht sein (Abb. 6.30). Im Sitz spürbare Schwingungen gehen in der Regel auf Biegeschwingungen der Karosserie zurück.

Die Schwingungs-Problematik ist bei Cabriolets besonders relevant, da die Struktur eines offenen Autos generell nicht die Steifigkeit einer geschlossenen Karosserie erlangen kann [65]. Limousinen erreichen in der Torsionsanalyse Eigenfrequenzen von bis zu 50 Hz, viersitzige Cabriolets dagegen nur ca. 15–25 Hz (Abb. 6.31). In diesem Frequenzbereich bewegen sich auch die Achs- und Motorresonanzen, so dass den Fahrkomfort störende Torsionsschwingungen angeregt werden. Versuche zeigen, dass beim Vergleich der Querschwingungen in der Coupé- und der Cabriolet-Version eines Mo-

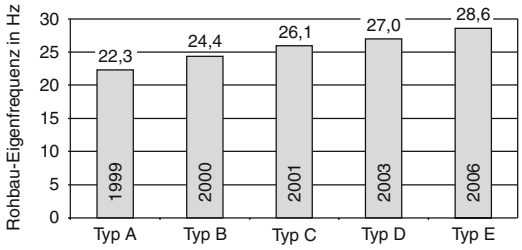



**Abb. 6.31** Erste Torsionseigenfrequenz Rohbau von viersitzigen Cabriolets



dells die Querschwingungen am Rückspiegel des Cabriolets um den Faktor zehn höhere Schwingungsamplituden erreichen.

#### 6.1.4.2.2 Karosserietilger

Die im vorangegangenen Kapitel erläuterten Resonanzschwingungen der Karosserie, verursacht durch Koppelschwingungen zwischen Karosserie, Fahrwerk und Motor, erzeugen Geräusche und Vibrationen, die zu subjektiv wahrnehmbaren Einbußen an Geräusch- und Fahrkomfort führen. Um Vibrationen und Geräusche zu dämpfen, werden passive Karosserietilger in Form von gezielt platzierten Feder-Masse-Systemen eingesetzt. Sozusagen als „Nebenwirkung" dämpfen die Tilger auch schlichte Fahrbahnstöße. Einen neueren Ansatz stellt die aktive Schwingungstilgung dar: Mit hydraulischen Aktoren werden Gegenschwingungen erzeugt, die die Karosserievibrationen minimieren und so ohne Zusatzgewicht höheren Komfort vermitteln.

Als Tilger können z. B. auch die Batterie oder – bei Cabriolets – die Hydraulikpumpe der automatischen Verdecke dienen. Bei einigen Cabrio-Modellen (z. B. VW New Beetle Cabriolet, Porsche Boxster) nutzten die Konstrukteure den Motor – auf einem hydraulischen Dämpfer gelagert – als Schwingungstilger.

Die Tilgermasse beträgt in vielen Cabrios zehn Kilogramm und mehr. Bei Cabriolets ist insbesondere zu beachten, dass die dynamische Steifigkeit bei offenem und geschlossenem Dach variiert, der Schwingungstilger jedoch nur auf eine Frequenz abgestimmt sein kann. Generell gilt hierzu: Je höher die Dämpfung ausgelegt wird, desto breiter die Wirkungsweise des Schwingungstilgers.

#### 6.1.4.2.3 Betriebsfeste Auslegung von Cabriolet-Karosserien

Generell gilt: Die Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit von Cabriolet-Karosserien (► Abschn. 6.1.4.2.1) und die Sicherstellung der geforderten Crash-Eigenschaften (► Abschn. 6.1.4.3) stehen in der Cabrio-Entwicklung der Forderung nach Leichtbau gegenüber.

Die wesentlichen Punkte bei der Betrachtung der Betriebsfestigkeit von Cabriolet-Karosserien sind:

- Lokale Steifigkeitssprünge aufgrund der zusätzlichen Versteifungen; diese können zur Überhöhung von Materialspannungen führen;
- Geringere Steifigkeit der Cabriolet-Karosserien resultiert in größerer Verformung und damit auch in höherer Bauteilbeanspruchung; ggf. Verschiebung der lokalen Beanspruchung in die Fügezone von Übernahmeteilen.
- Die häufigsten Ermüdungsschäden treten bei Cabriolets an den Fügestellen (Schweißnähte, Schweißpunkte etc.) auf.

Als grundsätzliche Konstruktionsprinzipien zur Optimierung der Betriebsfestigkeit bei Cabriolets sollten daher gelten: Vermeidung von großen Steifigkeitssprüngen sowie die Platzierung von Fügestellen möglichst außerhalb hoch beanspruchter Bereiche.

### 6.1.4.3 Sicherheitsrelevante Auslegung von Cabriolets

Für Cabriolets gelten grundsätzlich die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für alle anderen Personenfahrzeuge im öffentlichen Verkehr. Aktive wie passive Sicherheitssysteme aus der Großserie haben längst Einzug in die Cabriolet-Varianten gehalten und zählen bei vielen Modellen zur Standardausstattung. Einige aktive Sicherheitssysteme werden speziell auf die Bedingungen im Cabriolet angepasst: Die Funktion von Kopf-Airbags, die bei Limousinen im Dach untergebracht sind, übernehmen in Cabriolets z. B. größere Kopf-Thorax-Airbags, die in den Türverkleidungen platziert sind. Sicherheitsrelevante, cabrioletspezifische Modifikationen finden sich ferner beim Überschlagschutz (verstärkte A-Säule, Überrollbügelsysteme) und in den Türen.

**Frontcrash** Beim Frontcrash erfolgt der Abbau der Crashenergie vorrangig über den Fahrzeugboden, bei Cabriolets zusätzlich über den Kraftpfad Tür (► Abschn. 6.1.4.5). Verstärkungen im Schwellerbereich, z. B. über doppelte Blechstärken, Tailored Blanks oder Versteifungsrohre, sind daher bei Cabriolets üblich.

**Seitencrash** Um bei Seitencrashs die Sicherheit der Insassen zu erhöhen, wird der cabrioletspezifische Entfall der B-Säule auf Fensterhöhe durch die Versteifung des Bodens, des unteren Bereichs der B-Säule im Übergang zum Schweller sowie der Seitenwand kompensiert. In der Regel kommen bei diesen Maßnahmen Rohrverstärkungen zum Einsatz. Durch die versteiften A- und B-Säulen werden bei einem Seitencrash zudem das Türschloss und die Scharniere stärker beansprucht als das bei einem geschlossenen Fahrzeug der Fall wäre.

Ein spezieller Fall des Seitencrash bildet der Pfahlcrash, der besonders A-Säule, Windschutzrahmen und Verschlüsse des Verdecks beansprucht, die hierfür besonders ausgelegt sein müssen. Ein abgestimmtes Zusammenspiel zwischen unterem Schweller und Boden sowie A-Säule und Windschutzrahmen des Fahrzeugs sind wichtig.

**Heckcrash** Im Fall eines Seitencrashs im hinteren Fahrzeugbereich, aber insbesondere bei einem Heckcrash muss sichergestellt sein, dass weder bei geschlossenem noch bei geöffnetem Dach Teile des Verdecks, der Verdeck-Kinematik oder der Antriebssysteme in den Fahrgastraum eindringen können.

**Überschlag** Generell gilt: Bei Fahrzeugen ohne schützendes, massives Dach, wie Cabriolets und offene Sportwagen, muss im Fall eines Überschlages ausreichend Überlebensraum für alle Insassen zur Verfügung stehen. Die Hauptlast im Fall eines Überschlags tragen in der Regel bei einem Cabriolet die A-Säulen und der Frontscheibenrahmen, unterstützt – falls vorhanden – von Überrollbügelsystemen.

Die konstruktiven Lösungen zur Versteifung der A-Säulen konzentrieren sich auf integrierte Rohre aus hoch- und höchstfesten Stählen; zudem können die Windläufe mittels stärkerer Bleche und/oder größerer Querschnitte verstärkt werden.

Bei den Überrollbügelsystemen herrschen heute zwei Grundprinzipien vor: starre und aktive Überrollbügelsysteme. Zu den „starren" Systemen zählen a) fest installierte Überrollbügel, die die gesamte Fahrzeugbreite überspannen und b) fest installierte, höhenunveränderliche Überrollbügel, die den einzelnen Fahrzeugsitzen zugeordnet sind. Bei beiden „starren" Lösungen werden erhöhter Luftwiderstand und die dadurch erzeugten Fahrgeräusche häufig als nachteilig empfunden. Auch optische bzw. designrelevante Gründe sprechen vielfach gegen diese Systeme.

Bei den „aktiven" Systemen ist der Überrollbügel in einem Kassettengehäuse oder einer Rückwand-Baueinheit abgelegt. Nur bei drohendem Überschlag wird das Bügelsystem sensorgesteuert und typischerweise mittels eines pyrotechnischen Energiespeichers in Sekundenbruchteilen in eine schützende Position aufgestellt und verriegelt.

### 6.1.4.4 Aeroakustik

Einen wichtigen Stellenwert bei der Cabrioletentwicklung hat die Aeroakustik. Im Fokus stehen dabei die Minimierung von Windgeräuschen sowie die Vermeidung von Verwirbelungen, die Umströmungsgeräusche erzeugen. Zudem muss das Augenmerk auf Schwingungsanregungen von Bauteilen gelegt werden, die ebenfalls ursächlich für störende Geräusche sein können.

**Luftschall** Umströmungsgeräusch, verursacht vor allem durch Wirbelablösungen, entstehen zum Beispiel an Dichtungsübergängen, an den Fugen zwischen Verdeck und Fahrzeug oder zwischen Verdeck und Seitenscheibe [66]. Auch Undichtigkeiten aufgrund von Bauteiltoleranzen lassen den Schall in den Fahrzeuginnenraum gelangen. Auf diese Weise können unangenehme Pfeifgeräusche entstehen. Weitere kritische Stellen sind die Stoffnähte bei Softtops, bei Retractable Hardtops (RHTs) die Übergänge an den Dachschalen.

Störende Geräusche wie Wummern der Heckscheibe, Schwirren von Kleinteilen oder Flattern des Innenhimmels bei geschlossenem oder speziell bei geöffnetem Seitenfenster sind häufig auf Schwin-

gungsanregungen von der Umströmung und/oder den Bauteilen zurückzuführen. Als Maßnahmen eignen sich zusätzliches Fixieren der Bauteile oder die gezielte Beeinflussung der Anströmung von Bauteilen.

**Körperschall** Geräusche, die über Schwingungen bzw. Anregungen von flexiblen Körpern, wie z. B. in Cabriolets das Zusammenspiel zwischen Karosserie und Verdeck, werden oft über die Schnittstellen zwischen Verdeck und Karosserie übertragen und können durch spezielle Maßnahmen (z. B. Abschirmung des Verdeckgestänges) minimiert werden [66].

Die Intensität der Übertragung des Außengeräuschs ins Fahrzeuginnere wird maßgeblich durch das Material des Verdeckbezugs sowie der Dämmung bestimmt, aber auch durch das Material des Innenhimmels (sog. Transmissionsverlust).

Um die Geräuschdämmung möglichst weitgehend zu reduzieren, kommen Dämmmatten aus Polyestervlies oder Polyurethan zum Einsatz.

◘ Abb. 6.32 zeigt die Messungen zweier unterschiedlicher Dämmmaterialien über den Frequenzverlauf.

Zusätzlich zur Dämmung der Geräusche, müssen die Materialien des Verdecks die Geräusche auch absorbieren können. ◘ Abb. 6.33 und ◘ Abb. 6.34 zeigen den Transmissionsverlust bzw. den Absorptionskoeffizienten in Abhängigkeit der Frequenz.

Um im offenen Fahrzeug Windgeräusche und Verwirbelungen zu minimieren, kommen Windschotts und Windabweiser zum Einsatz. Sie sorgen für zusätzlichen Komfort der Passagiere vor allem bei höheren Geschwindigkeiten. Bei viersitzigen Fahrzeugen ist das Windschott in der Regel im Bereich der Rücksitze platziert. Bei zweisitzigen Fahrzeugen kommen auch netzartige Einsätze oder transparente Scheiben zum Einsatz, die zwischen den Überrollbügeln montiert werden. Jüngste Entwicklungen gehen dahin, zusätzliche Windabweiser am Windschutzscheibenrahmen einzusetzen, ähnlich wie bei Schiebedächern üblich.

#### 6.1.4.5 Türen

Der Kraftpfad Tür, der neben dem Fahrzeugboden ganz wesentlich zur Absorption der Crashenergie bei Frontcrashs beiträgt, wird über eine steifere Ausführung der im Cabriolet rahmenlosen Türen im Brüstungsbereich sowie an der Türanbindung verstärkt.

Die Scheiben der rahmenlosen Cabriolet-Türen absorbieren Druck-, Torsions- und Biegekräfte, die bei geschlossenen Fahrzeugen vom Türrahmen aufgenommen werden. Um diesen Anforderungen zu genügen, stehen folgende konstruktive Lösungen im Vordergrund:

a) Erhöhung der Materialstärke der Türscheibe einschließlich Anpassung des Fensterhebersystems,
b) Verstärkung des Türschachts und
c) Einsatz von zusätzlichen Längsträgern im Türaufbau.

#### 6.1.4.6 Dachsystem

Bis vor 30 Jahren basierten die Dachsysteme für Cabrios meist auf einem einfachen Gestänge, das mit einem PVC-Bezug mit integrierter flexibler Kunststoffheckscheibe bezogen wurde. Die Verdecke waren im Heckbereich an der Karosse angebunden. Per Hand konnte eine Persenning aufgeknöpft werden. Cabrios dieser Zeit waren z. B. Ford Mustang, VW Golf oder Opel Astra. In den 90er Jahren setzten sich mehr und mehr Verdecksysteme durch, die unter einem Verdeckkastendeckel im Heck verstaut werden können. Typische Vertreter dieser Cabriolet-Gattung sind BMW 3er Cabrio, Audi 80 Cabrio oder Mercedes-Benz CLK Cabrio. ◘ Abb. 6.35 zeigt eine exemplarische Ausführung auf Basis des BMW 2er Cabrios. Diese Verdeckart wird auch Spannbügelverdeck genannt.

Bei Softtop-Dachsystemen ohne Verdeckkastendeckel führte die Weiterentwicklung zu den so genannten „Z-Faltungs-Verdecken". Bei dieser Verdeckvariante wird der vordere Dachbereich, auch Frontspriegel oder Dachspitze genannt, als Ablagedeckel genutzt. Jaguar F-Type Roadster, Audi TT Roadster oder das Ford Mustang Cabrio zeigen diese Verdeckvariante.

Parallel zu den Softtops etablierten sich im Markt Metalldächer, so genannte „Retractable Hardtops" (RHT). Deren Wegbereiter waren Mercedes-Benz SLK und Peugeot 206CC. Anfänglich wurden die RHTs nur bei zweisitzigen Cabrios eingesetzt. Ab 2005 statteten mehrere

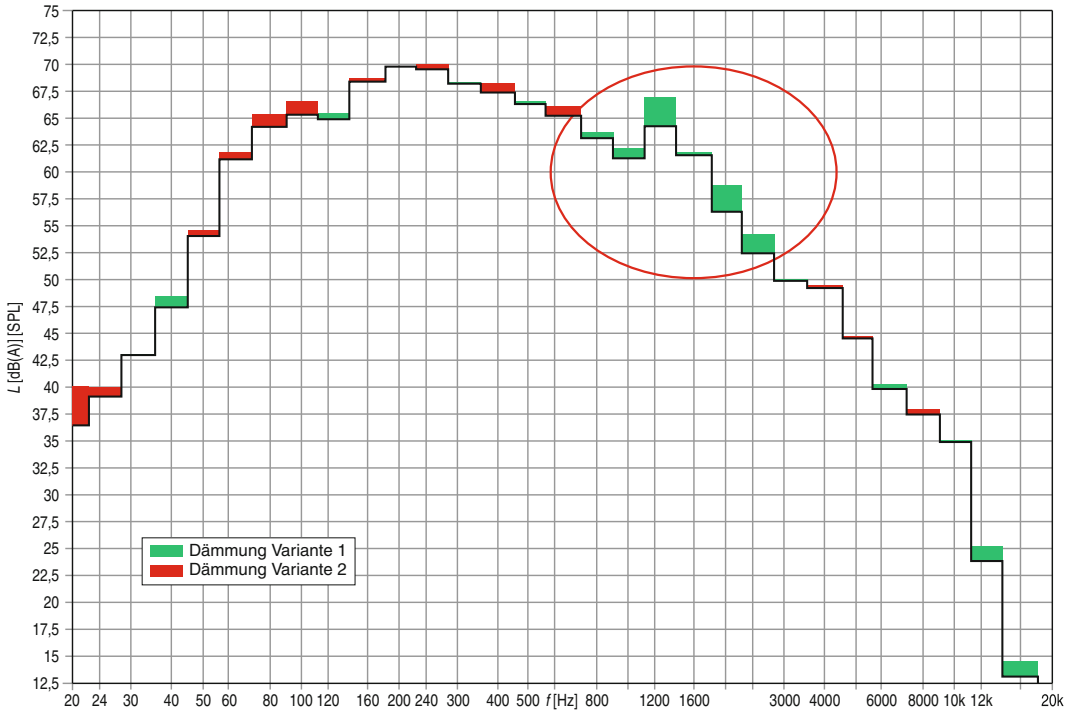



**Abb. 6.32** Verlauf des Schalldruckpegels zweier unterschiedlicher Dämmmaterialien über dem Frequenzband

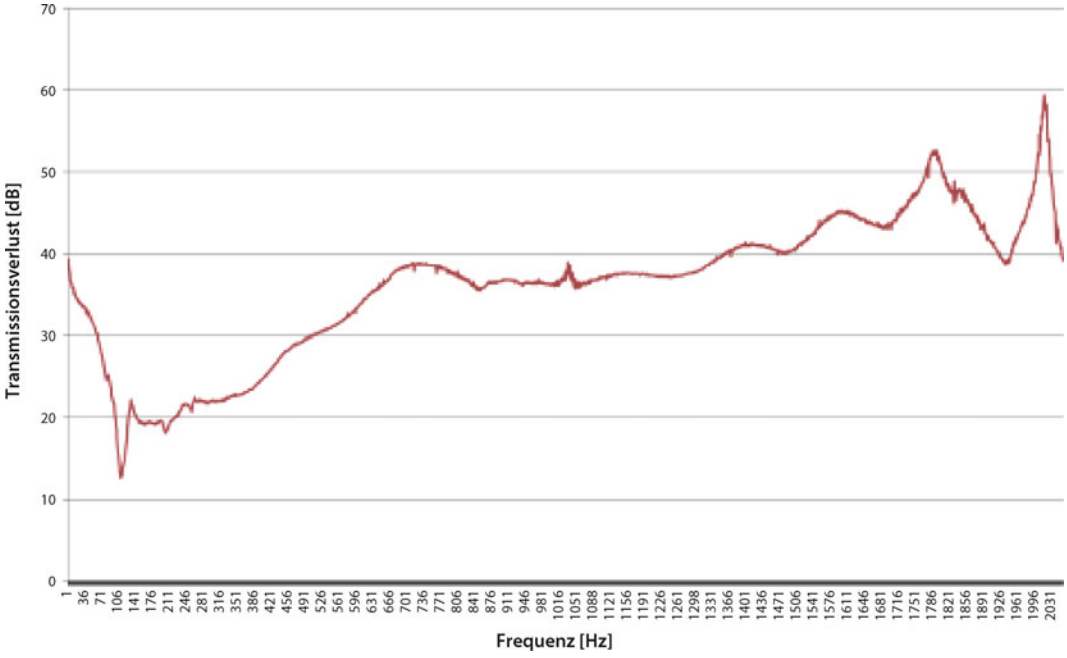



**Abb. 6.33** Transmissionsverlust über Frequenzverlauf eines Dämmmateriales

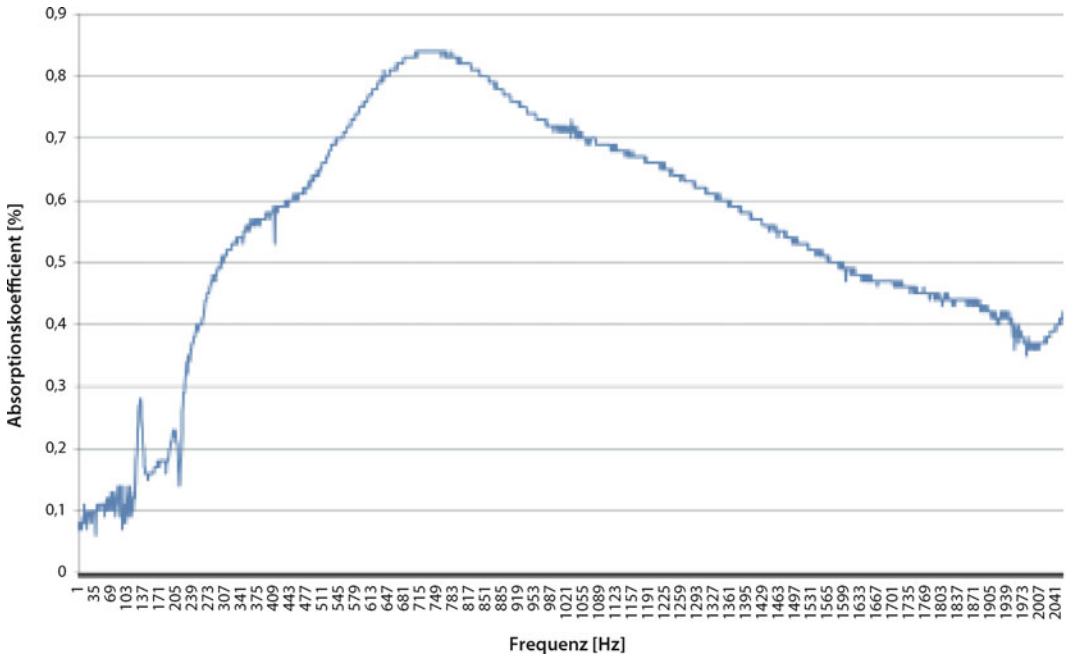



**Abb. 6.34** Absorptionskoeffizient über Frequenzverlauf eines Dämmmateriales



**Abb. 6.35** Softtop mit Verdeckkastendeckel (Quelle: BMW AG)



**Abb. 6.36** Retractable Hardtop mit drei Dachschalen (Quelle: BMW AG)

Fahrzeughersteller auch viersitzige Cabrios mit den aufwändigeren RHTs aus, darunter Opel Astra TwinTop, VW Eos, BMW 3er, Volvo C70. Konnten die Metalldächer für zweisitzige Cabrios noch aus zwei Dachteilen aufgebaut werden, so war es bei viersitzigen Fahrzeugen meist notwendig, das Dach in mindestens drei Segmente zu teilen. Nur so konnte der Fahrgastraum groß genug gestaltet werden, um auch den hinteren Passagieren genügend Platz zu geben. Abb. 6.36 zeigt eine exemplarische Ausführung auf Basis des BMW 4er Cabrios, ein RHT mit drei Dachschalen.

Darüber hinaus finden sich im Markt Targadächer mit großen Glaselementen und dementsprechend großen Dachöffnungen (z. B. Porsche 911 Targa) sowie Faltdächer aus Textil. Letztere werden vor allem bei Kleinwagen (z. B. Citroen C3) eingesetzt. Beide Varianten werden hier jedoch nicht näher betrachtet, da sie nicht zu den klassischen Cabrioletverdecken zählen. Mischbauweisen aus den verschiedenen Verdeck- und Dachvarianten sind in Zukunft denkbar bzw. wurden auch schon in Designstudien und Kleinserien realisiert.

Ferner gibt es sogenannte manuelle Dächer oder Notverdecke, die nur zur temporären Nut-

zung gedacht sind, speziell bei Spider und Speedster Fahrzeugen (z. B. Bugatti Veyron Roadster). Auch einfache manuelle Hardtops sind auf dem Markt vertreten (z. B. Lamborghini Aventador Roadster). Spezielle Hardtops für Softtops, die ausschließlich zur Nutzung in der Winterzeit dienen, sind aufgrund der technischen Weiterentwicklungen bei Softtops in Sachen Ganzjahrestauglichkeit nahezu vom Markt verschwunden.

#### 6.1.4.6.1 Faltbares Festdach (Retractable Hardtop)

Mit den Retractable Hardtops entstand eine neue Art von Cabrios. Faltbare Festdächer vermitteln den Kunden vor allem Vandalismusschutz sowie bessere Geräusch- und Temperaturisolation. Wobei gerade die beiden letztgenannten Punkte auch bei den Softtops durch neue Entwicklungen aufgegriffen werden.

Wurden anfangs hauptsächlich zweiteilige RHTs eingesetzt, so sind in den letzten Jahren vor allem Cabrios mit drei- bis fünfteiligen Hardtops auf dem Markt erschienen. Die Mehrteiligkeit wird durch die Länge der Fahrgastzelle bei Viersitzern und den aus Designgründen relativ kurzem Überhang definiert. Nur wenn die Dachfläche in drei Teile unterteilt wird, lässt sich bei vollständiger Viersitzigkeit ein kurzer Überhang und die Zugänglichkeit zum Gepäckraum realisieren. Außerdem kann dank hoher Packdichte ein niedriges Heck dargestellt werden. Bei zweisitzigen Fahrzeugen werden auch weiterhin zweiteilige RHTs favorisiert.

Die RHTs bestehen zumeist aus einer Dach- und einer Heck- bzw. Verdeckkastendeckel-Kinematik. Auf dieses Gestänge werden Dachschale bzw. Deckel montiert. Dachschalen und Deckel werden je nach Stückzahlen und Gewichtsanforderungen in Stahl- oder Aluminiumblechbauweise gefertigt, auch faserverstärkte Kunststoffbauweisen kommen bereits zum Einsatz.

#### 6.1.4.6.2 Stoffverdeck (Softtop)

Softtops werden mittlerweile in verschiedensten Bauformen dargestellt, wobei der Unterschied meist in der Art der Faltung und der dafür notwendigen Kinematik liegt: z. B. Spannbügelverdeck, spannbügellose Verdecke, parallele oder Z-Faltungsverdecke, Finnenverdecke [67]. Bei Stoffverdecken lässt

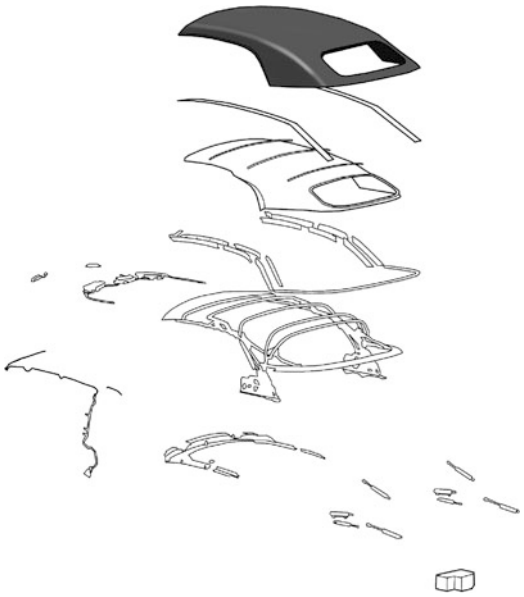


**Abb. 6.37** Darstellung der Komponenten eines Softtops

sich – im Vergleich zu RHTs – der Bauraum für das abgelegte Verdeck variabler gestalten. Somit kommen Softtops (Abb. 6.37) vorrangig bei folgenden Fahrzeugtypen zum Einsatz: Mittelmotor-Cabrios, viersitzige Cabrios mit besonders kurzem Überhang sowie bei Cabrios, die bei abgelegtem Dach einen besonders großen Kofferraum und gute Zugängigkeit bieten sollen.

Moderne Softtops müssen zudem hohe Ansprüche an Ganzjahrestauglichkeit, Geräusch- und Temperaturisolation erfüllen – und dies über die gesamte Fahrzeuglebensdauer.

#### 6.1.4.6.3 Komponenten des Verdecksystems

**Verdeckkinematik** Die Verdecksysteme, bestehend aus mehreren hundert Einzelteilen, zählen zu den aufwändigsten kinematischen Baugruppen an einem Cabrio.

Die Bewegungen des Verdecksystems inklusive des Verdeckkastendeckels sowie der Gestängeaustrittsklappen (im B- oder C-Säulenbereich) wie auch eventuelle bewegliche Hutablagen werden durch den Mechanismus der Verdecksystemkinematik ermöglicht. Bei Spannbügeldächern werden die kinematischen Elemente des Verdeckgestänges

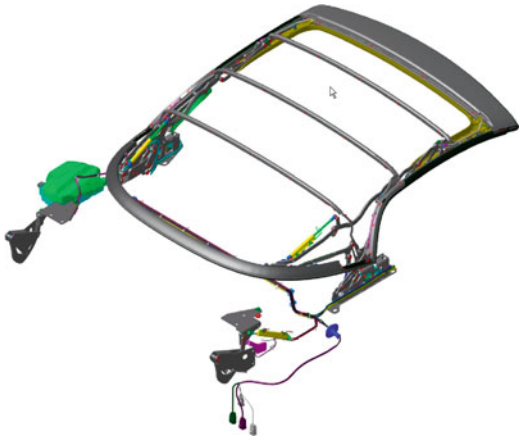


**Abb. 6.38** Verdeckgestänge für ein Softtop mit Spannbügel und elektrohydraulischem Antrieb

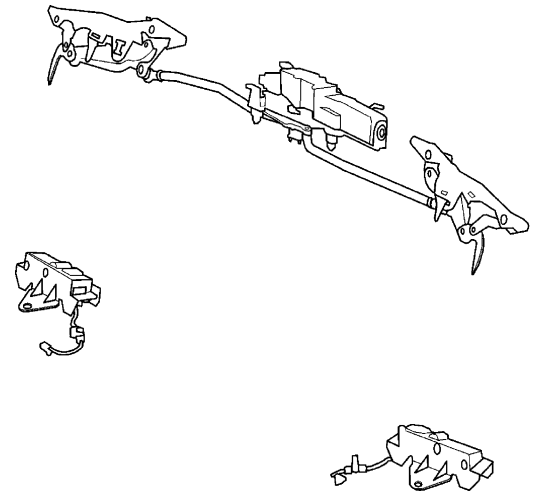


**Abb. 6.39** Frontverschluss mit Grundplatten

beispielsweise durch Verdeck und Spannbügel von einer definierten geschlossenen zu einer definierten geöffneten Position gesteuert. An dem Verdeckgestänge werden die Verschlüsse, Dichtungen, Verkleidungen und der gesamte Textilumfang – bei RHTs die Dachschalen – befestigt. Für die Bewegung des Verdeckkastendeckels und der Gestängeaustrittsklappen sind zusätzliche kinematische Elemente und Gestänge vonnöten. Abb. 6.38 zeigt exemplarisch das Verdeckgestänge eines Spannbügeldachs (Softtop).

Bei parallel- und Z-Faltungsverdecken muss das Verdeckgestänge nur das Verdeck bewegen, da der bewegliche Spannbügel fehlt. Dadurch werden keine zusätzlichen kinematischen Elemente oder Gestänge für Spannbügel oder Verdeckkastendeckel benötigt.

**Verschlüsse** Verdecke müssen im vorderen Bereich mit der Karosserie in geschlossener Position verbunden werden. Dies wird von dem im Frontspriegel (oder der Dachspitze) integriertem Frontverschluss und den im Windschutzrahmen integrierten Verschlussaufnahmen (oder Grundplatten) ermöglicht.

Wenn das Verdeck abgelegt wird, öffnen sich der Frontverschluss und der Frontspriegel, und das Verdeck kann sich vom Windschutzrahmen lösen und abgelegt werden. Abb. 6.39 zeigt exemplarisch einen Frontverschluss mit den Verschlussaufnahmen für einen automatischen Verschluss.

Bei Spannbügelverdecken muss auch in geschlossener Position der Spannbügel verriegelt werden. Dies kann durch in das Verdeckgestänge integrierte kinematische Elemente, durch sogenannte Übertotpunktlagen, oder durch zusätzliche Verschlüsse erfolgen.

Bei RHTs ergibt sich durch die aerodynamischen Kräfte sowie, um Knarz- und Klappergeräusche zu vermeiden, die Notwendigkeit, auch die einzelnen Dachschalen untereinander zu verriegeln. Die Verriegelungseinheiten zwischen den Dachschalen werden dazu über den Frontverschluss angetrieben oder sind in das Verdeckgestänge integriert (durch sogenannte Übertotpunktlagen oder zwangsgesteuerte Verschlusshaken).

Für Gestängeaustrittsklappen sowie den Verdeckkastendeckel kommen weitere Verschlüsse zum Einsatz. Es kann auch notwendig sein, das geöffnete Verdeck zur Karosserie hin zu verriegeln, um Schwingungen zu vermeiden. Dies kann beispielsweise über den Frontverschluss erfolgen.

**Textilumfang** Der Textilumfang eines Softtops besteht aus dem äußeren Verdeckbezug, einem Innenhimmel, einer eventuell vorhandenen Dämmung zwischen Bezug und Himmel sowie den Spanngurten.

Der Innenhimmel erfüllt vor allem eine optische Funktion: Er deckt die Kinematikbauteile im Innenraum mit separaten Verkleidungsteilen ab. Für den Himmel werden sowohl einlagige Materialien als auch mehrlagige Textilien eingesetzt. Seit einiger Zeit werden auch Innenbeleuchtungen in den Innenhimmel integriert.

Der Verdeckbezug besteht zumeist aus einem dreilagigen Aufbau: einer Außenlage, einer Elastomer-Schicht und einer Innenlage, jede mit eigenen Funktionen und Materialien:

**Außenlage** – Außenoptik, Farbe und Umweltbeständigkeit, Twill-Gewebe aus Acrylnitril

**Elastomer-Schicht** – Luft- und Wasserdichtigkeit, Schallisolierung und Verbindung zwischen Außen- und Innenlage; vulkanisiertes Chloropren- oder Butyl-Gummi

**Innenlage** – Festigkeit, Dehnung und Stärke; Cross-Twill-Gewebe aus Polyester oder Baumwolle

Nur noch in seltenen Fällen kommt eine genarbte PVC-Folie zum Einsatz.

Die Materialien für Verdeckbezüge werden in unterschiedlichen Qualitäten, Dicken und mit verschiedenen Flächengewichten ausgeführt, je nachdem welches Packmaß zur Verfügung steht und welche akustischen Eigenschaften gewünscht sind.

Um die Isolationseigenschaften von Softtops weiter zu verbessern, aber auch um dem Verdeck den vom Styling gewünschten Strak zu geben, kommen zusätzlich Dämmmatten (Vliesmaterial, Polyurethanmatten) zum Einsatz. Wichtig neben Optik und Isolationswirkung ist hier auch das Rückstellverhalten des Materials, um bei geschlossenem Verdeck möglichst wenig Falten zu haben. Die Stoffqualität hat wesentlichen Einfluss auf die Faltenreversibilität.

Kamen früher noch klare Kunststofffolien als Heckscheiben zum Einsatz, so werden heute, bis auf wenige Ausnahmen, z. B. im Offroadbereich, nur noch Mineralglasscheiben mit Heckscheibenheizung eingesetzt. In vielen Fällen sind die Glasscheiben mit dem Verdeckbezug verklebt. Alternativ kann die Glasscheibe über Metallrahmen mit zusätzlichen Dichtungen oder einem Kunststoffrahmen mit dem Bezugsmaterial verbunden werden.

Die Spanngurte links und rechts werden seitlich an den Querverbindungen des Verdeckgestänges, den sogenannten „Spriegeln“, befestigt. Diese thermostabilisierten Gurte übernehmen die Führung der Spriegel und stützen zugleich den Verdeckbezug.

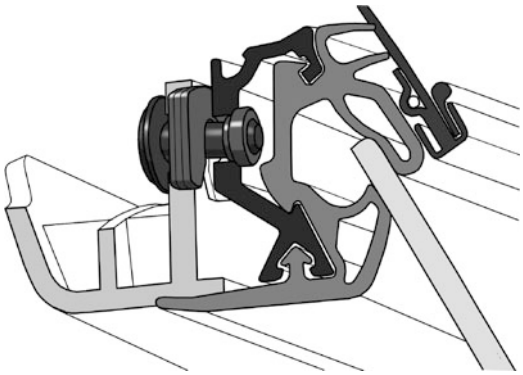


**Abb. 6.40** Seitliches Dichtprofil eines Softtops

Um die Sortenreinheit bei einer späteren Verschrottung zu gewährleisten, werden die Textilumfänge meist nur noch über mechanische Verbindungen wie Clipse, Schrauben oder Nieten mit dem Verdeckgestänge verbunden. Das frühere Verkleben wird, wo möglich, vermieden.

**Dichtungen** Das Verdeck als eigenständiges System muss – ähnlich einer Tür – an den Schnittstellen zum Fahrzeug abgedichtet werden. Die Schnittstellen sind: Windlauf, Seitenscheiben, Fensterschachtdichtung, Verdeckkastendeckel und Karosserieflächen im Heckbereich. Für Cabrios gelten heute die gleichen Dichtheitsanforderungen wie für alle anderen Fahrzeugtypen. Um die Toleranzen an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Verdeck aufnehmen zu können, kommen großvolumige Profile mit ein oder zwei Kammern und zusätzlichen Dichtlippen zum Einsatz (Abb. 6.40). An den Eckbereichen gehen die Profile in Formteile über. Die Dichtungen werden über so genannte „Fassungsschienen“ mit dem Verdeckgestänge verschraubt oder vernietet. Als Fassungsschiene wird ein C-Profil verbaut, das gegebenenfalls schon in das Gummiprofil der Dichtung eingebracht ist.

Ein zusätzliches, automatisches Absenken der Seitenscheiben beim Öffnen und Schließen der Türen, auch Kurzhubabsenkung genannt, stellt sicher, dass die Seitenscheiben beim automatischen Wiederhochfahren komplett von den Dichtungen um-

fasst werden. So ist neben der Dichtheit auch eine Minimierung der Windgeräusche und eine Schallisolation gewährleistet.

**Antriebe** Elektrohydraulik ist heute die häufigste Antriebstechnologie für Softtops mit Spannbügel, RHTs, deren Verschlüsse sowie der zusätzlichen Klappen. Bei Softtops ohne Spannbügel mit parallel- oder Z-Faltung kommen für das Verdeck sowie die Verschlüsse und Klappen fast nur elektro-mechanische Antriebe zum Einsatz. Auch bei den komplexeren Spannbügeldächern und RHTs werden in der Zukunft immer mehr elektromechanische Antriebssysteme eingesetzt. Ein Hydraulikantrieb besteht aus einer Pumpeinheit mit E-Motor, Ölreservoir und Ventilblock mit ein oder mehreren Solenoidventilen, einer Schlaucheinheit sowie den Hydraulikzylindern, die mit den zu bewegenden Baugruppen verbunden sind. Um die Geräusche bei der Bewegung zu verringern, werden die Hydraulikeinheiten oft mit einer separaten Dämmung (aus z. B. Polyurethanschaum) ausgestattet.

Die heute in Cabrios eingesetzten Hydraulikeinheiten wurden speziell für die Belange von Verdecksystemen entwickelt und werden so den Anforderungen an geringes Packmaß und hohe Kräfte gerecht. Dafür werden Drücke von ca. 120 bis 170 bar eingesetzt.

Ein elektro-mechanischer Anrieb besteht aus einem E-Motor und ein oder mehreren Getrieben, die mit den zu bewegenden Baugruppen verbunden sind. Elektromotoren können besser und genauer gesteuert und beispielsweise synchronisiert werden und mit einem Soft-Start und/oder Soft-Stop ausgestattet werden. Das geringe Betätigungsgeräusch eliminiert den Bedarf einer separaten Dämmung.

**Steuerung** Um die Position der Komponenten des Systems zu erkennen, kommen verschiedene Sensoren, wie z. B. Mikroschalter oder Hall-Sensoren zum Einsatz. Diese Sensoren erkennen die Position der Komponenten und schicken ein Signal über den Verdeckkabelbaum zu einem Steuergerät. Das Steuergerät steuert dann das Antriebssystem an, um das gesamte System zu öffnen oder zu schließen. Zusätzlich ermöglicht das Steuergerät die Kommunikation zwischen Fahrzeug und System.

## 6.2 Materialien der Karosserie

### 6.2.1 Historischer Rückblick

In den Anfängen des Automobilbaus wurden Karosserieformen und -strukturen weitgehend nach der Form von Kutschen realisiert. Die entsprechenden Karosserien bestanden überwiegend aus Stahl und Holz und wurden häufig auf Fahrgestelle montiert. Es dominierte die Einzelanfertigung auf Kundenwunsch; erst später wurden im Zuge der zunehmenden Industrialisierung kostengünstigere Herstell- und Bearbeitungsverfahren entwickelt. Im heutigen automobiltechnischen Großserienbau dominieren maßgeschneiderte werkstofftechnische Systemlösungen, wobei im Karosseriebau eine breite Materialvielfalt verwendet wird, bestehend aus hochfesten und vergüteten Stählen, Leichtmetallen, wie z. B. Aluminium und Magnesium, sowie thermoplastischen und duroplastischen Kunststoffen [74] (◘ Abb. 6.41 und ◘ Abb. 6.42).

Damit wird heute eine bestmögliche Zielerreichung in einer komplexen Anforderungsmatrix, bestehend u. a. aus Leichtbau, Sicherheit, Steifigkeit, Zuverlässigkeit, Umweltverträglichkeit und Kosten sichergestellt.

Der Innenraum von Karosserien und hier speziell das Cockpit ist eine wichtige Schnittstelle zwischen Fahrer und Technik. Die verwendeten Werkstoffe unterliegen einem ständigen Wandel, getrieben von steigenden Anforderungen u. a. an Komfort, Design und Ergonomie. Während in den frühen Jahren des Automobilbaus für das Cockpit überwiegend Metalle, Holz und Leder zum Einsatz kamen (◘ Abb. 6.43), wird heute für derartige Anwendungen ein breites Spektrum an Kunststoffen und Textilmaterialien verwendet [75] (◘ Abb. 6.44).

### 6.2.2 Konzepte und Bauweisen

Wird ein Auto in einem bestimmten Marktsegment positioniert, so werden Stückzahlen und Verkaufspreis geplant. Dies hat große Einflüsse bzw. Konsequenzen sowohl für die Funktion der Karosserie als auch auf deren Werkstoffauswahl. Die optimale Auswahl der Werkstoffe hängt von vielen Faktoren

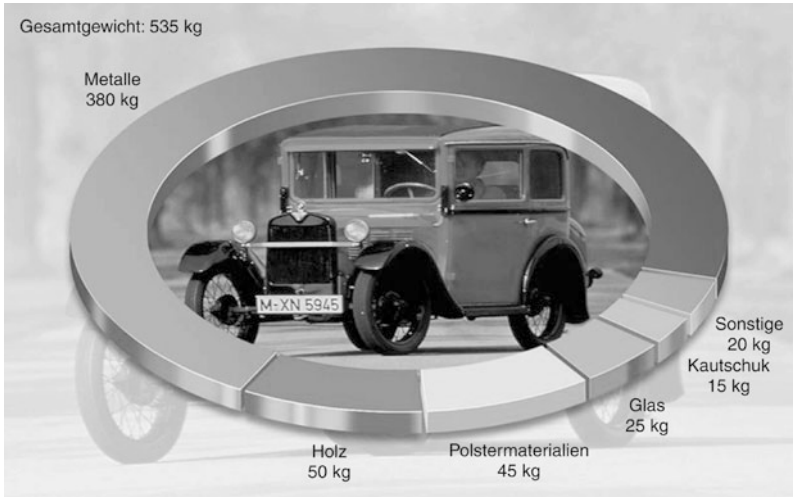



**Abb. 6.41** Werkstoffeinsatz BMW DIXI

ab, da derselbe Werkstoff sich nicht in jedem Projekt wirtschaftlich rechnet.

Im heutigen Großserienautomobilbau dominiert die Blechschalenbauweise mit Stahlwerkstoffen; es werden sowohl die Karosseriestruktur als auch die Anbauteile gezielt auf die jeweilige Anforderung ausgelegt. Diese Bauweise ist für hohe Stückzahlen wirtschaftlich; hohem Anlageninvest stehen günstige Werkstoffkosten gegenüber.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Rohkarosserie komplett aus Aluminium zu fertigen. Dafür eignet sich u. a. die Aluminium Space Frame Bauweise [76], welche aus einer Gitterrahmenstruktur aus Strangpressprofilen besteht

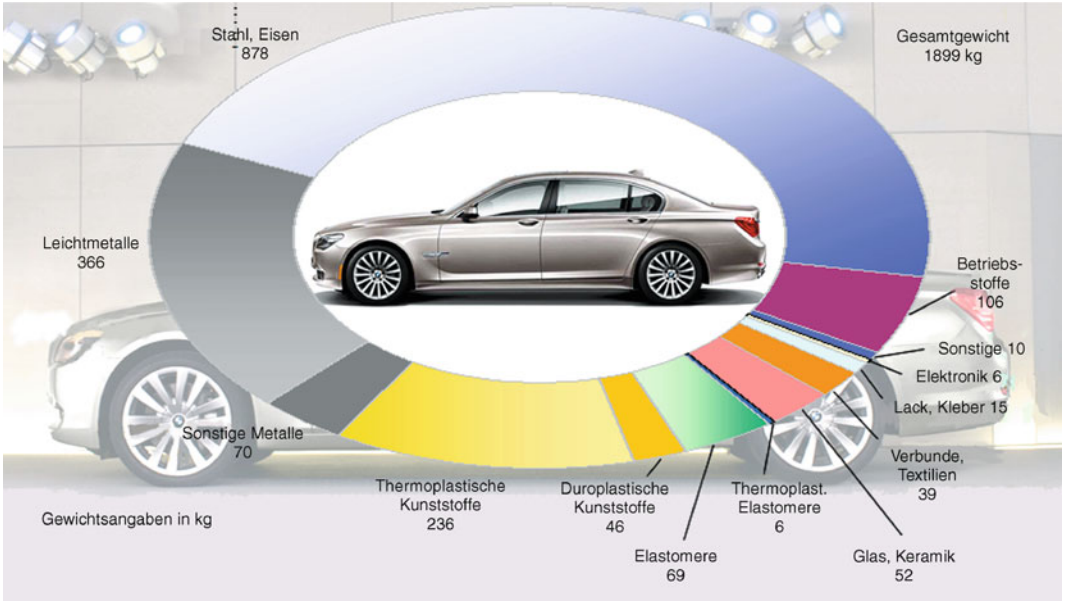



**Abb. 6.42** Werkstoffeinsatz im Pkw-Bau (Beispiel 7er BMW)

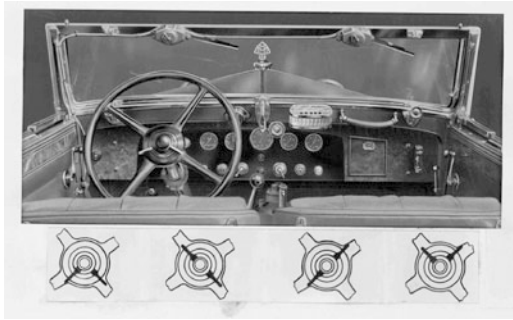


**Abb. 6.43** Instrumententafel des Maybach Zeppelin DS 7 (1930 bis 1937, Quelle: DaimlerChrysler)

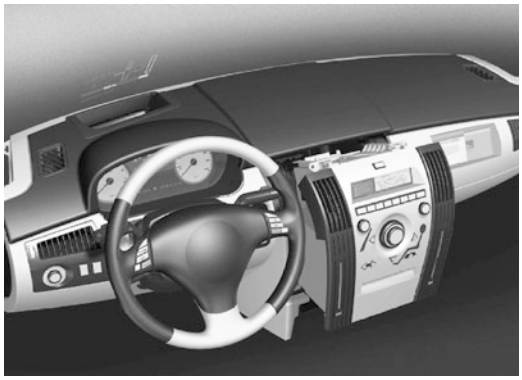


**Abb. 6.44** Modulares Cockpitkonzept (Quelle: Siemens VDO)

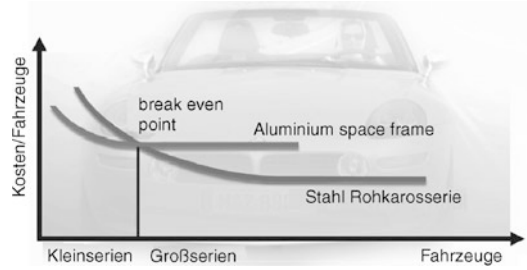



**Abb. 6.45** Wirtschaftliche Betrachtung von Aluminium Space Frame vs. Stahlkarosserie

(► Abschn. 6.1.2). Diese Bauweise ist vor allem für Kleinserien besonders ökonomisch; die im Vergleich zu Stahl höheren Werkstoffkosten des Aluminiums werden durch die geringeren Investkosten für derartige Anlagen kompensiert (Abb. 6.45). Bei neueren Fahrzeugmodellen findet man aus Leichtbaugründen auch Mischbauweisen für die Karosseriestruktur aus Stahl und Aluminium; hierbei kann z. B. ein Aluminium-Vorderbau mit der Stahlkarosse verbunden werden.

Ein Ansatz für zukünftige Karosseriekonzepte besteht in der Bauteil- und Funktionsintegration im Bereich der tragenden Strukturelemente im Verbund mit einer optimierten Krafteinleitung und entsprechend gewählten Fertigungsverfahren [77].

Eine Übersicht von Zielkonflikten bei der Entwicklung von Karosserien gibt Tab. 6.5. Der optimale Einsatz eines geeigneten Materials spielt nicht nur in wirtschaftlicher sondern auch in technischer Hinsicht eine große Rolle. Die ersten Überlegungen müssen den grundlegenden Kriterien wie Kosten, Verfügbarkeit, Verformbarkeit, Fügen usw. gelten.

Der Zielkonflikt Steifigkeit – Festigkeit – Leichtbau lässt sich anschaulich bei der Konzeption einer Karosserie verdeutlichen.

Das Leichtbau-Werkstoffkriterium für die Beulfestigkeit der Trägerstruktur ist $\sqrt{R_{p0,2}}/r$ [79]. Somit kann sie über die Werkstofffestigkeit erhöht werden. Um eine Reduzierung der Blechdicke bei gleicher Beulfestigkeit zu erreichen, muss die Festigkeit aber überproportional angehoben werden, da die Festigkeit linear, die Blechdicke aber quadratisch bis kubisch in die Beulfestigkeit einfließt. Das

**Tabelle 6.5** Zielkonflikte im Karosseriebau

| Konstrukteurziele | Zielkonflikte |
|---|---|
| Einsatz des „idealen" Werkstoffes | Kosten, Korrosion, Fügen, Reparatur, Recycling, Vorschriften, … |
| Gleichzeitig hohe Festigkeit und Steifigkeit | Bauraum steht in Konkurrenz steifigkeitserhöhender Strukturmaßnahmen wie Querschnittserhöhung |
| Multifunktionalität des Bauteiles | Werkstoffeigenschaften und Herstellbarkeit |
| Leichtbau | Akustische Auswirkungen |
| Design in Abhängigkeit der Stückzahl | Richtige Werkstoffauswahl und eventuelle Limitierung durch Herstellprozess |
| Kreislauffähigkeit des Materials | Kosten |

Potenzial höherfester Stähle in der Außenhaut ist deshalb geringer als bei Strukturteilen.

Die Beulsteifigkeit der Schalenstruktur wiederum berechnet sich nach dem Leichtbau-Werkstoffkriterium $\sqrt[3]{E}/\rho$ und ist stark vom E-Modul abhängig [79]. Da der E-Modul aber bei den Stählen ungefähr gleich ist, ist keine Verbesserung bei der Verwendung von höherfesten Stählen zu erwarten. Grosses Potenzial ist bei der Substituierung des Stahles durch Aluminium vorhanden, wenn man bei gleichem Gewicht die Blechdicke erhöht, da die Dicke, je nach Geometrie, zur 2ten oder 3ten Potenz eingeht.

Die Verwendung einer Aluminium-Lithium Legierung führt zu einem besseren Verhältnis von mechanischer Eigenschaft zu Masse, da der E-Modul erhöht und die Dichte reduziert wird.

Verringert man aus Gewichtsgründen die Stirnwanddicke, hat dies einen Einfluss auf die Akustikeigenschaften des Innenraumes. Akustikmaßnahmen, wie Dämmmatten, welche hier Abhilfe schaffen würden, sind meist teurer als eine Blechdickenerhöhung der Stirnwand.

Die verwendeten Werkstoffe sollen geeignet für Reparaturverfahren wie Ausbeulen, Schweißen, usw. sein. Die Konstruktion muss wirtschaftliche Reparaturabschnitte berücksichtigen.

### 6.2.3 Anforderungen und Auslegungskriterien an die Werkstoffe der Karosserie

Die Anforderungen an die Werkstoffe der Karosserie ergeben sich zuerst aus den funktionalen Eigenschaften des Fahrzeugs und einer gesamthaften Betrachtung der Prozesskette Presswerk-Karosseriebau-Oberfläche.

Anforderungsprofile der Karosserie- und der Interieurwerkstoffe sind in ◘ Tab. 6.6 und ◘ Tab. 6.7 zusammengefasst.

Mit den ausgewählten Rohkarosserie-Werkstoffen werden Schwingfestigkeitsuntersuchungen bis hin zum Ausfall unterzogen und in Wöhlerdiagrammen (Nennspannungsamplitude über der Schwingspielzahl) aufgetragen. Oft werden Dauerfestigkeitskennwerte ($N > 10^6$) angenommen, die es in der Realität in strenger Form nicht gibt.

◘ **Tabelle 6.6** Grundlegende Anforderungen an Rohkarosseriewerkstoffe

| **Karosserie** |
|---|
| Festigkeit |
| Steifigkeit |
| Leichtbau |
| Wirtschaftlichkeit |
| Korrosionsbeständigkeit |
| Fügbarkeit |
| Sicherheit |
| Reparaturfreundlichkeit |
| Optik |
| Verfügbarkeit |
| Recyclingfähigkeit |

◘ **Tabelle 6.7** Grundlegende Anforderungen an Innenraumwerkstoffe

| **Interieur** |
|---|
| Haptik |
| Optik |
| Steifigkeit |
| Festigkeit |
| Wirtschaftlichkeit |
| Energieaufnahme |
| Verfügbarkeit |
| Recyclingfähigkeit |

Die Schwingfestigkeit fällt nach dem Knick bei $N_k$ der Wöhlerlinie weiterhin leicht ab (◘ Abb. 6.46). Dadurch können Schäden im Bereich von hohen Schwingspielzahlen ($N > 10^6$) unter konstanten Belastungsamplituden auftreten. Vorhandene Erfahrungen erlauben aber eine Abschätzung des Wöhlerlinienverlaufes bis in den Bereich von Gigazyklen mit folgenden Neigungen nach dem Abknickpunkt: $k^* = 45$ (5 % Schwingfestigkeitsabfall pro Dekade) für Eisenbasiswerkstoffe und Magne-

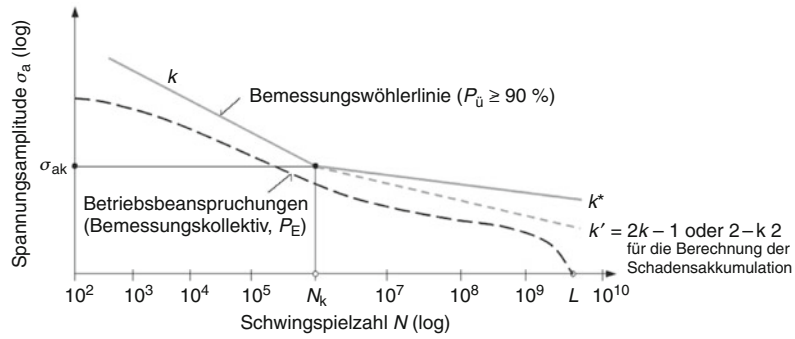



**Abb. 6.46** Betriebsfeste Bemessung

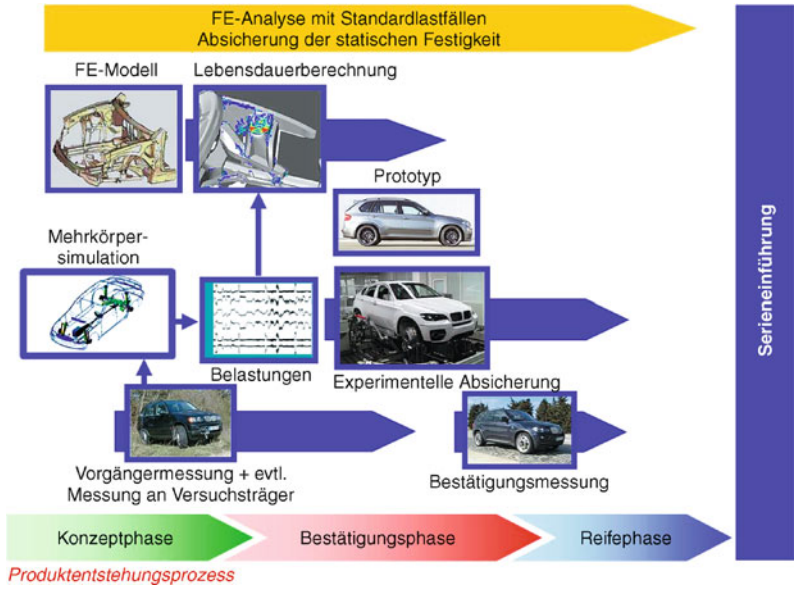



**Abb. 6.47** Lebensdauerabsicherung mit Hilfe von CAE (für die Standardlastfälle)

siumlegierungen, $k^* = 22$ (10 % Abfall) für Aluminiumlegierungen und Schweißverbindungen mit hohen Zugeigenspannungen. Auf Grund des beobachteten Abfalls der Schwingfestigkeit oberhalb von $10^7$ Schwingspielen wird die vorhandene IIW-Richtlinie (International Institute of Welding) zur schwingfesten Bemessung von geschweißten Konstruktionen entsprechend überarbeitet [80].

Nach Festlegung der Werkstoffe bzw. Fügeverfahren und Durchführung von Simulationen werden erste Karossen mittels Betriebsfestigkeitsprüfungen zyklischen Belastungen unterzogen (Abb. 6.47). Die Belastungsamplituden sind unterschiedlich in deren Häufigkeit, wobei auch Missbrauchsfälle abgedeckt werden müssen. Sicherheitskritische Bauteile sind so auszulegen, dass sie im Falle eines Missbrauches eine definiert plastische Verformung hinnehmen, bevor sie komplett versagen.

Im Presswerk werden Themen wie Umformverhalten, notwendige Umformkräfte und das Schneidverhalten des Werkstoffes berücksichtigt. Für das Fügen der Bauteile im Karosseriebau ist die Eignung der Werkstoffe für die verschiedenen kalten und warmen Fügeverfahren zu bewerten, wobei insbesondere das Fügen unterschiedlicher

**Tabelle 6.8** Vergleich Oberklasselimousine BJ. 1975 vs. Mittelklasselimousine 2001

| | BMW 3,0 Si Bj. 1975 | Δ Gewicht | BMW 330i Bj. 2001 |
|---|---|---|---|
| Fahrzeuglänge | 4,70 m | −10 kg | 4,47 m |
| Innenraumlänge | ≈ 1810 mm | | 1883 mm |
| Aufstandsfläche | 3,99 $m^2$ | +5 kg | 4,05 $m^2$ |
| Gewicht | 1440 kg | | 1430 kg |
| Gerippegewicht | 250 kg | | 260 kg |
| Beschl. 0–100 | 8,5 s | | 6,5 s |
| Steifigkeit | ≈ 9000 Nm/° | +35 kg | ≈ 17.500 Nm/° |
| Δ Ausstattung Blech | | +11 kg | Türverstärkung, verstärkte Schlösser und Sitzgestelle, … |
| | | ∑ +41 kg | |
| Δ Ausstattung | | +71 kg | Klima/Heizung (25), 6 Airbags (6) Kopfstützen, Gurtsysteme (6), ABS, ASR (5), 5 Ganggetriebe (5), Reversible Stoßfänger (10), Fensterheber (4), 2. Spiegel (2), Abgasreinigung (8) |

Werkstoffe betrachtet werden muss. Beispiele sind Stahl-Aluminium Verbindungen.

Trotz aller gewichtssenkenden Maßnahmen steigt das Fahrzeuggewicht bei fast allen Automobilherstellern an. Ein Grund hierfür ist, wie in Tab. 6.8 gezeigt, in der zunehmenden Ausstattung der Fahrzeuge zu suchen. Vergleicht man Karosserien mit ähnlicher Aufstandsfläche und Fahrzeuglänge (z. B. BMW 3,0Si und BMW 330i) müsste die Rohkarosserie des BMW 330i um 41 kg schwerer sein. Tatsächlich sind es aber nur 10 kg bei einer Verdoppelung der Steifigkeit. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von 31 kg oder 12 %, die über konstruktive Maßnahmen, verbesserte Fügeverfahren und Reduzierung der Blechdicke durch z. B. Verwendung von höherfesten Stählen erreicht worden sind [81].

Leichtbau und Gewichtsreduzierung im Automobilbau sind nicht nur in Kilogramm zu messen, sondern auch in Relation zu den erreichten Funktionen und der Größe zu betrachten. Die Auslegung der Rohkarosseriestruktur erfolgt hauptsächlich nach strukturdynamischen, statischen, crashrelevanten und gewichtsoptimierten Gesichtspunkten.

**Strukturdynamische Auslegung:** – (► Abschn. 3.4): Ziel ist das Erreichen der schwingungstechnischen und akustischen Ziele. Diese Anforderungen sind in den letzten Jahren weiter gestiegen. Sie erweisen sich in zunehmendem Maße als die treibende Kraft bei der Dimensionierung von guten Karosseriestrukturen. Als ein Maßstab für die dynamische Güte einer Karosserie kann das Schwingungsverhalten im Leerlauf betrachtet werden.

**Statische Auslegung:** – Bei der statischen Auslegung geht es primär um die steifigkeits- und festigkeitsrelevante Optimierung der Karosseriekonstruktion für das quasistatische Fahrverhalten wie z. B. Verwindung der Karosserie bei Kurvenfahrten.

**Crashrelevante Auslegung:** – (► Kap. 9): Ein ständiger Entwicklungsschwerpunkt ist die Verbesserung des Insassenschutzes. Wie auch in der statischen Auslegung (Steifigkeit) nimmt hierbei die Simulation einen besonderen Schwerpunkt ein, da sich mit ihr schon in der Konzeptphase wirksame Maßnahmen in die Karosseriekonstruktion integrieren und absichern lassen. Die zuvor beschriebenen guten statischen und dynamischen Eigenschaften bilden eine hervorragende Basis zur Crashoptimierung.

**Gewichtsoptimierte Auslegung:** – Zusätzlich zu den drei vorher genannten Auslegungskriterien spielen der Kraftstoffverbrauch und die Fahrdynamik eine bedeutende Rolle. Aus Sicht der Karosserie wird der Verbrauch neben der Aerodynamik vom Fahrzeuggewicht geprägt. Durch die selbstragende, optimierte Bauweise der Karosserie ging der Anteil der Rohkarosserie am Leergewicht trotz der Funktionssteigerungen deutlich zurück [82].

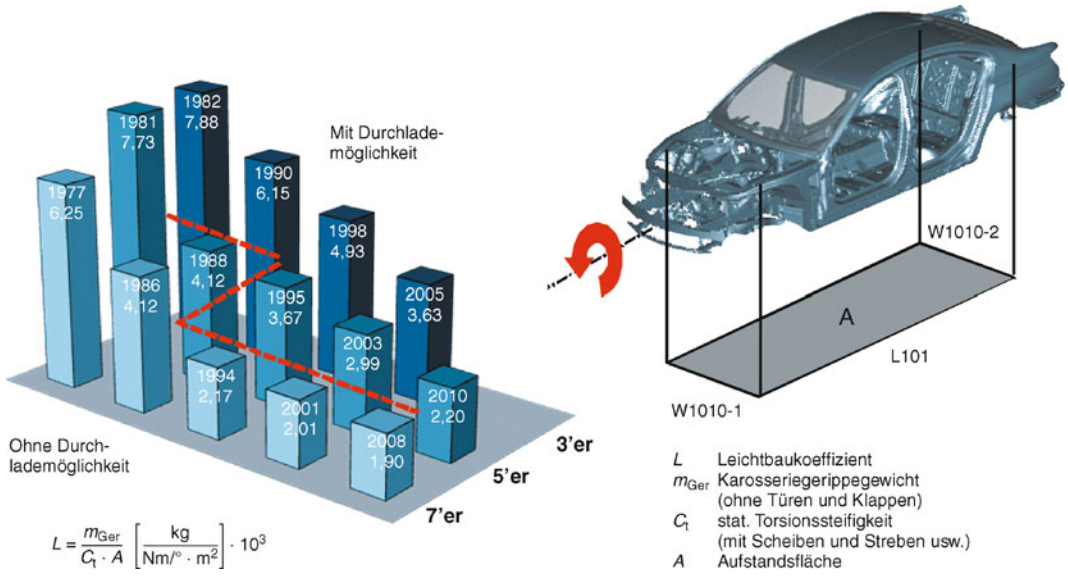



**Abb. 6.48** Entwicklung des funktions- und größenbezogenen Gerippegewichtes

Es wurde, ausgehend von den wichtigsten Karosseriefunktionen und den dazu definierten Zielen, die spezifische Leichtbauquote oder der Leichtbaugütewert $L$ definiert, welcher der Quotient aus dem benötigten Gerippegewicht $m_{Ger}$ (ohne Scheiben) pro Torsionssteifigkeit $C_t$ (mit Scheiben) und der zugehörigen Aufstandfläche $A$ (Spur × Radstand) ist (Abb. 6.48).

Dieser Leichtbaugütewert $L$, also Gewicht pro Funktion und Größe, zeigt, welche gravierende spezifische Gewichtsreduktion die Stahlkarosse in den letzten Jahren erfahren hat. Erreicht wurde die Verbesserung von $L$ durch bessere Konstruktionen, bessere Fügeverfahren (Laserschweißen, Kleben, …) und durch neu entwickelte Werkstoffe. Die Funktionen wie statische, dynamische Steifigkeiten und passive Sicherheit haben bei annähernd gleichem Flächengewicht einen hohen Stand erreicht. Daher gilt es zukünftig unter Beibehaltung dieser Funktionen, alle Anstrengungen, sich auf die Reduzierung des Flächengewichtes zu konzentrieren und somit eine weitere Verbesserung der Leichtbaugüte zu erzielen.

## 6.2.4 Typische Karosseriewerkstoffe

### 6.2.4.1 Stahlwerkstoffe

Abb. 6.49 zeigt, dass die über das Rohkarosseriegewicht gemittelte Mindestdehngrenze der eingesetzten Stähle in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Zur Reduzierung des Karosseriegewichts und wegen des Wettbewerbs mit Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium und Kunststoff wurden in den letzten Jahren neue Stahlsorten entwickelt. 50 % der heute verfügbaren Sorten wurden in den letzten 10 Jahren entwickelt oder zumindest optimiert [81].

Bei den bisher üblichen kaltgewalzten Stählen reicht das Festigkeitsspektrum von speziellen Tiefziehsorten wie DX56 oder DC06 mit einer Mindestfestigkeit von 120 MPa bis zu mikrolegierten Sorten mit 420 MPa. Warmgewalzte Stähle erreichen heute schon Zugfestigkeiten von über 1200 MPa, kaltgewalzte Stähle gleicher Festigkeit sind in Entwicklung. In den meisten Festigkeitsklassen stehen unterschiedliche Stahlsorten

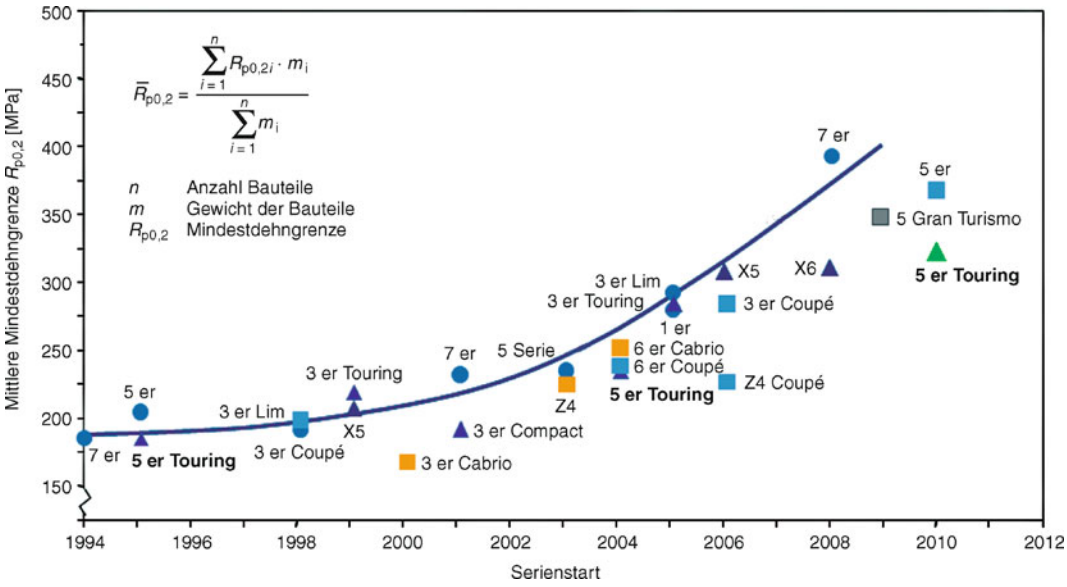



**Abb. 6.49** Entwicklung der Mindestdehngrenzen von typischen Karosseriestahlwerkstoffen

mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung.

In Tab. 6.9 ist eine Struktur und Klassifizierung der Stahlwerkstoffe abgebildet. Oft werden Stähle wie DP600 nach der maximalen Festigkeit, der Zugfestigkeit, bezeichnet. Um bei der Bauteilauslegung auf der sicheren Seite zu sein, muss aber der worst case, also die minimale Dehngrenze herangezogen werden.

Werkstoffe und Blechdicken in der Außenhaut sind u. a. nach der Beulfestigkeit (z. B. bei Hageleinwirkung) und Beulsteifigkeit (Einbeulen der Heckklappe beim Anschieben des Fahrzeuges) auszulegen.

Bake Hardening Stähle haben sich in vielen Bereichen der Außenhaut durchgesetzt, da sie im weichen Zustand gut umformbar sind und durch die Erwärmung im Lackierprozess eine zusätzliche Festigkeitssteigerung erfahren. Bake hardening Stähle zeichnen sich dadurch aus, dass der bake hardening Effekt gerade in gering umgeformten Bereichen relativ groß ist, so dass er bei der Türaußenhaut voll zum Tragen kommt.

Die Kaltverfestigung von IF-Stählen (Y-Stählen) und isotropen Stählen ist größer als die von bake hardening Stählen. Bei stärker umgeformten Bauteilen kann die Kaltverfestigung dieser Stähle alleine größer sein, als die Kaltverfestigung plus Festigkeitssteigerung durch Wärmebehandlung bei bake hardening Stählen. In diesen Fällen bieten sich isotrope Stähle für Bauteile mit Streckziehbeanspruchung und IF-Stähle für Bauteile mit Tiefziehbeanspruchung an.

Die überwiegend durch Streckziehen hergestellte Frontklappe ist ein Beispiel für die Verwendung isotropen Stahls.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei Strukturteilen im Fahrzeuginneren, insbesondere in Bereichen von Blechdopplungen und Knotenpunkten die für entsprechende bake hardening Effekte erforderlichen Temperatur-Zeitverläufe in den Trocknerprozessen nicht immer erreicht werden. Die Festigkeitssteigerung durch bake hardening ist in diesen Bereichen deshalb häufig gegenüber der Kaltverfestigung bei der Umformung gering.

Dualphasenstähle (DP-Stähle) sind ab Festigkeiten von 270 MPa verfügbar. Für die Außenhaut können Bleche dieser Festigkeit nur eingesetzt werden, wenn das Design begrenzte Anforderungen an die Umformtechnik stellt. Um das Potenzial der DP-Stähle voll auszuschöpfen, muss die Umfor-

**Tabelle 6.9** Klassifizierung der Stahlsorten nach Festigkeit und weiteren Eigenschaften (H = Höherfester Stahl; B = Bake hardening Stahl; Y = IF (interstitial free) Stahl; I = Isotroper Stahl; X = Dualphasen Stahl; T = TRIP Stahl)

| $R_{p\,0.2}$ [MPa] | Referenz für Tiefziehen | Zusätzliche Festigkeit durch Bake Hardening bei geringer Umformung | Hohe Kaltverfestigung und bake hardening bei großer Umformung | Streck-ziehen | Verbesserte Umformbarkeit bei höheren Materialkosten | Deutlich bessere Umform-barkeit bei deutlich höheren Kosten |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 120 | DC06, DX56 | | | | DC07, DX57 | |
| 140 | DC04, DX54 | | | | | |
| 160 | H160Y | H160B | | | | |
| 180 | H180Y | H180B | | | | |
| 220 | H220Y | H220B | | H220I | | |
| 260 | H260Y | H260B | H270X | H260I | | |
| 300 | | H300B | H300X | H300I | | Austenit |
| 340 | H340LA | | H340X | | | Austenit |
| 380 | H380LA | | | | | Austenit |
| 420 | H420LA | | H400T | | H400T | Austenit |
| 500 | H500X | | | | | |
| 700 | CP-W 800 | | | | | |
| 1000 | MS-W 1200 | | | | | Warmumformbare Borstähle |

mung aber so groß wie möglich sein. DP-Stähle weisen einen bake hardening Effekt auf. Im Gegensatz zu den bisherigen bake hardening Stählen ist die Verfestigung bei geringer Bauteildehnung aber gering und nimmt erst mit zunehmender Dehnung zu. Bei geringer Umformung kann deshalb ein bake hardening Stahl gleicher Ausgangsfestigkeit zu höherer Beulfestigkeit führen.

### 6.2.4.2 Aluminiumlegierungen

Die Bedeutung von Aluminium als Karosseriewerkstoff hat aufgrund seiner geringen Dichte, der hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit, seiner Korrosionsbeständigkeit und seiner passablen Umformbarkeit in den letzten Jahren stark zugenommen.

Aluminiumlegierungen werden abhängig vom Herstellungsverfahren in zwei Hauptgruppen eingeteilt: Plastisch verformbare Knetlegierungen und Gusslegierungen. Innerhalb dieser beiden Hauptgruppen kann man zwischen aushärtbaren und nicht aushärtbaren (naturharten) Legierungen unterscheiden.

Für die Karosserie stehen hauptsächlich die Produktformen Blech, Profil und Gussteile zur Verfügung. Bei den Blechlegierungen sind im Karosseriebereich vorrangig die 5xxx (Al-Mg Basis, nicht aushärtbar) und die 6xxx (Al-Mg-Si Basis, aushärtbar) Legierungen im Einsatz.

Die Legierungen der 5xxxer Gruppe sind naturhart, d. h. sie erfahren lediglich während der Umformung eine Kaltverfestigung, die nicht weiter gesteigert werden kann. Wenn eine Umformung notwendig ist, müssen diese Legierungen nach dem Walzen vollständig weichgeglüht werden. Während der Umformung im Presswerk erfahren sie eine Kaltverfestigung, welche während des KTL-Prozesses (Kathodische Tauch Lackierung) wieder teilweise zurückgehen kann. Neue Entwicklungen auf dem Gebiet sind Aluminiumlegierungen mit einem gut umformbaren und gleichzeitig festen Kern aus AlMg5,7Mn und einer beidseitigen Decklage aus AlMg1. Die Legierungen der 6xxxer Gruppe verhalten sich hier anders, denn sie können bei einer Warmauslagerung nach der Umformung mit einem entsprechenden Temperatur-/Zeitkollektiv noch eine Festigkeitssteigerung erfahren.

Die Festigkeit des fertigen Bauteiles wird somit entschieden beeinflusst von

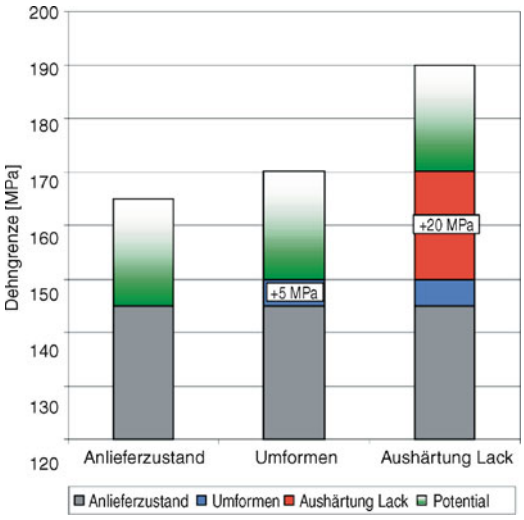



**Abb. 6.50** Steigerung der Dehngrenze nach den einzelnen Verfahrensschritten zur Erreichung der endgültigen Festigkeit am Motorträger aus AlSi0,6Mg0,5

- Anlieferungszustand des Platinen,
- Zunahme der Festigkeit bei der Umformung,
- Zeit-Temperaturverlauf der nachfolgenden Wärmebehandlungen (Abb. 6.50).

Im Gegensatz zu 5xxx Legierungen haben die 6xxx den Vorteil, dass bei einer Umformung keine Oberflächenunebenheiten in Form von großen flammenförmigen Mustern (Fließfiguren Typ A) oder in Form von feinen Streifen (Typ B) auftreten. In Europa setzen sich die Legierungen AA6016 oder die AA6181A für Außenhautanwendungen durch, wogegen in Japan großteils AlMg(Cu) Legierungen und in Nordamerika höherfeste AA6111 und AA6022 verwendet werden. Neue Entwicklungen gehen speziell das Problem der Entstehung der Fließfiguren bei 5xxx Legierungen an und die AA5182ffa (fließfigurenarm) kann als Alternative angesehen werden. Die bessere Umformbarkeit ermöglicht eine komplexere Bauteilgestaltung, wobei auch die geringeren Herstellungskosten als Vorteile zählen (Tab. 6.10).

Schmelz- und pulvermetallurgisch hergestellte Aluminiumschäume haben den Vorteil niedriger Dichte (0,2 g/cm$^3$) bei einer Porosität von knapp 90 Prozent. Die Potentiale sind einerseits in der Verwendung als Energieabsorber (A-Säule) oder aber als Schallisolierung zu finden.

**Tabelle 6.10** Einsatzbeispiele von Aluminium

| Karosserieteil | Bauteil | Art der Legierung |
|---|---|---|
| Außenhaut | Frontklappe | AA6016 bördeloptimiert |
| | Seitenwände | AA6016 bördeloptimiert |
| Innenblech | Frontklappe | AA5182 |
| | Seitenwände vorne | AA5182 |
| Strukturteile | Vorderbau | AlMg3,5Mn(0,5) |



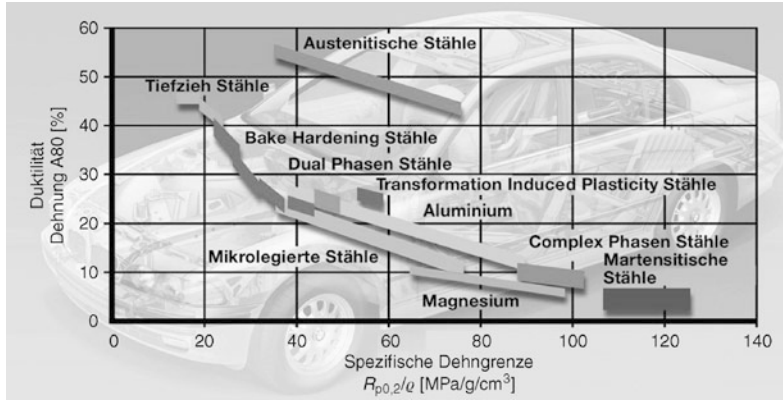



**Abb. 6.51** Duktilität über spezifischer Dehngrenze

### 6.2.4.3 Magnesiumlegierungen

Magnesium hat eine geringere Dichte (1,74 g/cm$^3$) als Aluminium und ist daher um etwa ein Drittel leichter als Aluminium. 2,7 Gewichtsprozent der Erde sowie 0,13 % der Weltmeere bestehen aus diesem Leichtmetall, was dessen Verfügbarkeit auf mehrere Jahrhunderte sichert. Die Kennwerte wie spezifische Festigkeit und die auf Dichte normierte Steifigkeit sind ebenfalls besser als von einigen Stahlsorten (Abb. 6.51 und Tab. 6.11). Magnesium kann als Strangpressprofil, als Gussmaterial und – eher noch selten – als Blech konstruktiv eingesetzt werden. Dennoch ist die Verbreitung im Karosseriebereich aufgrund der hohen Korrosionsneigung, den Materialkosten und der aufwendigen Verarbeitung derzeit noch gering. Der Korrosion versucht man mit der Verwendung von HP (high purity)-Legierungen entgegenzuwirken, welche sich durch geringe Eisen-, Kupfer- und Nickelgehalte auszeichnen.

Magnesium lässt sich im kalten Zustand aufgrund seiner hexagonalen Gitterstruktur sehr schlecht umformen. Daher werden Magnesium-Knetlegierungen hauptsächlich durch Strangpressen, Warmpressen oder Walzen umgeformt.

Magnesium-Gusslegierungen können im Vakuum Druckguss hergestellt werden, welches eine wirtschaftliche Herstellung von geometrisch komplexen Bauteilen bei geringen Wandstärken erlaubt. Auch die längeren Werkzeugstandzeiten im Druckguss sind ein Vorteil.

### 6.2.4.4 Kunststoffe

Kunststoffe werden seit Mitte der 70er Jahre mit Erfolg im Karosseriebereich eingesetzt. Generelle Anforderungen an Karosserieaußenhautbauteile aus Kunststoff sind: Ausreichendes mechanisches/thermisches Eigenschaftsprofil, Class-A Oberfläche, geeignetes Bruchverhalten, Lackierfähigkeit und niedrige Wärmeausdehnung.

**Tabelle 6.11** Materialeigenschaften

| | E-Modul [MPa] | Dichte [g/cm³] | $Rp_{0,2}$ [MPa] | $E/\rho$ | $\sqrt{E/\rho}$ | $\sqrt[3]{E/\rho}$ | $Rp_{0,2}/\rho$ | $\sqrt{Rp_{0,2}/\rho}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DC 04 | 210.000 | 7,85 | 185 | 26.752 | 58,4 | 7,6 | 23,6 | 1,7 |
| H 300 B | 210.000 | 7,85 | 340 | 26.752 | 58,4 | 7,6 | 43,3 | 2,3 |
| Borstahl | 210.000 | 7,85 | 1100 | 26.752 | 58,4 | 7,6 | 140,1 | 4,2 |
| AlMg5Mn | 70.000 | 2,70 | 185 | 25.926 | 98,0 | 15,3 | 68,5 | 5,0 |
| AlSi1,2Mg0,4 | 70.000 | 2,70 | 260 | 25.926 | 98,0 | 15,3 | 96,3 | 6,0 |
| AZ 91 T6 (Mg-Guss) | 45.000 | 1,75 | 200 | 25.714 | 121,2 | 20,3 | 114,3 | 8,1 |
| TiAl 6 V 4 F89 (Titan-Blech) | 110.000 | 4,50 | 820 | 24.444 | 73,7 | 10,6 | 182,2 | 6,4 |
| GFK (‖, 55 %) | 40.000 | 1,95 | 950 | 20.513 | 102,6 | 17,5 | 487,2 | 15,8 |
| GFK (⊥, 55 %) | 12.000 | 1,95 | 475 | 6154 | 56,2 | 11,7 | 243,6 | 11,2 |
| AFK (‖, 55 %) TM-Typ | 70.000 | 1,35 | 1500 | 51.852 | 196,0 | 30,5 | 1111,1 | 28,7 |
| AFK (⊥, 55 %) TM-Typ | 6000 | 1,35 | 750 | 4444 | 57,4 | 13,5 | 555,6 | 20,3 |
| CFK (‖, 55 %) | 110.000 | 1,40 | 1100 | 78.571 | 236,9 | 34,2 | 785,7 | 23,7 |
| CFK (⊥, 55 %) | 8000 | 1,40 | 700 | 5714 | 63,9 | 14,3 | 500,0 | 18,9 |
| GF-PA-12 (‖, 54 %) | 35.400 | 1,70 | 600 | 20.824 | 110,7 | 19,3 | 352,9 | 14,4 |
| GF-PA-12 (⊥, 54 %) | 4400 | 1,70 | 65 | 2588 | 39,0 | 9,6 | 38,2 | 4,7 |
| Glas (massiv, spröde) | 70.000 | 2,50 | 1000 | 28.000 | 105,8 | 16,5 | 400,0 | 12,6 |

Beleuchtet man die Hintergründe und Entscheidungskriterien bei der Auswahl eines Kunststoffsystems für eine Anwendung, so stellt man fest, dass ein System dann ausgewählt wird, wenn es im Vergleich zu anderen Werkstoffsystemen unter Berücksichtigung der Kriterien

- Design,
- Maßhaltigkeit,
- Integration,
- Korrosion,
- Oberfläche,
- Bruchverhalten,
- Kosten,
- Gewicht.

zu deutlichen Vorteilen kommt (◘ Tab. 6.12).

Bauteile, die bereits im Rohbau an die Karosserie montiert werden und den gesamten Lackierprozess (On-line-Lackierung) des Fahrzeuges durchlaufen, sind Temperaturen bis 200 °C im KTL-Trockner ausgesetzt. Wird das Bauteil nach dem KTL-Trockner-Durchlauf an die Karosserie gebaut (In-line), erreichen die maximal auftretenden Temperaturen etwa 160 °C. Der Einfluss der Temperaturbelastung auf die Eigenschaften des Klebstoffes muss bei der Bauteilauslegung bereits im Vorfeld berücksichtigt werden. Aufgrund der Forderung nach Online- bzw. In-line-Lackierung sowie mangelnder Wirtschaftlichkeit und geringem Gewichtspotenzial werden PUR-(R)RIM (Reinforced Reaction injection moulding) Werkstoffe überwiegend nur noch für Stoßfängerverkleidungen eingesetzt.

◘ Abb. 6.52 zeigt, dass Sheet Mould Compounds (SMC) Vorteile bezüglich des niedrigen Längenausdehnungskoeffizienten, der Steifigkeit und des Bruchverhaltens bieten. Die Vorteile von Thermoplasten sind Gewicht, Designfreiheit und die gute Oberflächenstruktur.

#### 6.2.4.4.1 Thermoplaste

Es sind seit längerem Thermoplaste auf dem Markt erhältlich, welche die Anforderungen, die an eine Kunststoffaußenhaut gestellt werden, im wesentlichen erfüllen. Im Bereich der konventionell lackierten Thermoplast-Spritzgießbauteile kann prinzipiell zwischen zwei Werkstoffgruppen unterschieden werden, welche aufgrund der unterschiedlichen Wärmeformbeständigkeit als Offline bzw. Inline/Online-Kunststoffe eingesetzt werden und in der ◘ Tab. 6.13 verglichen werden.

**Offline-Kunststoffe** Diese Kunststoffe weisen ein relativ gutes mechanisches Eigenschaftsprofil auf und sind in dieser Hinsicht den Inline/Online-Kunststoffen deutlich überlegen. Die Wärmeformbeständigkeit ist jedoch wesentlich niedriger einzustufen. Die Hauptnachteile dieser Werkstoffe sind in der Farbgebung, dem sogenannten Farbmatching, zu sehen, da diese Bauteile separat lackiert werden und mit der Karosserie hinsichtlich der Farbeigenschaften (Farbton, Glanz, Brillanz) übereinstimmen müssen. Hinzu kommt, dass der separate Lackierprozess sehr kostenintensiv ist und einen entsprechenden logistischen Aufwand in der Montage erfordert.

**Inline/Online-Kunststoffe** Diese Kunststoffe weisen deutlich niedrigere mechanische Eigenschaften als die Offline-Kunststoffe auf, mit Ausnahme der deutlich höheren Wärmeformbeständigkeit. Dadurch ist eine Lackierung mit der Karosserie möglich, so dass keine Farbmatching-Probleme bei der Herstellung entstehen. Für die Funktion sind jedoch deutliche Nachteile gegenüber den Offline-Thermoplasten vorhanden.

#### 6.2.4.4.2 Duroplaste

Zahlreiche Kriterien, wie die große Formfreiheit, Funktionsintegration und die Wirtschaftlichkeit bei niedrigen Stückzahlen sprechen für Duroplaste (◘ Tab. 6.14), deren Einführung in der Außenhaut bereits viele Jahre zurückliegt. Von diesen Werkstoffen werden bei vergleichbarem Gewicht gleiche Funktionalitäten wie bei einer Metallkonstruktion vorausgesetzt. Durch neueste Entwicklungen werden porenfreie Bauteile mit einer entsprechenden Class-A-Oberfläche erreicht. Diese Bauteile können im Rohbau montiert werden und durchlaufen den gesamten Lackierprozess. Optimierte Emissionswerte und gute Recyclingkonzepte haben die Situation für diese Werkstoffgruppe in den letzten Jahren deutlich verbessert.

Die für Anwendungen in der Außenhaut bedeutungsvollsten Verfahren sind SMC und RRIM. Die Harzsysteme erstrecken sich über das Spektrum der ungesättigten Polyester-, Vinylester- und Epoxy-

**Tabelle 6.12** Vergleich der Werkstoffe (Beispiel Seitenwand 6er BMW)

| Werkstoffe | Stahl | Aluminium | Thermoplast | SMC | RRIM |
|---|---|---|---|---|---|
| Gewicht pro Bauteil [kg] | 4,5 | 2,5 | 2,5 | 2,9 | 3,2 |
| Wandstärke [mm] | 0,8 | 1,2 | 3 | 2,1 | 3,5 |
| Lackierszenario | online | online | inline | online | inline |
| Herstellkosten [%] | 100 | 170 | 100 | 120 | 150 |

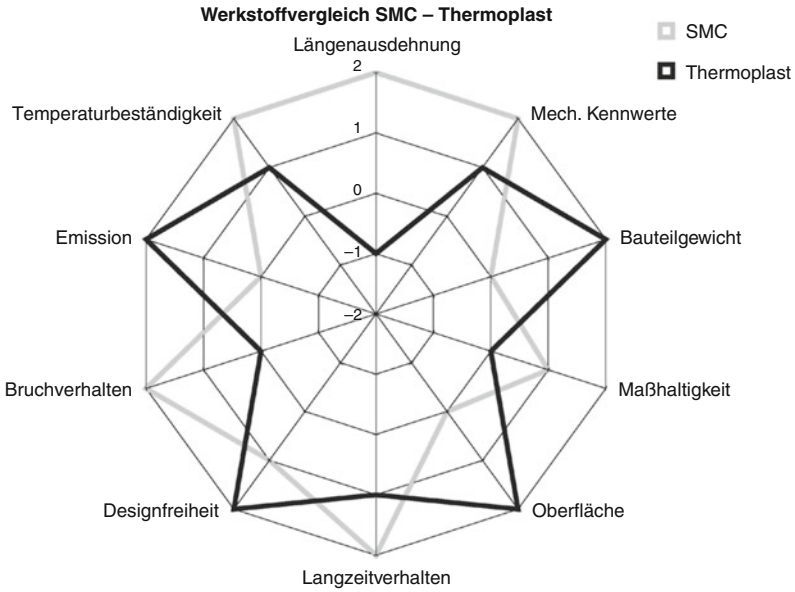



**Abb. 6.52** Werkstoffvergleich SMC – Thermoplast

**Tabelle 6.13** Eigenschaftsprofil von Online- bzw. Inline lackierten Kunststoffen (k. B. = kein Bruch)

| Eigenschaft | Einheit | Prüfnorm | Off-line | On-line |
|---|---|---|---|---|
| Biege-E-Modul | $N/mm^2$ | DIN 53457 | 3300 | 1800 |
| Schlagzähigkeit | $KJ/m^2$ | DIN 53453 | k. B. | k. B. |
| Kerbschlagzähigkeit | $KJ/m^2$ | DIN 53453 | 18 | 45 |
| Zugfestigkeit | $N/mm^2$ | DIN 53455 | 55 | 45 |
| Reißdehnung | % | DIN 53455 | 23 | 50 |
| Längenausdehnungskoeff. | 10-6/K | DIN 53752 | 45 | 90 |
| Vicat B/50 Erweichungs-Temperatur | °C | DIN 53460 | 130 | 175 |

**Tabelle 6.14** Duroplaste (BMC = Bulk moulding compound; UP = ungesättigter Polyester)

| Kunststoffe und Technologie | Kunststoff | Verfahren | Oberfläche |
|---|---|---|---|
| SMC | UP–GF | Pressen | Online-Lackierung |
| BMC | UP–GF | Spritzgießen | Inline-lackierfähig |
| RIM | PUR | Schäumen | Offline-Lackierung |
| R RIM | PUR-GF | Schäumen | Inline-lackierfähig |



harze sowie Polyurethane. Während bei den Thermoplastwerkstoffen verschiedene Eigenschaftsprofile durch deren Vielfalt abgedeckt werden, geschieht hier die Einstellung der Eigenschaften größtenteils über die Rezeptur, Art und Richtung der Verstärkungsfasern und über den Faseranteil.

Das Recycling von Duroplasten ist durch den Mahl- und Sichtprozess sehr aufwändig und führt zu einer Verteuerung der Produkte (Füll- und Verstärkungsstoffe).

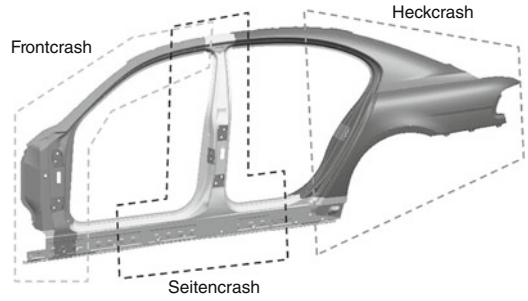



**Abb. 6.53** Im Crash beanspruchte Bereiche des Seitenrahmens außen

## 6.2.5 Sortenreine Beispiele

### 6.2.5.1 Stahl Seitenrahmen

Dieses Bauteil ist ein schwieriges Karosserieteil, da sowohl hohe Ziehtiefen (Türausschnitte) als auch hochwertige Außenhautqualität erreicht werden muss. Bisher konnten dafür nur weiche Tiefziehsorten DC04 oder DX54 verwendet werden, in einigen Fällen waren sogar Sondertiefziehsorten DC06, DX56, DC07 oder DX57 erforderlich.

Abb. 6.53 zeigt, welcher Teil des Seitenrahmens bei Frontal-, Seiten- und Heckcrash beansprucht wird. Durch höhere Festigkeit lässt sich die Blechdicke bei gleicher Crashperformance reduzieren und Gewicht sparen.

Bei einer aktuellen Oberklasselimousine wird mit einem H180Y ein höherfester Stahl für einen Seitenrahmen eingesetzt. Die Blechdicke kann bei vergleichbarer Crashperformance gegenüber einem weichen Stahl um 0,1 mm reduziert werden was einer Gewichtseinsparung von 4 kg pro Fahrzeug entspricht.

Die Einsparung weiterer 4 kg durch Einsatz eines H220Y ist nicht möglich, da mit diesem Werkstoff, wie Abb. 6.54 zeigt, die Grenzen der Umformbarkeit überschritten sind. Auch der Einsatz eines H180B ist nicht möglich. Dieser führt in weniger stark umgeformten Bereichen, insbesondere im Außenhautbereich, zwar zu einer zusätzlichen Festigkeitssteigerung durch den Bake Hardening Effekt, die Tiefziehbeanspruchung in diesem Bauteil




**Abb. 6.54** Ziehkritische Bereiche in Seitenrahmen außen

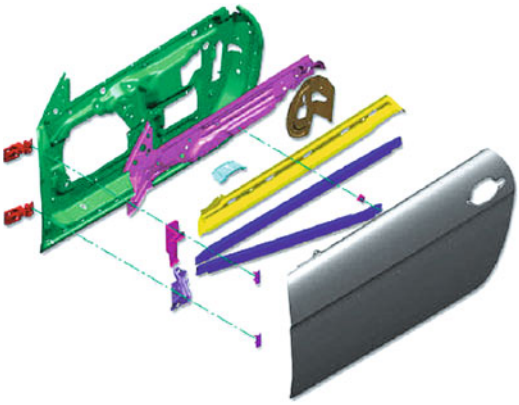


**Abb. 6.55** Tür in Schalenbauweise (rot = Stahl, andere = Aluminium)

ist aber so hoch, dass für eine prozesssichere Fertigung der für Tiefziehen optimierte IF-Stahl H180Y erforderlich ist.

#### 6.2.5.2 Aluminium Seitentür

Die in Schalenbauweise hergestellte Seitentür muss die gleichen Sicherheits- und Steifigkeitsziele wie eine Stahltüre aufweisen (Abb. 6.55). Erreicht wird dies durch eine Alu-Schalenbauweise mit zwei V-förmig angeordneten Versteifungsstreben (Strangpressprofile) und einer Türverhakung. In hohen dauerbelasteten Bereichen werden Verstärkungen aus hochfestem Aluminium eingesetzt. Der Zusammenbau entsteht durch Fügen mit speziellen Nieten und Kleben. Durch diese Bauweise kann das Gewicht um 10 kg pro Fahrzeug im Vergleich zu einer gleich dimensionierten Stahltür reduziert werden.

#### 6.2.5.3 Magnesium Instrumententafelträger

Die Einsatzgebiete von Magnesium erstrecken sich eher auf den Innenbereich wie z. B. Instrumententafelträger. Mit einer Integration mehrerer Komponenten kann hier bei einem mittels Druckgussverfahren hergestellten I-Tafelträger (Abb. 6.56) ein Gewichtsvorteil von ca. 3 kg im Gegensatz zu einer Stahlvariante erreicht werden. Ein geschweißter Träger würde aus 25 Teilen bestehen. Zur Beherrschung der Korrosion muss gewährleistet werden, dass sich kein Elektrolyt an den Berührungsflächen zur Stahlkarosserie sammeln kann.

#### 6.2.5.4 Hardtop als Sandwichkonstruktion

Die Vorteile des verwendeten Werkstoffs, PUR-GF/PUR Schaum Sandwich mit PUR Gießelastomercoating gegenüber Aluminium sind u. a. durch Designfreiheit und Fertigungsprozess gegeben. Voraussetzung hierbei ist die werkstoffgerechte Konstruktion. Werkzeugsystem und Oberflächenveredelung müssen für diese Anwendung angepasst werden. Bei Stückzahlen von ca. 5000 über die Laufzeit verteilt ergeben sich Kostenvorteile gegenüber einem Aluminium-Hardtop.

### 6.2.6 Mischbauweisen

#### 6.2.6.1 Mischbau in der Karosserie

Für Agilität und Dynamik eines Fahrzeugs spielt nicht nur das Gesamtgewicht, sondern auch die Gewichtsverteilung eine entscheidende Rolle. Strebt man eine gleichmäßige Achslastverteilung von je 50 % auf die Vorder- bzw. Hinterachse an, kann der Vorderbau, aufgrund des schweren Motors, aus Leichtmetall bestehen und an die Stahlkarosserie angebunden werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Aluminiumvorderwagen im Falle eines Crashs die Verformungsenergie, bei kontrollierter Verformung, sehr gut absorbiert, hingegen die Fahrgastzelle sich nicht verformt. Bei diesem Konstruktionsprinzip müssen unterschiedliche Wärmeausdehnungen von Stahl und Aluminium, mögliche Kontaktkorrosion sowie kostengünstige Reparaturkonzepte berücksichtigt werden.

Durch den Einsatz von Aluminium im Vorderbau einer oberen Mittelklasselimousine wurde eine Gewichtsreduzierung in Höhe von ca. 20 kg erreicht (Abb. 6.57).

Die Design-Anforderungen hinsichtlich Flächenverlauf und charakterbildenden Sicken am Fahrzeug wachsen stetig. Gestalterische Einschränkungen, indem z. B. nur gewisse Radien oder Verprägungen zulässig oder Flächenbombierungen im Wechsel zwischen konkav und konvex untersagt sind, ermöglicht der Einsatz von Thermoplasten eine Umsetzung gerade dieser charakteristischen Formen. In diesem Fall lässt sich mit einer Seitenwand vorne aus einem Thermoplasten gegenüber der Stahlvariante ca. 3 kg Gewicht pro Fahrzeug einsparen. Aus diesen Gründen bestehen die vorderen

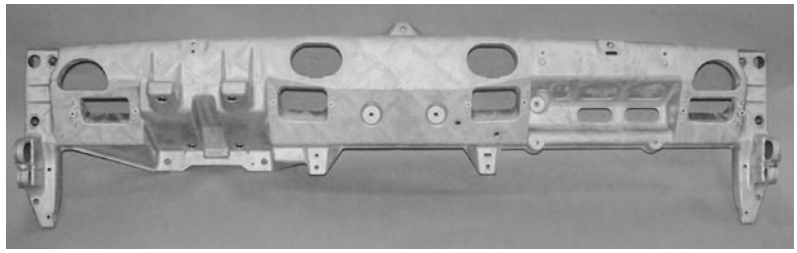


**Abb. 6.56** Mg I-Tafelträger aus AM60



Seitenwände beim BMW 3er Coupé (Abb. 6.58) aus einem mineralverstärkten Thermoplasten, der noch dazu eine kostengünstige Online-Lackierung erlaubt.

Die Realisierung hängt entscheidend davon ab, die hohe Wärmedehnung konstruktiv in den Griff zu bekommen (Abb. 6.59). Einerseits muss das Fugenbild passen, anderseits dürfen bei einer zu großen Behinderung der Wärmedehnung keine optisch sichtbaren Oberflächenunebenheiten entstehen. Gelöst wurde diese Aufgabe mit Hilfe einer äußerst innovativen Anbindungstechnik, in der sich

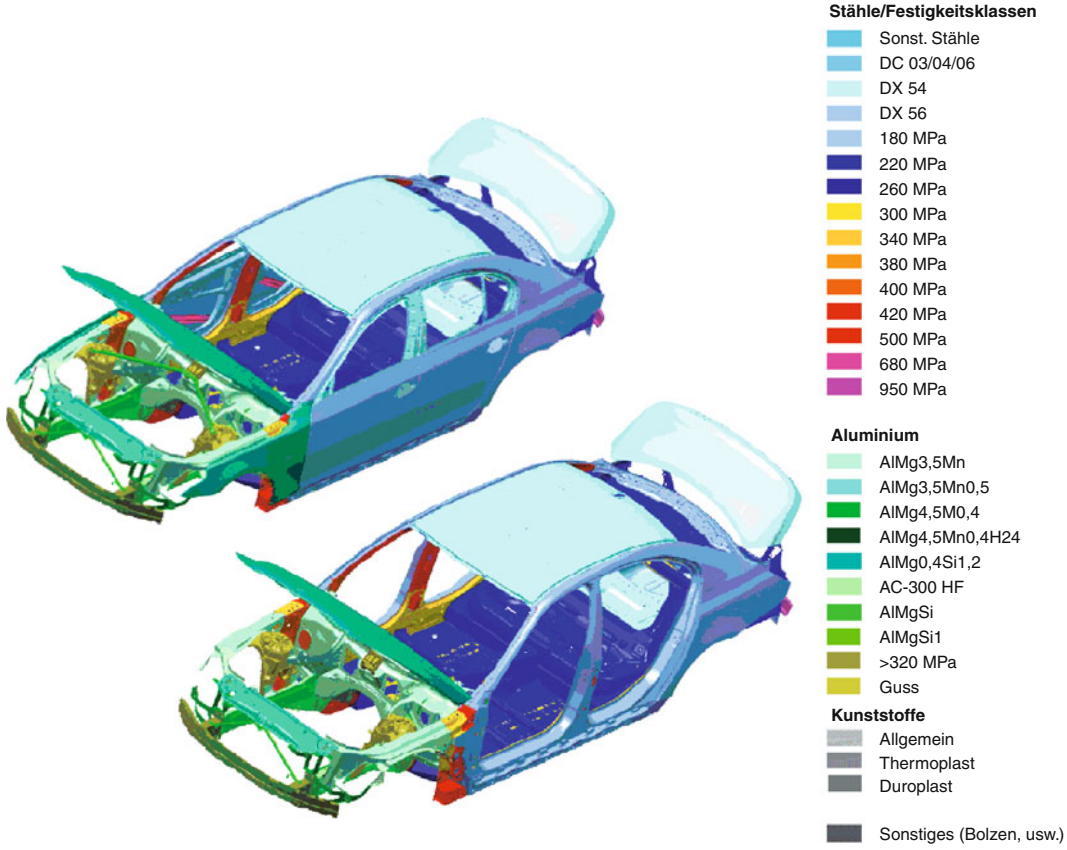



**Abb. 6.57** Stahlkarosserie mit Aluminiumvorderbau



**Abb. 6.58** BMW 3er Coupé



**Abb. 6.59** Detailansicht Thermoplast Seitenwand

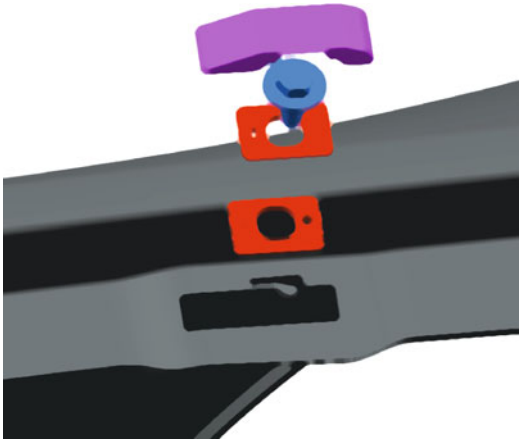


**Abb. 6.60** Ansicht der Verschraubung in der Wasserrinne und dem Verbindungselement

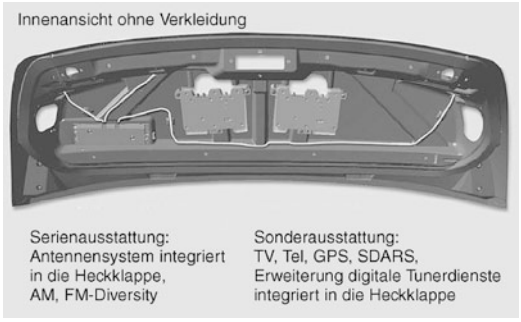



**Abb. 6.61** Heckklappe in SMC

die Seitenwand über den Stützträger und Scheinwerfer definiert nach vorne bewegen kann. Die Seitenwand wird im Bereich der A-Säule und Türeindrehung fest verschraubt. Diese Technik gewährleistet die notwendige Montagetoleranz bei der Verschraubung und lässt auch eine genau definierte Wärmedehnung zu. Die Freigängigkeiten für Toleranzausgleich und temperaturbedingte Längenänderung sind voneinander entkoppelt (Abb. 6.60). Durch den Einsatz von dafür eigens konstruierten Abdeckkappen, die die restliche auftretende Wärmedehnung in eine gleichmäßige Bombierung übergehen lässt, erkennt der Kunde optisch nicht die am Bauteil auftretende geometrische Veränderung. So kann selbst bei extremer Sonneneinstrahlung die Türfuge gehalten werden. Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit der Integration von verschiedenen Aufnahmen für weitere Exterieur-Elemente wie Zierelemente, seitliche Blinker usw.

Die Frontklappe und die Türen aus Aluminium sind zwei weitere Beiträge zur Gewichtsreduktion. Darüber hinaus verringert die 2 Komponenten-Verklebung der Frontklappe das Gewicht auf der Vorderachse um ein weiteres Kilogramm. Um die markanten Konturen im Heckbereich des Fahrzeugs darzustellen, fiel bei der Heckklappe die Wahl auf den Werkstoff SMC. Zudem ermöglicht er die Umsetzung der Designanforderungen mit einteiliger Außenhaut und die Integration von Abrisskante und Antennen in den Heck- und Verdeckverbund des Fahrzeugs (Abb. 6.61). SMC ist korrosionsfrei und erlaubt kostengünstige Online-Lackierung.

### 6.2.6.2 Mischbau im Innenraum (Cockpit) und Frontendmodule

Da der Erfolg neuer Fahrzeugmodelle zunehmend von der Innenraumgestaltung abhängt gilt der Oberflächengestaltung und dem Akustikverhalten des Cockpits ein wachsendes Augenmerk. Diese Dekorationsverfahren reichen vom Softlackie-

ren über das Hinterspritzen oder Hinterprägen von Kunstleder oder Softtouchfolien bis hin zum Einsatz von Gießhäuten.

Die individuellen Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren sind in ◘ Tab. 6.15 zusammengefasst.

Speziell für Fahrzeuge der Kompaktklasse, die unter einem besonderen Kostendruck gefertigt werden, fordern die Automobilhersteller immer häufiger Materialien, die

- eine hohe Zähigkeit, Chemikalien- und Wärmeformbeständigkeit,
- sehr gute Oberflächenqualität,
- angenehme Haptik,
- günstiges akustisches Dämpfungsverhalten und
- eine problemlose Verarbeitbarkeit

in sich vereinigen. Vor allem Blends auf Basis von PA und ABS haben sich in diesem Zusammenhang bewährt.

Neben der Gewichtseinsparung bieten die Polymerwerkstoffe zahlreiche weitere Vorteile. Diese reichen von einer größeren Designfreiheit über die Möglichkeit, zusätzliche Funktionen in die Bauteile zu integrieren, bis hin zu einem exakt definierten Crashverhalten.

Zu den jüngsten Trends bei der Gestaltung von Cockpits zählt die Integration von metallisch wirkenden Oberflächen. Dabei werden jedoch nur selten Stahl oder Aluminium eingesetzt. Für die Oberflächenmetallisierung von Kunststoffteilen stehen zahlreiche Technologien im Wettbewerb, deren Vor- und Nachteile in ◘ Tab. 6.16 zusammengestellt sind.

Aufgrund zahlreicher Vorteile gilt die Zusammenfassung von Stoßfängersystem samt Montageträger und Crashboxen, Scheinwerfern mit Verkabelung, Teilen der Crashsensorik, Kühler, Haubenschloss und Dichtungen zu einem montagefertigen Frontendmodul als Stand der Technik. Die Vorteile von Frontendmodulen sind in ◘ Tab. 6.17 zusammengefasst. Wegen der vielfältigen Aufgaben sowie einer hohen Integrationsdichte bestehen die Frontends regelmäßig aus einer Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffe. Neben Kunststoffen für Verkleidungsteile, Spoilerlippen, Kühlergrill, Schutzleisten oder Kennzeichenträger kommen auch Stahl und Aluminium für die Stoßfängerquerträger, Buntmetalle für den Kühler sowie Glas oder transparente Kunststoffe für die Streuscheiben der Scheinwerfer zum Einsatz.

Für die Frontmodulträger befinden sich fünf verschiedene Werkstofftypen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Anforderungen an die Fertigungstechnik im Wettbewerb (◘ Tab. 6.18). Hybride Strukturen erleichtern die Funktionsintegration, da die Metallstruktur das notwendige Crashverhalten und die Steifigkeit gewährleistet, während die Kunststoffteile die Integrationspunkte bilden [92].

Zu den aktuellen Herausforderungen bei der Entwicklung von Frontendmodulen zählen die Regelungen zum Fußgängerschutz (▶ Kap. 9). Zu den ersten Lösungen, den Beinaufprall abzumildern, zählen der Einsatz zusätzlicher Energieabsorber in Höhe des Stoßfängerquerträgers sowie die Integration eines zusätzlichen Querträgerprofils unter dem Stoßfängerquerträger als Überfahrschutz.

## 6.2.7 Materialspezifische Aspekte der Fertigungstechnik

### 6.2.7.1 Tailored products

Zur konsequenten Kosten- und Gewichtsreduzierung, kann man je nach Belastung und Bedürfnissen unterschiedliche Blechplatinen zusammenschweißen (Laserschweißen). Sie können hinsichtlich der Werkstoffgüte aber auch in der Blechdicke der zu verbindenden Teile differieren.

Einen anderen Weg der Gewichtseinsparung bietet die Verwendung von Tailored rolled Blanks (TRB – ◘ Abb. 6.62). Hier wird der Walzspalt während des Walzvorganges verändert (◘ Abb. 6.63). So kann die Dicke des Blechs in Längsrichtung überall den jeweiligen Belastungen des Bauteils entsprechend angepasst werden. Unterschiedliche mechanische Kennwerte stellen sich je nach Umformung ein. Dieses kostengünstige Verfahren hat zudem den Vorteil, dass es keine Schweißnaht gibt. Die homogene Umformung verhindert eine Kerbwirkung, und der Faserverlauf wird nicht beeinträchtigt. Zudem verkürzt dieses flexible Walzen den Herstellungsprozess solcher Bleche und ermöglicht ihre Umformung durch weitere Verarbeitungsschritte wie z. B. durch Tiefziehen oder Hydroforming.

**Tabelle 6.15** Vor- und Nachteile von Dekorationsverfahren [90]

| | Spritzgießen | Softlackieren von Bauteilen | Insert moulding | Hinterspritzen und Hinterprägen von Kunstleder und Softtouchfolien | Mehrkomponenten-verfahren, speziell: Überspritzen mit TPE/TPU | PUR – Gießhaut-Überfluten in 2 Prozessschritten | SkinForm-Verfahren |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lederähnliche Haptik | – | 0 | 0 | + | 0/+ | + | + |
| Kratzfestigkeit | – | – | + | + | – | + | + |
| Komplexe, stark dreidimensionale Oberflächen mit engen Radien | + | + | 0 | 0 | + | + | + |
| Durchbrüche | + | + | + | –/0 | + | + | + |
| Kein Dekor- oder Narbungsverzug | 0 | 0/+ | – | –/0 | + | + | + |
| Oberflächenveredelung so dünn wie möglich | 0 | + | 0/+ | 0/+ | – | – | + |
| Soufttouch am Bauteil | – | –/0 | –/0 | + | 0 | + | + |
| Partieller Softtouch | – | – | – | –/0 | – | + | + |
| Keine Nacharbeit | + | + | + | – | + | – | + |
| Keine Vorformlinge | + | + | – | 0/+ | + | –/+ | + |
| Großserientaugliches Verfahren | + | + | + | + | + | + | + |
| Kaschieren von Spritzgießfehlern | – | – | + | + | 0/+ | + | + |
| Wenig Verzug des Bauteils | + | –/0 | 0 | –/0 | –/0 | + | + |
| One-Shot-Prozess | + | | – (Folien vorformen) | – (Bauteilbeschnitt) | + | – | + |

+ gut realisierbar, 0 realisierbar mit Einschränkungen, – nicht realisierbar

**Tabelle 6.16** Entscheidungsmatrix zur Fertigung metallisch wirkender Oberflächen (Quelle: Fa. Karmann) Bewertungen: + + sehr gut bis – – sehr schlecht

| | Metalle | Kunststoffe | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Lackierung | Metallisierung | Galvanisierung | Folienhinter-spritztechnik | Heißpräge-folientechnik | Eingefärbtes Spritzgussmaterial |
| Optik | ++ | + | ++ | ++ | ++ | ++ | + |
| Haptik | ++ | – | + | + | 0 | – | – – |
| mechanische Eigenschaften | ++ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maßhaltigkeit | ++ | – | 0 | 0 | + | + | ++ |
| Alterungs-beständigkeit | ++ | 0 | + | + | + | + | 0 |
| Versagens-verhalten | ++ | 0 | 0 | 0 | + | 0 | 0 |
| Oberflächen-empfindlichkeit | ++ | 0 | – – | + | ++ | + | + |
| Herstellungs-verfahren | – – | – – | – – | – – | – | 0 | ++ |
| Teilepreis | – – | – | – – | – – | 0 | + | ++ |
| Werkzeugkosten | – – | – – | – – | – – | – – | – – | ++ |
| Gewicht | – – | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ |
| Geometrische Freiheit | ++ | ++ | ++ | ++ | 0 | – | ++ |
| Recyklierbarkeit | ++ | – | – | – | – | – | ++ |

**Tabelle 6.17** Vorteile von Frontendmodulen (Quelle: Fa. Decoma)

| | |
|---|---|
| Funktionsintegration | Teilereduktion |
| Reduzierung der Montagezeiten | Ergonomische Montage des Moduls |
| | Verbesserte Fahrzeugmontage |
| | Geringe Anzahl der Montagepunkte am Band |
| Einfache Werkslogistik | Geringe Zahl von Bauteilen/Modulen |
| | weniger Lieferanten – kurze Wege |
| | weniger Ansprechpartner |
| | geringer Lagerbestand |
| | reduzierter Platzbedarf |
| Gewichtsreduzierung | Verbesserung der Gesamtenergiebilanz |
| Qualitätsverbesserung | Toleranzen, Fehlerrate – Qualitätskostenreduzierung |
| Kurze Entwicklungszeiten | Kooperation der Entwicklungspartner |
| Geringe Reparaturkosten | Modulbauweise |
| Niedrige Versicherungseinstufung | Reparaturfreundlichkeit des Gesamtsystems |

**Tabelle 6.18** Materialalternativen für Frontmodulträger (Quelle: Fa. Decoma)

| | **Werkstoff** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Stahl** | **GMT** | **Aluminium** | **Hybridtechnologie BAYER Ford Focus** | **MKV** |
| Werkstoff(e) | Stahlbleche mit unterschiedlichen Wandstärken | Thermoplast mit 40 % Lang-Glasfaser-Verstärkung | Aluminiumbleche mit versch. Wandstärken | Stahlträger im Verbund mit PA6, 30 % Glasfaser-Verstärkung | Hohlprofil durch Stahlträger und Spritzgussteil PP 40 % Lang-Glasfaser-verstärkt |
| Fügeart | Schweißen Schrauben Kleben | Metallinserts einpressen oder setzen | Schweißen Schrauben Kleben | Stahlträger wird umgespritzt | Stahlträger wird mit Spritzguss-Träger ultraschallvernietet |
| Steifigkeit (%) | 100 | 30 | 80 | 100 | 100 |
| Energieaufnahme (%) | 100 | Ca. 10 | 100 | 150 | (150) |
| Verarbeitungstoleranzen | X Y Z ±2 mm | X ±1,2 mm Y ±0,8 mm Z ±1,0 mm | X Y Z ±2 mm | X ±1 mm Y ±0,5 mm Z ±1,5 mm | X Y Z ±0,8 mm |
| Korrosionsschutz | Verzinkung KTL-Beschichtung | Nicht notwendig | Chromatierung KTL-Beschichtung | KTL-Beschichtung | KTL-Beschichtung |
| Ca. Kosten (%) | 100 | 135 (incl. Blech) | 150 | 120 | 115 |
| Gewicht (kg) | 4 | 4,1 | 2 | 3,1 | 3,3 |
| Serienerfahrung | Ja | Ja | Ja | Ja | Bedingt (Airbag-Deckel) |

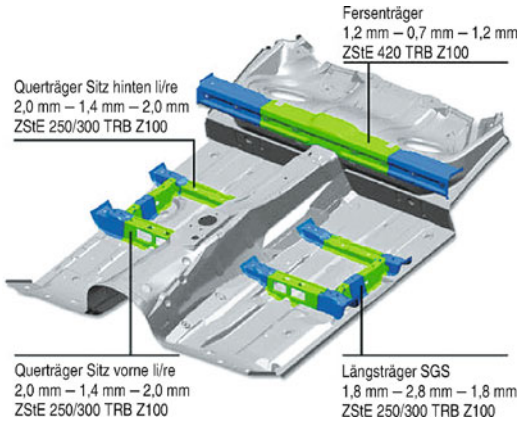



**Abb. 6.62** Tailored rolled blanks gefertigte Bauteile in Coupé und Cabrio (BMW 6er)

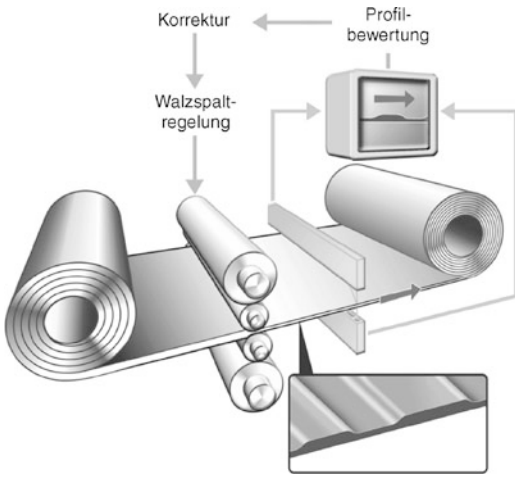



**Abb. 6.63** Walzprozess der Tailored rolled blanks-Platine (Quelle: MUBEA)

### 6.2.7.2 Superplastisches Umformen (SPF)

Das superplastische Umformen ist ein Verfahren zur Herstellung komplexer Bauteilgeometrien mit hohen Umformgraden und eignet sich besonders für geringe Stückzahlen (bis ca. 1000 Einheiten pro Jahr).

Das Werkzeug besteht aus einer formgebenden Matrize und einer Lufteinlassplatte. Das Blech wird warm umgeformt, die Umformkraft wird durch Luftdruck aufgebracht. Hierfür wird das Blech auf die beheizte Matrize gelegt, die Presse wird geschlossen und durch die Luftzufuhr von oben Druck aufgebracht. Die Umformung erfolgt für Aluminium bei ca. 500 °C, der Luftdruck beträgt 10–20 bar. Das Material wird durch Druck- und Wärmeeinbringung in den plastischen Zustand gebracht. Zunächst formt es sich frei in der Matrize aus und legt sich im weiteren Verlauf der Umformung vollständig an die Matrize an (Abb. 6.64).

### 6.2.7.3 Innenhochdruckumformen (IHU)

Unter der Innenhochdruckumformung (IHU) ist das Aufweiten metallischer Rohre durch Wasserdruck von innen in einem geschlossenen Werkzeug zu verstehen. Die Verfahren des Innenhochdruckumformens von Hohlprofilen lassen sich nach den Spannungen in der Umformzone klassifizieren [95]. Mit der Innenhochdruckumformung lassen sich komplex geformte rohrförmige Hohlkörper aus einem Stück fertigen, die mit anderen Fertigungsverfahren nicht oder nur mehrteilig herstellbar sind.

Das Werkzeug wird dabei im Allgemeinen durch eine hydraulische Presse geöffnet, geschlossen und zugehalten. Der Umformvorgang erfolgt auf hydraulischen Pressen mit einer Öl- oder Wasserhydraulik.

Der Umformvorgang in vier Schritten wird anhand eines T-Stückes näher beschrieben (Abb. 6.65).

IHU Werkstoffe sollten tiefziehbar sein, ein feinkörniges Gefüge aufweisen und weichgeglüht sein. Beim Innenhochdruckumformen werden Rohteile aus Halbzeugen, wie gezogenen oder

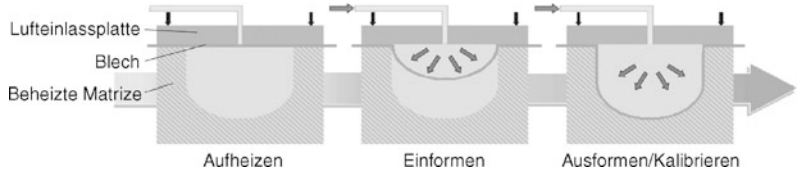



**Abb. 6.64** Verfahrensprinzip Superplastisches Umformen

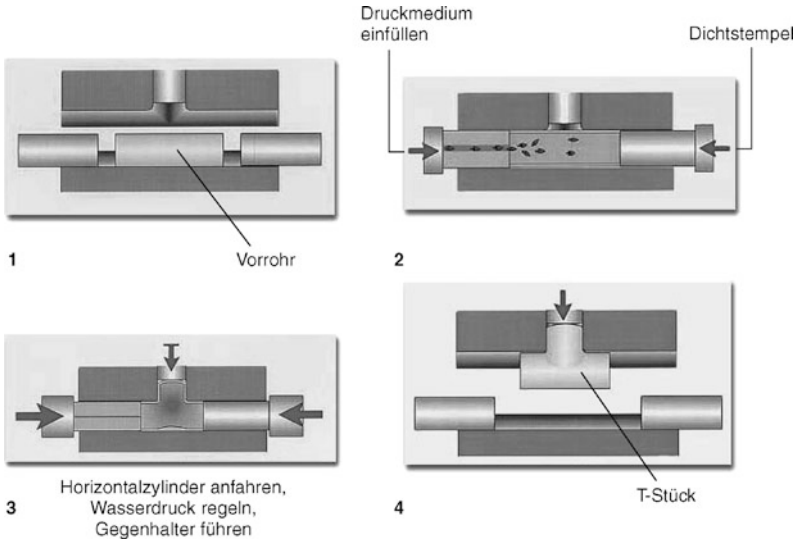



**Abb. 6.65** Prozessschritte IHU (Quelle: Schuler AG)

geschweißten Rohren, Doppelwandrohren, Strangpressprofilen oder geschweißten oder vorgeformten Platinen eingesetzt:

Vorteile dieses Verfahrens sind:

- hohe Form- und Maßgenauigkeit,
- Herstellung komplexer Geometrien in wenigen Fertigungsstufen,
- Verbindungsschweißnähte entfallen,
- Integration zusätzlicher Fertigungsoperationen in das Umformwerkzeug, Teilereduzierung,
- gute mechanische Eigenschaften am Bauteil.

### 6.2.7.4 Folientechnik als Alternative zur Nasslackierung

Die zunehmende Verwendung von Polymerwerkstoffen im Karosseriebau erfordert von den Beteiligten je nach Anwendung und verwendetem Kunststofftyp umfassende Problemlösungen (Tab. 6.19).

Allen Anwendungen und Kunststofftypen gemein ist das Problem, dass die kontinuierliche Verlagerung der Lackierung von Karosserieaußenteilen aus Kunststoff auf Zulieferer die Farbtonharmonisierung (Colour matching) erschwert. Als alternative Problemlösungen gelten Folienkonzepte, bei denen beschichtete oder eingefärbte Kunststofffolien nicht nur eine identische Farbe zwischen den unterschiedlichen Karosseriemodulen sicherstellen, sondern auch die herkömmliche Nasslackierung substituieren [93].

Der Einsatz hochglänzender Folien zum Hinterspritzen mit Thermoplasten auf Basis von PP, ABS oder PC wurde zunächst für Anwendungen im Fahrzeuginnenraum entwickelt. Seit Mitte der 90er Jahre wird die Technik zunehmend auch im Exterieurbereich angewendet. Zu den Beispielen zählten zunächst Zierleisten, Außenspiegel, Dachleisten, Radkappen, Schweller und Kühlergrills [94].

Zwar gibt es bislang keine Folie, die für alle Karosseriebereiche mit ihren unterschiedlichen Anforderungen geeignet ist oder eingesetzt wird, dennoch ließen sich für einzelne Serienanwendungen bereits Class A-Oberflächen erzielen. Das PFM-System (Paintless Film Moulding) von BASF zum Beispiel wird für das Dachmodul des Smart Fortwo eingesetzt und erzielt dort eine Class A-Oberfläche.

Für PFM-Bauteile wird zunächst eine zwei- oder dreischichtige Folie coextrudiert. Sie besteht aus einer eingefärbten ASA- oder ASA/PC-Trägerschicht und einer klaren PMMA-Deckschicht, die für Glanz, Härte, Kratzfestigkeit und Witterungsbeständigkeit verantwortlich ist. Eine optionale zweite PMMA-Schicht zwischen Trägermaterial und Oberflächenfolie kann dazu beitragen, die Farbanmutung zu erhöhen. In einem zweiten Prozessschritt wird der Folienverbund mit verstärkten

**Tabelle 6.19** Anwendungen und Probleme heutiger Kunststoff-Karosseriewerkstoffe (Quelle: BASF)

| Material | Anwendungen | Probleme |
|---|---|---|
| SMC | Komplettkarosseriebeplankungen Renault Espace und Avantime, Heckdeckel DC, diverse Nutzfahrzeuge | ➖ Hohe Nacharbeit<br>➖ Nicht großserientauglich bei > 70.000 Stück/Jahr |
| PUR-RRIM | Heckklappe DC A-Klasse Brasilien, Kotflügel VW D1 | ➖ Nicht großserientauglich<br>➖ Nacharbeit |
| PPE/PA | On-line lackierte Kotflügel diverser Renault, PSA Peugeot, DC A-Klasse, VW New Beetle | ➖ Hohe thermische Längenausdehnung<br>➖ Geringe Steifigkeit<br>➖ Dimensionsstabilität |
| PBT/PC | Beplankung MCC Smart, Heckblenden, Stoßfängerblenden | ➖ Hohe thermische Längenausdehnung |
| ASA/PC | Heckklappe DC A-Klasse Europa, Heckblende E-Klasse | ➖ Mittlere Längenausdehnung<br>➖ Specielles Prozess-Know-How erforderlich |



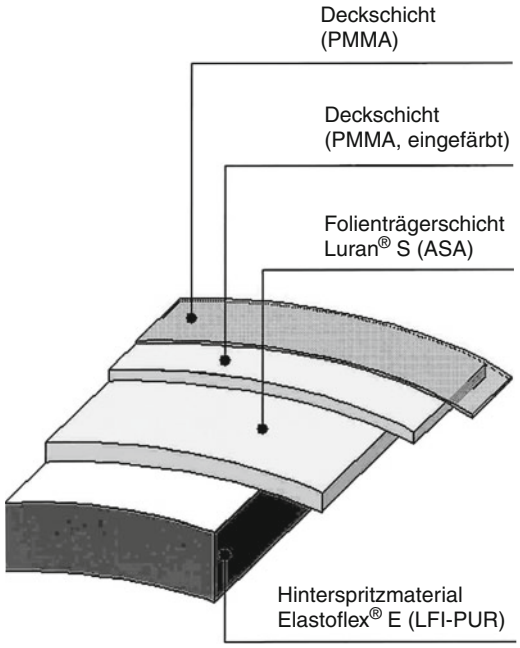



**Abb. 6.66** Oberflächenaufbau eines Paintless Film Moulding (PFM)-Bauteils (Quelle: BASF)

oder unverstärkten Thermoplasten auf Basis von Styrolcopolymeren und deren Blends hinterspritzt, hinterschäumt oder hinterpresst (Abb. 6.66). Je nach Hinterformmaterial und Verarbeitungstechnik können dabei unterschiedliche Bauteileigenschaften maßgeschneidert werden (Tab. 6.20). Zu den Schlüsselfaktoren zählen die Oberflächenqualität und Temperierung des Formwerkzeugs, die Sauberkeit der Umgebung von Folie und Werkzeug sowie die Qualität der eingesetzten Rohstoffe.

### 6.2.7.5 Fügeverfahren

Im Rahmen der Entwicklung von Bauteilen aus Kunststoffen für die Fahrzeugaußenhaut wird das Thema Verbindungstechnik und im speziellen das Kleben immer wichtiger. Außenhautbauteile aus Kunststoff sind in der Regel in zweischaliger Bauweise konzipiert. Dabei wird die Außenschale in Class-A-Oberflächenqualität mit einem verstärkenden Innenteil verklebt. Bei der Innenschale kann es sich sowohl um ein verstärktes Kunststoffteil als auch um ein Metall handeln. Werden Bauteile unterschiedlicher Werkstoffe gefügt, muss das Ausdehnungsverhalten der einzelnen Fügepartner bei Temperaturänderung berücksichtigt werden. Gegebenenfalls müssen die Unterschiede der Längenausdehnung von Innen- und Außenschale, sofern sie aus unterschiedlichen Werkstoffen gefertigt sind, durch den Klebstoff ausgeglichen werden.

Beispiele für Fügeverfahren, welche im Metall-Mischbau angewendet werden, sind in Abb. 6.67 abgebildet.

**Tabelle 6.20** Einfluss der Verarbeitungsverfahren auf die Materialeigenschaften

| Hinterformmaterial (ABS) | Terluran® GP-22 | Terluran® GP-35 | Terluran® GP-35 | Terluran® GP-35 |
|---|---|---|---|---|
| Folienträgermaterial | ASA | ASA | ASA | ASA |
| Glasfasergehalt [%] | 15 | 15 | 30 | 30 |
| Spritzguß (SG), Pressen (LFT) | SG | LFT | SG | LFT |
| Glasfaserlänge [mm] | 1–5 | > 10 | 1–5 | > 10 |
| E-Modul [N/mm$^2$] | 2930–3490 | 3365–3734 | 3250–4710 | 4135–4642 |
| Streckgrenze [N/mm$^2$] | 47–58 | 42–47 | 49–73 | 44–46 |
| Schlagzähigkeit ISO179/1fU bei 23 °C [kJ/m$^2$] | 18–21 | 30–36 | 13–17 | 53–69 |

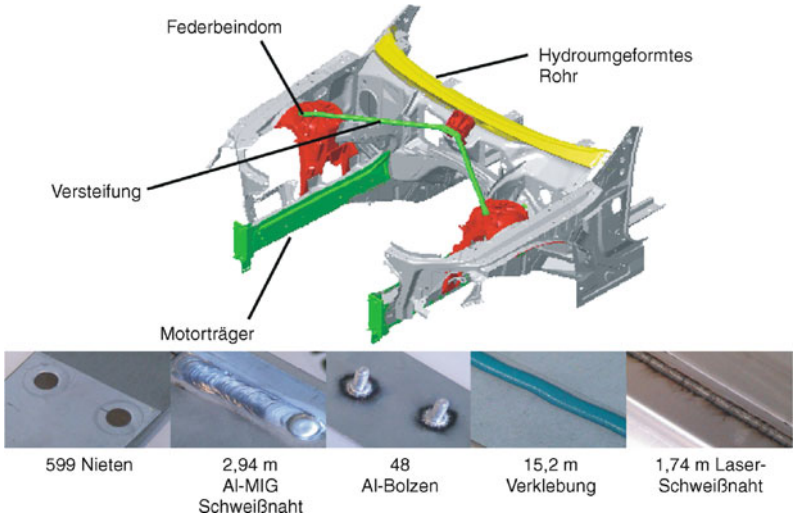



**Abb. 6.67** Fügeverfahren an einem Mischvorderwagen

## 6.3 Oberflächenschutz

*Der Schutz sämtlicher Oberflächen in einem Automobil ist von entscheidender Bedeutung. Gelegentliches Auftreten aggressiver Medien in der Umwelt (saurer Regen, Streugranulate) sowie die insbesondere von der europäischen Automobilindustrie angebotenen langfristigen Garantien gegen „Durchrostung" haben zur Entwicklung aufwendiger Lack- und Korrosionsschutzsysteme geführt. Mit dem gestiegenen Umweltbewusstsein bei Herstellern und Kunden fanden ab etwa 1990 verstärkt Lackierverfahren mit reduzierten Emissionen, zum Beispiel auf Basis von Wasserlacken, in der Serienproduktion Eingang.*

*Das folgende Kapitel führt in die gängigen Verfahren zur Erzielung eines guten, das heißt langzeitstabilen Oberflächenschutzes ein. Alle Ausführungen beziehen sich, sofern nicht explizit anders vermerkt, auf die selbsttragende Ganzstahlkarosserie. Der zunehmende Einsatz alternativer Karosseriewerkstoffe wie Aluminium oder Kunststoff erfordert neue bzw. adaptierte Prozesse in der Oberflächentechnik.*

### 6.3.1 Nutzen des Oberflächenschutzes

Die bei einem Kraftfahrzeug durchgeführten Oberflächenschutzmaßnahmen lassen sich in drei Funktionsgruppen unterteilen:

- Schutz der metallischen Karosseriewerkstoffe vor Korrosion,
- Schutz der Lackierung, die als Designelement einen hohen Wert für den Kunden darstellt,
- temporäre Maßnahmen zum Schutz des Fahrzeugs während des Transports vom Automobilhersteller zum Kunden.

#### 6.3.1.1 Korrosionsschutz

Ein wirkungsvoller Korrosionsschutz hat mehrere positive Effekte:

- konstante Strukturfestigkeit über die Lebensdauer des Fahrzeuges,
- langfristige Werterhaltung und damit verbunden erhöhte Wirtschaftlichkeit,
- Ressourcenschonung durch längere Betriebsdauer,
- Vermeidung von Funktionsausfällen,
- optische Anmutung.

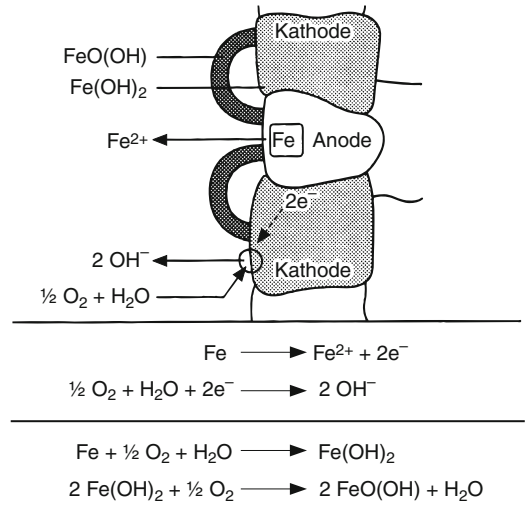



**Abb. 6.68** Elektrochemische Abläufe während des Korrosionsvorgangs

Warum tritt Korrosion an der Karosserie auf? Die meisten Metalle kommen in der Natur als Oxide, Sulfide oder Karbonate vor – als Erze also, weil diese chemischen Verbindungen die energetisch stabilste Form darstellen. Erst durch Energiezufuhr entsteht im Verhüttungsprozess aus dem Eisenerz das Metall Eisen. Wird der daraus erzeugte Stahl Umwelteinflüssen oder aggressiven Medien ausgesetzt, geht das Material wieder in den energetisch günstigeren Zustand über: das Oxid. Dann spricht man bei Metallen von Korrosion.

DIN 50900 definiert den Begriff Korrosion wie folgt: „Korrosion ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen handelt es sich um eine elektrochemische Reaktion. In einigen Fällen kann sie jedoch auch chemischer oder metallphysikalischer Natur sein."

Soll sich also eine Konstruktion aus metallischen Bauteilen über längere Zeit stabil verhalten, muss dieses werkstoffbedingte Verhalten bereits bei der Konstruktion und in der Produktionsplanung berücksichtigt werden.

Korrosion besteht darin, dass in einer anodischen Reaktion (Metallauflösung, Oxidation) frei werdende Elektronen über einen elektrischen Leiter (das Metall selbst) zu einer kathodischen Reaktion (Reduktion) transportiert werden. Ein ionischer Leiter (Elektrolyt) schließt dabei den Stromkreis. Die bei Korrosionsschäden an Karossen wichtigste elektronenverbrauchende Reaktion ist die Reduktion von Luftsauerstoff, Abb. 6.68. Die Stärke des Korrosionsangriffes hängt außer vom Material wesentlich von der Zusammensetzung des Elektrolyten (zum Beispiel dessen pH-Wert) und der Umgebungstemperatur ab.

An der Fahrzeugkarosserie können in der Regel drei Korrosionsarten auftreten: Oberflächen-, Spalt- und Kontaktkorrosion. Findet der beschriebene Vorgang auf einer freiliegenden Metalloberfläche statt, so spricht man von Oberflächenkorrosion.

Spaltkorrosion kann an der Karosserie zum Beispiel in Flanschen oder Bördelungen und unter Dichtungen auftreten. Sie ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Feuchtigkeit aus Spalten schlecht entweichen kann. Gleichzeitig wirken eingebrachte Salzrückstände hygroskopisch, das heißt, sie halten den Spalt ebenfalls feucht. Da sich die Oberflächen in den beschriebenen Bereichen durch

**Tabelle 6.21** Potenzialwerte ausgewählter Werkstoffe

| Werkstoff | Normalpotenzial (V) | Spez. Widerstand (μΩ × m) |
|---|---|---|
| Eisen | −0,440 | 0,097 |
| Aluminium | −1,66 | 0,027 |
| Magnesium | −2,37 | 0,045 |
| Zink | −0,76 | 0,059 |
| Edelstahl | +0,80 | 0,71 |
| CFK (Karbonfaser) | +1,30 | 13,75 |

mangelnde Zugänglichkeit nicht immer entsprechend beschichten und damit schützen lassen, müssen konstruktiv unvermeidbare Spalte entweder an eine trockene Stelle verlegt oder abgedichtet werden.

Haben zwei verschiedene Metalle elektrischen Kontakt, kann es in Anwesenheit eines Elektrolyten zu Kontaktkorrosion kommen. Je höher die Potenzialdifferenz (Tab. 6.21) zwischen den Werkstoffen ist und je kleiner die Anode im Verhältnis zur Kathode ausfällt, desto größer sind Korrosionsgeschwindigkeit und -schädigung. Um Kontaktkorrosion zu vermeiden, muss man entweder auf den Einsatz von Materialien mit unterschiedlichem Potenzial verzichten oder die Bauteile galvanisch voneinander trennen.

#### 6.3.1.2 Oberflächenschutz

Die Automobillackierung schützt nicht nur den Werkstoff vor Umwelteinflüssen, sondern ist zugleich ein wesentliches Designelement. Deshalb muss speziell das Decklacksystem, das in der Regel aus zwei Schichten – farbigem Basislack und Klarlack – besteht, folgenden Einflüssen standhalten:

- Chemikalien (Kraftstoffe, Vogelkot usw.),
- UV-Strahlen,
- Mechanische Einwirkungen (Steinschlag, Waschanlagen).

### 6.3.2 Entwicklung und Produktion des Oberflächenschutzes

Die Lastenheftanforderungen an den Oberflächenschutz für die Karosserie und ihre Komponenten sind in der Regel in firmeninternen Vorschriften festgelegt. Ergänzend dazu gibt es ein umfangreiches DIN/ISO-Normenwerk zum Korrosionsschutz. Die Verifikation einzelner Fahrzeugkomponenten erfolgt im Versuch anhand ebenfalls weitestgehend standardisierter Tests. Dazu gehören unter anderem Steinschlag-, Haftungs-, Feuchtklima-, UV-, Salznebel- und Abriebsfestigkeitsprüfungen. Diese werden sowohl im Labor als auch auf Freibewitterungsgeländen durchgeführt. Darüber hinaus wird das neuentwickelte Gesamtfahrzeug auf unterschiedlichen Strecken erprobt und Korrosionstests ausgesetzt.

Der Aufbau des Oberflächenschutzes an der Karosserie erfolgt in der Regel dem in Tab. 6.22 gezeigten Schema.

#### 6.3.2.1 Blechvorbeschichtung

Heute kommen in erheblichem Maße verzinkte oder mit Zinklegierungen beschichtete Stahlbleche im Karosseriebau zum Einsatz. Die Zinkschicht bietet einen sehr wirksamen kathodischen Korrosionsschutz für das Stahlblech. Ihre Wirksamkeit entfaltet sie vor allem, wenn die Lackschicht bereits verletzt ist. Dann nämlich wirkt Zink aufgrund seines niedrigeren elektrischen Potenzials gegenüber dem Eisen als galvanisches Element. Bei Anwesenheit eines Elektrolyten korrodiert so zunächst allein die Zinkschicht.

Karosseriebleche verzinkt in der Regel der Stahlhersteller. Hierbei gibt es verschiedene Arten der Vorbeschichtung. Verzinktes Stahlblech kann durch eine elektrolytische Abscheidung (elektrolytische Verzinkung) oder im Schmelztauchverfahren (Feuerverzinkung) hergestellt werden. Neben Rein-

**Tabelle 6.22** Aufbau des Karosserie-Oberflächenschutzes

| Schicht | Funktion | Dicke in µm |
|---|---|---|
| Stahlblech | Mechanische Festigkeit/Steifigkeit | |
| Zink (elektrolytisch + Schmelzverfahren) Zinklegierungen (elektrolytisch) | Korrosionsschutz | 5–8 |
| Phosphatierung | Korrosionsschutz und Lackhaftung | 1,5 |
| Kathodische Tauchlackierung (KTL) | Korrosionsschutz, besonders in Hohlräumen | 18–35 (außen) Minimum 10 innen |
| Grundlack (Füller) | Schaffung einer glatten Oberfläche, UV-Schutz für KTL-Lack | 20–35 |
| Decklack | Farbton | 40–70 |



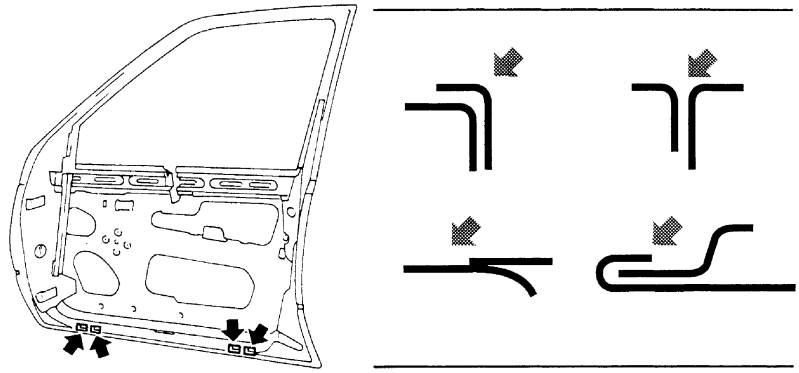


**Abb. 6.69** Lage von Entlüftungsöffnungen und Gestaltungsmöglichkeiten für korrosionsoptimierte Fügestellen

zink-Schichten sind auch Zinklegierungen, wie Zink-Nickel, Zink-Eisen (Galvanneal) oder Zink-Magnesium darstellbar. Bei Duplex-Beschichtungen wird ein verzinktes Blech zusätzlich mit einem organischen Stoff beschichtet.

### 6.3.2.2 Maßnahmen in der Karosseriekonstruktion

Bereits in der Konstruktionsphase können Oberflächen- und Korrosionsschutz wesentlich positiv beeinflusst werden. Dies beginnt bereits bei der Werkstoffauswahl. Hinzu kommt, dass durch geeignete Materialpaarungen oder Vermeidung entsprechender Berührungsstellen sich zum Beispiel Kontaktkorrosion von vorne herein ausschließen lässt. Weiterhin können zum Beispiel Hohlräume, die Feuchtigkeit ausgesetzt sind, gezielt so gestaltet werden, dass sich eine gute Belüftung ergibt. Solche Hohlräume finden sich in Türen, Holmen und Trägern. Die Belüftungsöffnungen sorgen gleichzeitig für einen guten Lackeintritt bei der Elektrotauchlackierung.

Konstruktiv sollten außerdem alle Komponenten so gestaltet werden, dass Wasser gut auslaufen kann. Bei der Verbindung zweier Blechteile sind scharfe Kanten oder scharfkantige Übergänge zu vermeiden, Abb. 6.69. Zusätzlich muss der Konstrukteur prüfen, ob Hohlräume beispielsweise durch Wachs zu schützen oder Verbindungsstellen mit Dicht- und Klebstoffen abzudichten sind.

Maxime ist in jedem Fall die prozessgerechte Konstruktion des Fahrzeugs. Dabei sind insbesondere Vorgaben zu beachten, die zum Beispiel die Handhabung der Rohkarosserie im Produktionsprozess betreffen (Aufnahmelöcher für die Fördertechnik). Abhängig vom gewählten Fertigungsver-

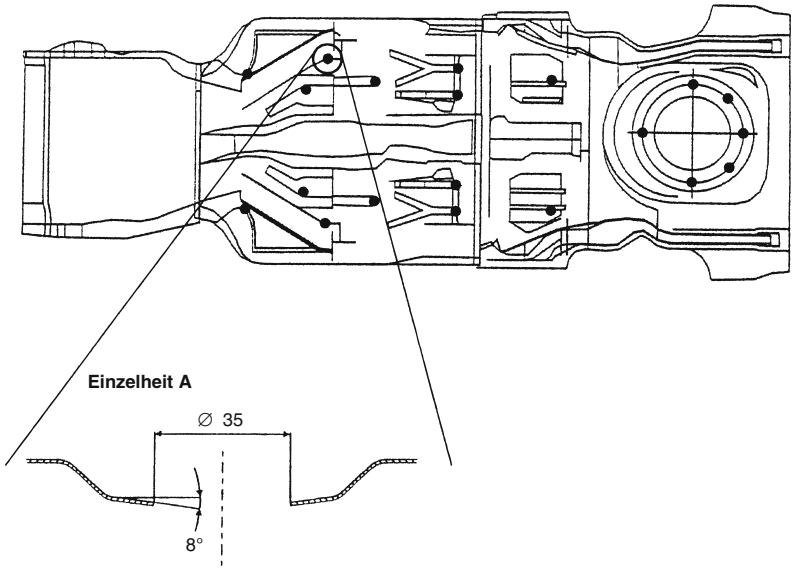



**Abb. 6.70** Lage und Gestaltung von Ablauföffnungen am Fahrzeugunterboden

fahren sind Öffnungen in der Karosserie vorzusehen, die das Ein- und Auslaufen von Prozessmaterialien erlauben, Abb. 6.70. Flansche, Bördel und Überlappungen sind so zu gestalten, dass das Auftragen von Klebstoff und Abdichtmaterialien leicht und prozesssicher möglich ist.

Zur korrosionsschutzgerechten Konstruktion von Fahrzeugen werden in der frühen Phase der Produktentwicklung verstärkt Simulationstechnologien entwickelt und eingesetzt. Auf dem Markt sind inzwischen zahlreiche Programme verfügbar, z. B. zur

- Überprüfung der erzielbaren KTL-Schichtdicke in kritischen Hohlräumen,
- Vermeidung von Lufteinschlüssen bei den Vorbehandlungs- und Elektrotauchlackierprozessen,
- Reduzierung von Verschleppungen von Chemikalien von einem Prozessschritt zum Nächsten,
- Auslegung von Trocknern zur Vermeidung von Überbrennungen oder unzureichender Reaktionstemperatur/-zeit für Bauteile bzw. Chemikalien.

Für die Simulation werden die CAD-Daten der Fahrzeugkonstruktion verwendet und entsprechend den jeweiligen Anwendungsprogrammen konvertiert.

### 6.3.2.3 Maßnahmen in der Produktion

Abb. 6.71 zeigt die typischen Stationen einer Automobilfertigung. Von Hersteller zu Hersteller können sich bedingt durch die unterschiedlichen Produktprogramme und mit der Zeit gewachsene Fertigungsprozesse Abweichungen ergeben.

#### 6.3.2.3.1 Kleben und Dichten

Das Fertigungsverfahren Kleben gewinnt in der Automobilindustrie zunehmend Bedeutung. Es hat den Vorteil, dass mit dem Fügen auch eine Abdichtung der Verbindungsstelle gegeben ist. Klebeverbindungen können bei prozessgerechter Konstruktion die Festigkeit von Schweißpunkten nicht nur erreichen, sondern sogar übertreffen. Durch die flexible Anwendbarkeit in Kombination mit anderen thermischen oder mechanischen Fügeverfahren ist das Kleben im modernen Automobilbau heute unverzichtbar.

Bisher waren Unterfütterungskleben, Bördelrandkleben und Versiegelungen die eingesetzten Klebeverfahren im Karosseriebau. Das Strukturkleben grenzt sich mit direktem Einfluss auf die Festigkeit der Karosserie gegen diese Prozesse ab. Im

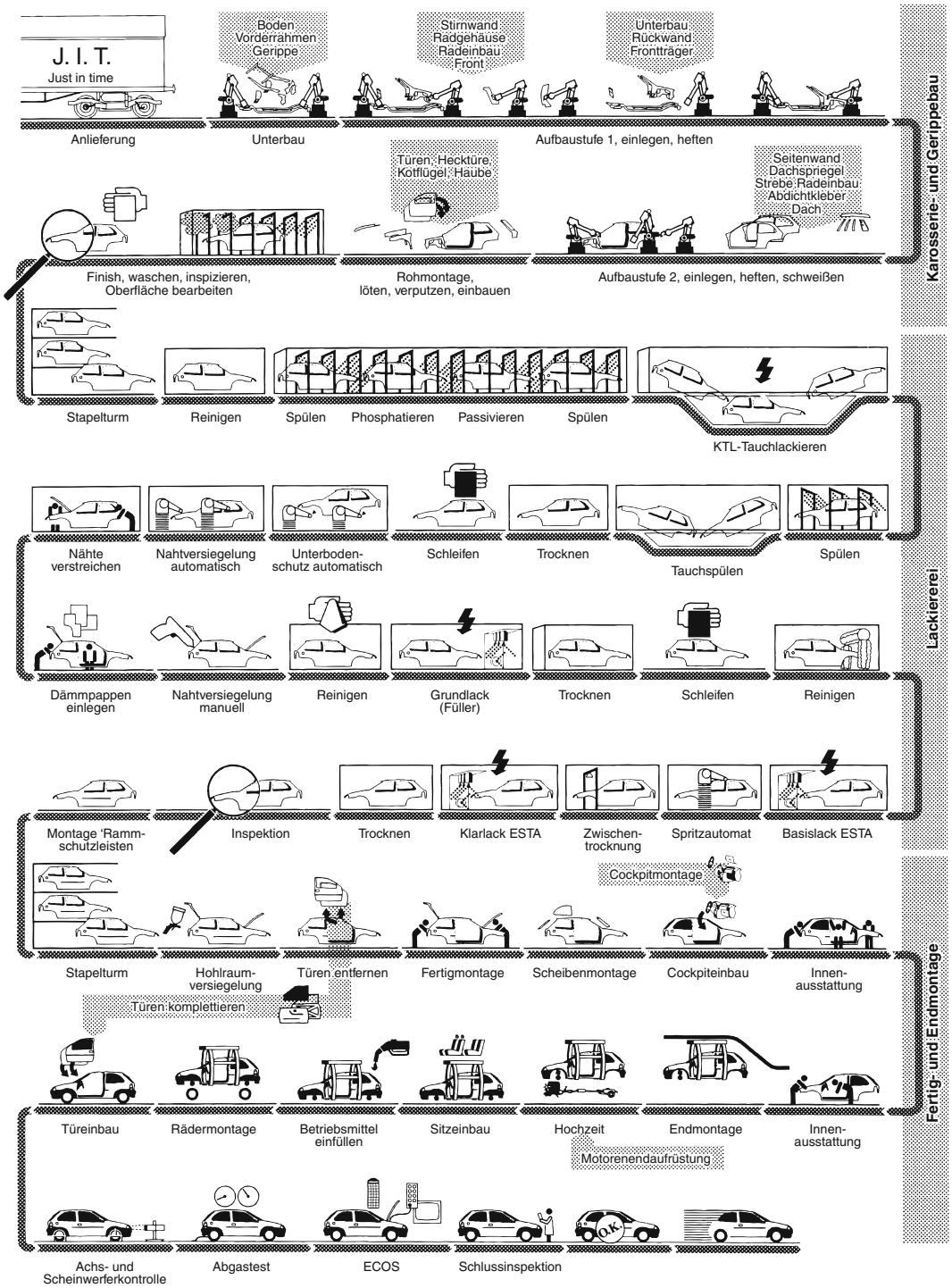



**Abb. 6.71** Prozessablauf in der Automobilfertigung

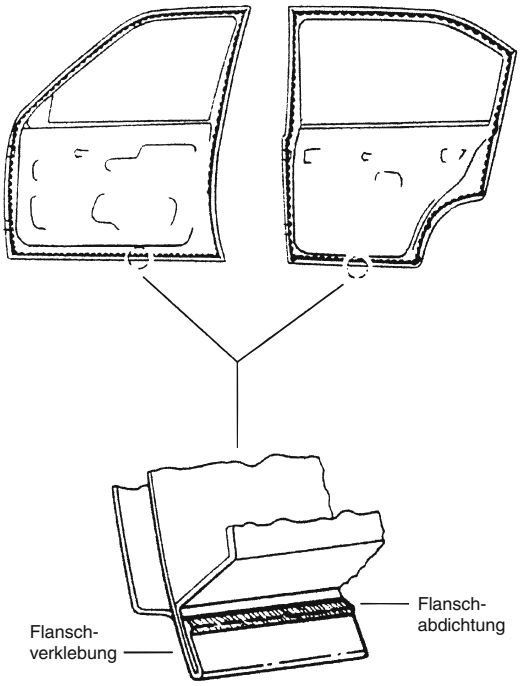



**Abb. 6.72** Lage von Verklebungen und Abdichtungen

Fall der Fahrzeugkarosserie sorgt das so genannte Strukturkleben für eine dauerbeständige und kraftübertragende Verbindung von hochfesten und steifen Fügeteilen, die auch in crashbeanspruchten Fahrzeugbereichen einsetzbar sind. Hauptziele des Strukturklebens sind eine höhere Karosseriesteifigkeit, eine verbesserte Crashstabilität durch erhöhtes Energieaufnahmevermögen sowie eine verbesserte Dauerfestigkeit. Hinsichtlich der immer größeren Materialvielfalt und insbesondere Zunahme der Werkstoffkombinationen, lassen sich somit unterschiedliche Werkstoffe durch die Fügetechnik Kleben kombinieren.

Im Vergleich zu anderen Fügeverfahren stellt das Kleben zusätzliche Anforderungen an die Fertigung, da nach dem Fügen der Bauteile noch keine Anfangsfestigkeit vorhanden ist. Erst nach dem Durchlaufen des KTL-Ofens in der Lackiererei wird der Klebstoff ausgehärtet und erhält somit seine endgültigen Materialeigenschaften.

Klebungen haben u. a. akustisch dämpfende Wirkungen und auch eine abdichtende Funktion. Schweiß- und Bördelflansche werden durch den Auftrag von Dichtstoff vor dem Eindringen von Feuchtigkeit, korrosiven Medien sowie Luftsauerstoff geschützt, ◘ Abb. 6.72.

Die notwendigen Dichtoperationen sind entweder im Rohbau oder in der Lackiererei durchzuführen. Im Rohbau müssen all jene Karosseriestellen abgedichtet werden, die nach dem Zusammenbau nicht mehr zugänglich sind, wie zum Beispiel verdeckte Bördelflansche oder Stützgerippe, die zur Unterfütterung der äußeren Bleche erforderlich sind. Bei dieser Prozessabfolge sind bei der Definition der Taktzeiten im Rohbau die für Klebeverbindungen notwendigen Vor- und Nachbehandlungszeiten zu berücksichtigen. Wird die Dichtoperation in der Lackiererei durchgeführt, erfolgt der Materialauftrag normalerweise auf eine fettfreie, KTL-lackierte Oberfläche. Da die Aushärtung zusammen mit dem Grundlack erfolgen kann, ist kein zusätzlicher Trockenprozess erforderlich.

In ◘ Tab. 6.23 sind die Dichtmaterialien dargestellt. Die Entscheidung über den Einsatz eines bestimmten Werkstoffes sollte immer im Zusammenhang mit der gewünschten Festigkeit beziehungsweise Elastizität getroffen werden.

#### 6.3.2.3.2 Vorbehandlung

Die Karosserieoberflächen werden vor dem eigentlichen Lackierprozess einer Vorbehandlung unterzogen, die zum einen dem Korrosionsschutz, zum anderen einer besseren Lackhaftung dient. Auf Ganzstahl-Karosserien ist der Standardprozess in die Stufen Reinigen/Entfetten, Spülen, Aktivieren, Phosphatieren, Spülen, Passivieren und abermaliges Spülen mit vollentsalztem Wasser untergliedert.

Der vom Rohbau gelieferten Karosserie haften noch Reste von Korrosionsschutzölen, Schmierstoffen, Schleifstäube sowie andere Verschmutzungen an, die entfernt werden müssen, um die Qualität des Lackierprozesses zu sichern. Reinigen und Entfetten der Karosserie erfolgen mit wässrigen alkalischen und tensidhaltigen Lösungen. Beim anschließenden Spülen wird die noch anhaftende Reinigungslösung entfernt. Eine Aktivierung der Oberfläche mit Titanphosphat vor der eigentlichen Phosphatierung soll die Phosphatiergeschwindigkeit erhöhen, das Schichtgewicht verringern und so für besonders feinkristalline Schichten sorgen.

**Tabelle 6.23** Dichtmaterialien und Klebstoffe im Karosseriebau

| Material | Haupteinsatzgebiet | Festigkeit | Elastizität |
|---|---|---|---|
| Epoxidharze | Strukturelle Verklebungen im Rohbau, Kleben von Bördelfalzen | ++++ | + |
| Produkte auf Kautschukbasis; Heißbutyle | Unterfütterungs-Klebstoff | +++ | ++ |
| PVC-Plastisole | Abdichtungen in der Lackiererei | ++ | +++ |
| Acrylat-Plastisole | Rohbauabdichtungen | + | ++++ |



Die Phosphatierung erfolgt mit einer Lösung, die als Hauptbestandteile Zink, Nickel- und Mangan-Ionen sowie Phosphorsäure und einen Beschleuniger (Oxidationsmittel wie Natriumnitrit oder Wasserstoffperoxid) enthält. Zur Behandlung einer Stahl-Aluminium-Karosserie wird zusätzlich freies Fluorid benötigt, um gelöstes Aluminium aus dem Behandlungsbad zu entfernen. Die saure Phosphatlösung wirkt als Beizmittel. Durch die Beizreaktion werden Eisen-II- und Zinkionen sowie atomarer Wasserstoff gebildet. Der Beschleuniger depolarisiert den Wasserstoff, befreit also die Metalloberfläche von Wasserstoffblasen, die die Phosphatierreaktion stören können. Aufgrund der Beizreaktion nimmt die Säurekonzentration an der Metalloberfläche stark ab, dafür bildet sich dort eine Schicht von schwer löslichem Zink- oder Zink-Eisen-Phosphat. Das Schichtgewicht liegt üblicherweise zwischen 1,5 und 4 g/m$^2$. Das entstehende Eisen-II-Phosphat wird durch das Oxidationsmittel in schwer lösliches Eisen-III-Phosphat überführt und als Schlamm abgeschieden. Auf der Karosserie verbliebene Schlammpartikel werden in einem weiteren Spülgang entfernt.

In der Phosphatschicht möglicherweise verbliebene Poren werden durch eine Passivierung mit wässriger Hexafluorzirkonsäurelösung oder organische Nachspüllösung geschlossen. Reste wasserlöslicher Salze sind abschließend mit vollentsalztem Wasser abzuspülen.

Die Vorbehandlungs-Prozessschritte erfolgen entweder im Spritz- oder im Tauchverfahren, meist in einer Kombination aus beidem.

Für Karosserien mit Multi-Metall Substraten, insbesondere bei hohem Anteil an Aluminium, wurde ein 2-Stufen-Prozess entwickelt (Tab. 6.24).

**Tabelle 6.24** Schlammentwicklung im Phosphatierprozess

| Substrat-Werkstoff | Schlammentwicklung (g/m$^3$) |
|---|---|
| Stahl | 3,0–5,0 |
| Verzinkter Stahl | 0,1–0,8 |
| Aluminium | 10–16 |

Durch angepassten Chemikalieneinsatz bei den Prozessstufen „Phosphatierung“ und „Passivierung“ wird erreicht, dass Stahl und verzinkter Stahl weiterhin „klassisch“ phosphatiert werden, Aluminium jedoch erst im Passivierungsschritt eine Konversionsbehandlung erhält (Schichtgewicht 0,2 g/m$^2$ bei Aluminium gegenüber 1,5 bis 4 g/m$^2$ bei Stahl bzw. verzinktem Stahl) (Abb. 6.73).

Verschiedene Chemikalienlieferanten arbeiten an der Optimierung der „Dünnschicht“ Prozesse ($\approx$ 100 $\times$ dünner als aktuelle Phosphatschichten), wobei der Fokus auf den ökologischen Potenzialen dieser alternativen Vorbehandlungsprozessen liegt:

- Verzicht auf Einsatz von Schwermetallen, insbesondere Nickel
- Reduzierung von Wasser, Abwasser und Schlamm, dadurch geringere Prozesskosten
- Energieeinsparung (Schichtprozess bei $\approx$ 20 °C und in ca. 30 s gegenüber 50–60 °C und ca. 3 min)
- Reduzierung von Prozessschritten, damit weniger Flächenbedarf und Investment-Kosten

Dünnschicht Vorbehandlungsprozesse werden in mehreren Automobilwerken insbesondere in USA bereits eingesetzt.

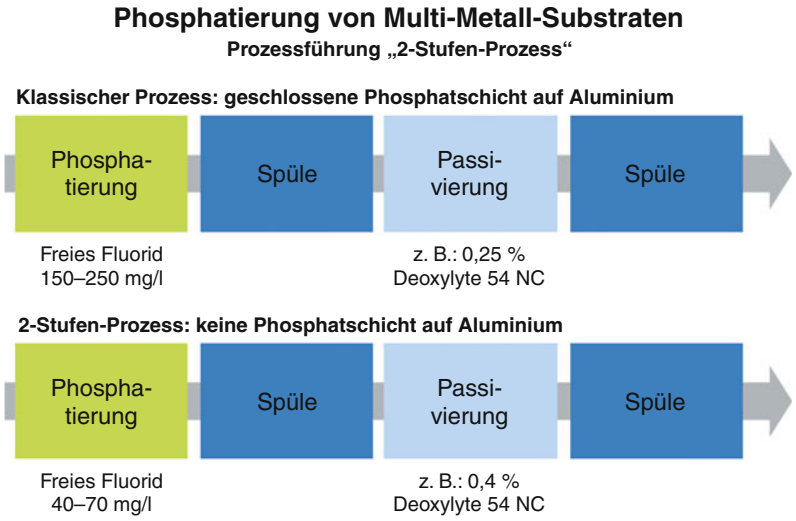
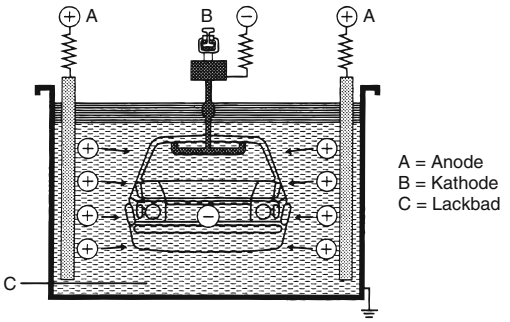



**Abb. 6.73** Phosphatierung von Multi-Metall Substraten (Quelle: Henkel)

### 6.3.2.3.3 Elektrotauchlackierung

Durch hohe Wirtschaftlichkeit und eine sehr gleichmäßige Schichtdickenbildung hat sich die Elektrotauchlackierung als Verfahren zum Korrosionsschutz in der Automobilindustrie etabliert. Bei diesem Verfahren wird der zu lackierende Körper in ein Lack-Wasser-Bad mit einem Anteil von 15 bis 25 % dispergierter Lackteilchen getaucht. Durch Anlegen einer Gleichspannung zwischen Werkstück und Tauchbad wandern die Lackteilchen an die Werkstückoberfläche und werden dort abgeschieden. Man unterscheidet zwischen der anodischen Elektrotauchlackierung (ATL) und der kathodischen Elektrotauchlackierung (KTL). Aufgrund des besseren Korrosionsschutzes hat sich die KTL, bei der die Karosserie als Kathode wirkt, Abb. 6.74, weitgehend durchgesetzt.

Die elektrochemische Abscheidung erfolgt üblicherweise innerhalb von 2,5 bis 4 Minuten. Bei größeren Stückzahlen werden die Tauchbecken meist als Durchlaufanlage gestaltet, die zwischen zwei und sieben Gleichrichterfelder mit unterschiedlichen Spannungen besitzt. Je nach Lackart und Verfahren werden Schichtdicken an außen liegenden Teilen von 18 bis 35 µm erzielt, wobei in Hohlräumen Schichtdicken von mindestens 10 µm erreicht werden müssen.




Kathodische Elektrotauchlackierung

1. Überführung von wasserunlöslichen, stickstoffbasischen Bindemitteln mit organischen Säuren in die wasserlösliche Form:

$$R_3\text{–}N + CH_3COOH \longrightarrow R_3[NH]^+\ [CH_3COO]^-$$

2. Elektrolyse des Wassers (Kathodenreaktion):

$$2\,H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2\uparrow + 2\,OH^-$$

3. Koagulation (Abscheidung) des Bindemittelkation in der basischen Diffusionsgrenzschicht an der Kathode:

$$R_3[NH]^+ + OH^- \longrightarrow R_3\text{–}N + H_2O$$

**Abb. 6.74** Kathodische Elektrotauchlackierung: Schema und Reaktionsgleichungen

Ein Kaskadenspülprozess befreit die Karosserie nach dem KTL-Tauchbad von elektrochemisch nicht gebundenen Lackpartikeln. Zur Reduzierung des Wasserverbrauchs und zur Lackrückgewinnung wird als Spülmittel Ultrafiltrat eingesetzt, ein Medium, das man aus KTL-Lack in einer Ultrafiltrationsanlage erzeugt. Der Kaskadenspülvorgang der Karosserie verläuft entgegen der Prozessrichtung. Spülmittel und Lackreste werden danach wiederum dem Tauchbecken zugeführt. Nach einem letzten Spülgang mit vollentsalztem Wasser wird der an der Karosserie haftende Lack bei Temperaturen von 160 bis 180 °C etwa 20 min eingebrannt. Gleichzeitig kann dieser Trocknungsvorgang dazu genutzt werden für Bake-Hardening-Stähle oder Aluminiumbleche, die ihre endgültige Festigkeit erst nach einer Wärmebehandlung erreichen, sowie um Klebe- und Dichtmaterialien nach- beziehungsweise auszuhärten.



#### 6.3.2.3.4 Grund- und Decklackierung

Der äußere Oberflächenschutz und die Farbgebung erfolgen durch aufgesprühte Nasslacke, in Einzelfällen auch durch Pulverlacke. Der Grundlack, auch Füllgrund oder Primer genannt, hat dabei die Aufgabe, eventuell vorhandene, aus den vorhergehenden Prozessschritten stammende raue Stellen oder Unebenheiten auszugleichen und einen glatten Untergrund für den Decklack zu gewährleisten. Außerdem bildet er die haftvermittelnde Schicht für den Decklack. Neben einfarbigen, meist grauen Grundlacken werden auch farbige oder sogar decklackfarbtonspezische Primer eingesetzt. Farbige Grundlacke haben den Vorteil, dass die Decklackschicht dünner ausgeführt werden kann (Kostenvorteil) und leichtere mechanische Beschädigungen im Kundenbetrieb weniger auffallen.

Als Decklack kommen in der Regel Zweischichtsysteme zum Einsatz, die aus einem Basislack zur Farbgebung und einem Klarlack bestehen. Bei den Basislacken wird zwischen Uni- und Effektfarbtönen (Metallic, Mica) unterschieden. Effektfarbtöne enthalten neben Farbpigmenten, zum Beispiel Aluminium- oder Glimmerpartikel, die abhängig von der Lichteinstrahlung verschiedene Farb- oder Glitzereffekte erzeugen. Bei der Farbtonentwicklung ist insbesondere darauf zu achten, dass die eingesetzten Pigmente lichtstabil und vollständig in das Bindemittel eingebettet sind. Ansonsten können, zum Beispiel durch dauerhafte Sonneneinstrahlung, Farbtonverschiebungen entstehen oder sich Pigmente an der Grenzschicht ansammeln und dort zu Haftungsproblemen führen.

Der Klarlack wird als Schutz zur Glättung und zur Erzielung eines Glanzeffektes eingesetzt. Er muss chemisch so beschaffen sein, dass er auch unter extremer UV-Einstrahlung nicht vergilbt. Des weiteren muss er vor Verkratzung schützen, wie sie zum Beispiel bei der Autowäsche vorkommen kann, und er muss organischen und anorganischen Stoffen wie Kraftstoff, Vogelkot, Baumharzen und saurem Regen gewachsen sein.

Beim Klarlack kommen sowohl 1-Komponenten als auch 2-Komponenten (Stammlack und Härter) Materialien zum Einsatz. 1-K Systeme sind kostengünstiger (Material, Applikationstechnik) und weisen meist eine höhere Kratzbeständigkeit auf als Standard 2-K Systeme. Die Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Stoffen ist dagegen bei 2-K Systemen höher, außerdem erscheint ein 2-K Klarlack optisch höherwertig.

Zur weiteren kundenrelevanten Optimierung der Produktqualität der Klarlackoberfläche wird an der Entwicklung deutlich kratzfesterer Materialien gearbeitet:

- Produkte mit hoher Vernetzungsdichte,
- Produkte mit glasähnlicher Silikat Matrix, Einbindung von Nano-Partikeln (∅ 10–20 nm),
- UV reaktive Systeme (UV Strahlungstrocknung).

Zahlreiche Verbesserungen sind im Test bzw. auch bereits im Serieneinsatz. Eine Klarlackoberfläche, die allen mechanischen Beanspruchungen widersteht, wird jedoch noch lange auf sich warten lassen. Bei der Materialentwicklung müssen auch Lösungen gefunden werden für z. B.

- Verarbeitbarkeit der Materialien in der Lackiererei,
- Reparaturfähigkeit der Lackierung an der Lacklinie im Werk, aber auch in Werkstätten im Feld (Schleifen, Polieren, Haftung der Reparaturlackierung, …),
- Lackierfähigkeit von Kunststoff-Anbauteilen (flexibler als Metalluntergrund).

Das komplette System aus Grund-, Deck- und Klarlack muss weiterhin die darunter liegenden Schichten vor dem Eindringen von Feuchtigkeit und UV-Strahlen schützen. Speziell die KTL-Schicht enthält Epoxidharze, die durch UV-Licht zersetzt werden könnten. Die Folge davon wären Haftungsverlust des Grundlackes und anschließendes Abblättern des Gesamtaufbaus. Eine weitere Anforderung stellt die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beaufschlagung, zum Beispiel durch Steinschlag, dar, die durch einen guten Haftungsverbund der Schichten sowie eine entsprechende Flexibilität erreicht wird.

Nasslacke bestehen aus flüchtigen und nichtflüchtigen Bestandteilen. Die flüchtigen Bestandteile, organische oder wässrig-organische Lösemittel, dienen der Verarbeitbarkeit des Lackes. Die nichtflüchtigen Bestandteile bilden nach der Aushärtung den eigentlichen Lackfilm. Für die Schichtbildung sorgt das enthaltene Bindemittel, für das hauptsächlich Alkyd-, Acryl-, Polyurethan- und Melaminharz zum Einsatz kommen. In das Bindemittel eingelagert werden Farbpigmente sowie verschiedene Hilfsstoffe, unter anderem Benetzungs-, Verlaufs-, Mattierungs- und Antiabsetzmittel sowie Weichmacher, Filmbildner und Füllstoffe.

Der Auftrag des Lackes erfolgt in Spritzkabinen. Diese sind nach Möglichkeit in einem separaten Bereich des Gebäudes (Reinraum-Bereich) angeordnet. Damit wird der Prozessempfindlichkeit der Lackmaterialien in Bezug auf Schmutz oder sonstige Störungen (etwa durch Silikon) Rechnung getragen. Bei der Verarbeitung sind entsprechend enge Grenzen bei Lufttemperatur und Feuchte einzuhalten, um Farbtonschwankungen zu vermeiden. Für wasserbasierte Lacke sind dies zum Beispiel 23 °C Lufttemperatur (±3 K) und 65 % relative Feuchte (±5 %).

Während die Innenlackierung in der Regel durch Roboter oder Handlackierer erfolgt, kommen bei der Außenlackierung neben Robotern auch Spritzautomaten zum Einsatz. Für die Lackapplikation werden hauptsächlich luftzerstäubende Spritzpistolen und elektrostatische Hochrotationsglocken (ESTA) verwendet. Bei Ersatz- bzw. Neuinvestitionen werden weitgehend nur noch Lackierroboter installiert, die gemeinsam mit neuen elektrostatischen Rotationszerstäubern eine hohe Flexibilität und deutlich verbesserte Auftragswirkungsgrade garantieren.

Getrocknet wird die Karosserie in Durchlauftrocknern durch Strahlung, Umluft oder durch die Kombination von beidem. Die Trockenzeit beträgt in der Regel 30 Minuten bei Temperaturen von etwa 165 °C bei Grundlacken und 140 °C bei Decklacken. Das Lacksystem härtet während des Trockenprozesses aus, das heißt, die Molekülketten des Bindemittels reagieren und vernetzen durch den Temperatureinfluss an zuvor blockierten Stellen. Die hierbei entstehenden Makromoleküle bilden dann einen entsprechend stabilen Verband. Die eingangs erwähnten Pigmente und Hilfsstoffe sind in dem entstandenen Molekülnetz eingeschlossen und beeinflussen dessen Eigenschaften zum Beispiel in Bezug auf Härte, Schleifbarkeit, Verlauf und Glanz.

Neben den gängigen Nasslacken kommen auch Pulverlacke und Powder Slurry zum Einsatz. Sie haben aber gegenwärtig in der Automobilindustrie einen sehr kleinen Marktanteil. Bei Pulverlacken entfällt der Lösemittelanteil; die nicht an das Werkstück angelagerten Lackteilchen (Overspray) können direkt wieder dem Prozess zugeführt werden. Häufige Farbwechsel und niedrige Stückzahlen belasten allerdings die Wirtschaftlichkeit. Eine Nachbesserung ist in der Regel zudem nur mit Nasslacken möglich, was die Bereitstellung zusätzlicher Anlagen bedingt. Aus diesem Grund werden Pulverlacke heute in erster Linie als einfarbige Grundierung oder als Klarlack eingesetzt. Eine Kombination aus beiden Verfahren stellen „Powder-Slurry"-Lacke dar. Hier wird vom Lackhersteller ein Pulverlack in ein wässriges Lösungsmittel eingearbeitet. Der Lack kann dann in bestehenden, modifizierten Nasslack-Anlagen eingesetzt werden. Auch diese Technologie kommt – genauso wie das Pulverlackverfahren – praktisch ohne organische Lösemittel aus.

### 6.3.2.4 Hohlraumkonservierung und Unterbodenschutz

Wirksamer Korrosionsschutz von Hohlräumen und Unterboden erfordert aufgrund der dort gegebenen hohen Beanspruchungen nicht nur besondere Abdichtoperationen, sondern weitergehende Maßnahmen wie die Hohlraumkonservierung durch Wach-

**Tabelle 6.25** Wachse zur Hohlraumkonservierung

| Material | Festkörperanteil in % |
|---|---|
| Heißflutwachs | 100 |
| Heißspritzwachs | 100 |
| Lösemittelfreies Spritzwachs | >99 |
| Spritzwachs auf Lösemittelbasis | >70 |
| Wasserbasiertes Spritzwachs | >40 |



se. Sie erfolgt in der Regel direkt nach dem Lackieren. Der Unterbodenschutz wird zum Teil in der Lackiererei und zum Teil am Ende des Produktionsprozesses aufgebracht.

#### 6.3.2.4.1 Hohlraumkonservierung

Die Hohlraumkonservierung mit Wachs dient der Versiegelung von Spalten und Flanschen und somit der Vermeidung von Spaltkorrosion. Tab. 6.25 nennt die zum Einsatz kommenden Wachse.

Für die Wirksamkeit der Abdichtung von engen Spalten ist das Penetrationsverhalten der Wachse entscheidend. Zwei rechteckige Prüfplatten mit definiertem Abstand werden bei Raumtemperatur waagerecht aufeinander gelegt und mit einem definierten Gewicht beaufschlagt. Anschließend ist eine Kante mit einem Überschuss an Wachs zu verschließen. Nach Ablauf der Testzeit und Auseinanderklappen der Platten lässt sich die Wachseindringstrecke messen.

Bereits bei der Fahrzeugkonstruktion muss die Art des Wachs-Applikationsverfahrens berücksichtigt werden. Die Hohlraumkonservierung kann entweder im Heißflut- oder im Spritzverfahren erfolgen. Beim Heißfluten wird die Karosserie im Beschichtungsbereich auf 60 bis 70 °C erwärmt und die Hohlräume mit etwa 120 °C heißem Wachs völlig ausgefüllt. Ein Teil des Wachses erstarrt und haftet an dem kühleren Karosserieblech, während der Rest des Materials wieder abläuft. Die Hohlräume müssen für dieses Verfahren in jedem Fall so gestaltet werden, dass ein sicheres und definiertes Auslaufen gewährleistet ist. Lufteinschlüsse im oberen Bereich der Profile sind zu vermeiden.

Das Spritzverfahren erfolgt im Gegensatz zum Heißflutverfahren bei Raumtemperatur, wobei Objekt- und Materialtemperatur nicht mehr als 10 K auseinander liegen sollten. Das Wachs wird mit oder ohne Vermischung mit Luft unter hohem Druck (zwischen 2000 und 12.000 kPa) in die Karosseriehohlräume eingesprüht. Konstruktiv sind deshalb unbedingt genügend Öffnungen zur Materialapplikation vorzusehen.

#### 6.3.2.4.2 Unterbodenschutz

Der Fahrzeugunterboden ist durch Steinschlag starken mechanischen Belastungen ausgesetzt. Zudem ist die Korrosionsanfälligkeit des Unterbodens durch Feuchtigkeit und Streusalz erheblich. Als Schutz davor haben sich Materialien auf Bitumen-, PVC- und Polyurethanbasis bewährt. Eine Übersicht alternativer Methoden zum Schutz des Unterbodens zeigt Abb. 6.75.

Bereiche, die nicht durch diese Materialien zu schützen sind, werden mit Wachsen versiegelt, Abb. 6.76. Diese Behandlung schützt gleichzeitig die in diesem Bereich liegenden Fahrwerkskomponenten.

Mit Ausnahme des Heißwachses können die gleichen Materialien eingesetzt werden wie bei der Hohlraumkonservierung. Die verwendeten Wachse müssen sich im Unterbodenbereich weniger durch hohes Penetrationsvermögen als durch hohe Beständigkeit gegen Auswaschen auszeichnen.

Für die Applikation werden alle gängigen Spritztechniken angewendet. Automatisierte Anlagen müssen modellspezifisch gesteuert werden, da nicht alle Bereiche des Unterbodens beschichtet werden dürfen. So sind die Zonen unter der Abgasanlage einschließlich des Katalysators frei zu halten.

### 6.3.2.5 Transportschutz

Der Kunde verlangt bei der Übergabe ein qualitativ und optisch einwandfreies Fahrzeug. Deshalb wird häufig vor der Auslieferung, meist am Ende der Fertigung, ein zusätzlicher Transportschutz aufgebracht und vor Übergabe des Fahrzeuges an den Kunden wieder entfernt. Er schützt den frischen Lack über einen Zeitraum von bis zu sechs Monaten vor mechanischen Einwirkungen und aggressiven Umwelteinflüssen. Von allen anderen Maßnah-




**Abb. 6.75** Alternative Methoden zum Schutz des Unterbodens

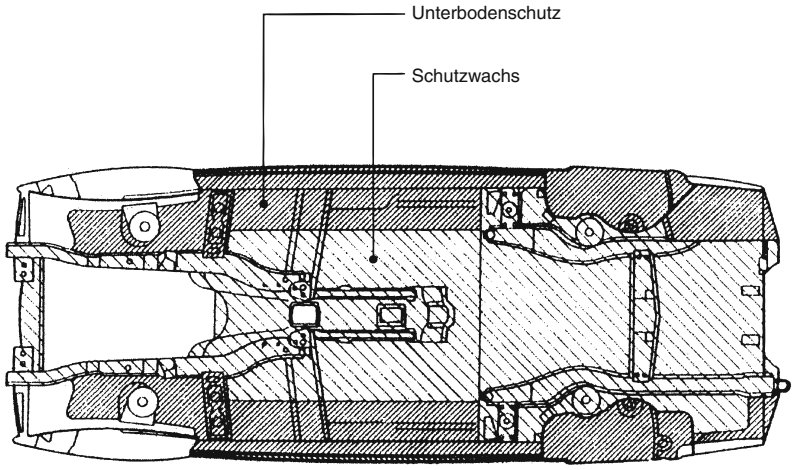



**Abb. 6.76** Beispiel für den Einsatz von Unterbodenschutzmaterial und Schutzwachs

men des Oberflächenschutzes unterscheidet sich der Transportschutz vor allem durch seine zeitlich begrenzte Einsatzdauer. Tab. 6.26 zeigt die zur Verfügung stehenden Transportschutzarten und -materialien.

**Tabelle 6.26** Transportschutz

| System | Einsatz |
|---|---|
| Wachse (org. Lösungsmittel- oder Wasserbasis) | Serie |
| Acrylsysteme | Serie |
| Folie | Serie |
| Spritzbare Folien | Serie |
| Transportschutzhauben | Serie |

## 6.3.3 Ausblick

Der Oberflächenschutz der Karosserie hat technisch einen sehr hohen Stand erreicht, der auch

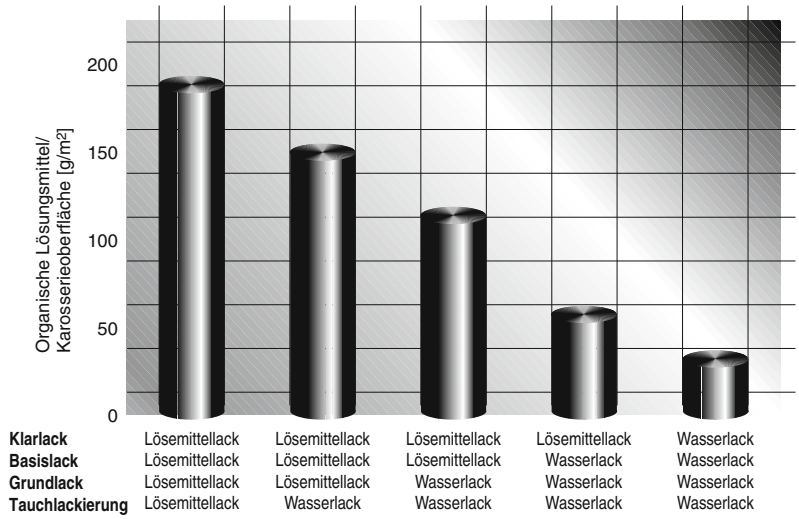



**Abb. 6.77** Rückgang der Emissionen von organischen Lösemitteln

durch die immer umfangreicheren von der Industrie gegebenen Garantien gegen Durchrostung dokumentiert wird.

Bei der Weiterentwicklung der Verfahren setzen Automobil-, Anlagen- und Lackhersteller immer mehr den Fokus auf umweltverträglichere Produkte und Verfahren. Die gemeinsamen Anstrengungen haben bereits erhebliche Wirkungen gezeigt. Vor allem durch den verstärkten Einsatz von Lacken auf Wasserbasis konnten die oberflächenbezogenen Lösemittelemissionen erheblich gesenkt werden, Abb. 6.77. Sollten sich Pulverlacke in ihrem Anwendungsspektrum verbessern, sind weitere Emissionsverringerungen möglich.

Weitere Beispiele für Schritte zu umweltverträglicheren Verfahren sind die Umstellung auf bleifreie Elektrotauchlackierung sowie chromfreie Nachspüllösungen. Um den Wasserverbrauch zu verringern, wird bei den Lackierprozessen zunehmend in geschlossenen Kreisläufen gearbeitet.

Etwa 50 % des Energiebedarfs eines Karosseriewerkes wird für den Lackierprozess benötigt. Deshalb gibt es viele Initiativen, diese Kosten zu reduzieren. Ein Beispiel aktueller Lösungsansätze ist die Einführung kompakter Beschichtungsprozesse, die das Ziel haben den Trockner für den Grundlack (Füller oder Primer) zu eliminieren:

- Füllerloser Prozess (statt Standardfüller werden „nass-in-nass“ zwei Basislackschichten mit entsprechendem Eigenschaftsbild aufgetragen, dadurch auch Entfall der Grundlack-Spritzkabine),
- Füller und Basislack werden „nass-in-nass“ appliziert (geeignet für festkörperreiche Lösemittel- und auch Wasserlacke).

Neu entwickelte Technologien zur Lacknebelabscheidung aus Lackierkabinen sind ein weiteres Beispiel für Energieeinsparungsmaßnahmen. Mit diesen Methoden ist es möglich einen großen Teil (ca. 90 %) der erforderlichen Spritzkabinenzuluft im Kreislauf zu fahren und damit die Kosten für die erforderliche Zuluftkonditionierung deutlich zu reduzieren.

Durch den Zwang zum Karosserie-Leichtbau werden in der Zukunft verstärkt Metall-Mischbauweisen in der Automobilproduktion Eingang finden und insbesondere Anbauteile aus Aluminium oder Kunststoff zum Einsatz kommen. Die Anpassung der Oberflächenbehandlungsprozesse an die Anforderungen der unterschiedlichen in einem Fahrzeug verbauten Substrate stellt eine große Herausforderung dar für die nächsten Jahre. Der Anspruch nach schnelleren und energieeffizienteren Prozes-

**Tabelle 6.27** Aktivitäten für eine zukunftsträchtige Oberflächentechnik

| Ziele | Beispiele |
|---|---|
| Erhöhung der Qualität/Funktionalität | ▬ Appearance (Glanz, Struktur (Orange Peel), Fülle, …)<br>▬ Farbeffekte (Perleffekt, Mica, …)<br>▬ Neue Funktionen (Easy-to-Clean, keine Vereisung, …)<br>▬ Kratzfestigkeit<br>▬ Beständigkeit gegen chemische und biologische Stoffe |
| Reduzierung der Prozesskosten | ▬ Integrierte Prozesse (nass-in-nass, füllerlos, …)<br>▬ Reduzierung der erforderlichen Einbrenntemperaturen<br>▬ Applikation mit Robotern und Glocken<br>▬ Erhöhung der First-Run-Rate (Clean-Room, No-touch, …)<br>▬ Kreislaufführung der Spritzkabinenluft |
| Produktdifferenzierung | ▬ Größere Farbtonvielfalt<br>▬ Individualisierung (Mehr-Farben-Lackierung, Folien, …)<br>▬ Neue Farbmischkonzepte (on-line) |
| Umweltschutz/Nachhaltigkeit | ▬ Erfüllung nationaler und internationaler Richtlinien<br>▬ Einsatz nachwachsender Rohstoffe<br>▬ Reduzierung von Emissionen, Energieverbrauch, Abfall, …<br>▬ Kreislaufführung von Prozessmedien |

sen beeinflusst zusätzlich den Lackiervorgang der Zukunft.

Die wichtigsten Aktivitäten der Zulieferindustrie auf die Forderungen der Automobilindustrie sind in Tab. 6.27 zusammengefasst.

## 6.4 Fahrzeuginnenraum

### 6.4.1 Ergonomie

#### 6.4.1.1 Bedeutung der Ergonomie in der Automobilgestaltung

Die Orientierung an den Bedürfnissen des Nutzers spielte von Anfang an eine ausschlaggebende Rolle für die Entwicklung des Automobils. Das Wissensgebiet der Ergonomie befasst sich mit dieser Frage mit dem Ziel, aus der Kenntnis menschlicher Eigenschaften und Fähigkeiten Hinweise für die technische Gestaltung von Arbeitsmitteln und Arbeitsumgebung zu entwickeln. Seit etwa den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts hat sich die Ergonomie auch für die Entwicklung von Automobilen zunehmend etabliert und heute ist es eine Selbstverständlichkeit, dass jedes Automobilunternehmen entsprechende Fachleute in ihren Ergonomieabteilungen beschäftigt. In den 60er und 70er Jahren wurde vor allem im Bereich der Luftfahrt daran gegangen, die Cockpits von Flugzeugen nach ergonomischen Gesichtspunkten zu gestalten. Im gleichen Zeitraum entwickelte die SAE (Society of Automotive Engineers) auf der Grundlage von wissenschaftlich durchgeführten Untersuchungen Gestaltungsvorschläge für den Fahrerarbeitsplatz im Automobil hinsichtlich Körperhaltung und Sichtbedingungen, die insbesondere die unterschiedlichen körperlichen Abmessungen der möglichen Nutzer von solchen Fahrzeugen berücksichtigen sollten. Die daraus entstandenen diversen SAE-Vorschriften sind heute Voraussetzung für die Zulassung eines Fahrzeugs in den USA. Sinngemäß wurden diese Vorschriften auch in viele nationale Vorschriften in anderen Ländern übernommen, so dass ihre Berücksichtigung bei der Konzeption eines Automobils unabdingbar ist.

Im Bereich der Automobilindustrie unterschiedet man speziell zwischen der Produkt- und der Produktionsergonomie.

- Bei der **Produktergonomie** ist es vorrangiges Ziel, einen möglichst benutzerfreundlichen Gebrauchsgegenstand für eine im Prinzip unbekannte Kundschaft anzubieten.

- Bei der **Produktionsergonomie** geht es darum, menschengerechte Arbeitsplätze in Produktions- und Dienstleistungsbetrieben zu schaffen mit dem Ziel, die Belastung des Mitarbeiters zu reduzieren und zugleich die Leistungsabgabe zu optimieren. In den meisten Fällen geht es also um die Frage der Zumutbarkeit und Erträglichkeit der Arbeit.

Da sowohl bei Produkt- wie bei Produktionsergonomie die Methoden der Ergonomie zum Einsatz kommen und da oftmals das „Produkt" des einen Herstellers „Arbeitsmittel" des andern ist, ist eine genaue Trennung zwischen diesen beiden Anwendungsgebieten praktisch nicht möglich. Vielmehr besteht eine gegenseitige Befruchtung der jeweiligen Erkenntnisse. In beiden Bereichen haben sich folgende Gebiete der Ergonomie etabliert, die einen jeweils spezifischen Fokus der Optimierung zum Gegenstand haben:

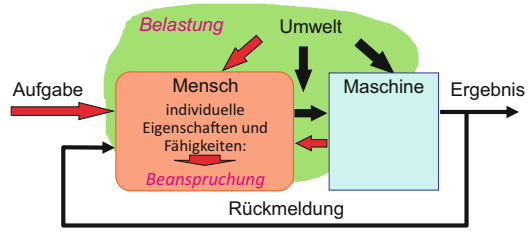
- **Systemergonomie** mit dem Ziel der optimierten Gestaltung des Informationsflusses zwischen Mensch und Maschine (dazu gehört u. a. die funktionale und die kognitive Ergonomie),
- **anthropometrische Ergonomie** mit der Ziel der Anpassung der technischen Welt an die körperlichen Bedingungen des Nutzers,
- **Umweltergonomie** mit dem Ziel, die Umgebungsbedingung menschengerecht zu gestalten.

Näheres in Bubb et al. [121] und Stein[122].

### 6.4.1.2 Das Regelkreisparadigma der Ergonomie

#### 6.4.1.2.1 Der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug

Um Hinweise für eine menschengerechte Gestaltung des Fahrzeugs zu erhalten, muss man die Wechselwirkung zwischen Mensch und Maschine (hier: Fahrzeug) systematisch analysieren. Für diese Analyse eignet sich das sog. Regelkreisparadigma (◘ Abb. 6.78). Jede sinnvolle Tätigkeit ist durch eine Aufgabe charakterisiert, sei es dass sie als Auftrag dem Menschen von außen vorgegeben wird, sei es dass sie sich der Mensch selber stellt. Beim Autofahren besteht diese in der Fahraufgabe, die durch




◘ **Abb. 6.78** Allgemeines Strukturschema des Mensch-Maschine-Systems (MMS)

das anzusteuernde Ziel und die Randbedingung gegeben ist, die Berührung mit allen stehenden und sich bewegenden Objekten auf der befahrenen Straße zu vermeiden, die den gegenwärtigen Standort mit dem Ziel verbindet. Die in ◘ Abb. 6.78 enthaltenen Pfeile stellen Informationsflüsse dar: die Information der Aufgabe wirkt auf den Menschen; er setzt sie in eine Information um, die er auf die Bedienelemente der Maschine überträgt, welche daraus die Information des Ergebnisses erzeugt. Beim Autofahren ist das Ergebnis die tatsächliche Bewegung des Fahrzeugs auf der Straße. Durch die Rückmeldung hat der Fahrer jederzeit die Möglichkeit, das Ergebnis mit der Aufgabe zu vergleichen und nicht tolerierte Abweichungen laufend zu korrigieren. Neben dieser Rückmeldung über das Ergebnis erhält der Fahrer auch direkt Information vom Fahrzeug, die zwar keine Rückmeldung über das Ergebnis selbst enthält wohl aber über Betriebszustände der Maschine (z. B. Rückstellkräfte der Bedienelemente, Motorgeräusch, Bewegung des Fahrzeugaufbaus u. Ä.).

Für jede ergonomische Analyse ist die genaue Beschreibung der Aufgabe unbedingte Voraussetzung. Das Fahren eines Kraftfahrzeugs erfordert die Bewältigung mehrerer Teilaufgaben, die teilweise hierarchisch geordnet und teilweise auch unabhängig voneinander sind (siehe ◘ Abb. 6.79). Es wird hier einem Einteilungsvorschlag von Geiser [123] gefolgt, der statt der sonst üblichen Einteilung drei Aufgabenbereiche vorsieht. Grundsätzlich lässt sich danach unterscheiden zwischen der primären Fahraufgabe, die vom Fahrer verlangt, das Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf Kurs zu halten, und sekundären Aufgaben, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Verkehrssituation erforderlich

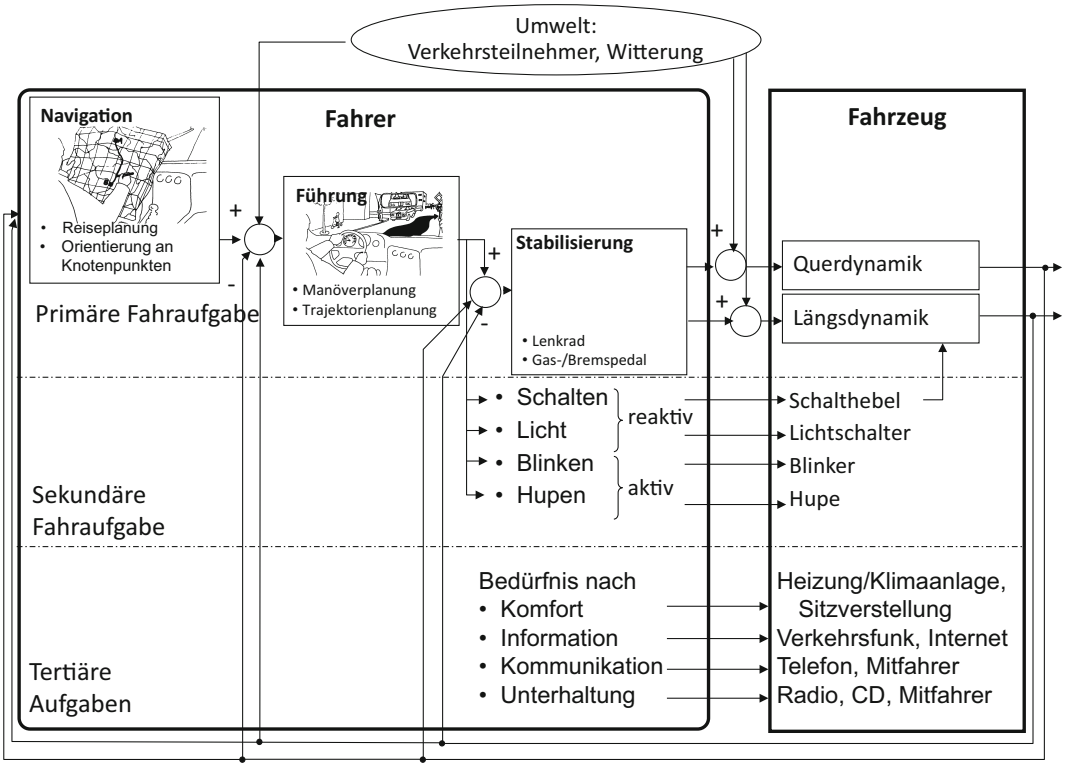



**Abb. 6.79** Aufgaben des Autofahrers

sind und die primäre Aufgabe unterstützen. Als tertiäre Aufgaben bezeichnet man Bedienvorgänge, die mit dem eigentlichen Fahren nichts zu tun haben. Abb. 6.79 vermittelt einen Überblick über diese Teilaufgaben.

**Primäre Aufgabe**

Die Aufgabenstellung für die primäre Fahraufgabe ist allgemein definiert durch den Transport von Personen und/oder Gütern, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ihr Ziel erreichen sollen. Aus dieser Transportaufgabe leitet sich die **Navigationsaufgabe** ab: die Fahrtroute ist festzulegen, eine Durchschnittsgeschwindigkeit für die zu befahrende Strecke abzuschätzen, um damit den Startzeitpunkt für die Fahrt zu bestimmen. Die Navigationsaufgabe lässt sich selbst wieder in die soeben beschriebene **Reiseplanung** einteilen und in Abhängigkeit davon die notwendige Orientierung an den **Knotenpunkten**, an denen in unterschiedlicher Form eine Entscheidung zur Abweichung von dem gegebenem Straßenverlauf notwendig wird. Bekanntlich werden beide Aspekte dieser Aufgabe heute durch GPS-basierte Navigationssysteme unterstützt, wobei der Fahrer bei den meisten Systemen die kürzeste oder schnellste Verbindung, Nebenstrecken oder Schnellstraßen wählen kann.

Durch die Festlegung der zu befahrenden Strecke ist ein globaler Rahmen für die tiefer gelegene Hierarchieebene, die **Führungsaufgabe** vorgegeben. Die Führungsaufgabe verlangt vom Fahrer, in Abhängigkeit von der aktuellen Verkehrssituation den Sollkurs und die Sollgeschwindigkeit festzulegen. Diese mental zu bildenden Führungsgrößen sind entsprechend der äußeren Bedingungen wie Straßenverlauf, Hindernisse auf der Fahrbahn, Witterungsbedingungen, Verkehrsdichte und dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer zu bestimmen. Im Detail lässt sich diese Aufgabe unterteilen: In der **Manöverplanung** entscheidet sich der

Fahrer aufgrund der gegebenen Situation und seines eigenen inneren Antriebs für eine bestimmte Aktion. Trivial und praktisch ständig zu realisieren ist dabei das Manöver „dem Straßenverlauf folgen". Komplexer ist bereits das Manöver „dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen", weil zusätzlich zu dem Verfolgen des Straßenverlaufs auch noch die Einregelung des korrekten Abstandes kommt. Die Entscheidung, das vorausfahrende Fahrzeug zu überholen, ist ein sehr komplexes Manöver, da das Beschleunigungsvermögen des eigenen Fahrzeuges abzuschätzen und damit die Länge des Überholweges mit der einsehbaren Strecke abzugleichen, sowie gegebenenfalls die Geschwindigkeit eines entgegenkommenden Fahrzeugs und der von diesem dabei zurückgelegte Weg abzuschätzen ist. Ein anderes, sich aus der Navigationsaufgabe beispielsweise ergebendes Manöver kann „Abbiegen von der Straße (links oder rechts)" sein. Es lassen sich so verschiedene Manöver definieren, die In Abhängigkeit von der jeweiligen Situation abgerufen werden. Liegt die Entscheidung für ein bestimmtes Manöver vor, so ist auf dieser Grundlage die **Trajektorie** so zu planen, dass eine Berührung mit stehenden oder sich bewegenden Objekten bzw. Personen in jedem Fall vermieden wird. Die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zeigen, dass diese Aufgabe permanent für eine räumliche Distanz bis maximal 200 m vor dem Fahrzeug und innerhalb eines Zeitfensters von etwa 2 s durchgeführt wird. Die Entwicklung von Assistenzsystemen, die dem Komfort und der Verkehrssicherheit dienen, geschieht vor allem auf dem Gebiet der Führungsaufgabe.

Durch Betätigung der Bedienelemente bewirkt der Fahrer durch Erledigung der **Stabilisierungsaufgabe** die Übereinstimmung der Istgrößen (Istkurs, Istgeschwindigkeit) mit den im Rahmen der Führungsaufgabe mental gebildeten Sollgrößen. Für diese zweidimensionale Stabilisierungsaufgabe (Längs- und Querdynamik) werden in einem handgeschalteten Fahrzeug fünf Bedienelemente verwendet, wobei allein vier Stellteile für die Regelung der Längsdynamik zu bedienen sind: Bremse, Kupplung, Schalthebel, Gas. Fahrzeuge mit Automatikgetriebe bieten hier den Vorteil, dass nur noch drei Bedienelemente zur Stabilisierung benötigt werden, was letztlich – zumindest theoretisch – der Konzentration auf das Verkehrsgeschehen förderlich ist. Die heute weitgehend eingeführten Assistenzsysteme ABS und ESP wirken auf der Stabilisierungsebene, wobei nach Überschreiten bestimmter messtechnisch erfasster Größen (Schlupf am Rad, Differenz zwischen Lenkwinkel und Gierwinkelrate) innerhalb eines 200 ms-Zeitfensters ein automatischer, korrigierender Eingriff erfolgt.

#### Sekundäre Aufgaben

Sekundäre Fahraufgaben fallen in Abhängigkeit von der primären Fahraufgabe an, wobei der Fahrer mit *Aktionen* andere Verkehrsteilnehmer über seine Intentionen informiert (Fahrtrichtungsanzeige, Horn, Lichthupe) oder auf äußere Bedingungen *reagiert* (Umschalten von Fernlicht auf Abblendlicht, Einschalten der Nebelscheinwerfer bzw. der Nebelrückleuchte, Einschalten des Wischers bei Regen). Viele der reaktiven Sekundäraufgaben lassen sich automatisieren, wie es in Fahrzeugen der gehobenen Mittelklasse oder Premiumklasse (meist jedoch nur als Sonderausstattung) bereits in Form intelligenter Lichtsysteme oder durch Regensensoren realisiert ist. Auch das Schalten der Gänge stellt eine sekundäre Fahraufgabe dar, die entweder als Reaktion auf äußere Bedingungen anfällt (z. B. Herunterschalten beim Befahren von Steigungen oder Gefälle) oder als Aktion bei bestimmten Fahrmanövern (z. B. Herunterschalten vor dem Überholen). Deshalb sind bei Automatikgetrieben die verschiedenen Fahrstufen auch von Hand schaltbar. Neueste Entwicklungen nutzen Informationen aus dem Navigationssystem, um so gewisse Elemente des vorausschauenden Fahrens (z. B. rechtzeitiges Zurückschalten vor einer Steigung, Nutzen der Motorbremse bei Gefälle) zu realisieren.

#### Tertiäre Aufgaben

Tertiäre Fahraufgaben haben mit der eigentlichen Fahraufgabe nichts zu tun. Mit diesen Aufgaben nimmt der Fahrer einerseits Einfluss auf die Komfortbedingungen im Fahrzeug (z. B. Bedienung der Klimaanlage) oder sie dienen der Information und Kommunikation oder schlicht der Unterhaltung (z. B. Bedienung des Radios, um Verkehrsmeldungen oder den Wetterbericht zu hören, Telefonieren, Abspielen einer CD bzw. Bedienen eines Musikstreemingsystems). Wie bei den sekun-

dären Fahraufgaben lassen sich auch hier Aktionen und Reaktionen unterscheiden. Eine aktive Aufgabe stellt das Anrufen eines Gesprächspartners dar, während das Entgegennehmen eines Anrufs die Reaktion auf das Signal des Telefons ist. In jedem Falle wenden tertiäre Aufgaben von der eigentlichen Fahraufgabe ab. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass der Fahrer in aller Regel Abwendungszeiten bis zu einer Zeitspanne von 2 s toleriert. In einer experimentellen Studie konnte Rassl [124] jedoch zeigen, dass in einigen Fällen Abwendungszeiten bis zu 16 s Dauer auftraten. Daraus leitet sich die Forderung ab, dass technische Einrichtungen nach systemergonomischen Regeln so gestaltet werden müssen, dass die dadurch bedingte Abwendung inhaltlich so gering und zeitlich so kurz wie möglich ist.

#### 6.4.1.2.2 Das Belastungs-Beanspruchungskonzept der Ergonomie

Charakteristisch für die Ergonomie ist das Belastungs-Beanspruchungskonzept. Danach werden unter Belastung all die Einflüsse zusammengefasst, die den Arbeitsprozess des Menschen beeinflussen können und die für jeden Menschen, der sich in dieser Situation befindet, gleich sind (in ◘ Abb. 6.78 durch die *auf* den Menschen gerichteten Pfeile charakterisiert). Beanspruchung – oft auch im gleichen Sinn mit dem Ausdruck „*Workload*" belegt – ist die individuelle Reaktion auf diese Belastung (Reaktion *im* Menschen in ◘ Abb. 6.78). Aufgabe der ergonomischen Forschung ist u. a. das Spektrum dieser Reaktionsmöglichkeiten bei bestimmten Belastungskonstellationen zu untersuchen. Das Konzept ist insofern von großer Relevanz, als durch technische Gestaltung nur die Belastung beeinflussbar ist. Das Belastungs-Beanspruchungskonzept lässt sich auf die Belastung durch die Aufgabenstellung, die Belastung, die sich aus der gegebenen Mensch-Maschine-Konstellation ergibt, und die Belastung durch die Umgebung anwenden. Insbesondere die Belastung durch die Umwelt ist im Prinzip unabhängig von dem eigentlichen Regelungsvorgang der Fahrzeugführung. Die Wirkrichtung dieser Einflüsse kann sich dabei unmittelbar auf den Menschen beziehen, indem sie dessen Fähigkeit direkt beeinflusst (z. B. Lärm). Sie kann aber auch auf die Informationsübertragung zwischen Mensch und Fahrzeug gerichtet sein und diese Übertragung stören (z. B. heftige Bewegungen des Fahrzeugaufbaus in schwerem Gelände). In anderen Fällen kann sie sich direkt auf das Fahrzeug auswirken und es in seinem konstruktiv vorgesehenen Funktionsablauf beeinflussen (z. B. Seitenwind). In jedem Fall muss der Fahrer die durch diese Einflüsse bedingte Veränderung des Ergebnisses ausregeln. Bei den Umwelteinflüssen unterscheidet man prinzipiell zwischen sog. physikalischen Umwelteinflüssen (Beleuchtung, Schall, mechanische Schwingungen, Klima, toxische Einflüsse, Staub, Schmutz und Nässe) und sozialen Umwelteinflüsse, die sich aus der Beziehung des Fahrers zu seinen Mitreisenden, aber auch zu anderen Verkehrsteilnehmern außerhalb des Fahrzeugs ergeben. Neben der Abwendung, die die Bedienung eines fahrzeuginternen Telefons mit sich bringt, ist der Einfluss eines inhaltlich schwierigen Telefonats auf die Führungsfähigkeit des Fahrers nicht zu unterschätzen. Wegen der Nichtbeeinflussbarkeit der sozialen Einflussfaktoren durch technische Maßnahmen sind sie zwar nicht Gegenstand ergonomischen Bemühens, auf ihre herausragende Bedeutung muss aber in diesem Zusammenhang hingewiesen werden.

Das Wort Beanspruchung darf allerdings auch nicht in dem Sinn missverstanden werden, dass es sich dabei in jedem Fall um eine negative Reaktion handelt, viel mehr weisen sowohl die subjektive Erfahrung als auch viele wissenschaftliche Untersuchungen darauf hin, dass es eine optimale Belastung/Workload gibt, die zu minimaler Beanspruchung und zugleich höchster Leistung (*Performance*) führt. Während aufgrund der beschränkten menschlichen mentalen Verarbeitungskapazität ein zu hoher Anspruch zu einer Reduktion der Leistung führt, haben schon frühe Untersuchungen (z. B. Schmidtke [125], de Waard [126]; ◘ Abb. 6.80) gezeigt, dass auch ein sehr niedriger Anspruch zu geringer Leistung führt („*Überforderung durch Unterforderung*"). Die Bewältigung dieser Situation wird mit dem Begriff *Vigilanz* charakterisiert. Man versteht darunter „die Fähigkeit, den Aufmerksamkeitsfokus aufrechtzuerhalten und über längere Zeit wachsam für Stimuli zu sein" [127].

Im Zusammenhang mit der Nutzung von Assistenzsystemen spielen die Aspekte der Überfor-

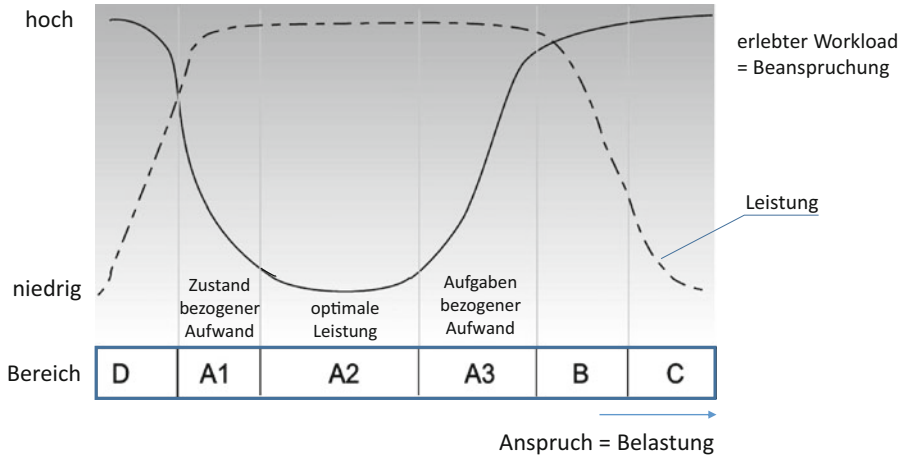



**Abb. 6.80** Zusammenhang zwischen Workload (Belastung) und Performance (aufgrund der Beanspruchung mögliche Leistung) nach De Waard [126]

derung und Unterforderung eine wichtige Rolle. Einerseits kann man Überforderungssituationen durch Automatikfunktionen auffangen. Andererseits besteht die Gefahr, dass dadurch in reizarmer Umgebung der Effekt der Monotonie noch zusätzlich gesteigert wird. Zudem ist der Workload eine extrem subjektive Angelegenheit. Es ist somit eine Vorhersage, zu welchen Effekt die Nutzung einer bestimmten Automatikfunktion bei dem einzelnen Fahrer führt, kaum möglich, zumal dies auch intraindividuell starken zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. In Zusammenfassung der in der Literatur geschilderten Befunde kann man aber eine grobe Zeitschiene aufstellen, die das Entstehen von mangelnder Aufmerksamkeit beschreiben [128] (Abb. 6.81). Demnach bewirken endogene Faktoren, wie Erschöpfung, Müdigkeit – womöglich verursacht durch Schlafentzug und zu geringes Erregungsniveau, eher kurzfristig mangelnde Aufmerksamkeit. Exogene Faktoren, die Reizarmut mit sich bringen wie Monotonie, das Fahren in bekannter Umgebung und eine hohe Vorhersehbarkeit der Situation führen langfristig zu Unterforderungssituationen (Bereich D in Abb. 6.80), während lang andauernder stressige Autofahrten bei hoher Verkehrsdichte Überforderungssituationen erzeugen (Bereich B und C in Abb. 6.80). Diese langfristigen Aufmerksamkeitsdefizite lassen sich nur durch eine kurze Schlafphase von ca. 20 Minuten kompensieren.

#### 6.4.1.2.3 Ergonomie und Komfort

Das Erleben des Fahrens ist nicht nur eine rationale Angelegenheit, sondern ganz Wesentlich auch eine emotionale. In diesem Zusammenhang ist die Frage nach dem Komforterleben zu beantworten. Die Definition von Komfort im englischen Wikipedia gibt dazu die Antwort: „Komfort (oder komfortabel sein) ist die Wahrnehmung physischer oder psychologischer Leichtigkeit, häufig charakterisiert als ein Mangel an Härte. Ein gewisses Maß an psychologischem Komfort kann erreicht werden durch Erfahrungen, die mit angenehmen Erinnerungen verbunden sind, durch das Handhaben vertrauter Gegenstände …“ Komfort ist demnach ein eher diffuser Begriff: er bedeutet im heutigen Sprachgebrauch so viel wie *Behaglichkeit, Bequemlichkeit und Zufriedenheit*, bezieht sich aber auch auf die Beurteilung des *Luxus* einer Ausstattung. Im Dritten Internationalen Lexikon der englischen Sprache (1981) wird beispielsweise Komfort definiert als „ein Zustand der Entlastung (relief), der Förderung (encouragement) und des Gefallens (enjoyment)“.

Zhang et al. [129] und Helander und Zang [130] haben anhand von Befragungsexperimenten, deren Ergebnisse sie einer Clusteranalyse unterworfen ha-




**Abb. 6.81** Endogene und exogene Faktoren, die zu einer Abnahme der Aufmerksamkeitsleistungen führen [128]

ben, gezeigt, dass sich Komfort aus zwei unabhängigen Einflussgrößen zusammensetzt: nämlich dem Aspekt des *Gefallens* und dem Aspekt des *Erleidens* (siehe Abb. 6.82). Sie nannten diese beiden Größen – etwas unglücklich – *Komfort* und *Diskomfort*. Man kann sich den Unterschied am Beispiel eines hart gefederten Sportwagens vor Augen führen: dieser kann zwar stark das „Erleiden" harter Stöße, geringer Kopffreiheit und womöglich einer ungünstigen Körperhaltung bewirken, aber trotzdem zugleich seiner Form und des Images wegen, das er verspricht, sehr „gefallen". Vink und Hellbeck [131] schließen sich diesem Modell modifiziert durch eine komplexere Abhängigkeitskaskade an.

Das **Gefallen** hat viel mit *Mode und Zeitgeist* zu tun und entzieht sich damit strengen naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden. Wie Knoll [133] herausarbeitet, erwächst ein ästhetisches Gefühl immer aus der Interaktion von Objekt und betrachtendem Subjekt. Bei der Bildung von Geschmacksurteilen ist demnach Form und Funktion des Gegenstandes strikt zu trennen. Die Form wird („ohne Interesse") durch den Geschmack beurteilt, die Funktion durch den Verstand („von Interesse geleitet"). Dabei kann nach den Ergebnissen der Untersuchungen von Knoll das Gefallensurteil das Gefühl des Erleidens durchaus beeinflussen. Trotz dieser individuellen Relation von Subjekt und Objekt wird in der kognitiven Ästhetik argumentiert, dass solche Objekte als schön empfunden würden, die mit einer gewissen – aber nicht zu großen – Komplexität das Gehirn stimulieren und so Musterbildung anregen. Offensichtlich gefällt vor allem das, was einen hohen Wiedererkennungswert hat [134]. Untersuchungen von Braun et al. [135] zur Attraktivität von Gesichtern zeigen allerdings, dass gerade systematische Abweichungen von der Durchschnittlichkeit die Attraktivität erhöhen. Auch bezüglich des Gefallens von Automobildesign fällt auf, dass es – natürlich auch

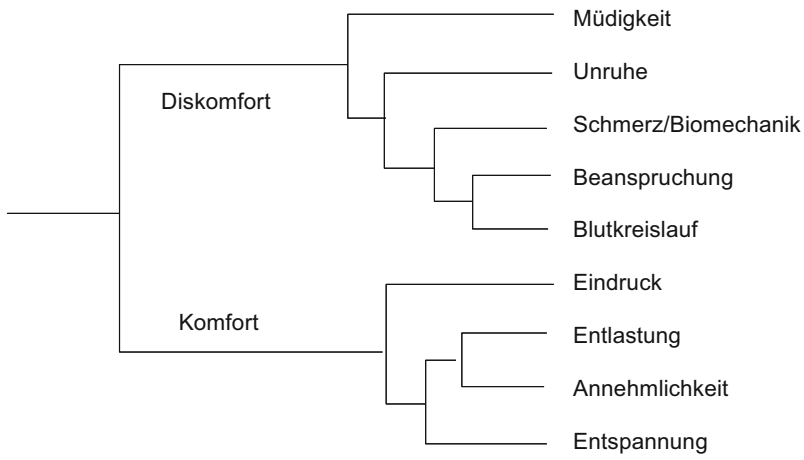



**Abb. 6.82** Ergebnis der Clusteranalyse in den Experimenten von Zhang, Helander und Dury [129]

bedingt durch die technischen Möglichkeiten der Gestaltung – zeitabhängige Moderichtungen gibt, die einerseits eine hohe Ähnlichkeit der Fahrzeuge bewirken, wobei andererseits der Reiz aber gerade in geringfügigen Abweichungen vom Mainstream liegt. Dies alles unterstreicht die Bedeutung des Industrial Design für den gesamten Bereich der Gestaltung des Automobils.

Das **Erleiden** kann hingegen mit den *klassischen Methoden der Psychophysik* untersucht werden. Die Psychophysik untersucht den mathematischen beschreibbaren Zusammenhang zwischen einem physikalischen Reiz und der individuellen Empfindung. Die Anwendung psychophysische Messmethoden spielen deshalb in den ergonomischen Entwicklungsabteilung der Automobilindustrie eine herausragende Rolle. Bezüglich dieser Reize ist nun weiter zu fragen, welche auf das Erleiden großen Einfluss haben und welche geringeren. Krist [132] konnte aufgrund von Befragungsexperimenten eine Komfortpyramide definieren, die in Übereinstimmung steht mit den Ergebnissen von [129] bzw. [130] und mit sonstigen Eigenheiten menschlicher Wahrnehmung, die generell auf die Wirksamkeit eines Maskierungseffektes hinweisen: ganz unten steht die Erfüllung der Bedürfnisse, die ganz wichtig sind. Wenn diese zufriedengestellt sind, wächst zunehmend der Einfluss der nächst höheren, wobei mit kognitivem Aufwand natürlich auch bei der Nichtbefriedigung niedrigerer Bedürfnisse der Effekt höherer Bedürfnisbereiche beurteilt werden kann (Abb. 6.83).

Die zunehmende Perfektionierung, welche die Elektronifizierung der Produkte mit sich bringt, hat hinsichtlich der ergonomischen Gestaltung die Forderung nach *Handhabbarkeit* hervortreten lassen. Gerade unter dem kommerziellen Gesichtspunkt der Attraktivität eines Produktes ist damit auch die Frage nach dem sog. *Bedienkomfort* verbunden. Auch er ist unter dem Aspekt des Komfort/Diskomfort-Modells zu sehen. Auch hier kann mit den naturwissenschaftlichen Methoden der Psychophysik nur der Diskomfort einer unzureichenden Bedienung abgebaut werden kann, wobei zugleich die Forderung nach ästhetischer Zufriedenstellung erhoben werden muss. Zusammenfassend zeigt somit die Darstellung der Abb. 6.83 den Zusammenhang von naturwissenschaftlich orientierter *Ergonomie* und künstlerisch orientiertem *Industrial Design*.

### 6.4.1.3 Systemergonomische Gestaltung

Für die ergonomische Gestaltung des Automobils spielt der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug eine dominante Rolle. Die Untersuchung und Beschreibung dieses Informationsflusses ist Gegenstand der sog. Systemergonomie [136]. Ausgangspunkt jeder systemergonomischen Analyse ist die der Aufgabe zugrunde liegende Information. Dieser Gedanke gilt für jede Form der Aufgabe.

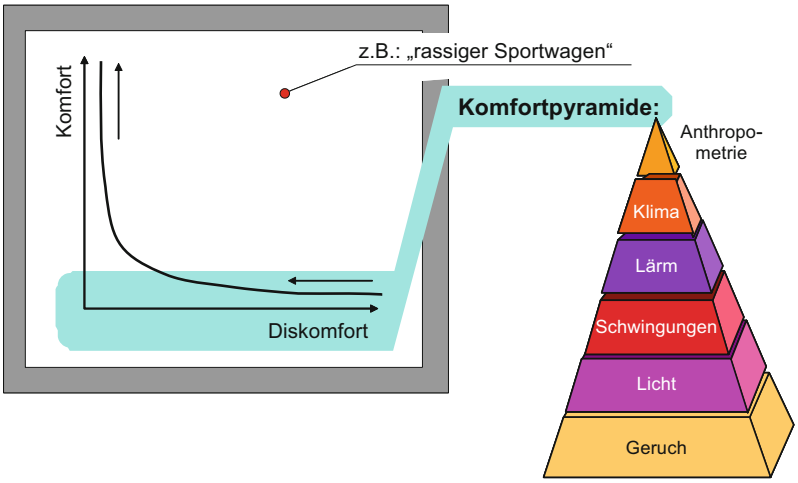



**Abb. 6.83** Komfort als ein Paradigma für „Gefallen“ und Diskomfort für „Erleiden“ in Verbindung mit der Komfortpyramide nach Krist [132]

Es ergeben sich aber beim Autofahren unterschiedlichste Formen der Aufgabe. Für die ergonomische Gestaltung eines Fahrzeuges ist deshalb zuerst zu untersuchen, für welchen Einsatzzweck es gedacht ist („funktionale Ergonomie“). Tab. 6.28 gibt hierfür im Sinn von Nutzungsszenarien einen exemplarischen Überblick mit einigen Beispielen.

Unter Berücksichtigung der grundlegenden Vorstellung des Regelkreises aus Abb. 6.78 lässt sich festlegen:

Die Funktion eines technischen Systems bzw. Systemelements stellt die definierte Überführung der Eingangsgrößen in die umgewandelten Ausgangsgrößen unter Berücksichtigung von Parametern dar. In dieser Eigenschaft ist es ein Teil eines Mensch-Maschine Systems, woraus sich unter Berücksichtigung des Nutzungskontextes die ergonomischen Anforderungen für das technische System ableiten.

#### 6.4.1.3.1 Systemergonomische Regeln

Systemergonomische Regeln sind im Prinzip auf jede Teilaufgabe einzeln angewendet, wodurch konkrete Hinweise für die Auslegung des Informationsflusses, d. h. insbesondere für die Gestaltung von Bedienelementen und Anzeigen, erhalten werden. Dabei sind die folgenden grundlegenden Fragen in befriedigender Weise zu beantworten:

a) *Funktion*: „Was beabsichtigt der Fahrer/Nutzer und inwieweit unterstützt ihn dabei das technische System?“
b) *Rückmeldung*: „Kann der Fahrer/Nutzer erkennen, ob er etwas bewirkt hat und was das Ergebnis seiner Handlung war oder sein wird?“
c) *Kompatibilität*: „Wie groß ist der Umcodieraufwand für den Fahrer/Nutzer zwischen verschiedenen Informationskanälen?“

Abb. 6.84 gibt eine Übersicht, wie die systemergonomischen Gestaltungsmaxime Funktion, Rückmeldung und Kompatibilität weiter untergliedert sind (Näheres hierzu siehe in Bubb et al. [121]).

Die Stellen, an denen Information vom Menschen auf die Maschine, d. h. auf das Fahrzeug übertragen und wo umgekehrt vom Fahrzeug Information auf den Menschen übertragen wird, bezeichnet man als die *Schnittstelle* zwischen Mensch und Maschine. Durch eine optimale Schnittstellengestaltung, die unter anderem die systemergonomischen Regeln berücksichtigt, sollen Missinterpretationen durch den Fahrer gerade in kritischen Situationen weitgehend vermieden werden.

Ganz allgemein werden alle technischen Elemente als **Anzeigen** bezeichnet, über die auf gestalterische Weise gezielt Information auf den Menschen übertragen wird. Dabei kommen alle Sin-

**Tabelle 6.28** Generelle Fahrmissionen und Beispiele

| | **Beteiligte** | | |
|---|---|---|---|
| **Auftrag** | **Einzelperson** | **Personengruppe** | **Objekt** |
| Dienstlich | – Fahrt zur Arbeit<br>– Fahrt zu einem Gesprächs-/Behandlungstermin<br>– Kundenbesuch (z. B. Vertreter) | – Reise zu einem Besprechungstermin<br>– Verschiedene Ziele für die Reisenden<br>– Fahrgemeinschaft | – Transport eines Gegenstandes<br>– Transport mehrerer Gegenstände |
| Privat | – Besuch bei Verwandten, Freunden<br>– Besorgung<br>– Abholen/Bringen von Objekten<br>– Rundfahrt<br>– Urlaubsreise mit einem Ziel<br>– Urlaubsreise mit mehreren Zielen | – Verwandtengruppe<br>– Gruppe aus Erwachsenen, Kindern oder gemischt<br>– Unbekannte Fahrgemeinschaft<br>– Bekannte Fahrgemeinschaft<br>– Rundfahrt<br>– Urlaubsreise mit einem Ziel<br>– Urlaubsreise mit mehreren Zielen<br>– Verschiedene Ziele für die Reisenden | – Transport eines Gegenstandes<br>– Umzug<br>– Abholen/Bringen von Objekten<br>– Transport fremder Gegenstände<br>– Transport von Sportgeräten (Golfbag, Fahrräder, Ski, Boot u. Ä.) |



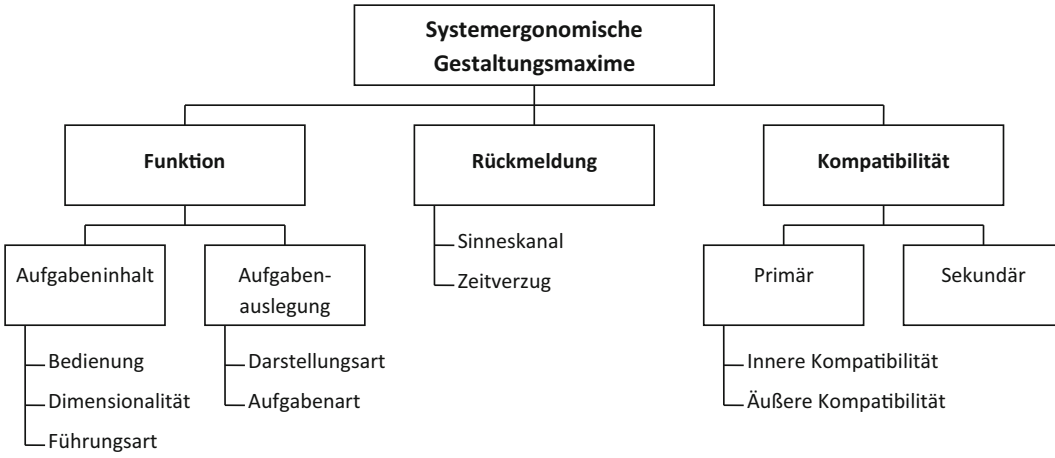



**Abb. 6.84** Übersicht über die systemergonomischen Gestaltungsmaxime Funktion, Rückmeldung und Kompatibilität

nesorgane infrage, so dass man im Wesentlichen *optische, akustische und haptische Anzeigen* unterscheidet. Als **Bedienelemente** bezeichnet man die technischen Einrichtungen, über die Information vom Menschen auf die Maschine übertragen wird. Traditionell spielen hierbei all die Elemente eine Rolle, die mechanisch mit den Extremitäten, also den Fingern, Händen und Beinen betätigt werden. Im Wesentlichen unterscheidet man also *Fußstellteile* (Pedale) und *Handstellteile* (Hebel, Knöpfe, Taster u. v. a.). Mit den zunehmenden Möglichkeiten der Informationsverarbeitung kommen als Bedienelemente auch Sensoren (Mikrofon, Kamera, IR-Sensor) in Gebrauch, über die Informationen an eine im Computer technisch realisierte Detektionseinheit und Interpretationseinheit (Spracherkennung, Mimikerkennung, Gestikerkennung) übermittelt werden, durch welche dann entsprechende Funktionen ausgelöst werden [137–139].

Durch Anzeigen soll die Information, die vom Fahrzeug kommt, so codiert werden, dass ihr vom Nutzer im Sinn der Semantik Bedeutung zugeordnet werden kann. Über das Bedienelement soll der Nutzer seine Intention so codieren, dass das Fahrzeug seinen Willen ausführt. In jedem Fall sind dabei Codesysteme zu nutzen, die es ermöglichen, dass die Informationen von einem möglichst großen Anteil der Gesamtbevölkerung verstanden werden [140]. Dafür kommen grundsätzlich folgende Codesysteme in Betracht, wobei die Aufzählung auch die Rangfolge der Wichtigkeit wiedergibt:

- *Positionscodierung*,
- *Bewegungscodierung*,
- *Formcodierung*,
- *Größencodierung*,
- *Farbcodierung* (Die Farbcodiergrundsätze für Anzeige und Bedienelement sind ausführlich in DIN EN 60073 bzw. DIN 04844 dargestellt),
- *Zeichencodierung*: Wegen deren schnellerer Erfassbarkeit ist es sinnvoll, immer eine Kombination von Piktogrammen und Beschriftung zu wählen, wenn die Umstände dies zulassen [138].

Die genaue Lokalisation von Anzeigen und Bedienelementen ist eine komplexe Aufgabe, die im Rahmen der anthropometrischen Auslegung des Fahrzeugs (Packaging, siehe ▶ Abschn. 6.4.1.4) gelöst werden muss. Dabei hat sich in der historischen Entwicklung des Automobils das Schema einer Anordnung von Anzeigen und Bedienelementen im Fahrzeug etabliert, welche im linken Armaturenbereich die Lichtfunktion, im Bereich um und hinter dem Lenkrad alle primären und sekundären Fahrfunktionen und in der Fahrzeugmitte die Funktionen des sog. *Fahrzeuginformationssystems* bzw. *Central Information Display* (FIS bzw. CID u. a. Radio, Navigationssystem) sowie sonstige tertiäre Komfortfunktionen (z. B. Heizung/Klimaeinstellung) vorsieht. Schmid und Maier [141] teilen den Cockpitraum in folgende Zonen ein:

- primärer Bereich: zentrales Sehfeld/Beidhandzone,
- sekundärer Bereich: peripheres Sehfeld/Einhandzone,
- tertiärer Bereich: außerhalb des Sehfeldes/erweiterte Einhandzone.

In diesen Zonen sind die Bedienelemente und Anzeigen der primären, sekundären und tertiären Fahraufgaben unterzubringen. Aus diesen Überlegungen entwickeln sie ein Basiscockpit, das weitgehend ergonomische Forderungen erfüllt, ein hohes Maß an „Selbsterklärungsfähigkeit" beinhaltet und damit einen wesentlichen Beitrag für die aktive Sicherheit leistet (◘ Abb. 6.85).

#### 6.4.1.3.2 Anzeigen

Durch Anzeigen soll ein Abbild der Außenwelt bzw. technischer Details (Messwerte) dem Nutzer verfügbar gemacht werden. Im Sinne des Regelkreisbildes der ◘ Abb. 6.78 haben alle Anzeigen, die Information über den technischen Zustand des Fahrzeugs sowie dessen Bewegung vermitteln, auch Rückmeldecharakter. Bedienelemente, die durch den Nutzer mechanisch betätigt werden, können über die haptische Sinnesqualität ebenfalls Rückmeldung zumindest über ihre Betätigung vermitteln. Viele Bedienelemente, die über die Hände bzw. Finger betätigt werden, haben durch die dadurch eingenommene neue Stellung Anzeigecharakter. Für sie gelten also im Prinzip – soweit anwendbar – die im Folgenden dargestellten Regeln für visuelle Anzeigen.

##### Visuelle Anzeigen

In Abhängigkeit vom Abstraktionsgrad der Darstellung unterscheidet man bei visuellen Anzeigen digitale, analoge, bildhaft situationsanaloge, fotorealistische bzw. kontaktanaloge Anzeigen. Am Beispiel der Navigationsanzeige hat Israel [142] diese Stufen anschaulich gemacht und zugleich eine Abschätzung der geistigen Leistung vorgenommen, die notwendig ist, um den Anzeigeninhalt mit der Wirklichkeit in Kongruenz zu bringen (◘ Abb. 6.86).

**Digitale Anzeigen** Bei digitalen Anzeigen wird ein Kontinuum von Werten mit Bezug zur realen Welt in Segmente unterteilt und nur der Wert des augenblicklich aktuellen Segmentes angezeigt. So ist beispielsweise die Anzeige des Zustandes aus/an in Form von zwei oder auch nur einem Lämpchen bereits eine sehr einfache Form der digitalen Anzeige. Prinzipiell ist die Fehlerrate auch beim schnellen Ablesen einer digitalen Anzeige gegenüber allen anderen Formen der Anzeige sehr gering. Digitale An-

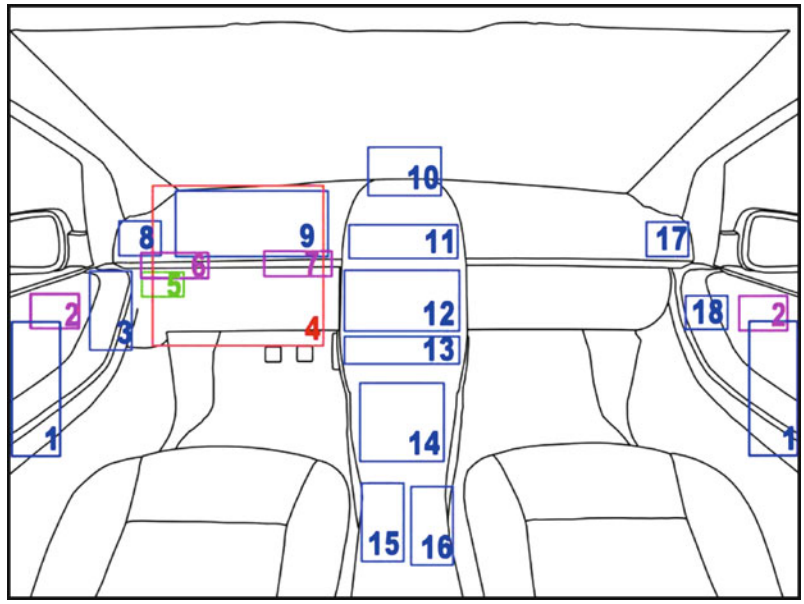



**Abb. 6.85** Anordnungsbereiche der Bedienelemente im Basiscockpit nach Schmidt und Maier [141]. *1*: Türgriff links & rechts; *2*: Türöffner links & rechts; *3*: Fensterheber, Spiegelverstellung, Zentralverriegelung; *4*: Multifunktionslenkrad; *5*: Lichtschalter; *6*: linker Lenkstockhebel; *7*: rechter Lenkstockhebel; *8*: linke Luftdüse & dazugehörige Regelung; *9*: Kombiinstrument; *10*: zentrales Display; *11*: mittige Luftdüsen & zugehörige Regelung; *12*: Klimamodul; *13*: Entertainmodul; *14*: Schalthebel; *15*: Bedieneinrichtung für zentrales Display; *16*: Handbremse; *17*: rechte Luftdüse & dazugehörige Regelung; *18*: Fensterheber für Beifahrerseite




**Abb. 6.86** Visuelle Anzeigen und geistige Leistung am Beispiel der Navigation [142]

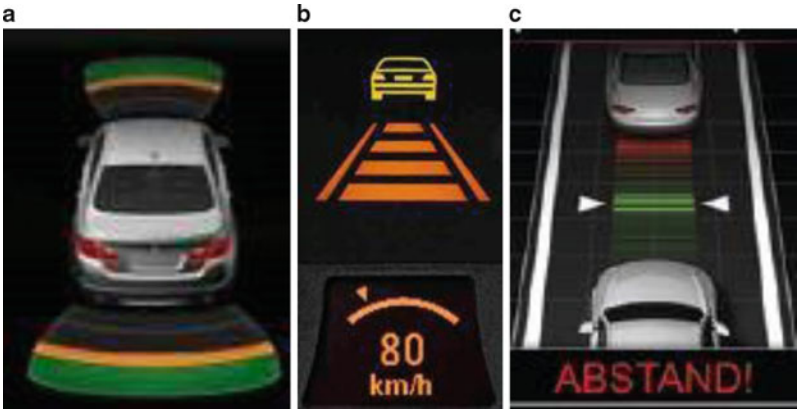
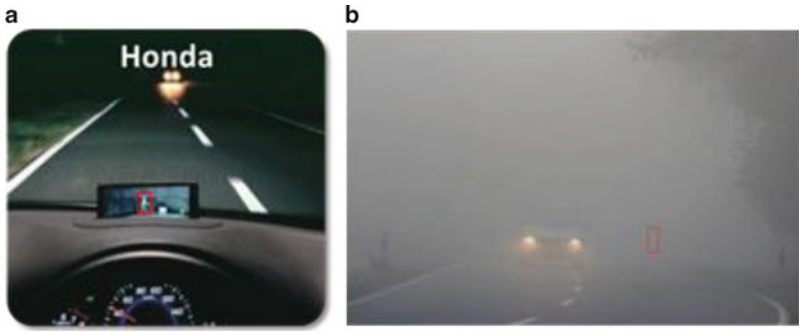



**Abb. 6.87** Bildhafte Anzeige des Abstandes zum stehenden Hinderniss beim Einparkvorgang (**a**) und Abstandstempomat (**b** BMW, **c** Audi)

zeigen sind immer dann zu empfehlen, wenn von der Aufgabe her das korrekte Ablesen des ggf. numerischen Wertes von ausschlaggebender Bedeutung ist.

**Analoge Anzeigen** Durch analoge Anzeigen wird das Kontinuum der Realität durch ein entsprechendes Kontinuum der Winkelstellung bzw. Position eines Zeigers oder eines in seiner Länge veränderlichen Elements (z. B. Bandtacho der 60er Jahre, Balkenanzeige auf einem Bildschirm) repräsentiert. Diese Anzeige ist besonders dann geeignet, wenn zwei Werte miteinander verglichen werden sollen, weil dann – gleiche Ausführungsform des Analoganzeigers vorausgesetzt – unterschiedliche Winkelstellungen bzw. Längen unmittelbar wahrgenommen werden können [143, 144]. Eine weitere vorteilhafte Nutzung der analogen Anzeige besteht darin, dass der Zeiger über eine farblich gekennzeichnete Skala streicht, die nicht nur unterschiedliche Betriebszustände charakterisiert, sondern durch die Bewegung des Zeigers auch die Annäherung an einen erwünschten bzw. unerwünschten Betriebszustand (z. B. Drehzahlmesser – „roter Bereich"). Ist es aus der Sicht der Aufgabe notwendig, auch den Zahlenwert der Messung zu erfassen (z. B. Geschwindigkeit), so wird dem Nutzer eine mentale Zuordnung zwischen der Zeigerstellung und der Zahlenskala abverlangt. Der Zahlenwert wird am genauesten abgelesen, wenn der Zeiger exakt auf die entsprechende Ziffer zeigt (diese sollte dabei nicht durch den Zeiger verdeckt werden). Bei einer Zeigerstellung zwischen den Ziffern wird vom Nutzer eine Interpolation abverlangt. Diese ist in der mittleren Stellung am genausten. Um die Interpolation möglichst sicher zu machen, sollten als Skalenwerte nur Vielfache von entweder 1, 2 oder 5 oder deren Zehnerpotenzen verwendet werden. Eine einwandfreie Interpolation ist zudem nur dann möglich, wenn die Skaleneinteilung absolut linear ist.

**Bildhafte Anzeigen** Bildhafte Anzeigen liefern ein stilisiertes Bild der Umwelt [140] und erleichtern somit den mentalen Prozess, den Anzeigeinhalt mit der Realität in Verbindung zu bringen. Bildhafte Anzeigen sind normalerweise *zweidimensional*. Mit dem Einzug der Rechnertechnologie in das Kraftfahrzeug haben bildhafte Anzeigen an Bedeutung gewonnen. So erleichtert eine bildhafte Anzeige des Abstandes zu stehenden Hindernissen beispielsweise das Einparken (Abb. 6.87a). Mit ähnlichen Anzeigen kann auch bei einem ACC-System dargestellt werden, welcher Sollabstand eingestellt ist (Abb. 6.87b; Beispiel BMW) oder ob der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug im sicheren (grünen) oder unsicheren (roten) Bereich ist (Abb. 6.87c; so verwendet bei Audi). Bildhafte Anzeigen finden gerade in Verbindung mit Navigationsgeräten Anwendung. Die Anwendung bildhafter Anzeigen im Fahrzeug ist extrem vielfältig und wird in Zukunft in Verbindung mit den entsprechenden Sensoren und Displays noch weiter zunehmen.




6

**Abb. 6.88** Kontaktanaloge Anzeige, um einen Fußgänger mittels eines Infrarotnachtsichtgeräts kenntlich zu machen. **a** auf dem Display eines Bildschirms (Beispiel Honda), **b** unmittelbar in der realen Sicht nach einem Vorschlag von Bergmeier [146]

So sind verschiedene Anzeigen realisiert, durch die der Energiefluss bei Hybridfahrzeugen dargestellt wird. Lorenz [145] hat ein Beispiel gegeben, wie durch bildhafte Anzeigen ein Tutorial für die korrekte Sitzeinstellung unterstützt werden kann.

**Kontaktanaloge Anzeigen** Kontaktanaloge Anzeigen sind dadurch charakterisiert, dass in ein reales Abbild der Umwelt – heute im Allgemeinen in ein mittels elektronischer Kamera erfasstes Bild – künstliche Information im Sinn der augmentierten Realität eingebracht werden (sog. Augmented Reality = unterstützte Realität). Anstelle des zuvor genannten stilisierten Abbildes einer Autobahnausfahrt oder einer Straßensituation in einer Stadt könnte z. B. in einem Navigationsgerät das aktuelle Bild einer Videokamera dargestellt werden, in dem die entsprechenden Navigationsinformation unmittelbar und ortsfest überlagert wird. Auch für Nachtsichtgeräte, welche mittels Infrarottechnologie Gegenstände sichtbar machen können, ist es durch Bilderkennung möglich, kritische Objekte (zum Beispiel Fußgänger oder Tiere) zu detektieren und mittels eines farbigen Rahmens in dem von der Infrarotkamera entworfenen Bild kenntlich zu machen (◘ Abb. 6.88a). Wie Bergmeier [146] allerdings nachwies, ist diese Form der technischen Realisierung hinsichtlich der Verkehrssicherheit wenig effektiv, da der Fahrer gerade in der kritischen Situation, in der sein Blick auf die Außenwelt gerichtet sein sollte, auf das im Armaturenbereich befindliche Display blicken müsste. Hier wäre nach seinen Untersuchungen die Anwendung des kontaktanalogen Head-Up-Display von Vorteil (◘ Abb. 6.88b). Mittels dieser Anzeigetechnologie wäre es möglich, technisch erzeugte Information unmittelbar in das reale Umfeld einzuspiegeln [142, 146–149] (siehe untere Darstellung der ◘ Abb. 6.86; diese Darstellungsform wird neuerdings von der Firma Continental als Augmented Reality Head-Up-Display, AR-HUD angeboten). Das heute zunehmend in Fahrzeugen angebotene HUD stellt keine kontaktanaloge Anzeige dar, da hier in einer fixen Entfernung von 2–3 m im Allgemeinen fahrzeugbezogene Daten wie Geschwindigkeit, Aktionszustand der Assistenzsysteme, konventionelle Navigationshinweise ohne unmittelbaren Bezug zur Außenwelt der Realität überlagert werden.

Eine besonders einfache Form eines kontaktanalogen Bildes liefert der *Spiegel*, der im Fahrzeug fast ausschließlich in Form des Rückspiegels Anwendung findet. Allerdings ist es gemäß obiger Definition insofern nicht ganz korrekt, von „kontaktanalog“ zu sprechen, da keine zusätzliche Information künstlich eingebracht wird. Trotzdem ist der Spiegel ein technisches Element, das den Blick auf die reale Umwelt manipuliert (z. B. durch Blickwinkelaufweitung und damit verbundener Verkleinerung beim konvexen Spiegel). Die Nutzung von Kamera und Bildschirm ist eine zukünftig zu überdenkende Alternative als Spiegelersatz, da dem Kamerabild nützliche, technisch verfügbare Information überlagert werden kann. Dadurch wäre es möglich, nicht nur den Nachteil des reduzierten Entfernungsschätzens zu kompensieren, sondern bei richtiger Auslegung der Kamerasysteme auch den

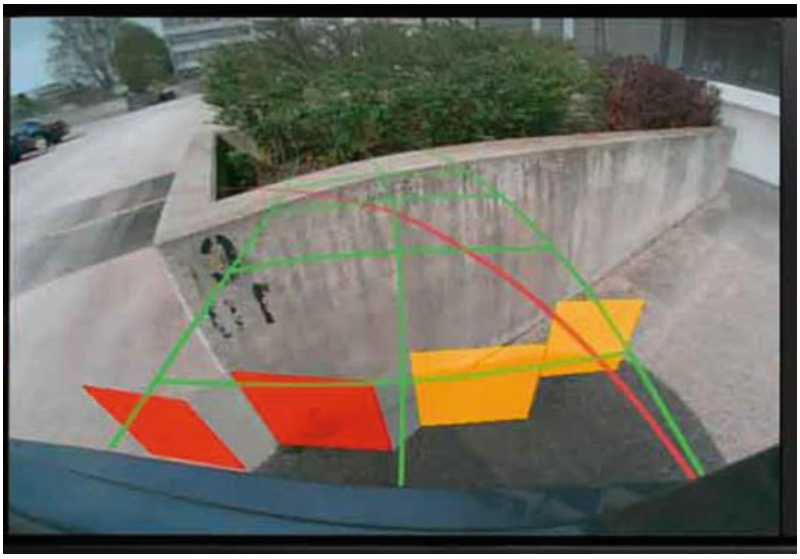


**Abb. 6.89** Rückfahrassistenz mit eingeblendeten Hilfsspuren für das Einparken, welche die oben genannten Empfehlungen berücksichtigt

Effekt des toten Winkels zu umgehen [150]. In Form der Rückfahrkamera, in welche die Fahrspuren für einen Einparkvorgang eingeblendet werden, ist dafür bereits ein Vorbild geschaffen (Abb. 6.89).

**Auslegung von visuellen Anzeigen** Visuelle Anzeigen müssen so ausgelegt werden, dass die von ihnen dargestellte Information aus der Fahrerposition jederzeit sicher wahrgenommen werden kann. Das stellt insbesondere Anforderungen an die Größe der verwendeten Sehzeichen und den Kontrast, mit dem diese sich vor dem Hintergrund abheben. Das gilt nicht nur für Anzeigen im engeren Sinne, sondern auch für die Beschriftung von Bedienelementen, die ja auch Anzeigecharakter hat.

Nach allgemeinen ergonomischen Regeln sollte ein Sehzeichen mindestens unter einem Blickwinkel von 15′ dargeboten werden (ISO 15008). Tatsächlich ist aber praktisch die doppelte Größe zu empfehlen. Die durch den Alterungsprozess bedingte Unfähigkeit älterer Personen auf nahe Gegenstände zu akkommodieren, kann nur sehr unvollkommen durch größere Sehzeichen kompensiert werden. Nicht zuletzt deswegen stößt das HUD gerade bei älteren Personen auf so hohe Akzeptanz, weil bei den heute realisierten HUDs die Information in ausreichender Größe und auf einer virtuellen Ebene dargestellt wird, für die praktisch keine Akkommodationsleistung mehr notwendig ist.

Dunkle Schrift auf hellem Grund ist zwar um den Faktor 1,2 bis 1,3 besser abzulesen als helle Schrift auf dunklem Grund [151]. Allerdings kann ein helles Display gerade bei dunkler Umgebung, wo sich die eigentliche Fahraufgabe darstellt, sehr störend sein. Deshalb ist für den Fall, dass die Displayhintergrundfarbe nicht geändert werden kann, die Variante „helle Schrift auf dunklem Grund“ im Fahrzeug vorzuziehen. Im selben Maße, in dem LCD-Displays im Kombiinstrument Einzug halten, ist diese Empfehlung aber zu überdenken und womöglich eine Umstellung in Abhängigkeit von der Außenhelligkeit vorzuziehen, wie es heute schon bei vielen Navigationsgeräten der Fall ist. Entsprechend ISO 15008 soll ein Kontrast zwischen Symbol und Hintergrund von 3 : 1 für Tageslichtbedingungen eingehalten werden.

Obwohl die graphische Auslegung (Formcodierung!) des Displays hinsichtlich der Informationsübertragung die größere Bedeutung hat, spielen auch Farben eine wichtige Rolle. Es ist hier zu unterscheiden zwischen der Hintergrundfarbe und der Farbe einer Schrift oder eines Sehzeichens. Nach

DIN-IEC 73/VDE 0199 charakterisiert ein weißer Hintergrund eine neutrale, allgemeine Information. Auch schwarzer und grauer Hintergrund haben keine besondere Bedeutung. Die Farbe Rot kennzeichnet unmittelbare Gefahr, Gelb Vorsicht, Achtung und Grün Sicherheit und Gefahrlosigkeit. Insbesondere „Rot" kann auch für die Beschriftung verwendet werden, um auf einen gefährlichen Zustand hinzuweisen (z. B. zu geringer Luftdruck in einem Reifen). Sonst ist es eher verwirrend, in einem Text unterschiedliche Farben zu verwenden. Die gleichzeitige Verwendung von roten und blauen Schriftzeichen ist möglichst zu vermeiden, insbesondere bei Selbstleuchtern mit monochromatischem Licht (LED-Anzeigen), da das menschliche Auge aufgrund der chromatischen Aberration der Augenlinse für rotes Licht weitsichtig und für blaues Licht kurzsichtig ist. Bei Anzeigen, die unmittelbar mit der Verkehrssituation zu tun haben, ist das originale Layout der Verkehrszeichen in Farbe und Form zu verwenden. Für Anzeigen, die nicht unmittelbar mit der Verkehrssituation verbunden sind, sollten graphische Darstellungen, die an Verkehrszeichen erinnern, eher vermieden werden.

#### Akustische Anzeigen

Akustische Anzeigen kann man prinzipiell unterteilen in solche, welche lediglich Hinweise bzw. Warnungen ausgeben und andererseits in solche, welche detaillierte inhaltliche Information über Sprache zu vermitteln vermögen.

Bei den **Hinweise bzw. Warnungen** vermittelnden akustischen Anzeigen wird die Information durch die Frequenz des Tons bzw. die Frequenzzusammensetzung des Geräusches und die zeitliche Sequenz (Wiederholfrequenz) codiert. Da das menschliche Ohr bei 4000 Hz die höchste Empfindlichkeit hat, sind Warntöne mit einem Frequenzspektrum zwischen 1000 Hz und 5000 Hz besonders wirkungsvoll. Prinzipiell sollten sie den vorhandenen Lautstärkepegel im Fahrzeuginnenraum um mehr als 5 dB, besser bis zu 15 dB übertönen (DIN EN 457; bei einer Innenlautstärke von ca. 70 dB(A) kann also der Warnton bis zu etwa 85 dB(A) reichen). Nur bei kritischen Verkehrssituationen (also z. B. bei der Gefahr des Auffahrens auf einen sehr viel langsamer Vorausfahrenden oder ein stehendes Hindernis, bei einem plötzlich in die Fahrbahn tretenden Fußgänger, drohendes Abkommen von der Fahrbahn u. a.) sollte durch einen Warnton die Aufmerksamkeit erregt werden. Obwohl es üblich ist, dafür reine Töne zu verwenden, wurde in einer Untersuchung von Fricke [152] gezeigt, dass das Einspielen eines Geräusches, welches das Bremsenquietschen nachahmt, zu deutlich reduzierten Reaktionszeiten führt. Die Dringlichkeit der Reaktion kann durch die Wiederholfrequenz des Warntons codiert werden. Eine Wiederholfrequenz von einem 1/2 Hertz (Tonlänge 0,7–1 s) wirkt wesentlich weniger dringend als eine Wiederholfrequenz von 1–2 Hz (z. B. akustische Anzeige der Messergebnisse ultraschallbasierter Parkdistanzgeräte).

Auf Ergebnisse geringerer Dringlichkeit ist es besser, mit einem dezenten akustischen Signal hinzuweisen. Es hat sich hierfür ein künstlich erzeugter Gong etabliert. Da die damit verbundenen Ereignisse normalerweise selten auftreten, ist es unabdingbar, dass der akustische, die Aufmerksamkeit weckende Hinweis mit einer entsprechenden optischen, das Ereignis näher erläuternden Information verbunden wird.

Letzteres erübrigt sich, wenn man synthetische oder von einer menschlichen Stimme gespeicherte **Sprachsignale** verwendet. Dabei sind allerdings lange Sätze, insbesondere Nebensätze zu vermeiden. Es ist heute üblich geworden, optional insbesondere Navigationshinweise auf diese Art zu vermitteln (in älteren radiobasierten Navigationsgeräten erfolgt der Hinweis sogar nur akustisch). Auch Hinweise auf irgendwelche auftretenden Zustände des Fahrzeugs können durchaus mit dieser Methode vermittelt werden. In beiden Fällen ist allerdings zu berücksichtigen, dass das akustische Signal und somit auch die gesprochene Sprache immer flüchtig ist, d. h. wenn im Moment der Abgabe der Fahrer unaufmerksam war, wird der Hinweis womöglich nicht erkannt. Deshalb ist zu empfehlen, dass parallel zu dem akustischen Sprachhinweis eine redundante optische „Rückfallebene" verfügbar ist bzw. durch eine spezielle Taste die Wiederholung der Sprachinformation abgerufen werden kann (detaillierte Empfehlungen finden sich in [138]).

Obwohl akustische Signale jedweder Art hohen, die Aufmerksamkeit erregenden Charakter haben und damit im Prinzip sehr wirkungsvoll sind, sind

sie dennoch mit Bedacht anzuwenden. Das Signal wird nämlich nicht nur vom Fahrer, sondern auch von den mitfahrenden Passagieren gehört. Der Fahrer kann sich dann vor diesen wegen seines Fahrstils oder sonstiger Maßnahmen „blamiert" fühlen und somit solche Signale von Grund auf ablehnen [153].

**Haptische und taktile Informationen/Anzeigen**

Bei der Haptik ist zwischen *Oberflächenhaptik* (Erfühlen der Materialqualität des berührten Objektes = taktil) und *Bedien-* oder *Betätigungshaptik* (Rückwirkung eigeninitiierter Bewegung auf die menschliche Wahrnehmung = haptisch) zu unterscheiden. Erstere kann durch das verwendete Material und durch die Form gestalterisch beeinflusst werden, letztere zusätzlich durch den Kraft-Weg-Verlauf während der Betätigung. Die Haptik vermittelt dabei nicht nur Rückmeldung im Sinne der Abb. 6.78, sondern hat auch erheblichen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität des Fahrzeugs. Sie fördert somit wesentlich den Gefallensaspekt des empfundenen Komforts.

Für die **Oberflächenhaptik** spielt das verwendete *Material* eine entscheidende Rolle. Wärmeleitendes, als „kühl" empfundenes Metall, verbunden mit visuell erfassbarem metallischem Glanz wird von vielen als wertvoll empfunden. Weniger gut wärmeleitendes Material mit nach Möglichkeit polierter Holzoberfläche vermittelt ebenfalls einen „wertigen" Eindruck. Hingegen empfindet man schlecht wärmeleitenden Kunststoff mit rauer Oberfläche, an dem womöglich noch Entgratungsränder zu spüren sind, als „billig". Der optische Eindruck muss offensichtlich zu der Berührhaptik passen. Beispielsweise enttäuschen mit dünner Metalloberfläche überzogene, sich „warm" anfühlende Kunststoffteile die optisch aufgebaute Erwartung.

Der *Form* der angefassten Objekte kommt neben dem eben erwähnten Wertigkeitsaspekt auch Rückmeldecharakter zu, da damit – nach einem durch Übung erfolgten Lernvorgang – Information über das berührte Stellteil gegeben wird. Dies steht allerdings oftmals im Widerspruch zu ästhetischen Ansprüchen und zu wirtschaftlichen Aspekten (Verwendung von Gleichteilen). Gleichwohl sollten sich Lenkstockhebel, insbesondere, wenn hinter dem Lenkrad auf einer Seite mehrere angebracht werden, nicht nur durch Form und Position deutlich unterscheiden (z. B. durch verschieden lange Hebel), sondern auch durch die taktil gefühlte Oberfläche (z. B. der eine glatt und der andere geriffelt). Ähnliche Ansprüche gelten für in der Mittelkonsole angebrachte Knöpfe, die oftmals entgegen dieser Forderung die Anmutung einer „Klaviatur" vermitteln. Mit der Betätigung nicht sehr häufig genutzter Stellteile geht immer eine Blickzuwendung einher [154–156]. Deshalb sind solche Stellteile so anzubringen, dass sie auch optisch erfassbar sind.

Die **Betätigungshaptik** selbst ist wesentlich charakterisiert durch den Kraft-Weg-Verlauf. Der ideale Verlauf hängt dabei von dem Einsatzzweck und der Art des Bedienelements ab. An dieser Stelle soll nicht auf die Betätigungshaptik der primären Stellteile (Lenkrad, Kupplung, Gaspedal, Bremse, Schalthebel) eingegangen werden, obwohl dort teilweise von haptischer Anzeige im engeren Sinne gesprochen werden kann, weil ggf. gewollt durch Wahl entsprechender Federelemente bzw. Stellmotoren erzeugte haptische Information vermittelt wird. Bei den Bedienelementen, die für die sekundäre und tertiäre Fahraufgabe Anwendung finden, ist hinsichtlich der haptischen Rückmeldung grundsätzlich zwischen tastender (Bedienelement kehrt nach der Betätigung wieder in seiner Ausgangslage zurück) und rastender Ausführung (Bedienelement verharrt nach der Betätigung in der erreichten Stellung) zu unterscheiden (genauere die Kraft-Weg-Charakteristik betreffende, auf wissenschaftlichen Untersuchungen basierende Auslegungsempfehlungen sind in [157] und [158] zu finden).

#### 6.4.1.3.3 Bedienelemente

Über die konventionellen Bedienelemente werden Muskelkräfte auf Maschinenteile zum Steuern, Regeln, Schalten, Fahren und Auslösen von Funktionen übertragen, welche dazu dienen, die aus der menschlichen Informationsverarbeitung entwickelten Vorhaben in Realität umzusetzen. Dazu werden Bedienelemente verwendet, die mit den Fingern, der Hand oder dem Fuß betätigt werden. Wie bereits angesprochen besteht auch die Möglichkeit, Sprachinformation von Mikrophonen aufzufangen und über einen Rechner codiert in entsprechende Funktionen umzusetzen. Neuerdings wird auch

diskutiert bzw. bereits realisiert, das Erfassen von Gesten (Handbewegungen ohne Berührung von Gegenständen, Kopf- und Oberkörperbewegungen und Augenbewegungen) zu nutzen, um bestimmte Funktionen am Fahrzeug auszulösen. Gerade bei letzterem Ansatz, aber auch schon bei der Nutzung der Sprachinformation besteht ein grundsätzliches Problem – abgesehen von der Zuverlässigkeit der Erkennertechnologie – darin, zufällige Handlungen, welche dann womöglich ungewollte Funktionen auslösen, von gewollten zu unterscheiden. Diese Fehlermöglichkeit tritt natürlich auch bei den konventionellen Bedienelementen auf, ist dort aber bei weiten nicht so häufig [159, 160]. Mit der fortschreitenden Entwicklung der technischen Möglichkeiten werden heute sog. multimodale Interaktionen diskutiert und auch teilweise realisiert. Im Prinzip kommt man damit der menschlichen Eigenschaft, Informationen nicht nur über einen Kanal, sondern über mehrere Kanäle abzugeben (zum Beispiel Sprechen in Verbindung mit Gestik und womöglich sogar Berührung des Gesprächspartners) entgegen.



#### Kategorisierung der Bedienelemente

Auf der Grundlage der Kategorisierung von Rühmann [140] werden für konventionell mechanisch zu betätigende Bedienelemente folgende Kriterien vorgestellt, die prinzipiell beliebig miteinander kombinierbar sind:

- *Wirkungsweise*: Wie bei den Anzeigen kann auch bei den Bedienelementen bauartbedingt die Information digital oder analog codiert übertragen werden. *Analoge Bedienelemente* werden dort eingesetzt, wo für einen Regelvorgang kontinuierlich veränderliche Information zu übertragen ist (z. B. Lenkrad, Gas- und Bremspedal, Lautstärkeregler des Radios, Dimmen der Instrumentenbeleuchtung). Als analoge Bedienelemente können auch solche bezeichnet werden, die objektiv eine sehr enge Rasterung besitzen. Entscheidend ist hierbei, ob die einzelnen Stufen vom bedienenden Menschen als diskret oder als quasi-kontinuierlich empfunden werden. *Digital wirkende Bedienelemente* werden dort eingesetzt, wo entweder diskrete Zustände dauerhaft erhalten bleiben sollen (z. B. bestimmte Licht- bzw. Scheibenwischerfunktionen) oder wo durch das Bedienelement eine Funktion abgerufen werden soll (z. B. Berechnung der Fahrtroute in einem Navigationsgerät).
- *Bedienung*: Man unterscheidet Finger- (z. B. Lichtschalter), Hand- (z. B. Schalthebel), Fuß- (z. B. Gaspedal) und Beinbedienung (z. B. Kupplungspedal).
- *Bewegungsart (Bewegungscodierung)*: Es sind *Translationsbewegungen* von *Rotationsbewegung*en zu unterscheiden. Beide Bewegungsarten können zwar für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden, allerdings ist zu berücksichtigen, dass ein translatorisch wirkendes Bedienelement – im Gegensatz zu einem rotatorischen Bedienelement, bei dem das nicht notwendigerweise der Fall ist – immer zwei Endanschläge besitzt, die mit einem entsprechend beschränkten Bereich in der Realität korrespondieren sollten (z. B.: zeitlicher Abstand, auf den ein ACC-System regelt).
- *Dimensionalität*: Die Dimensionalität beschreibt die bauartbedingten Freiheitsgrade, in denen das Bedienelement bewegt werden kann. Aus ergonomischer Sicht sollte die Dimensionalität des Bedienelements mit der Dimensionalität der Aufgabe übereinstimmen (z. B. ist die zweidimensionale Positionierung eines Cursors auf einer im Display wiedergegebenen Landkarte mit einem zweidimensionalen Touchpad oder einem mausähnlichen Bedienelement viel einfacher zu bewerkstelligen als mit je einem eindimensionalen Bedienelement für je die $x$- und $y$-Richtung [161]).
- *Arretierbarkeit*: Bedienelemente können in der Stellung, in die sie gebracht worden sind, durch unterschiedliche Mechanismen arretiert werden. Wenn eine solche Arretierbarkeit sinnvoll ist, weil sichergestellt werden soll, dass das Stellteil seine Position nicht verändert (z. B. Wählhebel des Getriebes) ergibt sich die Frage, wie die Arretierung wieder zu lösen ist. Als Möglichkeiten bieten sich hier an: erhöhter Kraftaufwand (gegeben bei jedem Bedienelement mit einer Rasterung – Detent), geänderte Bewegungsrichtung oder Betätigung eines

Entarretierungsstellteils (z. B. Handbremshebel). Unbeabsichtigte Entarretierung wird in der dargestellten Reihenfolge zunehmend verhindert, allerdings dadurch erkauft, dass die Betätigung umständlich erscheint und in Verbindung mit einer gewissen Ungeschicklichkeit oder Unwissen über die Art der Betätigung womöglich auch gar nicht gelingt. Eine Sonderform der Arretierung sind Ein-Aus-Taster, welche bei jeder Betätigung zwischen diesen beiden Zuständen wechseln. Wenn ein solches Bedienelement eingesetzt wird, ist eine optische Rückmeldung über den Schaltzustand unabdingbar.

Bei den nicht arretierbaren Bedienelementen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die keine stellungsabhängige Rückmeldung geben (Rückmeldung nur während der Bewegung durch Reibung oder viskose Dämpfung) und solchen, die durch Federkraft oder einen ähnlich wirkenden komplexeren Mechanismus in ihre Neutralstellung zurückkehren. Bei den erstgenannten dient die genannte Rückmeldung dem Wahrnehmen der Bewegung und der Versicherung, dass das Stellteil nach der Betätigung in seiner Position verharrt (z. B. Lautstärkeregler). Die letztgenannten spielen vor allem in Verbindung mit dem Fahrprozess ein Rolle (z. B. Lenkrad, Gas-, Brems- und Kupplungspedal). Die Rückstellkraft gibt hier unmittelbare haptische Information über das Maß des Bedieneinflusses.

*Integration*: Man spricht von integrierten Bedienelementen, wenn in *einem* Bedienelement *mehrere* Bedienfunktionen zur alternativen, sequentiellen oder simultanen Betätigung zusammengefasst werden. Integration kann dadurch erfolgen, dass auf einem Bedienelement ein oder mehrere weitere Bedienelemente montiert werden (z. B. ein zusätzlicher Drehschalter zur Vorwahl der Intervallzeit auf dem für die Wischerbetätigung zuständigen Lenkstockhebel) oder dass den Dimensionen eines zwei- oder mehrdimensionalen Bedienelements unterschiedliche Funktionen zugeordnet werden. Integrierte Bedienelemente sind sinnvoll, wenn aus einer mehr oder weniger fest vorgegebenen Fahrerhaltung in Abhängigkeit von der Fahraufgabe bestimmte Funktionen relativ häufig abzurufen sind. Der heute oft eingesetzte Drehdrücksteller kann als zweidimensionales Bedienelement gelten, wobei die beiden Dimensionen „Drehen“ (Rotation) und „Drücken“ (Translation) unterschiedliche Aktionen auslösen: Anwahl einer Funktion durch Drehen – Auslösen der ausgewählten Funktion durch Drücken. Heutige im Fahrzeug verbaute Dreh-Drücksteller können häufig auch translatorisch in der Ebene verschoben werden (X-Y-Ebene), wodurch dann noch zusätzliche (Grund-)Funktionen abgerufen werden. In diesem Fall ist es allerdings hilfreich, durch eine geeignete Anzeige am Bildschirm verständlich zu machen, welcher Bewegung bestimmte Funktionen zugeordnet sind. Ähnliche Zuordnungen unterschiedlicher Funktionen werden bei den verschiedenen Ausführungen von Lenkstockhebeln beobachtet (manche sind sogar vierdimensional: Translation nach oben-unten, vor-zurück, Drücken sowie Drehen um die Lenkstockachse). Keine dieser Funktionszuordnungen ist selbsterklärend. Der für die korrekte Bedienung notwendige Lernvorgang wird allerdings erleichtert, wenn in einem solchen Bedienelement thematisch zusammengehörige Funktionen untergebracht werden (z. B. nur Lichtfunktionen, nur Wischerfunktionen). Eine veranschaulichende Übersicht der vorgestellten Kategorisierung bietet ◘ Abb. 6.90.

Im Folgenden werden die genannten Prinzipien für die im Fahrzeug am häufigsten anzutreffenden Pedale und Handstellteile näher erläutert.

**Pedale**

Pedale werden heute im Fahrzeug eigentlich nur als sog. Fahrpedal für die Regelung des Motordrehmoments bzw. der Motorleistung und als Bremspedal für die Reduzierung der Bewegungsenergie des Gesamtfahrzeugs genutzt. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und handgeschaltetem Getriebe kommt noch das Kupplungspedal hinzu. Eine Möglichkeit der optischen Kontrolle über die Lokalisation und Stellung der Pedale besteht nicht.

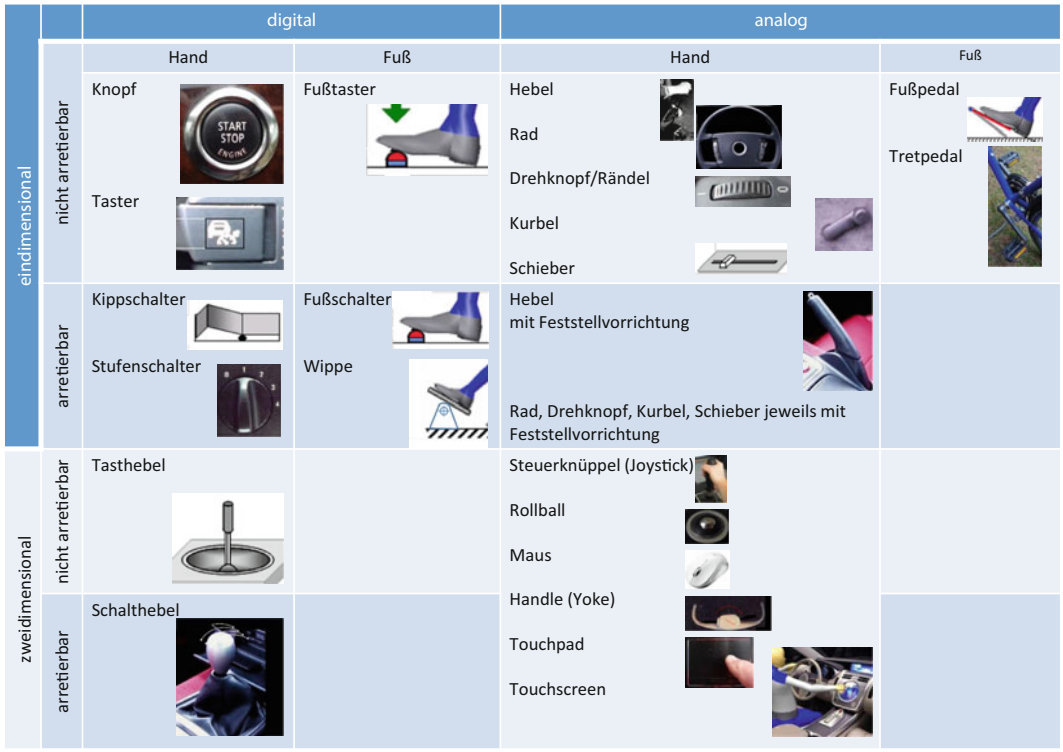



**Abb. 6.90** Kategorisierung der Bedienelemente

Die Rückmeldung ist nur haptisch, zudem vermitteln sie keinerlei Rückmeldung über den Erfolg der initiierten Handlung hinsichtlich der Fahrzeugbewegung, vielmehr liefern sie nur mehr oder weniger präzise (s. u.) Information über die Stellung des Pedals und die damit verbundene Rückstellkraft.

Die Gestaltung der Rückstellkräfte beim **Gaspedal** (allg. Fahrpedal) ist dabei vergleichsweise einfach, da es hier nur auf die Stärke der Rückholfeder ankommt. Als ein akzeptabler Kompromiss zwischen nicht zu hohem Diskomfort bezüglich der aufzubringenden Kraft bei Dauerbetätigung und hinreichende Rückmeldung hat sich ein Wert von ca. 27 N bei 2/3 der Fahrpedalstellung herausgestellt [162]. In Verbindung mit dem sog. *elektronischen Gaspedal* besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Verbindung zwischen Gaspedalstellung und Drosselklappe nichtlinear und zudem noch abhängig von weiteren Parametern (z. B. Motordrehzahl, Lastzustand) relativ frei zu gestalten. Dadurch können für den Fahrer verschiedene Motorcharakteristiken erzeugt werden. Neuere Entwicklungen führen zum sog. „*Aktiven Gaspedal*". Hier wird die Rückstellkraft vollkommen synthetisch produziert. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, zusätzlich fahrdynamische Information über das Gaspedal rückzumelden (z. B. eine verbrauchsoptimierende Fahrweise, Hinweise auf notwendigen Gangwechsel oder in Verbindung mit Fahrerassistenzsystemen Einflussnahme auf die Geschwindigkeitswahl des Fahrers).

Die Betätigungskräfte für das **Bremspedal** dürfen deutlich höher sein als die des Fahrpedals, da nur von einer vergleichsweise kurzfristigen Nutzung auszugehen ist (ca. 40–50 N). Abb. 6.91 gibt den gemessenen Kraft-Weg-Verlauf einer konventionellen Servobremse für unterschiedliche Bremsbetätigungen wieder. Diese ist – bedingt durch die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Systems – unabhängig von der Art der Betätigung immer durch eine starke Hysterese gekennzeichnet. Hinzu kommt, dass sich diese Cha-

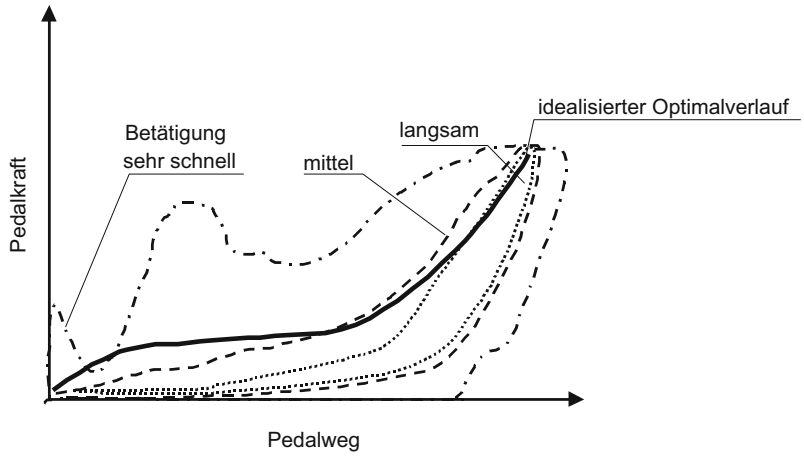



**Abb. 6.91** Weg-Kraft-Verlauf am Bremspedal eines modernen Pkw mit Servobremse

rakteristik erheblich in Abhängigkeit von der Betätigungsgeschwindigkeit verändert. Um diese komplexen Nichtlinearitäten aufzuheben, wird in jüngerer Zeit diskutiert, das Bremsgefühl durch die Einführung einer elektrischen Bremse zu gestalten. In Abb. 6.91 ist zusätzlich ein elektronisch verwirklichter Optimalverlauf eingezeichnet, der weder eine Hysterese noch eine Abhängigkeit von der Betätigungsgeschwindigkeit zeigt. Sein progressiver Verlauf ist auf Arbeiten von Göktan [163] zurückzuführen, bei denen in simulierten Nachfahrversuchen und Bergabfahrten diese Charakteristik als bester Kompromiss gefunden wurde. Wie allerdings Bill et al. [164] betonen, hängt das Pedalgefühl auch erheblich von der Bauart des Fahrzeugs (z. B. Pkw oder Lieferwagen) ab. Dafür und insbesondere in Verbindung mit dem zukünftigen Elektroantrieb besteht noch weiterer Forschungsbedarf (beispielsweise Rückmeldung des Übergangs von Rekuperation zu konventioneller Bremsung).

Auch die Kennlinie des **Kupplungspedals** ist bauartbedingt durch eine starke Hysterese charakterisiert. Im mittleren Bereich des Betätigungsweges, dort wo die Kupplung „greift", sollte die Rückstellkraft praktisch wegunabhängig sein, um eine gute Dosierbarkeit zu ermöglichen (siehe hierzu Abb. Abb. 5.160).

### Handbetätigte Bedienelemente

**Bewegungsmerkmale** Neben der schon erwähnten Positionscodierung spielt die Bewegungscodierung bei den handbetätigten Bedienelementen eine vorrangige Rolle. Im Wesentlichen unterscheidet man hierbei, wie bereits erwähnt, *rotatorische* (z. B. Drehregler) und *translatorische* (z. B. Schieberegler) Stellteile. Aus ergonomischer Sicht bezieht sich die Bezeichnung allerdings nicht zuvorderst auf die technische Ausführungsform, sondern auf die von der Hand auszuführende Aktion. Insofern ordnet man Hebeln (z. B. Gangwahlhebel) und Kippschaltern, die sich eigentlich um eine Drehachse bewegen, einer Translationsbewegung zu. Problematisch bei dieser Art der Zuordnung sind allerdings die Lenkstockhebel, die wegen des eindeutigen Bezugs zu Lenkrad und Lenkachse eine Drehbewegung suggerieren (z. B. würde ohne eine derartige Zuordnung der Blinkhebel gar nicht richtig verstanden werden). Das führt bei dem rechten Lenkstockhebel, der häufig für die Wischerbetätigung genutzt wird, zu sekundärer Inkompatibilität: ist die Bewegung des Hebels nach oben als ein „mehr/an" (das ist die Bewegungsrichtung des Wischers) oder als eine Linksdrehung mit der Bedeutung „weniger/aus" zu verstehen? Verschiedene Hersteller

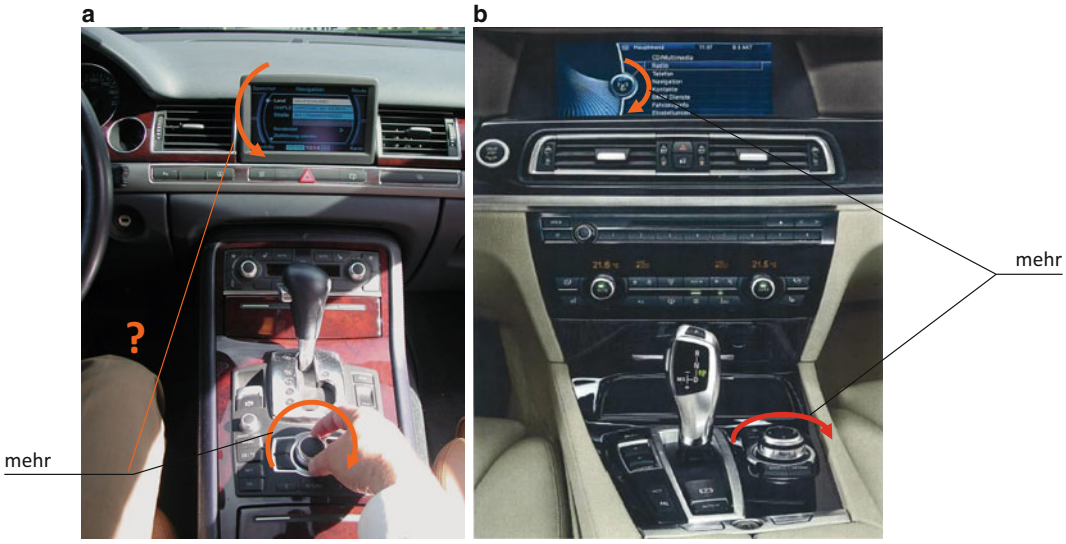



**Abb. 6.92** Inkompatibilität (**a**) zwischen Drehbewegung des Controllers und der Reaktion am Bildschirm und Lösung des Konflikts (**b**)

kommen hier zu durchaus unterschiedlicher Auslegung.

Sekundäre Inkompatibilität zu vermeiden ist besonders dann eine Herausforderung, wenn durch ein Bedienelement auf einem Bildschirm etwas verändert werden soll. Abb. 6.92a zeigt dafür ein Beispiel: Die Drehbewegung des Controllers im Uhrzeigersinn bedeutet ein „Mehr"/„Weiter". Der Cursor wandert aber nach unten (z. B. weil die alphabetische Anordnung der Optionen von oben nach unten dargestellt ist). Dies wird durch die Grafik, die einen mittigen Drehpunkt suggeriert, begründet. Durch einen links auf dem Bildschirm dargestellten Bezugsdrehpunkt und einen Radius in der graphischen Darstellung kann dieses Problem gelöst werden (Abb. 6.92b).

Eine Besonderheit bezüglich der Bewegungscodierung stellen *Touchscreens* dar. Die meisten der heute in Fahrzeug üblichen Versionen bieten virtuelle Buttons an, durch deren Antippen (Kontaktgriff, siehe unten) entweder direkt eine Funktion ausgelöst wird oder ein neues Menü geöffnet wird, das weitere Buttons anbietet. Der Vorteil dieser Version des Touchscreens ist, dass in einem beschränkten Ortsbereich eine Vielzahl von Funktionen abrufbar ist. Dies wird u. a. durch den Nachteil erkauft, dass keinerlei haptische Rückmeldung über die Berührung eines solchen Buttons noch vor dessen Betätigung erfolgt, sodass eine Blickkontrolle unerlässlich ist, die durchschnittlich länger ausfällt als beim Betätigen eines physischen Schalters [161]. Für die genaue Ausgestaltung der angebotenen Buttons und der Menüfolgen sind die Regeln für simultane Bedienung zu beachten [121]. Eine durch die Bedienung von Smartphones populär gewordene gestenbasierte Bedienform ist das „Wischen" mit einem Finger sowie das „Zoomen" durch die Bewegung zweier Finger, das nun mehr und mehr auch in die im Fahrzeug verbauten Touchscreens einzieht. Auch diese Interaktionsformen erfordern eine kontrollierende Blickzuwendung (normalerweise >800 ms). Als eine Besonderheit ist das Schreiben von alphanumerischen Zeichen auf einer eigens dafür vorgesehenen Fläche (sog. Touchpad) anzusehen, welche durch eine entsprechende Detektiersoftware in vom Bordrechner lesbare Zeichen umgesetzt werden. Die letztere Form der Informationsübertragung hat sich im Versuch vor allem für Eingaben von Daten in Navigations- und Telefonanwendungen als besonders günstig und mit der eigentlichen Fahraufgabe wenig interferierend herausgestellt [165]. In mehreren Versuchen konnte



**Abb. 6.93** Greifarten; Kontakt- (Zeigefinger), Zufassungs- (zwei bzw. drei Finger) und Umfassungsgriff [166]

nachgewiesen werden, dass diese manuell-visuelle Interaktion nennenswerte Vorteile im Vergleich zur Spracheingabe, Touchscreeneingabe oder auch zur Eingabe mittels Dreh-Drück-Steller besitzt [166]. Ausschlaggebend ist allerdings die Platzierung des Touchpads in einer Lage, die gute Erreichbarkeit und Ablagemöglichkeit für den Handballen oder das Handgelenk bietet sowie eine entsprechend schnelle Verarbeitung und Rückmeldung der erkannten Eingabe an den Nutzer mittels eines optimal positionierten, vom Touchpad getrennten Bildschirms.

**Greifarten** Für den Kontakt zwischen der Hand und dem Bedienelement sind die unterschiedlichsten Variationen denkbar (Abb. 6.93). Praktisch unterscheidet man zwischen:

- *Kontaktgriff*: Von der Hand wird über einen Finger – normalerweise den Zeigefinger – eine vertikale Kraft auf das Bedienelement übertragen.
- *Zufassungsgriff*: Durch den Griff über zwei oder drei Finger entsteht ein Reibungsschluss oder bei entsprechender Gestaltung auch ein Formschluss zwischen dem Bedienelement und der Hand. Drehsteller und Schiebschalter werden über den Zufassungsgriff betätigt.
- *Umfassungsgriff*: Durch den Umfassungsgriff können auch höhere Kräfte übertragen werden. Man unterscheidet zwischen orthogonaler und tangentialer Kraftaufbringung. Bei der orthogonalen Kraftaufbringung wird praktisch eine formschlüssige Verbindung hergestellt. Die übertragbaren Kräfte sind größer (z. B. Handbremshebel, Türgriffe u. Ä.). Bei der tangentialen Kraftaufbringung kommt es im Wesentlichen zu einem Reibschluss, der ggf. mittels entsprechender Ausformungen durch formschlüssige Elemente unterstützt werden kann (z. B. Lenkrad mit „fingerfreundlicher" Konturierung auf der Rückseite).

**Anzeigefunktion des Bedienelements** Götz [167] legt dar, dass die meisten Bedienelemente durch die Elemente Greifelement, Bewegungsübertragungselement, Bezugsfläche und Anzeige charakterisiert sind (Abb. 6.94). Die Anzeige gibt dabei nicht nur Rückmeldung, in welchem Zustand sich das

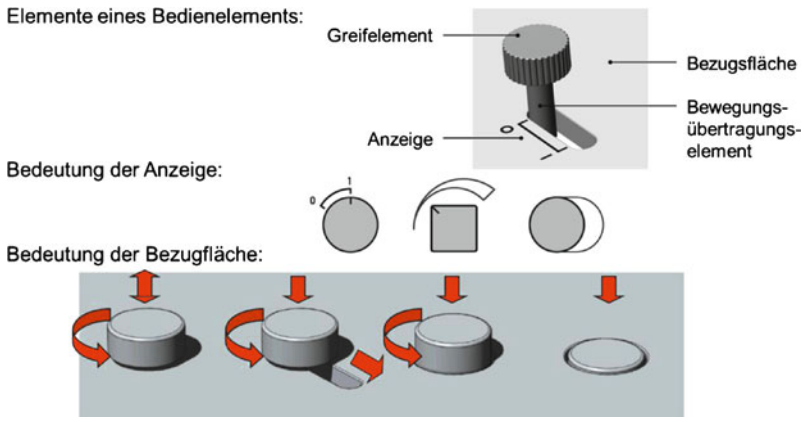



**Abb. 6.94** Hauptbestandteile eines Bedienelements, das Bedienelement als Anzeige und die Bedeutung der Bezugsfläche [167]

Bedienelement momentan befindet, sondern in Verbindung mit der Bezugsfläche auch Auskunft darüber, wie es betätigt werden kann (Affordance). Aus dieser Feststellung geht bereits hervor, dass das Fehlen von Anzeige und Bezugsfläche, wie es z. B. bei den Lenkstockhebeln der Fall ist, irgendwelche kompensatorische Maßnahmen (z. B. eindeutige Beschriftung, Rückmeldung über den Betriebszustand durch Kontrollleuchten im Kombiinstrument) erforderlich machen, um dieses ergonomische Manko zu beseitigen.



**Sprachsteuerung**

Da in vielen Situationen die Eingabe von Werten, Namen oder auch Kommandos sehr viele einzelne manuelle Eingaben erfordert, bieten Sprachbefehle prinzipiell ein hohes Potenzial, Aktionswünsche parallel zur Fahraufgabe an das Fahrzeug zu vermitteln. Sprache stellt eine digitale Informationsvermittlung dar und eignet sich deshalb nur für die Vermittlung digitaler Befehle. Für die Vermittlung analoger Befehle (zum Beispiel „lauter", „weiter links") ist sie eher ungeeignet. Die technische Herausforderung, Sprache von dem Hintergrund des Fahrgeräusches unter Berücksichtigung der unterschiedlichen auch durch den Dialekt bedingten Sprachfärbung herauszufiltern, ist inzwischen sehr gut gelöst. Daneben besteht das Problem, eindeutig den an das Fahrzeug gerichteten Sprachbefehl von Bestandteilen einer normalen Unterhaltung zwischen den Passagieren zu trennen. Eine entsprechende Mikrofoncharakteristik und Mikrofonplatzierung können hier sehr viel zur Fehlervermeidung beitragen. Man verwendet zudem eine Aktivierungstaste („Push to Talk"), wodurch der Fahrer seine Absicht, mit dem Fahrzeug zu kommunizieren, kund tut. Das größte Problem der technischen Sprachinteraktion ist, dass es – zumindest beim gegenwärtigen Entwicklungsstand – auch zu Fehlerkennungen kommt. Diese können verschiedene Ursachen haben: Der Nutzer spricht in falscher Weise, er spricht die falschen Kommandos oder zum falschen Zeitpunkt. Durch solche individuellen Abwandlungen gerät das Detektiersystem häufig in informationstechnische Sackgassen (mit der Konsequenz von Rückmeldungen wie z. B. „Bitte wiederholen Sie" bis hin zu „Abbruch"), die für den Nutzer dann undurchschaubar sind, weil er den Weg zu der Position des Kommunikationsabbruchs nicht kennt bzw. nicht in Erinnerung hat. Der oben genannte Vorteil der sprachlichen Interaktion wird dann ins Gegenteil verkehrt, weil das nun notwendige Zurechtfinden, die Neuorientierung bzw. Wiederholung des ganzen Vorgangs mentale Ressourcen beansprucht, welche die Fahraufgabe ggf. erheblich beeinträchtigen. Unter solchen Bedingungen kommen bis zu 80 % Bedienungsfehler vor, die auch durch technische Erkennungsfehlerraten von bis zu 20 % bedingt sind. Insgesamt zeigt sich aber in Versuchen seitens der Probanden eine klare Präferenz für Sprache in allen Fahrszenarien. Gerade wenn man die möglichen technischen Weiterentwicklungen berücksichtigt, ist der Sprachinteraktion große Bedeutung beizumessen. Allerdings ist dabei auch zu bedenken, dass sprachlicher Befehlseinsatz bedingt, dass der Nutzer weiß, welche Begriffe (Vokabular) zu verwenden sind. Auch hier spielt die multimodale Interaktion eine große Rolle, da sich zeigt, dass Nutzer bevorzugt die Begriffe für Spracheingaben verwenden, die auch auf dem Bildschirm in Schriftform angezeigt werden. Im Gegensatz dazu liefert die klassische Bedienung mittels Stellteilen – bei ergonomischer Ausführung durch Beschriftung und Anordnung – quasi eine Bedienungsanleitung mit, was die spontane Nutzung auch eines fremden Fahrzeugs erleichtern kann.

**Gestensteuerung**

Neuerdings wird für die Bedienung von sekundären und tertiären Funktionen auch die Gestensteuerung propagiert und realisiert. In diesem Zusammenhang ist zunächst zu bedenken, dass Gesten im täglichen Leben spontan und meist unbewusst zur Unterstützung willentlich eingesetzter Informationsabgabe (normalerweise beim Sprechen) vor allem konnotativ eingesetzt werden. Natürlich wird auch in zwischenmenschlicher Beziehung die Geste als Kommunikationsmittel eingesetzt. Wenn dieses für eine sichere Informationsübermittlung (meist visuell über größere Entfernungen, z. B. Einweisen zum Parken) genutzt werden soll, müssen die entsprechenden Gesten allerdings gelernt werden. Weiterhin besteht das technische Problem, unwillkürliche Gesten von willkürlichen zu trennen. Meist wird die Gestenerkennung im Zusammenhang mit der Bildschirmbedienung diskutiert. So wird beispiels-

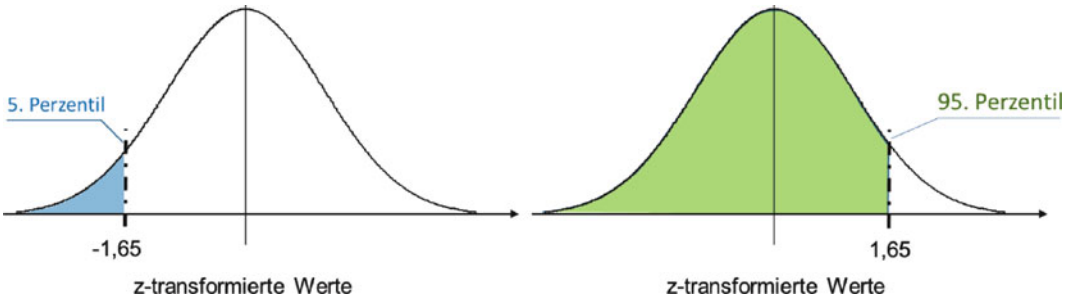



**Abb. 6.95** Darstellung von 5. und 95. Perzentil in Standardnormalverteilungen

weise bei Annäherung der Finger an den Bildschirm der angezielte Button größer dargestellt. Neuerdings wird von einem Hersteller angeboten, durch eine Wischbewegung Bildschirminhalte des zentralen Bildschirms (CID) auf den Bildschirm hinter dem Lenkrad zu bewegen. Die oben bereits erwähnte notwendige längere Blickzuwendung bei dieser Art der Bedienung wird durch diese Maßnahme allerdings nicht kompensiert. Zurzeit fehlen valide wissenschaftliche Befunde für den Nutzen solcher Anwendungen im Fahrzeug.

### 6.4.1.4 Anthropometrische Gestaltung

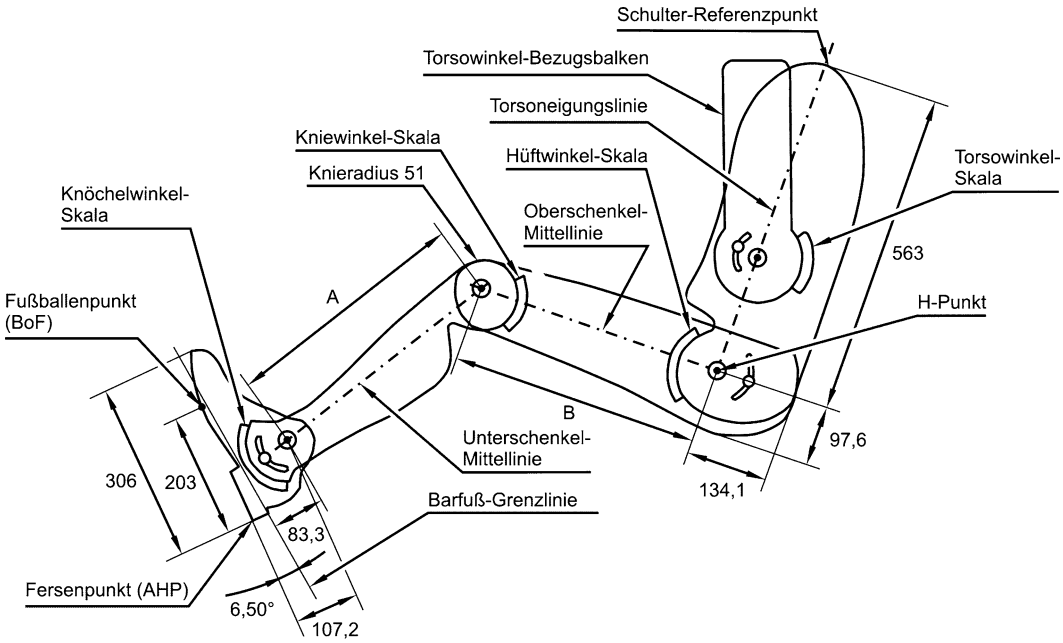
Die Zusammenstellung aller Fahrzeugkomponenten und Baugruppen unter Berücksichtigung ihrer Relativbewegungen und Montagefreiräume ist die klassische Disziplin des Fahrzeugpackagings. Ausgehend vom Fahrzeugkonzept des Aufbaus werden die Bauräume der Komponenten wie Motor, Tank und Laderaum prinzipiell angeordnet. Der Mensch und die Abmaße seiner Extremitäten, notwendige Bewegungsfreiräume sowie deren Erreichbarkeitsgrenzen sowie seine Sichtbedingungen stellen die ergonomische Seite im Package dar und werden mit der Fahrzeugarchitektur zu Beginn der Maßkonzeption festgelegt.

#### 6.4.1.4.1 Kategorisierung anthropometrischer Maße und Menschmodelle

Um eine technische Anpassung der geometrischen Arbeitsumgebung an die menschlichen Eigenschaften zu ermöglichen, ist die Kenntnis von menschlichen Abmessungen unabdingbar. Die sog. **Anthropometrie** (Kunstwort aus griechisch: anthropos = ανθρωπος = Mensch und metrein = μετρειν = messen) liefert hierzu die wissenschaftliche Grundlage. Um Messwerte, die von verschiedenen Untersuchern an dem „weichen" Menschen erhoben werden, überhaupt einigermaßen miteinander vergleichen zu können, wurde von Martin [168] eine Standardisierung der Messvorschriften vorgenommen, die heute noch gültig ist und die im Detail in DIN 33402 – Teil 1 beschrieben ist. Im Wesentlichen werden danach Knochen-zu-Knochen-Abstände gemessen, wobei die Probanden für die Messung genau vorgeschriebene Haltungen einnehmen müssen. Um valide Aussagen zur Verteilung von Körpermaßen innerhalb einer Population treffen zu können, wird eine repräsentative Stichprobe von geeignetem Umfang gezogen. Die Lokalisierung einzelner Körpermaße innerhalb der Verteilung geschieht über das sog. Perzentil. Hierbei bedeutet ein Körpermaßwert des $x$. Perzentils, dass $x$ % der Bevölkerung dieses Maß unterschreiten. Als Vorteil für die anschließende Berechnung erweist sich, dass Körpermaße zumeist normalverteilt sind [169]. Somit reichen die Angabe von Mittelwert $\overline{x}$ und Standardabweichung $s$ aus, um die gesamte Verteilung eines Maßes innerhalb der Population beschreiben und berechnen zu können. Abb. 6.95 zeigt eine graphische Darstellung des 5. und 95. Perzentils.

Eine einfache Zuordnung zwischen Körpermaß und zugeordnetem Perzentil erfolgt über die $z$-Transformation, welche die Verteilung in eine Standardnormalverteilung überführt (Gl. 6.1).

$$x_{\text{perz}} = \overline{x} + z_{\text{perz}} \cdot s \text{ (z-Transformation)} \quad (6.1)$$




| | 10%M | 50%M | 95%M Körperumriss-schablone |
|---|---|---|---|
| Unterschenkel (A) | 392,7 mm | 417,1 mm | 459,1 mm |
| Oberschenkel (B) | 407,7 mm | 431,5 mm | 456,0 mm |

**Abb. 6.96** SAE-Körperumrissschablone

mit

$$z_{95\,\%} = 1{,}645 \text{ und } z_{5\%} = -1{,}645 \text{ bzw.}$$
$$z_{97{,}5\,\%} = 1{,}960 \text{ und } z_{2{,}5\%} = -1{,}960$$

Schließlich werden in der Auswertung jedes Körpermaßes typischerweise das 5., 50. und 95. Perzentil nach Geschlecht und Altersgruppen differenziert in Tabellenform abgelegt (z. B. DIN 33402 Teil 2). Solche Tabellen sind weltweit von unterschiedlichen Institutionen veröffentlicht. Es zeigen sich dabei erhebliche regionale Unterschiede. Hinzu kommt das Phänomen der sog. *Akzeleration*, wonach Mittelwert und Standardabweichung von ausgewachsenen Probanden in Abhängigkeit vom Erhebungsjahr ansteigen (die Körperhöhe von Männern in Deutschland bis zu 20 cm/Jahr; für Frauen ca. 10 cm/Jahr; nach neueren Erhebungen aus SizeGERMANY scheint die Akzeleration allerdings einem Ende entgegenzustreben). Besondere Aufmerksamkeit muss der Tatsache geschuldet werden, dass sämtliche Körpermaße einzeln perzentiliert werden und somit kein Zusammenhang mehr zu den Individuen der Maßerfassung besteht. Menschen bestehen in der Regel nicht aus Körpermaßen des exakt gleichen Perzentils. Dies wird durch deutlich wahrnehmbare Proportionsunterschiede von Körperstamm (Kopfspitze bis Gesäßauflagefläche im Sitzen) zu Beinen offensichtlich.

Die Nutzung anthropometrischer Tabellen stößt im Zusammenhang mit der geometrischen Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen schnell an ihre Grenzen. Mit geeigneten Körperumrissschablonen lassen sich diese Grenzen teilweise überwinden. In Verbindung mit der H-Punkt-Messmaschine (Abb. 6.100), die für das SAE-gerechte Packaging von essentieller Bedeutung ist (siehe ▶ Abschn. 6.4.1.4.2), wurde bereits

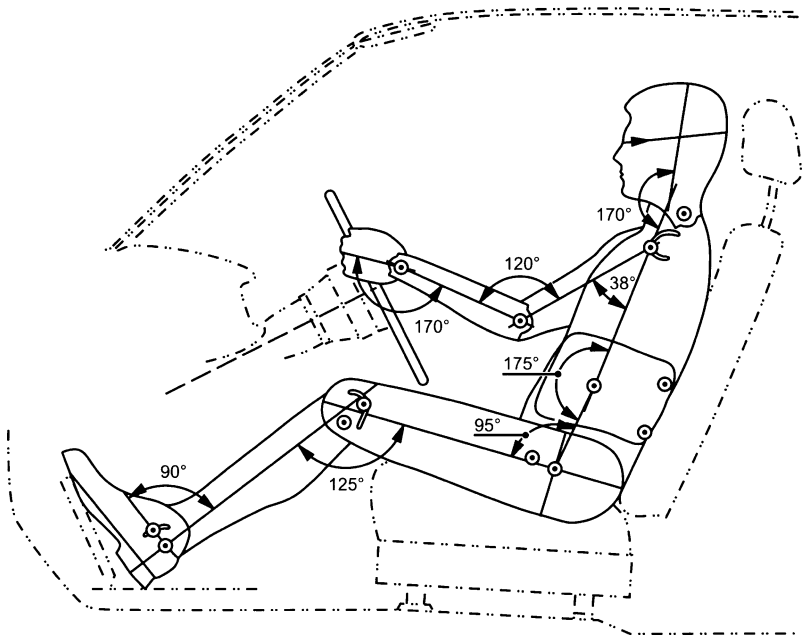



**Abb. 6.97** Empfehlungen für die Einstellungen der Zeichenschablone „Kieler Puppe" nach DIN 33 408

1962 eine Zeichenschablone (SAE J826) entwickelt, die sich aus Unterschenkel (Lower Leg Segment), Oberschenkel (Thigh Segment) und Torso zusammensetzt. Bemerkenswerterweise hat diese Umrissschablone keinen Kopf (Abb. 6.96), was allerdings in Verbindung mit der in SAE J941 definierten Augenellipse gesehen werden muss. In seiner ursprünglichen Form repräsentierte diese Körperumrissschablone die Abmessungen eines 50-Perzentil Manns auf der Grundlage der Messungen von Geoffrey von 1961. Ergänzend wurden 1969 vom „U.S. Department, Education and Welfare" Daten für den Unterschenkel und den Oberschenkel des 10. und 95. Perzentil Mann angefügt.

Für die deutsche Automobilindustrie hat die von Helbig und Jürgens [170] 1977 entwickelte sog. „*Kieler Puppe*" große Bedeutung erlangt, die sich in ihrer Gestalt an die SAE Körperumrissschablone anlehnt und folglich im Zusammenhang mit Maßkonzeption nach SAE auch angewendet werden kann. Sie ist seit 1981 als zweidimensionale Schablone in drei Ansichten in DIN 33 408 genormt (Abb. 6.97). Die *Kieler Puppe* ist in den Abmessungen der 1. und 5.-Perzentil Frau, sowie des 50., 95. und 99. Perzentil Manns verfügbar. Durch Einstellung der Gelenke an den Zeichenschablonen können unterschiedliche Körperhaltungen dargestellt werden. Um hier keine allzu willkürlichen Haltungen zu erzeugen, werden in DIN 33408-1 sog. Komfortwinkel angegeben (Abb. 6.97), deren experimentelle Grundlage allerdings nicht genauer dokumentiert ist.

Mit dem Aufkommen der Computertechnologie, die in Form der CAD-Techniken eine Revolution der Konstruktion im Automobilbau hervorgerufen haben, entstand auch das Bestreben, ein 3-dimensionales Abbild der Gestalt des Menschen im Computer zu realisieren. Allen Computermodellen liegt die Annahme zugrunde, durch die Verwendung der drei Perzentile (5., 50. und 95. Perzentil), nach dem Geschlecht getrennt, die Berücksichtigung der Maße des Menschen hinreichend sicherzustellen. Eine besondere Herausforderung für die anthropometrischen digitalen Menschmodelle stellt die korrekte Wiedergabe der Abmessungen der Körperteile, der Beweglichkeit und der Bewegungsräume dar. Eine einfache Übertragung von Werten aus anthropometrischen Tabellen, deren Werte mit konventionellen Messmethoden erhoben worden sind, verbietet sich eigent-



**Abb. 6.98** JACK

lich, da für die Konstruktion von Menschmodellen statt der Knochen-zu-Knochen-Abstände Abstände zwischen den Gelenkpunkten notwendig wären und kein Individuum durch gleiche Perzentilwerte in allen Körperabmessungen charakterisiert ist. Die Aneinanderreihung gleicher Perzentilmaße zum Aufbau eines Menschmodells würde deshalb zu widersprüchlichen Ergebnissen führen. Diese Problematik wird von den heute verfügbaren Menschmodellen auf unterschiedliche Weise gehandhabt. Mittlerweile sind folgende drei Menschmodelle weltweit im Bereich der Anwendung für das Automobil etabliert:

- Das Modell **JACK** (Abb. 6.98), unter Federführung der NASA zusammen mit der Universität von Pennsylvania Mitte der 80er entwickelt.
- Das Modell **SAFEWORK** entwickelt von Carrier et al. [171] an der Ecole Polytechnique Montreal, später übernommen als *Human Builder* von Dessault in das CAD-System CATIA.
- Zwischen 1987 und 1994 wurde in Deutschland in Zusammenarbeit mit der deutschen Automobilindustrie und einigen bedeutenden Zulieferern, der Fa. Tecmath, der Katholischen Universität Eichstätt, und dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München das Menschmodell **RAMSIS** (**R**echnergestütztes **A**nthropologisch-**M**athematisches **S**ystem zur **I**nsassen **S**imulation bzw. Engl. Bezeichnung: **R**ealistic **A**nthropological **M**athematical **S**ystem for **I**nterior-comfort **S**imulation) entwickelt (Abb. 6.99) . Heute wird das Modell von der Firma Human Solutions weiterentwickelt, gepflegt und vertrieben. Es wurden dafür die tatsächlichen Korrelationen zwischen den Körpermaßen, die bei anthropometrischen Erhebungen in den 80er Jahren in der ehemaligen DDR anfielen, für die Modellierung herangezogen. Bei der Neukonzeption dieses Modells (RAMSIS Nextgeneration) werden die im Rahmen der Messerhebung „SizeGERMANY“ (2010, inzwischen erweitert durch SizeITALY und zurzeit wird eine Erhebung SizeAMERICA mit entsprechenden Daten für Nordamerika und Kanada initiiert) erhobenen Werte und die daraus bekannten Korrelationen für die Modellierung genutzt, was zu präziseren Vorhersagen der anthropometrischen Abmessungen dieses Modells führen wird.

#### 6.4.1.4.2 Pkw-Maßkonzeption nach SAE

Im September 1973 wurde in der von dem „Human Factors Engineering Committee“ erarbeiteten Richtlinie SAE J1100 erstmals genormte Fahrzeugabmessungen aufgeführt. Diese Norm bzw. die sich daran orientierende DIN 70020-1 stellt bis heute eine wesentliche Grundlage für die Pkw-Maßkonzeption dar. In SAE J 1100 wird bezugnehmend auf SAE J182 folgendes Koordinatensystem definiert: die $x$-Achse verläuft in Fahrzeuglängsrichtung, die $y$-Achse senkrecht dazu in Fahrzeugquerrichtung nach rechts und die $z$-Achse in vertikaler Richtung nach oben. Der Koordinatenursprung befindet sich in Fahrzeugmitte nahe an der Vorderachse. Zur Beschreibung der in SAE J1100 definierten Abmessungen werden Ebenen benutzt, die jeweils orthogonal zu diesen Achsen verlaufen. Die Fahrzeugabmessungen werden durch eine Buchstaben-Zahlen-Kombination kodiert. Distanzen parallel zur $x$-Achse werden mit „L“ (length = Länge), zur $y$-Achse mit W (width = Breite), und zur $z$-Achse mit H (height = Höhe) bezeichnet. Zahlenwerte zwischen 1 und 99 definieren Interior-

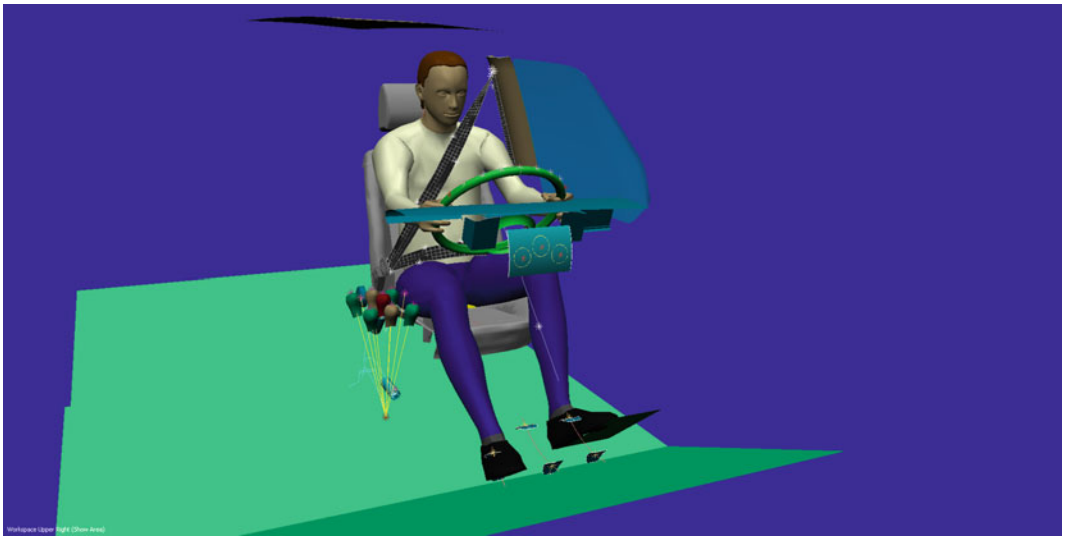


**Abb. 6.99** Das Menschmodell RAMSIS

Abmessungen und Zahlenwerte zwischen 100–199 Exterior-Abmessungen [172]. Alle Winkel werden mit dem Präfix „A“ (angle) und Volumina mit „V“ (volume) charakterisiert (SAE J110 und SAE Handbook).

Eine Vielzahl von Gesetzestexten, Richtlinien und anderen Normen beziehen sich auf die Fahrzeugabmessungen nach SAE J1100. Unter anderem werden die so definierten Fahrzeugabmessungen von Fahrzeugherstellern genutzt, um die sog. GCIE-Austauschlisten (Global Car Manufacturers Information Exchange Group – früher ECIE, European Car Manufacturers Information Exchange Group) und Pkw-Package-Pläne zu erstellen, wodurch Abmessungen unterschiedlicher Fahrzeughersteller direkt miteinander verglichen werden können.

Von essenzieller Bedeutung ist die menschengerechte Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes. Aus Sicht eines Konstrukteurs stellt dabei der Sitz wegen seiner Polsterung und der damit verbundenen ungenauen Position des Fahrers darin ein Problem dar. Deshalb wurde in SAE J1100 der Sitzreferenzpunkt (**SgRP** – Seating Reference Point) definiert. Er kennzeichnet in Relation zu „harten“ Bestandteilen des Sitzes (z. B. Sitzschiene) den Punkt, in dem der Hüftpunkt (H-Punkt) einer definierten Person zu liegen kommt. Von der SAE wird dabei eine Prozedur zugrunde gelegt, die das 95. Perzentil einer männlichen Population mit einer 95 % Beinlänge und 95 % Schuhlänge annimmt (siehe SAE J826, SAE J1100, SAE J1516 und SAE J1517). Messtechnisch wird er durch die H-Punktmessmaschine nach SAE J826 gefunden. Es handelt sich dabei um einen Prüfkörper, der die Gesäßform eines großen Mannes (95. Perzentil) nachahmt, der zudem mit mechanischen Modellen von Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß (jeweils 95. Perzentil U. S.-Mann) ausgestattet ist und der mit dem Gewicht eines 50 Perzentil-U. S.-Manns (76 kg) belastet wird (Abb. 6.100). Dieser Prüfkörper wird nach einer ganz bestimmten Vorschrift in den Sitz eingebracht, der für die spätere Konstruktion des Fahrzeugs vorgesehen ist. In vielen Fällen wird in einer frühen Phase der Konstruktion der SgRP bzw. das H-Punkt-Verstellfeld vorab festgelegt. Die Abb. 6.101 zeigt die wichtigsten SAE Vorschriften für die Fahrzeugkonzeption.

#### 6.4.1.4.3 Arbeitsfelder anthropometrischer Fahrzeuggestaltung

Beim Entwickeln des Fahrzeugpackaging sind mehrere Themenfelder zu berücksichtigen, die sich gegenseitig hinsichtlich des vom Nutzer empfunde-

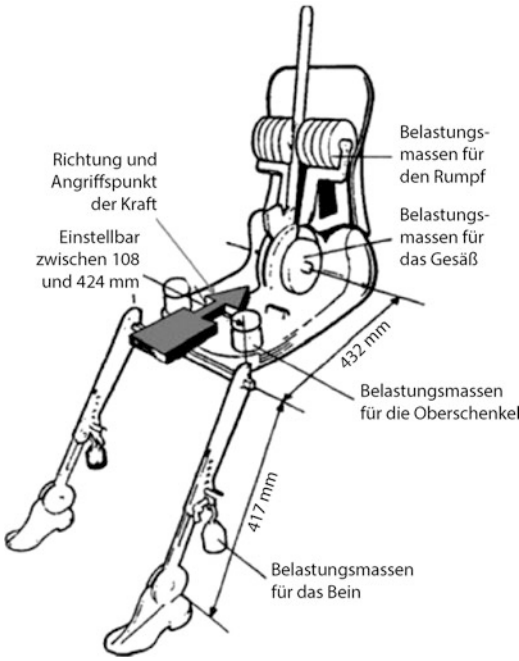



**Abb. 6.100** H-Punkt-Messmaschine nach SAE J826

nen Komforts bzw. Diskomforts, der Sicherheit und der Benutzerfreundlichkeit beeinflussen. Im Wesentlichen sind dabei die Themenfelder Sitzen, Sicht, Anordnung der Bedien- und Anzeigeelemente, das Raumgefühl, die Bedingungen des Ein- und Ausstiegs, das Beladen des Fahrzeugs und bestimmte Servicehandlungen zu berücksichtigen (im Folgenden wird beispielhaft nur auf den Bereich Sitzen und Sicht eingegangen). Um all dies zu berücksichtigen, sind verschiedene Methodiken zur Pkw-Maß-Konzeption entwickelt worden. Speziell ist die Pkw-Maßkonzeption des ASPECT-Programms (Automotive Seat and Package Evaluation and Comparision Tool) zu erwähnen, dessen Forschungsergebnisse in einer Vielzahl von Veröffentlichungen dokumentiert sind. Einen ausführlichen Überblick darüber liefert Reed et al. [173]. Auf der Grundlage des ASPECT-Programms und eigenen Versuchen wurde von Reed et al. [174, 175] die Methodik des „**Kaskade-Vorhersagemodells**“ zur Fahrerplatzauslegung entwickelt. Unabhängig davon wurden diverse Software-Anwendungen entwickelt, die auf der Grundlage von Menschmodel-

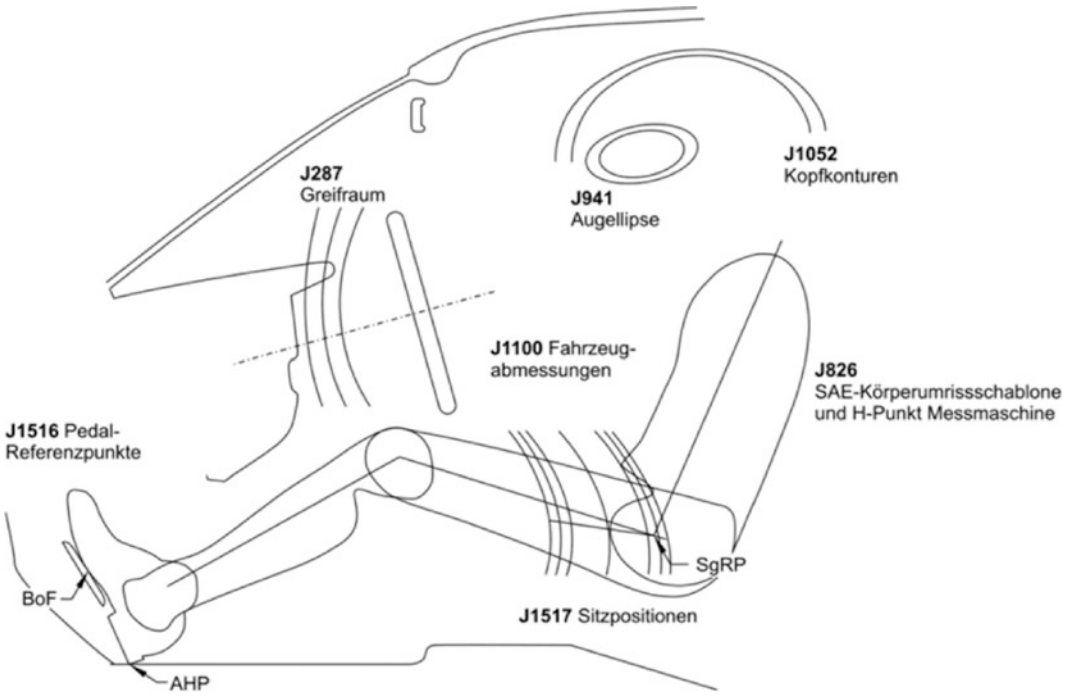



**Abb. 6.101** Für die Fahrerplatzauslegung relevanten SAE Normen [172]

len und steuernden Parametern eine automatische Ergebnisableitung ermöglichen und so besonders schnell verschiedene Konzeptvarianten miteinander zu vergleichen erlauben. Speziell zu erwähnen ist hier das von dem Menschmodell **RAMSIS** zur Verfügung gestellte Modul „**Package Designer**" zur anthropometrischen Auslegung des Fahrer-Arbeitsplatzes (Human Solutions, 2000, 2002 und 2008). Auch für das Menschmodell **Jack** existiert ein Programm zur Pkw-Maß-Konzeption, das die Software Anwendung „Classic Jack" um das Modul „**Occupational Packaging Toolkit**" erweitert. Das in der Automobilindustrie weit verbreitete CAD-System CATIA stellt das optional implementierbare Softwaremodul „**Vehicle Occupant Accommodation**" zur Verfügung. Es verwendet dabei das in CATIA implementierte Menschmodell „**Human Builder**" [176]. Neben diesen mit den etablierten Menschmodellen direkt in Verbindung stehenden Systemen wurden aber auch eine Reihe von Softwareentwicklungen vorgestellt, die davon unabhängig sind.

All die genannten Verfahren versuchen die Vielfalt der anthropometrischen Eigenschaften des Fahrers bzw. der Passagiere zu berücksichtigen. Die einfachste Anpassung stellt hierbei die Verschiebung des Fahrersitzes dar. Unter Anwendung der wissenschaftlichen Anthropometrie erschien es sinnvoll, eine Spannweite von Perzentilen festzulegen, um dadurch einen gewünschten Prozentsatz der Bevölkerung als mögliche Nutzer des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Häufig wird empfohlen, dafür die Spannweite von der 5-Perzentil Frau bis zum 95-Perzentil Mann zu berücksichtigen. Damit erfasst man theoretisch 95 % der Bevölkerung. 97,5 % berücksichtigt man, wenn man die Spannweite von der 2,5 % Frau bis zum 97,5 % Mann ausdehnt.

### Sitzen

Fahren kann prinzipiell nur im Sitzen stattfinden und da oftmals lange Strecken zurückgelegt werden, sind an Sitze und Sitzposition unter dem Aspekt der prinzipiell geringen verfügbaren Bewegungsfreiheit höchste Anforderungen zu stellen. Insbesondere ist eine korrekte und ermüdungsfreie Sitzposition des Fahrers aus Komfort- und Sicherheitsgründen von größter Bedeutung. Die *Fahrerhaltung* wird dabei wesentlich durch die Position des Lenkrads und die der Pedale bestimmt. Durch die Sitzeinstellung soll eine Anpassung an individuelle Gegebenheiten weitgehend ermöglicht werden. Indem man in dem Menschmodell RAMSIS entsprechende Restriktionen setzt, wird unter diesen gegebenen Bedingungen die wahrscheinlichste Fahrerhaltung berechnet. Wenn man eine solche Berechnung für jedes Mitglied aus der avisierten RAMSIS-Familie durchführt, können die notwendigen Verstellbereiche sowie sonstige durch die Karosserie gegebenen Einschränkungen erkannt und bereits in der Konzeptionsphase korrigiert werden. ◘ Abb. 6.102 zeigt die Vorgehensweise am Beispiel einer Mittelklasselimousine. Bei all diesen Justierungen zeigt sich insbesondere, dass eine Lenkradschwenkung um eine Fahrzeug-$y$-Achse, wie es häufig bei Fahrzeugen der unteren Preisklasse realisiert wird, keineswegs ausreicht, um die Anforderungen durch die unterschiedlichen Anthropometrien zu berücksichtigen.

Die errechneten Sitzhaltungen müssen durch eine entsprechende *Sitzkonstruktion* unterstützt werden. Der Gestaltung dieses Sitzes kommt sowohl bezüglich der Minimierung des Diskomforts als auch hinsichtlich einer gesunden und ermüdungsfreien Körperhaltung große Bedeutung zu. Zugleich wird aus dem zuvor Dargelegten ersichtlich, dass der Sitz immer nur in Verbindung mit der jeweiligen Sitzhaltung, welche durch die jeweiligen Randbedingungen mitbestimmt wird, gestaltet bzw. beurteilt werden kann. Ein häufig verwendetes Kriterium zur Beurteilung der Sitzqualität ist die Druckverteilung in der Sitz- und Lehnenfläche, denn Druck auf Hautareale mit wenig Fett und Muskeln bewirkt dort höhere Werte (z. B. speziell unter den sog. Sitzbeinhöckern). Bereits Drücke von 20–33 mmHg (2,6–4,3 kPa) können zu eine Verminderung der Blutzirkulation und damit der Versorgung des Gewebes mit Nährstoffen sowie eine Verlangsamung der Nervenleitgeschwindigkeit führen. Die Aufgabe der Polsterung ist es dabei, hohe Drücke in der Berührfläche zwischen Körper und Sitz zu reduzieren und dabei zugleich unterschiedliche Körperformen aufzufangen. Eine vollkommen gleichmäßige Druckverteilung würde allerdings auch Diskomfort verursachen. In zahlreichen Versuchen, die unter anderem mit einem speziellen Forschungsstuhl durchgeführt worden sind, wurde ein Druckverteilungsbild ermittelt, das zu ei-

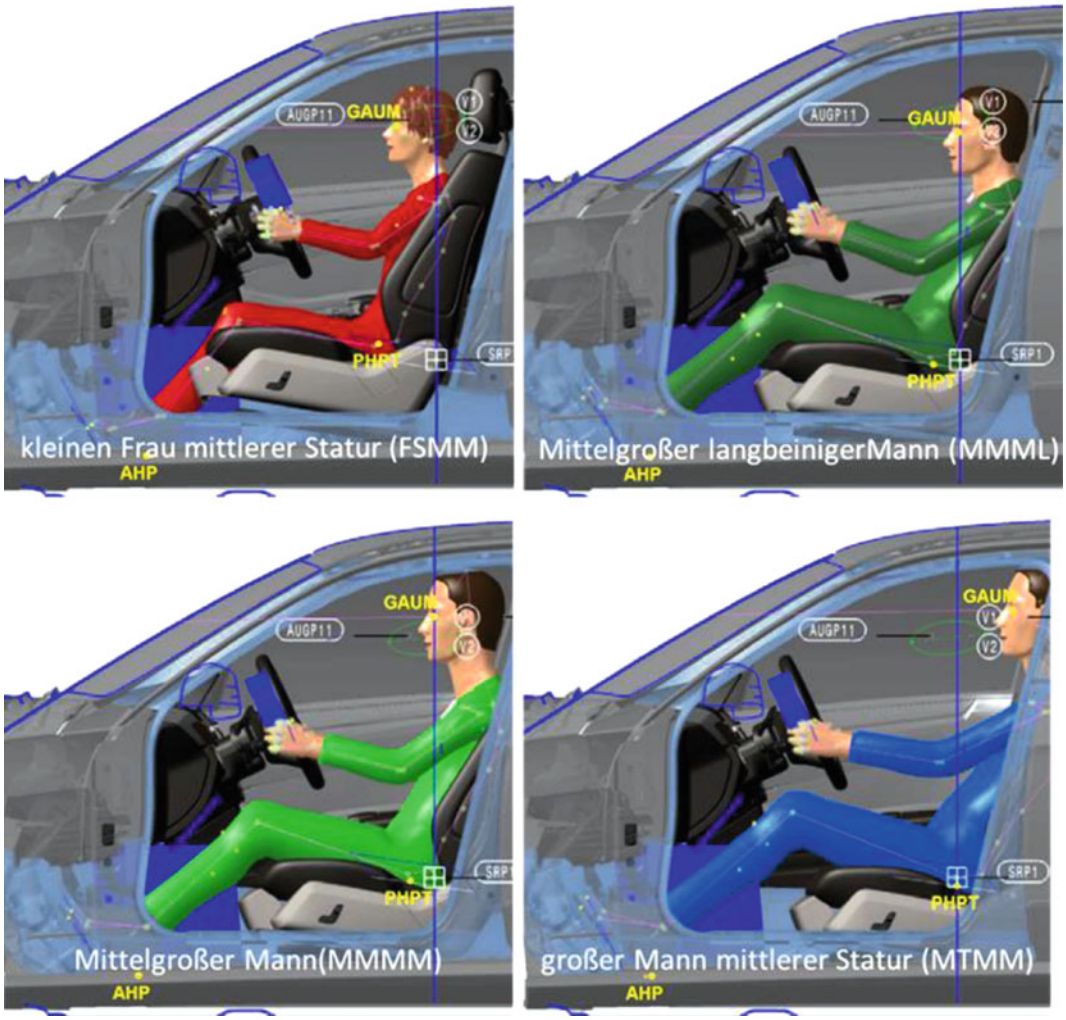



**Abb. 6.102** Fahrerhaltung verschiedener Auslegungsmannequins in einem gegebenen Mittelklassewagen [177]

nem minimalen Diskomfort führt (Abb. 6.103). Es konnte gezeigt werden, dass diese Druckverteilung einerseits geringe Bandscheibendrücke verursacht und andererseits einen minimalen Langzeitdiskomfort bewirkt [145, 178, 179]. Um diese korrekte Sitzdruckverteilung bei unterschiedlichen Anthropometrien zu erzeugen, ist eine Sitzlängsverstellung und Lehnenverstellung nicht ausreichend. Der Sitz muss sowohl in der Höhe als auch in seiner Neigung verstellbar sein. Zusätzlich kommt eine Anpassung der Sitzfläche an die individuelle Oberschenkellänge hinzu.

Um lange Fahrten ermüdungsfrei zu bewältigen, sind weitere Abstützungen zu konzipieren. Dazu zählt vor allem die *Fußstütze* bzw. die Neigung des Bodenblechs, die so konzipiert sein muss, dass Verspannungen im Sprunggelenk vermieden werden. In Abhängigkeit von den Bedingungen des jeweiligen Karosseriekonzeptes kann hier mittels der Menschmodelle ein guter Kompromiss gefunden werden (ein Berechnungsbeispiel findet sich in [181]). Speziell bei der Anordnung der *Pedale* sind gesetzliche Vorgaben zu beachten, um Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen [182]. Ein weiteres

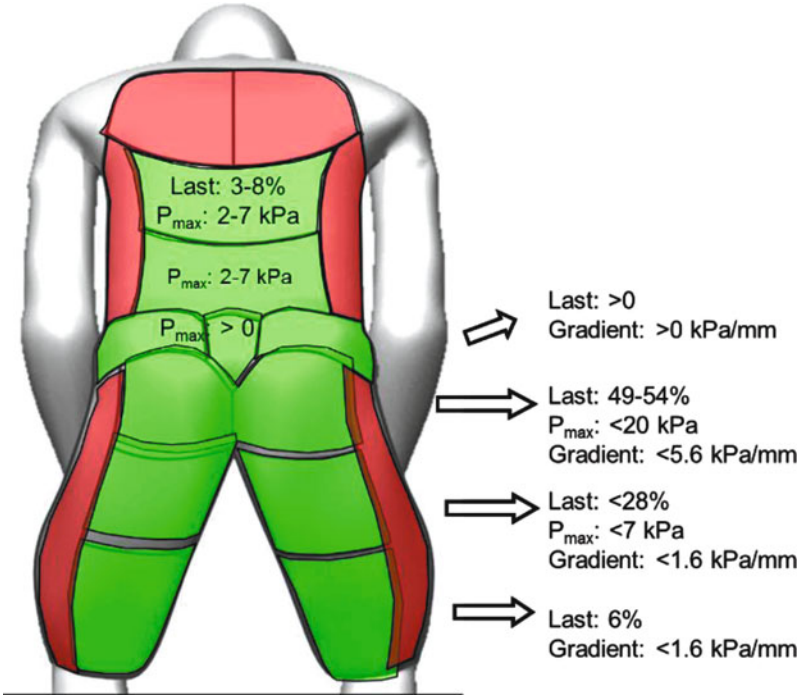



**Abb. 6.103** Last, maximaler Druck und Gradient des Druckanstieges, welche nach den Untersuchungen von Hartung [180] und Mergl [178] zu einem minimalen Diskomfort führen

Problem stellt bei handgeschalteten Fahrzeugen das *Kupplungspedal* dar, das sowohl von kleinen kurzbeinigen Personen wie von großen langbeinigen Personen sicher zu bedienen ist. Auch hier können mithilfe von Menschmodellen in Abhängigkeit des Karosseriekonzepts Kompromisse gefunden werden [121].

Durch die Gurtanlegepflicht, die heute praktisch in allen Ländern Gültigkeit hat, in denen Fahrzeuge zugelassen werden, stellt die Handhabung des *Gurtes* hinsichtlich des Anlegevorgangs und der durch das Tragen des angelegten Gurtes hervorgerufene Diskomforts einen wichtigen Aspekt der Interieurgestaltung dar. RAMSIS bietet ein ausgefeiltes Gurtverlaufsmodell, mit dessen Hilfe sowohl die Position der Gurtplatte in der Ausgangsstellung als auch die des Gurtschlosses modelliert werden kann. Das Modul berücksichtigt dabei auch gesetzliche Vorschriften, die für den Gurtverlauf in verschiedenen Ländern erlassen worden sind. Mittels der unterschiedlichen Anthropometrien ist dann zu überprüfen, inwieweit eine Anpassung dieser beiden Punkte unter Berücksichtigung des daraus resultierenden Gurtverlaufs notwendig ist.

All die genannten Punkte gelten mit gewissen Einschränkungen auch für die anderen Passagiere des Fahrzeugs. Insbesondere ist in Abhängigkeit von dem Fahrzeugkonzept dem Fahrzeugfond besondere Beachtung zu schenken.

### Sicht

Über 90 % der für das Fahren aufzunehmenden Information geschieht über die Sicht. Deshalb hat die Gestaltung der technischen Elemente, die die Sicht beeinträchtigen bzw. unterstützen können ebenso wie das zuvor genannte Sitzen elementare Bedeutung. Dessen Gestaltung bezieht sich dabei vornehmlich auf das sog. Greenhouse (auch Glashaus), welches die Windschutzscheibe, Rück- und Seitenfenster sowie die Säulen, welche diese voneinander trennen (beginnend bei der Fahrzeugfront als A-, B- usw. Säule bezeichnet) und das Dach umfasst. Dabei kann die Sicht nicht unabhängig vom Sitzen gesehen werden. Oftmals richtet der Fahrer seine

**Tabelle 6.29** Wichtige Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Sicht aus einem Pkw (aktualisiert und ergänzt nach [184])

| *Sichtfeld* | *Scheibenwischer und -wascher* | *Sicherheitsglas* | *Rückspiegel* |
|---|---|---|---|
| **StVZO §35** | **FMVSS 104** | **BS AU 178a**<br>Spezifikation | **StVZO §56** |
| **ISO 7397**<br>Messung und Beurteilung | **SAE J903**<br>Wischfeld | **ECE R43** | ADR 12<br>ausgelaufen |
| **SAE J1050a**<br>Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes | **ISO 3469**<br>Testmethoden | **ISO 3637**<br>Material | **ADR 14** |
| **77/649 EWG → 90/630 EWG**<br>Mindestsichtfeld nach vorne<br>Verdeckungen | **EWG 78/318**<br>Wischfeld, Funktion | **ISO 3538**<br>optische Eigenschaften | **2003/97 EG → 2005/27 EG**<br>Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes |
| **FMVSS 128**<br>Mindestsichtfeld<br>Verdeckungen<br>Sonnenblenden | **ADR 16** | **ISO 3917**<br>Testverfahren | **ECE R46** |
| **ECE R125**<br>Vorderes Sichtfeld | *Scheibenentfrostung* | **FMVSS 205** | **FMVSS 111**<br>Anordnung<br>Sichtfeld<br>Bedienung |
| **J/P/061**<br>Sichtfeld im Nahbereich | **EWG 78/317**<br>Bereiche, Zeit | **ADR 8** | FMVSS 107<br>zurückgezogen |
| *Schattenbänder* | **SAE J902, SAE J381**<br>Entfrostung<br>Beschlagentfernung | *Windschutzscheiben Luftdüsenausstattung* | **ISO 5740**<br>Testverfahren Reflektionsgrad |
| **SAE J100** | **ISO 3468**, ISO/NP 3470<br>Testmethoden | **ISO 3470**<br>Testmethoden | |
| | **FMVSS 103**<br>Entfrostung<br>Beschlagentfernung | *Heckscheiben Wischer und -wascher* | |
| | **ISO 5898**<br>Entfrostung Heckscheibe | **ISO 6255**<br>Anforderungen | |

Sitzposition so ein, dass er – subjektiv – eine optimale Sicht auf die Fahrumgebung erhält. Er geht dann ggf. Kompromisse bezüglich seiner Position zu Lenkrad, Pedalen und weiteren Bedienelementen ein, die bei längerer Fahrt zu Diskomfort führen können. Lorenz [183] hat in Versuchen dazu Restriktionen entwickelt, mit denen dieser Effekt in RAMSIS simuliert werden kann.

Man hat zwischen der *direkten Sicht nach vorne auf Fahrbahn*, Verkehrszeichen und Signalanlagen sowie nach hinten durch das Rückfenster z. B. bei Rückwärtsfahrt und der *indirekten Sicht* über Innen- und Außenspiegel zu unterscheiden. Es existiert eine Reihe von gesetzlichen Vorschriften verschiedener Nationen bzw. Wirtschaftsräume, um eine erforderliche Mindestqualität der Sichtbedingungen in jedem für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeug sicherzustellen. Die wesentlichen Vorschriften für die direkte und indirekte Sicht in den Regionen Europa, Nordamerika und Australien wurden von Hudelmaier [184] zusammengestellt und sind mit Aktualisierungen und Ergänzungen in Tab. 6.29 wiedergegeben. Außerdem existieren gesonderte Vorschriften für die Länder Japan, Indien und die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). Die meisten Vorschriften dieser Staaten orientieren sich inhaltlich und formal an den Vorschriften aus Europa und Nordamerika. Darüber hinaus existieren Normen der Ingenieurvereinigungen wie beispielsweise DIN, VDI, SAE oder JAMA, die den „Stand der Technik" beschreiben und somit Relevanz haben, jedoch nicht unbedingt rechtsverbindlichen Charakter besitzen [121, 185].

Mit Hilfe von Menschmodellen (z. B. RAMSIS-kognitiv) kann sowohl die direkte Sicht als auch die Nutzung der Spiegel sowie die Sichtverhältnisse beim Rückwärtsfahren simuliert werden und anschaulich aus der Sicht des jeweiligen Mannequins zur Beurteilung dargestellt werden. Darüber hinaus ist es z. B. auch möglich, den Effekt von Spiegelun-

gen und unerwünschte Reflexionen bereits in der Konzeptionsphase abzuschätzen.

#### 6.4.1.5 Zusammenfassung

Aus der Vielzahl der dargestellten Punkte lässt sich erkennen, dass das Thema Mensch-Maschine und dessen wissenschaftliche Behandlung durch die Ergonomie für die Auslegung von Fahrzeugen immer wichtiger werden. Dies spielt insbesondere im Zusammenhang mit dem fortschreitenden Einsatz von Assistenzsystemen und mit dem automatisierten Fahren eine zunehmende Rolle. Auch die Berücksichtigung älterer Fahrzeugnutzer stellt eine wichtige ergonomische Herausforderung dar. Ausführliche Darstellungen zu den angerissen Themen finden sich in [121].

### 6.4.2 Kommunikationssysteme und Navigation

Mit der Entwicklung und Standardisierung der digitalen zweiten Generation des Mobilfunks begann ab Ende der 80er Jahre des 20 Jahrhunderts eine beispiellos rasante Entwicklung der mobilen Sprach- und Datenkommunikation (◘ Abb. 6.104). Wesentliche Erfolgsfaktoren waren ein europaweit einheitlicher technischer Standard (GSM – Groupe Spécial Mobile, später umbenannt in Global System for Mobile Communication) und harmonisierte Frequenzvergaben, die Aufgabe der staatlichen Post- und Telekommunikationsmonopole mit der einhergehenden Deregulierung und Privatisierung der Telekommunikationsmärkte sowie die Einführung des Roaming-Konzeptes, das mit einem Gerät und einer persönlichen Mobiltelefonnummer europaweite Erreichbarkeit und Zugang zu mobilen Telekommunikationsdiensten ermöglichte [186]. Waren die Mobilgeräte zum Markstart der ersten digitalen GSM-Mobilfunknetze von Form und Gewicht her noch eher tragbare Telefone für den Fahrzeugeinbau, so zielten doch alle Eckdaten der Spezifikation wie Sendeleistung, Stromverbrauch und Leistungsmerkmale auf die Entwicklung von leichten, tragbaren Endgeräten für die Westentasche. Mit einem vielfältigen Angebot an Endgeräten, konkurrierenden Netzbetreibern und Dienstleistungen wurde die Grundlage gelegt für einen innovativen Massenmarkt (1 Million Teilnehmer 1994, 10 Millionen im Jahr 1995, 100 Millionen in 1998 und über eine Milliarde GSM Kunden im Jahr 2004 [187]), der mit stetig entwickelten technischen Neuerungen aufwartet.

Die Nachfrage nach mobiler Telekommunikation (Sprache und Daten) erzeugte neue Herausforderungen für das Automobil, bot aber verbunden mit international standardisierten Technologien auch effiziente Lösungen zur Realisierung neuer Angebote. In der ersten Generation der GSM-Telefonie im Fahrzeug wurden noch vorrangig fest eingebaute Telefone mit abnehmbarem Hörer verbaut. Das änderte sich mit der zunehmenden Verbreitung persönlicher Mobiltelefone einerseits und gesetzlichen Rahmenbedingungen zu deren Nutzung im Fahrzeug. [190] Damit wurden neue Angebote nachgefragt wie drahtlose Kopplung des Mobiltelefons mit der Freisprecheinrichtung des Fahrzeugs und Sprachsteuerung. Die Möglichkeiten zur mobilen Datenübertragung wurden für die Realisierung zusätzlicher Telematikdienste genutzt, zunächst auf Basis des kostengünstigen Short Message Service SMS. [191] Deren bekanntestes Beispiel, der im Falle eines Unfalls automatisch ausgelöste Notruf mit eingebetteter Übertragung der Fahrzeugposition an die Rettungsleitstelle, wird mittlerweile unter anderem in der EU gesetzlich gefordert [192].

Über die mobile Telekommunikation hinaus haben digitale Technologien weiter zu einem reichen Angebot an Unterhaltungs-, Informations-, Komfort- und Assistenzfunktionen in modernen Fahrzeugen geführt. Dazu gehören Rundfunkdienste ebenso wie Betriebssysteme und Softwarelösungen für moderne Systemarchitekturen auf deren Basis eine Vielzahl von Anwendungen realisiert wird. Navigation, lange als dritte zentrale Komponente neben dem Rundfunkempfänger und der Telematik-Kommunikationseinheit realisiert, ist zwar weiterhin eine der dominierenden Funktionen aber realisiert als Software-Anwendung, die zunehmend eingebettet ist in ein vernetztes Informationssystem mit einem vielfältigen Angebot an Zusatzfunktionen.

#### 6.4.2.1 Rundfunk und Entertainment

Bis zum Aufkommen der digitalen GSM-Mobilfunknetze spielte in Fahrzeugen die Telekommunika-

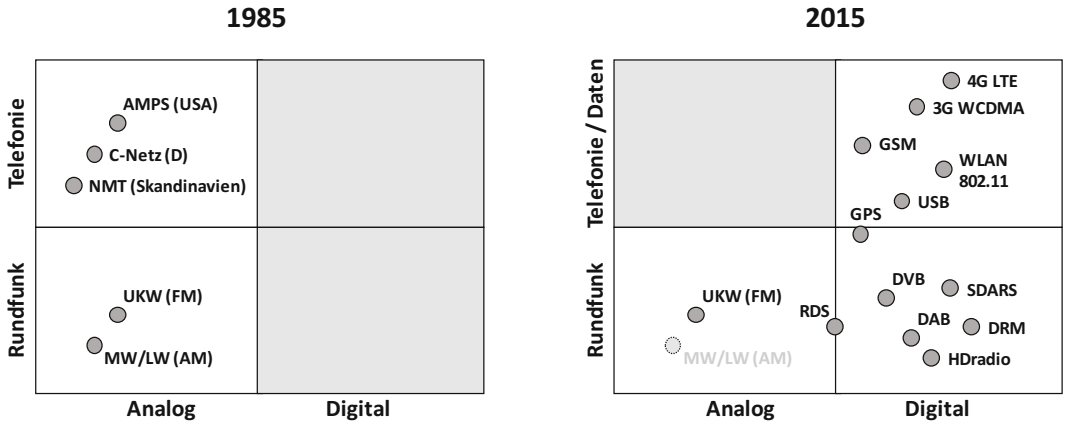



**Abb. 6.104** Kommunikationstechnologien im Fahrzeug von 1985 bis heute

tion eine untergeordnete Rolle, in geringen Stückzahlen als nachgerüstetes analoges Mobiltelefonsystem.

Wichtigster Kommunikationsdienst war der analoge frequenzmodulierte FM-Rundfunk. Die Sendefrequenzen von 87,5 MHz bis 108 MHz belegen einen Teil des Bands der Ultrakurzwelle UKW (30 MHz bis 300 MHz). Rundfunk auf Mittel- und Langwelle in den Frequenzbändern bis 3 MHz spielt eine zunehmend rückläufige Rolle. Die Mittelwellensender der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten wurden zum Jahresende 2015 final außer Betrieb gestellt. [193]

UKW-Rundfunk blieb ein beliebtes Ausstattungsmerkmal für Fahrzeuge, das von einem optionalen Sonderzubehör zu einer unverzichtbaren Serienausstattung ab Werk wurde, in letzter Zeit aber zunehmende Konkurrenz durch digitale Streamingangebote [222–224] und die nachdrückliche Einführung des digitalen Rundfunks auf Basis DAB+ erfährt. Wesentlich zur Attraktivität des UKW-Rundfunks beigetragen hat ein reiches, regional stark differenziertes Angebot von öffentlich-rechtlichen und privaten Sendern. Hinzu kamen Zusatzdienste des Radio Data System RDS [196]. Dieses Zusatzsignal wird in einem Seitenkanal des eigentlichen Stereo-Audiosignals digital übertragen. In diesem Datenkanal sind Informationen zu Senderkennungen, Verkehrsdurchsagen, dem laufenden Programm und seinen Inhalten, sowie die Frequenzen benachbarter Sender mit demselben Programm vorgesehen. Nutzer kennen das RDS vor allem von Sendernamen und dem Titel des aktuell laufenden Musikstücks, die in einem Display eingeblendet werden. Insbesondere die Informationen zu benachbarten Sendern sind für den mobilen Empfang im Fahrzeug von großer Bedeutung.

UKW-Empfänger im Fahrzeug haben eine Reihe von technischen Maßnahmen, die mit mehreren Empfangseinheiten für den mobilen Einsatz befähigen. Dazu zählt zunächst der redundante Empfang des Radiosignals über zwei Antennen (Diversity-Empfang). Eine Regeleinrichtung sorgt zur Bekämpfung der störenden Einflüsse der mobilen Mehrwegeausbreitung (fast fading) für eine schnelle Umschaltung auf das jeweils aktuell bessere Signal. Die gewichtete Kombination der beiden Empfangssignale sorgt für eine richtungsselektive Entzerrung und verbesserte Empfangsqualität. Eine weitere Empfangseinheit wird häufig eingesetzt für den Empfang von Zusatzinformationen über das Radio Data System in Situationen wo der aktuell gehörte Sender nicht die benötigten Informationen bereitstellt wie zum Beispiel aktuelle Daten zur Verkehrslage, die so im Hintergrund dennoch empfangen werden können. Eine weitere Empfangseinrichtung wird oft dazu benutzt, kontinuierlich die im RDS-Datenkanal benannten Frequenzen der benachbarten Sender mit demselben Programm zu beobachten, um Sender mit besserer Signalqualität zu erkennen und automatisch auf diese Frequenz für den primären Empfang des Programms um-

schalten zu können. Das ist im Fahrzeug besonders hilfreich, weil es Notwendigkeit zur häufigen manuellen Sendersuche deutlich reduziert.

Darüber hinaus werden über den RDS-Datendienst auch aktuelle Verkehrsinformationen übertragen. Ein kompaktes Protokoll des Traffic Message Channel TMC [197] kann für ausgewählte Abschnitte des Verkehrsnetzes aktuelle Informationen zum Verkehrsfluss übertragen. Dazu wird ein standardisierter, aber länderspezifischer Katalog von wichtigen Streckenabschnitten und Verkehrsknotenpunkten mit einem Katalog zu möglichen Ursachen von Verkehrsstörungen kombiniert. Für deren Übertragung stehen nur bis zu 100 bit/s zur Verfügung, so dass zwar nur ein geringer Teil des Straßennetzes abgedeckt werden kann, sich aber ein Bild der regionalen Verkehrslage und vorausschauende Warnungen vor Streckenabschnitten mit Gefahrenstellen auf Autobahnen realisieren lassen. Der Vorteil von RDS und TMC war, dass die bereits bestehende Senderinfrastruktur relativ leicht und kostengünstig erweitert werden konnte. Ein deutlich weiterreichendes, aber auch komplexeres System wurde beispielsweise dagegen schon sehr frühzeitig in Japan mit der VICS (Vehicle Information and Communication System) Technologie entwickelt [199]. Sie setzt sehr gezielt auf im Fahrzeug relevante Informationsdienste und definiert dabei ein sehr engmaschiges Netz zur Erfassung und Verteilung dieser Informationen über FM Rundfunk, aber auch Straßen-Baken auf Basis von Infrarot- und Funkkommunikation.

Mit den oben beschriebenen Merkmalen konnte sich der analoge Rundfunk in Europa lange Zeit erfolgreich gegen die Konkurrenz durch den digitalen terrestrischen Rundfunk behaupten. Das Digital Audio Broadcasting DAB [194, 195] bietet einige überlegene technische Leistungsmerkmale hinsichtlich Audioqualität und digitalen Zusatzinformationen, allerdings blieb der Markterfolg des digitalen Systems deutlich hinter den Erwartungen zurück. In Deutschland wird nun mit der zweiten Generation des DAB+ ein weiterer Anlauf unternommen. Die Sender nutzen vor allem das sogenannte VHF Band III im Bereich 174 MHz bis 230 MHz mit einem innovativen Mehrträgermodulationsverfahren, das durch umfangreiche Maßnahmen der digitalen Signalübertragung gut an den mobilen Empfang insbesondere im Fahrzeug angepasst wurde. So sind auch ohne Diversity-Empfänger Störungen beispielsweise durch Mehrwegeausbreitung mit Mechanismen zur Fehlerkorrektur adressiert. Leistungsfähige Kanal- und Quellencodierverfahren bieten eine hohe spektrale Effizienz, so dass Programmbouquets mit bisher nur regional empfangbaren Sendern nun überregional oder bundesweit ausgestrahlt werden können. Dies wird unterstützt durch die Möglichkeit des Gleichwellenbetriebs, bei dem das gesamte Sendernetz dieselbe Frequenz nutzt und der ein Umschalten der Frequenz während der Fahrt im Auto überflüssig macht.

Im digitalen Datenstrom eines DAB-Multiplex stehen neben den Audiosignalen der Sender auch zahlreiche Möglichkeiten zur Übertragung von zusätzlichen Datendiensten zur Verfügung. Neben programmergänzenden Multimediainformationen können so insbesondere Verkehrsinformationen mit einer deutlich höheren Datenrate ausgestrahlt werden. Damit kann ein größerer Anteil des Streckennetzes in höherer Auflösung codiert werden, so dass für Autofahrer deutlich präzisere Prognosen der Fahrtdauer möglich werden. Hierfür wird sowohl das im RDS des UKW-Rundfunks eingesetzte TMC-Protokoll erweitert, wie auch ein leistungsfähigeres Protokoll TPEG entwickelt, das nach der entsprechenden Arbeitsgruppe Transport Protocol Experts Group benannt ist [197].

Im Gegensatz zur trotz interessanter Leistungsmerkmale und hoher Audioqualität schleppenden Marktakzeptanz der digitalen Rundfunksysteme in Europa bedient das digitale Satellitenrundfunksystem Satellite Digital Audio Broadcast SDARS in Nordamerika eine Marktlücke. Die analogen terrestrischen UKW-Radiosender bieten dort anders als in Europa keine flächendeckende Rundfunkversorgung und ein überregionales Angebot besteht nahezu nicht. Das Angebot der seit 2008 fusionierten Firmen XM und Sirius basiert auf einer landesweiten Versorgung durch ein Netz von Satelliten [208]. Der Sendebetrieb im S-Band ermöglicht insbesondere eine hervorragende Versorgung weitläufiger ländlicher Gebiete, benötigt aber für die Ausleuchtung urbaner Gebiete mit hoher Bebauung ein zusätzliches Netz an terrestrischen Repeater-Stationen. Damit wir dann aber auch der mobile Empfang insbesondere im Fahrzeug bei gerin-

gen Antennendimensionen ermöglicht. Ein attraktives Angebot mit einer breiten Palette von Kanälen sorgte für eine hohe Zahlbereitschaft sowohl bei der Anschaffung der Empfänger wie auch bei den monatlichen Abonnementgebühren. Der Digitalisierung des terrestrischen UKW-Rundfunks [209] zum Trotz sicherte das SiriusXM eine hervorragende Markposition und hohe Nachfrage sowohl im Verbau der Fahrzeugempfänger ab Werk wie auch in der Nachrüstung. Aufgrund dieser Nachfrage sind Fahrzeughersteller teilweise sogar dazu übergegangen, die vollständige Vorbereitung für das System auch ohne Bestellung ab Werk zu verbauen. Die Aktivierung erfolgt dann ohne lange Wartezeit für den Kunden über eine Freischaltung des Vertrags.



#### 6.4.2.2 Telefonie

Neben dem analogen UKW-Rundfunk war zunächst das klassische festeingebaute Autotelefon nach den jeweiligen nationalen analogen Standards (u. a. AMPS, NMT, C-Netz [186]) die zweite häufig genutzte Kommunikationseinrichtung in Fahrzeugen. Außer einer Stromversorgung über das Energiebordnetz des Fahrzeugs mit entsprechender Steuerung der Klemmenzustände sowie einem Anschluss für eine Außenantenne besaßen diese Geräte keine weitere Integration mit dem Fahrzeug und wurden daher als nahezu voll gekapselte Subsysteme realisiert. Mit der Einführung des digitalen Mobilfunks nach dem GSM-Standard und der Navigation auf Basis digitaler Karten änderte sich die Herangehensweise zunehmend, weil eine wachsende Zahl von Schnittstellen zum Austausch von Sensor- und Steuersignalen geschaffen wie auch der Zugriff auf Ein-/Ausgabeeinheiten wie Display, Bedienelement und Audioanlage geregelt werden musste.

Die GSM Netze definieren ein zelluläres Netz, gebildet aus den für eine lückenlose Versorgung aneinandergrenzenden Sendegebieten der Basisstationen („Zelle“). Die Netze wurden zunächst im 900 MHz Band spezifiziert und schrittweise auf die Bänder um 1800 MHz sowie 1900 MHz erweitert. Für den internationalen Betrieb wurden so Mobilstationen mit Dual- oder Tri-Band Empfängern notwendig. Die Personalisierung der Mobilgeräte mit einem Mobilfunkvertrag erfolgt über die SIM-Karte. Dieses Subscriber Identity Module trägt die wichtigen Identitätsinformationen und Kryptofunktionen, um die Mobilstation zu authentifizieren und die Nutzung von Telekommunikationsdienstleistungen individuell abzurechnen. Dieser SIM-Karte ist auch eine eindeutige internationale Telefonnummer (Mobile Station ISDN MSISDN) zugeordnet, über die der Mobilteilnehmer erreichbar ist. Der Vertrag mit der eindeutigen Kundennummer (International Mobile Subscriber Identity IMSI) und der MSISDN kann über die SIM-Karte jedem beliebigen Mobilgerät zugeordnet werden. In der frühen Phase der GSM-Netze wurde mit der SIM-Karte und einem lokalen Leihgerät auch internationales Roaming in Netzen realisiert, deren Frequenzband das eigene Telefon mangels Dual- oder Tri-Band-Funktion noch nicht unterstützte. Viele Mobilfunkkunden nutzen die MSISDN als persönliche Telefonnummer auch über den Wechsel des Telekommunikationsanbieters hinweg, seit die Telefonnummer als wertvolles personenbezogenes Datum erkannt und deren uneingeschränkte universelle Portierbarkeit auch durch entsprechende regulatorische Entscheidungen zugesichert wurde. Es gehört zu den Kernfunktionen eines modernen Mobilfunknetzes, diese persönliche MSISDN aufzulösen gegen ein konkretes Mobilgerät mit der entsprechenden SIM-Karte sowie den aktuellen Aufenthaltsort, um Sprachanrufe jederzeit auch international durchstellen zu können. Das Mobilgerät bucht sich dazu in das jeweilige lokale Netz ein und aktualisiert regelmäßig seinen Aufenthaltsort (Location Update) wenn es sich durch die Sendegebiete der das Mobilnetz aufspannenden Basisstationen bewegt. Damit wird der Suchaufwand bei einem Anruf und damit die Verbindungsaufbauzeit auf ein Minimum reduziert.

Es sind unter anderem diese Merkmale der persönlichen Kommunikation, der weltweiten Erreichbarkeit unter einer Telefonnummer (MSISDN) unabhängig vom aktuellen Aufenthaltsort und ohne die Notwendigkeit unterscheiden zu müssen, über welches Gerät der Angerufene momentan erreichbar sein würde (Festnetz, Autotelefon, tragbares Mobiltelefon), welche den Besitz eines persönlichen Mobiltelefons innerhalb weniger Jahre für viele unverzichtbar machten. Entsprechend wurden im Automobil die Festeinbau-Lösungen mitt-

lerweile vollständig verdrängt durch die Nutzung des persönlichen Telefons. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben darf in vielen Ländern ähnlich wie in der Bundesrepublik Deutschland im Fahrzeug nur telefoniert werden, wenn dazu das Gerät selbst nicht in der Hand gehalten wird. Damit ist eine Freisprecheinrichtung im Fahrzeug notwendig, die entweder als kostengünstige Nachrüstlösung – oft in Kombination mit einem tragbaren persönlichen Navigationsgerät – oder als komfortabel integrierte Werksausstattung genutzt werden kann. In jedem Fall wird das persönliche Mobiltelefon über eine lokale Kommunikationsstrecke, drahtlos per Bluetooth [202] oder drahtgebunden per USB [201], mit dieser Freisprecheinrichtung gekoppelt. Sprachein- und -ausgabe werden aus dem Mobiltelefon auf diese Freisprecheinrichtung umgeleitet, ebenso wie die Annahme und die Wahlvorgänge von ankommenden und abgehenden Anrufen darüber gesteuert werden. Eine besonders komfortable und verkehrssichere weil ablenkungsarme Variante ist eine sprachgesteuerte Freisprecheinrichtung, zumal wenn deren Aktivierung unterstützt wird durch leicht erreichbare Steuertasten die etwa auf den Speichen des Lenkrads integriert sein können. Durch eine intelligente, prioritätsorientierte Stummschaltung von Audioquellen wie z. B. dem Autoradio wird komfortables Telefonieren ohne störende Hintergrundmusik und Unterbrechungen durch Ansagen des Navigationssystems gewährleistet. Umgebungslärm und Fahrgeräusche unterdrückende, echokompensierende und Rückkopplungen vermeidende digitale Signalverarbeitung hinter den Mikrofonen in der Freisprecheinrichtung heben die Audioqualität des Telefonsignals auch für die Gesprächspartner auf der Gegenseite. Digitale ISDN-Leistungsmerkmale wie Halten eines Anrufs oder Makeln können durch gute Freisprecheinrichtungen oft ebenfalls gesteuert werden. Häufig sind moderne Freisprecheinrichtungen auch in der Lage, die im Mobiltelefon gespeicherten Daten des Adressbuches auszulesen, zwischenzuspeichern und für Anrufe zu nutzen. Meist können die dabei gespeicherten Adressen auch an die Zielprogrammierung der Navigation übergeben werden, die so in vielen Fällen eine herkömmliche aufwändige Eingabe des Fahrtziels im Auto überflüssig machen.

Zwar bietet die drahtlose Kopplung des Telefons per Bluetooth mit einer solchen Freisprecheinrichtung den Vorteil, dass das persönliche Mobiltelefon beim Betreten des Fahrzeugs nicht aus der Jacke oder Tasche entnommen werden muss. Eine drahtgebundene Kopplung per USB besitzt dagegen den Vorteil, dass das Telefon während der Fahrt auch mit Energie versorgt und dessen Akku geladen werden kann. Oft wird dies in Form einer Ladeschale ausgeführt – meist in der Mittelkonsole des Fahrzeugs platziert – in die das Telefon eingelegt und während der Fahrt crashsicher verwahrt wird. Neben der Stromversorgung aus dem Bordnetz bietet eine solche Ladeschale meist auch die Kopplung an eine externe Dachantenne, welche die Sende- und Empfangsbedingungen deutlich verbessert und die in den Fahrzeuginnenraum abgestrahlte Sendeleistung minimiert. An einer drahtlosen Variante für diese Kopplung wird bereits gearbeitet, welche dann sowohl eine induktive Stromversorgung wie auch eine induktive Ankopplung der Außenantenne realisiert. Dafür muss nur das Telefon an einem definierten Platz abgelegt werden, das Anstecken entfällt.

#### 6.4.2.3 Mobile Datenkommunikation

Neben den modernen Leistungsmerkmalen der digitalen Sprachtelefonie wurde mit der Einführung der GSM-Systeme auch die mobile Datenkommunikation möglich. Zunächst mit niederbitratigen, leitungsvermittelten Diensten bis 9,6 kbit/s noch durchaus auf einem Niveau das vielen Haushalten auch für den Internetzugang im Festnetz zu Verfügung stand, blieben die Mobilnetze auch mit der Einführung von paketvermittelten Datendiensten (General Packet Radio Service GPRS) ab 64 kbit/s zunehmend hinter den aus dem Festnetz gewohnten Übertragungsgeschwindigkeiten zurück. Das änderte sich mit der Einführung der dritten Generation Mobilfunk, dem GSM-Nachfolger Universal Mobile Telecommunication System UMTS (oft auch als 3G bezeichnet) zusehends. [186] Wurden dort bereits Datenraten von typisch ca. 300 kbit/s und in Spitzen ausnahmsweise bis zu 2 Mbit/s erreicht, sind mit den modernen Netzinfrastrukturen und Übertragungsverfahren bis zu 100 Mbit/s möglich. [204] Hier spricht man mittlerweile von der vierten Generation der Mobilkommunikation

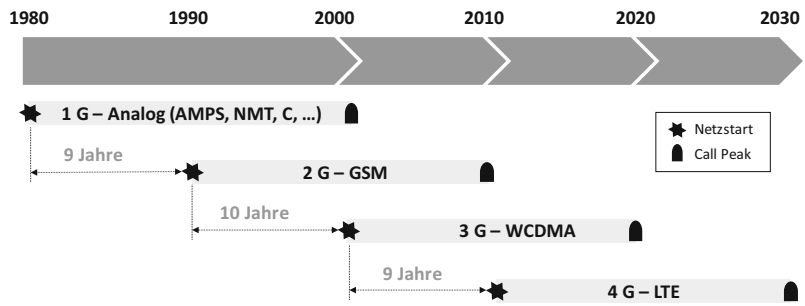



**Abb. 6.105** Evolution der Mobilkommunikationstechnologien seit 1980 (Quelle: GSMA Intelligence [189])

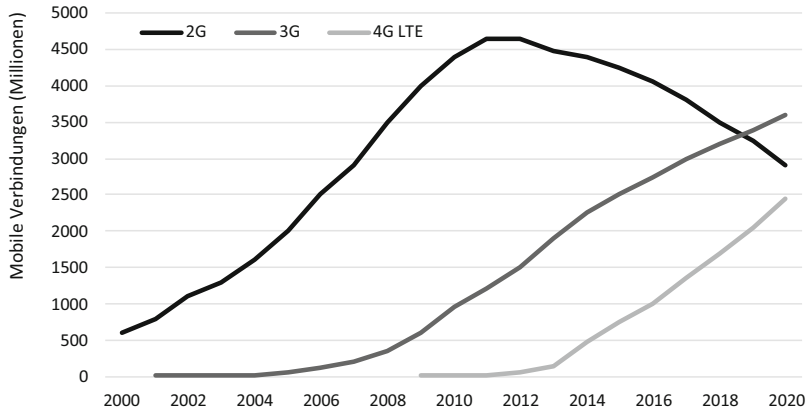



**Abb. 6.106** Gesamtzahl der weltweiten Mobilfunkverbindungen nach Technologien (Quelle: GSMA Intelligence [188])

4G oder Long Term Evolution LTE welche deutlich kleinere Mobilfunkzellen realisiert, deren Sendegebiete auch kleinere Teilnehmerzahlen versorgen und damit deutlich höhere Datenraten erzielen können, deren Netzausbau daher aber auch deutlich aufwändiger und nur in Ballungsräumen ökonomisch sinnvoll ist. [205, 206] Aufgrund der großen Bedeutung echtzeitfähiger mobiler Datenkommunikation für die moderne Verkehrstelematik bis hin zu mit Hilfe aktuellster Umgebungsinformationen hoch automatisiert fahrenden Fahrzeugen wird ein Ausbau der LTE-Infrastruktur zumindest entlang des Autobahnnetzes in Deutschland aktiv diskutiert. Aus demselben Grund werden bei der Entwicklung der nächsten Generation Mobilfunk (5G) bereits von Anfang an automobile Anwendungen und Anforderungen betrachtet. [207] Die Produktlebenszyklen der Mobilkommunikationstechnologien können für Fahrzeughersteller eine besondere Herausforderung bergen, denn sie bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie die eines Fahrzeugmodells (Abb. 6.105). Zwar erreicht eine Technologiegeneration typischerweise erst mit einer Verzögerung von 9 Jahren nach Einführung der entsprechenden Nachfolgetechnologie ihr maximales weltweites Anrufvolumen (vgl. Abb. 6.106). Da aber zu diesem Zeitpunkt innovative Netzbetreiber in Leitmärkten bereits mit der Einführung der jeweils übernächsten Technologiegeneration beginnen, werden dort häufig auch ältere Technologien bereits wieder abgeschaltet. Ein Fahrzeughersteller muss somit flexible Elektronikarchitekturen gestalten, um für ein weltweites Angebot mehrere Mobilkommunikationstechnologien anbieten und auf Netzabschaltungen in der laufenden Flotte reagieren zu können und so eingeführte Dienstangebote nicht abkündigen zu müssen.

Im Fahrzeug wird die mobile Datenkommunikation häufig als Festeinbaugerät mit eigener SIM-Karte realisiert. Es wird aber auch das persönliche Mobiltelefon des Fahrers als Modem benutzt (engl. Tethering), wobei dann häufig eine Kopplung des Telefons mit dem Fahrzeug über eine drahtlose WLAN-Schnittstelle nach dem Standard IEEE 802.11 [203] stattfindet. Letzteres hat den Vorteil, stets mit der aktuell verfügbaren Mobilfunktechnologie und einem passenden Datenvertrag online zu gehen. Im ersteren Fall besitzt das Fahrzeug selbst eine eigene Mobilfunknummer, und kann erreicht werden wenn kein Mobiltelefon gekoppelt ist. Das ist insbesondere für Anwendungen wie den automatisierten Notruf relevant, bei dem insbesondere auch nach einem schweren Unfall mit hohen Beschleunigungswerten noch eine garantierte Mobilfunkverbindung aufgebaut werden soll um die aktuelle Fahrzeugposition zu übermitteln. Andere Anwendungen wie die Vorkonditionierung der Klimaanlage per online-Fernsteuerung oder das Türöffnen per Smartphone-App bei versehentlich eingeschlossenem Fahrzeugschlüssel benötigen ebenfalls ein mit eigener SIM-Karte erreichbares Fahrzeug, dessen Bordnetz zur Ausführung von online ausgelösten Funktionen aufgeweckt werden können muss. Weitere Beispiele für häufig angebotene Telematikdienste sind die Ferndiagnose des Bordnetzes zur akuten Pannenhilfe ebenso wie ein Kurztest zur Anmeldung beim Service, der online eine bessere Beratung ermöglicht weil eine aktuelle Bestandsaufnahme des Fahrzeugzustands vorliegt. Moderne Anwendungen für den Flottenbetrieb bis hin zum Carsharing wären ohne Erreichbarkeit des Fahrzeugs durch eine eingebaute SIM-Karte ebenfalls nicht realisierbar, weil dort der aktuellste Standort des Fahrzeugs jederzeit abgefragt, Buchungs- und Reservierungsinformationen ausgetauscht und aktuelle Informationen über die Nutzung zur Entgeltabrechnung zuverlässig übertragen werden müssen.

Eine andere Form der Datenkommunikation wird ausschließlich über das Mobiltelefon abgewickelt, wenn per Sprache das Diktieren von E-Mails ermöglicht wird. Die so verfassten Nachrichten werden anschließend vom Smartphone direkt aus dem Fahrzeug heraus versandt. Ebenso können natürlich auf dem Telefon eingegangene Nachrichten im Fahrzeug vorgelesen werden. Dabei können die intelligente Freisprecheinrichtung des Fahrzeugs ebenso genutzt werden wie intelligente Sprachassistenten auf dem Smartphone selbst [215–217].

Durch einfache Audio-Ausgabe werden im Fahrzeug vermehrt die zunehmend als Smartphone ausgelegten persönlichen Mobiltelefone auch als Entertainment-Quelle genutzt. Das Abspielen von auf dem Geräte gespeicherten Musikdateien gehört dabei ebenso dazu wie das Streaming von Inhalten über mobile Datendienste, das zunehmend zum klassischen UKW-Radio in Konkurrenz tritt [222–224]. Das Smartphone wird dabei zunehmend zu einer Plattform für Anwendungen, die auch im Fahrzeug optimal genutzt und bedient werden sollen. Dazu realisierten einzelne Hersteller zunächst proprietäre Lösungen die nur mit wenigen Fabrikaten der Smartphones kompatibel waren, doch mittlerweile ist das Potential erkannt und wird von Seiten der Smartphone-Hersteller mit standardisierten Lösungen unterstützt [218, 219]. Auf der Fahrzeugseite wird die Integration dieser Lösung durch innovative Softwareplattformen ermöglicht, wozu Linux-basierte Betriebssysteme und Applikationstechnologien wie HTML5 und Java gehören [210–212]. Bei den neuen Vorschlägen zum Smartphone-Betrieb im Fahrzeug werden der Bildschirm und die Bedieneinheiten des Fahrzeugs genutzt, um Apps auf dem Smartphone direkt zu steuern. Im Smartphone wird der Betrieb im Fahrzeug erkannt und auf eine speziell angepasste Darstellung umgeschaltet, die sowohl die Auswahl der Apps auf für den Betrieb im Fahrzeug freigegebene einschränkt, wie auch deren Interaktionskonzept auf die spezifischen Anforderungen der Nutzerschnittstelle im Fahrzeug umstellt. Diese Darstellung wird dann auf den externen Bildschirm im Fahrzeug gespiegelt und dort beispielsweise per Touch- oder Tastenbedienung vom Fahrer genutzt. So können persönliche Favoriten aus den Smartphone-Apps auch im Fahrzeug ablenkungsarm und sicher bedient werden. Durch die Nutzung vernetzter Apps zur Navigation über diesen Mechanismus ist zu erwarten, dass dedizierte Nachrüstgeräte für die Navigation, sog. Personal Navigation Devices, zunehmend verdrängt werden.

Eine gar nicht für die Online-Datenkommunikation vorgesehene Kommunikationsschnittstelle

des Fahrzeugs rückt in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus. An der OBD-II-Schnittstelle, ursprünglich vorgesehen und gesetzlich vorgeschrieben für die Abgasdiagnose [220, 221], kann ein wesentlicher Umfang von Fahrzeugsignalen ausgelesen werden, die beispielsweise für eine Fahrzeugdiagnose oder eine Fahrtenbuchfunktion notwendig sind. Mit einem Aufsteckadapter auf der OBD-II-Schnittstelle können diese Daten von einer Smartphone-App ausgelesen werden und auch online übermittelt werden. So werden einfache Telematik-Angebote auch in Fahrzeugen realisiert, die ursprünglich gar nicht für die mobile Vernetzung und die damit möglichen Funktionen vorbereitet waren. Auf dieser Basis entstehen eine wachsende Anzahl von Nachrüstlösungen und herstellerunabhängigen Dienstangeboten. Die Angebote sind insbesondere aus Sicherheitsüberlegungen heraus umstritten, weil die OBD-Standards bisher keinen ausreichenden Schutz vor schreibendem Zugriff vorsehen.



#### 6.4.2.4 Navigation

Mit den Möglichkeiten der mobilen Datenkommunikation hat auch die Navigation im Fahrzeug einen erheblichen Wandel erlebt. Von der einfachen Routenführung auf Basis von digital auf einer CD gespeichertem Kartenmaterial hat sich die Navigation selbst zu einem vernetzten Dienst entwickelt, der Daten von Servern in der Cloud abruft, Daten an Server in der Cloud übermittelt, und als Plattform für kartenbasierte Funktionen im Fahrzeug dient.

Die Funktion des ursprünglich nur lose mit anderen Systemen im Fahrzeug gekoppelten Navigationssystems erfuhr eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Die Möglichkeiten zur Erfassung, Verbreitung und Speicherung des digitalen Kartenmaterials alleine wurden so verbessert, dass über reine Straßen- und Kreuzungsinformationen hinaus beispielsweise eine stetige Detaillierung und bessere Auflösung der Karte, Bebauungsinformationen und Grundlagen zur Kartendarstellung in 3D, Informationen zu Zusatzdiensten und reisrelevanten Adressen und Satellitenbildern zur verbesserten Orientierung aufgenommen wurden. Darüber hinaus enthält das digitale Kartenmaterial auch Informationen zur Steuerung von Fahrerassistenzinformationen wie zum Beispiel Anzahl und genaue Lage von Fahrstreifen, Abbiegeinformationen, Kurvenradien und Informationen zur Geomorphologie, um beispielsweise mit Daten zum Gefälle der vorausliegenden Strecke die Steuerung der Antriebs- und Rekuperationsstrategie verbessern zu können. Aus den Informationen der digitalen Karte wird dazu ein Informationsdatensatz für die sogenannten Advanced Driver Assistence Systems ADAS erstellt und im Bordnetz den jeweiligen Komponenten zur Verfügung gestellt. Die digitale Karte und deren tagesaktuelle Ergänzung selbst wird dabei neben dem Positionssignal aus einem satellitengestützten System (das weltweit bekannteste ist das US-amerikanische Global Positioning System GPS [198]) zu einer wichtigen Informationsquelle für die hochgenaue Eigenpositionierung des Fahrzeugs wie sie zukünftig unter anderem für hoch-automatisiert fahrende Fahrzeuge notwendig wird. Die Verteilung der Karte erfolgt damit schon lange wegen der schieren Größe des Datenmaterials nicht mehr per CD, sondern mindestens auf einer DVD und immer häufiger wird sie beim Händler durch eine hochbitratige Datenleitung direkt ins Fahrzeug geladen oder in regelmäßigen Abständen online über digitale Mobilkommunikation aktualisiert.

Die Funktion der Navigation im Fahrzeug selbst berechnet mittlerweile eine Vielzahl von Alternativrouten nach unterschiedlichen Strategien, das können Streckenlänge, Fahrtdauer, Kosten oder Kraftstoffverbrauch sein. Dazu werden die Informationen der digitalen Karte verknüpft mit aktuellen Verkehrslageinformationen, die über die bereits erläuterten Kanäle TMC und TPEG das Fahrzeug erreichen. Das TPEG Protokoll wird dabei mit hochauflösenden Kodierungen für Orte und Streckenabschnitte im kontinuierlich erweiterten Format AGORA-C versorgt [200]. Die TPEG-Informationen werden typisch über digitalen Rundfunk verteilt, erreichen aber viele Fahrzeug mittlerweile auch über digitale mobile Datenkommunikation indem die Fahrzeuge die für ihre aktuelle Region und Route relevanten Informationen regelmäßig von einem Server aus der Cloud abrufen.

Für den Fahrer sichtbarste Weiterentwicklung ist die Darstellung der Navigationsinformationen und Hinweise zur Routenführung auf mehreren Displays im Fahrzeug. Neben einem zentralen Informationsdisplay zur Kartendarstellung kommen

dabei zusätzlich eine Anzeigefläche im Kombiinstrument sowie die eingespiegelten Informationen des Head-Up-Display hinzu. Im Fahrzeug wird dazu typischerweise auf der Headunit, auf der auch die eigentliche Navigationsapplikation läuft, eine logische Komponente in Software realisiert, die analog einem Display Server die Informationen für die Darstellung auf den einzelnen Anzeigeflächen zentral aufbereitet und an die anderen beteiligten Komponenten verteilt, um jederzeit konsistente und synchrone Darstellung von Kartenausschnitten, Abbiegehinweisen und anderen Daten sicherzustellen.

Nicht zuletzt die Navigation, aber auch die digitalen Kommunikationseinrichtungen werden damit von einem vertikal integrierten, funktionsspezifischen Teilsystem immer mehr zu einer Plattformkomponente mit Schlüsselrolle für die Befähigung zahlreicher weiterer Funktionen aus anderen Domänen. Sie nutzen Informationen aus dem digitalen Kartenmaterial genauso wie aktuelle Daten die auf Servern in der Cloud bereitgestellt werden. Befähigt werden Energiemanagement und Rekuperation, Antriebsstrang und Vorausschau, aber auch neue Funktionen für Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebssträngen wie zum Beispiel das Fahrzeugzustands- und Lademanagement oder die Steuerung der Konditionierung des Fahrzeugs vor Fahrtantritt. Vernetzung und hochaktuelle digitale Informationen über Strecke, Gefahrenstellen, Sondersituationen und Verkehrsfluss werden eine zunehmend wichtige Säule für hochautomatisiert und autonom fahrende Fahrzeuge. So wie viele Funktionen moderner Fahrzeuge ohne Elektronik und Software-Lösungen nicht mehr realisierbar sind, werden sie es zukünftig auch nicht mehr ohne digitale Daten und deren Austausch über mobile Kommunikationsnetze sein.

## 6.4.3 Innenraumbehaglichkeit/ Thermischer Komfort

Die sehr hohe Ausstattungsrate mit Klimaanlagen selbst bei Kleinfahrzeugen unterstreicht die außerordentlich wichtige Rolle des thermischen Komforts und so wird eine Klimaanlage inzwischen von Fahrzeugkäufern häufig als Grundausstattung erwartet. Behaglichkeit bedeutet entspanntes Fahren, Entlastung und Konzentration auf die primären Fahraufgaben.

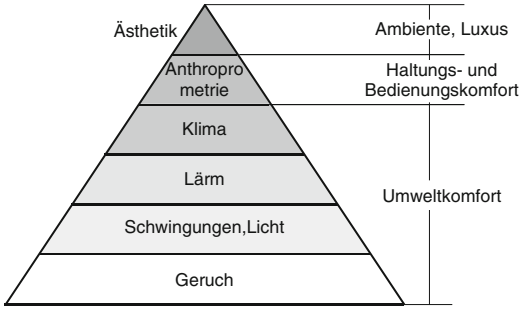



**Abb. 6.107** Komfortpyramide nach Bubb

### 6.4.3.1 Komfortbedürfnisse der Fahrzeuginsassen

Bubb [225] beschreibt in einer Komfortpyramide (Abb. 6.107) die verschiedenen Bedürfnisfaktoren, die für das individuelle Komfortempfinden erfüllt sein sollten. Nach dieser Hierarchie werden Komfortmängel erst bewusst, wenn die darunter liegenden Bedürfnisse erfüllt sind.

Fanger [226] führte eine Vielzahl von Probandenstudien zum thermischen Komfort in Gebäuden durch. Er führte den PMV (Predicted Mean Vote, gemittelter Beurteilungsindex des globalen Raumklimas) ein sowie die davon abhängige Größe PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) als den erwarteten Prozentsatz der Unzufriedenen (siehe auch [227]). Aus den empirischen Daten leitete er erstmals eine komplexe Berechnungsformel für den PMV mit folgenden Parametern ab:

- Umwelt (Lufttemperatur, -geschwindigkeit, -feuchte, Strahlung)
- Aktivität
- Kleidung

Damit ist eine rechnerische Abschätzung des zu erwartenden thermischen Komforts möglich. Im Kraftfahrzeug herrschen jedoch inhomogenere und dynamischere Bedingungen als in Gebäuden. Die Scheiben in der oberen Kabinenhälfte führen zu völlig unterschiedlichen Strahlungs- und Isolationswerten, die wiederum unterschiedliche Luftge-

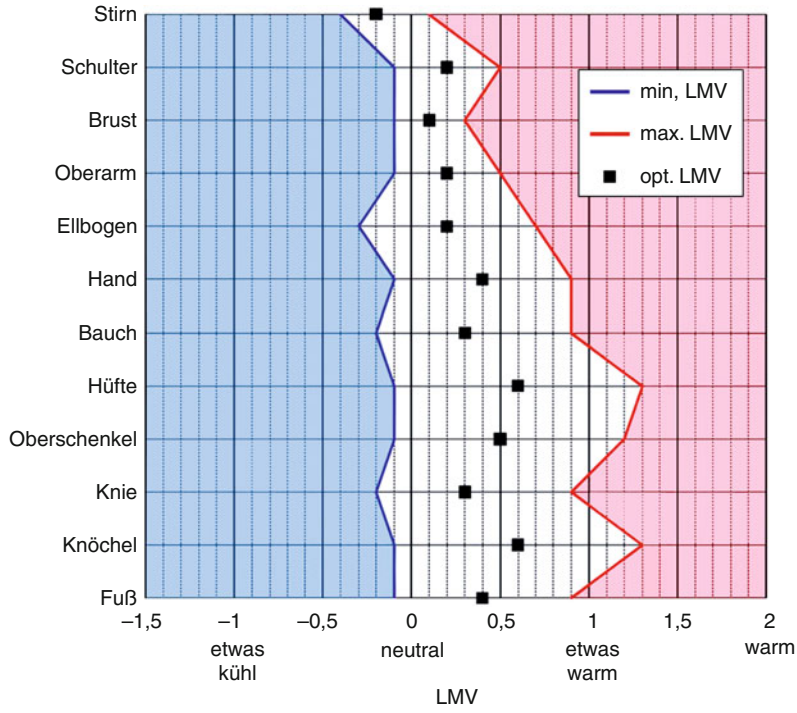



**Abb. 6.108** Komfortbewertung an Körperteilen mit LMV

schwindigkeiten und -temperaturen erfordern, um thermischen Komfort zu erreichen.

Auf Basis der Fanger'schen Behaglichkeitsuntersuchungen wurden für das Fahrzeug spezifische Bewertungsmethoden entwickelt, die anstelle des globalen Komforts den lokalen Komfort an einzelnen Körperteilen mit dem LMV (Local Mean Vote) bewerten [228–230] (Abb. 6.108). Dabei dient der bereits im frühen Stadium einer Fahrzeugentwicklung mit CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics) simulierte LMV zu einer ersten Voraussage des thermischen Komforts, der dann in realen Fahrzeugen über subjektive Komfortbewertungen oder Messungen mit thermischen Dummies bestimmt wird.

Nach der Theorie sollte es eigentlich kein regional unterschiedliches Komfortempfinden geben; in der Praxis zeigen sich jedoch tatsächlich regionale Vorlieben – während in Europa und Asien eher eine indirekte und zugfreie Klimatisierung gewünscht wird, sollte für den US-amerikanischen Markt eine direktere Klimatisierung dargestellt werden. Dies kann durch spezielle Ländervarianten der Klimaregelung, durch die Auswahl individueller Klimastile oder neuerdings auch durch spezielle Komfortausströmer erreicht werden (Abb. 6.109). Damit kann jeder Insasse die Ausströmcharakteristik der Auslaßdüse entsprechend seiner individuellen Komfortbedürfnisse zwischen diffus (zugfrei), konventionell oder spot (direkter Luftstrom) einstellen [231].

Klimatisierung reduziert den thermischen Stress und wirkt damit positiv auf Reaktion, Vigilanz, Wahrnehmung/Entscheidung und Emotionen und trägt somit auch zur Sicherheit im Straßenverkehr bei [232]. Umfangreiche Tests zeigten die Abnahme von Reaktionsgeschwindigkeit, Sinneswahrnehmung und Kombinationsgabe um 20 % bei Anstieg der Innenraumtemperatur von 25 auf 35 °C [233, 235]. Über den thermischen Komfort hinaus werden auch zunehmend Technologien gefordert, die den Aufenthalt im Fahrzeug angenehmen machen und eine Wellness-Atmosphäre schaffen. Im Umfeld der Klimatisierung zählen



**Abb. 6.109** Komfortausströmer mit einstellbarer Ausströmcharakteristik (Werkbild Behr)

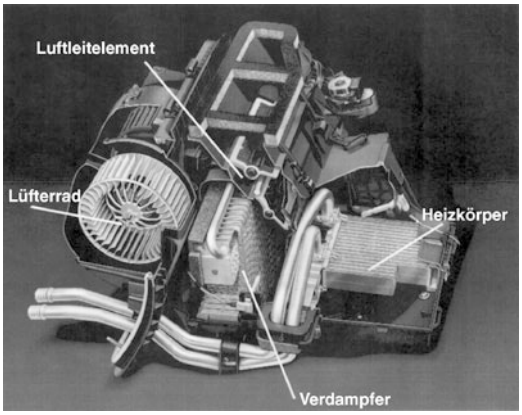



**Abb. 6.110** Hauptkomponenten eines Klimagerätes

hierzu Beduftung und Luftionisation [234], die sich zunehmend im Markt etablieren.

### 6.4.3.2 Funktionen und Aufbau von Klimageräten

Das vollständige Klimatisierungssystem besteht aus dem Heizkreislauf, dem Kältekreislauf, der Luftansaugung mit Wasserabscheidung, dem Klimagerät, den Luftführungen und Luftaustritten zum Innenraum, der Kabinen-Entlüftung sowie der zugehörigen Bedienung, Regelung und Steuerung mit Sensorik und Aktuatorik.

Der Heiz- und Kältekreislauf ist bereits in ► Abschn. 3.3.2 beschrieben, so dass hier der Schwerpunkt auf das Klimagerät, die Luftführung und die Regelung gelegt wird.

Das Modul Klimagerät besteht im Wesentlichen aus den Hauptkomponenten (siehe auch ◘ Abb. 6.110):

- Frischluft-/Umluftgehäuse,
- Gebläse,
- Filter,
- Verdampfer zur Temperatursenkung und Luftentfeuchtung (siehe ► Abschn. 3.3.2),
- Heizkörper zur Temperaturerhöhung (siehe ► Abschn. 3.3.2),
- optional elektrischer Zuheizer (PTC) (siehe ► Abschn. 3.3.2),
- Regeleinrichtung zur Temperatureinstellung,
- Luftverteilung (Klappen an Auslässen).

Die Grundfunktionen eines Klimagerätes können wie folgt charakterisiert werden:

- Luft fördern,
- Luft reinigen,
- Luft temperieren und entfeuchten,
- Luft verteilen.

#### 6.4.3.2.1 Funktionen des Klimagerätes – Luft fördern

Im Frischluftbetrieb wird die Luft vom Gebläse über Öffnungen in oder an der Motorhaube über eine Wasserabscheidung in das Klimagerät angesaugt. Durch die Luftverteilklappen wird die inzwischen temperierte Luft über Kanäle und Luftauslässe in die Kabine gefördert. Nach der Durchströmung der Kabine gelangt die Luft über Öffnungen im Heckbereich, die Entlüftung, wieder ins Freie. Bedingt durch den Druckabfall in der Entlüftung baut sich im geschlossenen Fahrzeug ein leichter Überdruck von ca. 20 Pa auf, der ein Einströmen von nicht temperierter und ungereinigter Luft durch Undichtigkeiten verhindert. In Bereichen in denen aufgrund der aerodynamischen Gegebenheiten bei Fahrt ein hoher Staudruck entsteht, wie z. B. im Stirnwandbereich, wird die Kabine besonders sorgfältig abgedichtet. Vor allem bei kalten Außentemperaturen führt direkt eindringende Außenluft zu sehr unangenehmen Zugerscheinungen.

◘ Abb. 6.111 zeigt einen typischen Druckverlauf von der Ansaugung bis zur Entlüftung.

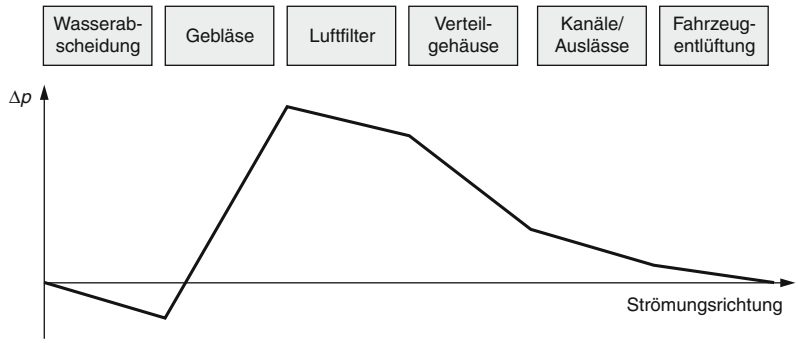



**Abb. 6.111** Druckverlauf bei der Kabinendurchströmung

In der Wasserabscheidung wird die angesaugte Frischluft vor dem Eintritt in die Kabine und ins Klimagerät von mitgerissenen Wassertropfen und Schnee getrennt. Dies erfolgt durch Umlenkungen oder durch Reduzierung der Luftgeschwindigkeit. Die Luft soll dem Klimagerät möglichst tröpfchenfrei zugeführt werden.

Die Wasserabscheidung ist im Allgemeinen vor der Kabine im Motor- oder Aggregateraum angeordnet. Der Ansaugbereich der Außenluft befindet sich meist unmittelbar am unteren Ende der Frontscheibe.

Der nachfolgende Gebläsetrakt beinhaltet das Gebläse, sowie das Frischluft-Umluftgehäuse, in welchem Klappen zur Umschaltung von Frisch- auf Umluft vorgesehen sind. Die Umluft wird im Cockpitbereich aus dem Kabineninneren angesaugt. Umluft wird vor allem zur schnelleren Kabinenabkühlung sowie zur Abschottung gegen schlechte Außenluftqualität eingestellt. Ein Luftgütesensor für die Außenluft wird heute häufig genutzt um, z. B. zur Vermeidung von unangenehmen Geruchsereignissen, automatisch auf Umluft umzuschalten.

Im Zuge der Effizienzsteigerung der Klimatisierung wird versucht, den Umluftanteil zu vergrößern. Die bereits temperierte Umluft ist mit weniger Energieeinsatz auf Wunschtemperatur zu halten verglichen zur fortlaufenden Temperierung der Außenluft. Der sinnvolle Umluftanteil wird nach oben begrenzt durch den benötigten Frischluftanteil zur Aufrechterhaltung des Sauerstoffgehaltes der Innenluft und durch den sich bei Umluft einstellenden Feuchtegehalt, der zu Scheibenbeschlag führen kann.

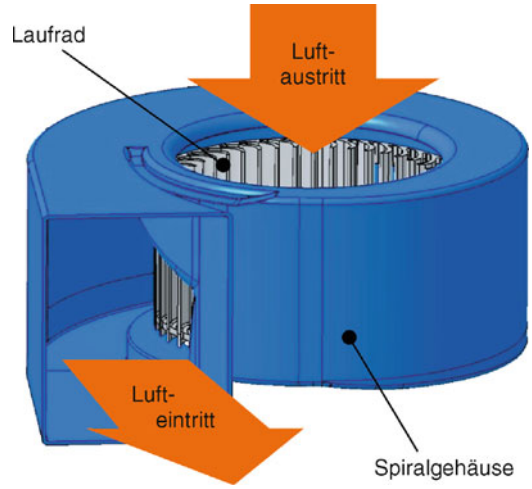



**Abb. 6.112** Gebläse mit Spiralgehäuse

Das Gebläse, ausgeführt als Radialgebläse, (Abb. 6.112) besteht aus einem Lüfterrad, dem Spiralgehäuse und einem Motor. Der Gebläsemotor kann als Permanentmagnetmotor oder als bürstenloser BLDC-Motor ausgeführt sein.

Zur Luftmengenvariation erfolgt die Ansteuerung des Motors über Vorwiderstandsgruppen mit entsprechender Stufigkeit oder zunehmend stufenlos über elektronische Regler.

Je nach Kabinengröße werden die Gebläse für das Abkühlen oder Aufheizen auf eine maximale Luftmenge von 7 bis 11 kg/min ausgelegt. Im statio-

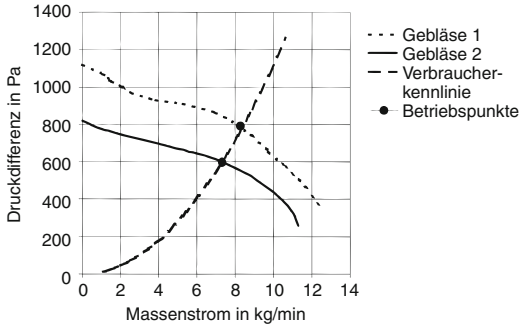



**Abb. 6.113** Gebläse und Verbraucherkennlinie

nären Fall werden deutlich geringere Luftmengen benötigt. Zur Auswahl des passenden Gebläses wird die für ein Fahrzeug erforderliche Luftmenge mit den Druckabfällen des Gesamtsystems in einer sogenannten Verbraucherkennlinie (Abb. 6.113) aufgetragen und mit den Leistungswerten des Gebläses, den Gebläsekennlinien, abgeglichen, so dass ein Gebläse ausgewählt werden kann, welches den vorgegebenen Betriebspunkt erreicht.

Da das Gebläse durch seine Stromaufnahme und als Hauptakustikquelle im Zentrum der Bemühungen um Energieeffizienz und geräuscharme Klimatisierung steht, werden erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaufwände zur Weiterentwicklung getrieben.

#### 6.4.3.2.2 Funktionen des Klimagerätes – Luft reinigen

Zum Komfort- und Gesundheitsbedürfnis des Autofahrers gehört auch eine entsprechende Luftgüte – Luftverunreinigungen und unangenehme Gerüche sollen nicht in die Kabine gelangen.

Die Partikelbelastung der angesaugten Luft ist nur zum Teil dem Straßenverkehr zuzuordnen; unerwünschte Pollen müssen von den sogenannten Partikelfiltern ebenso abgeschieden werden wie normaler Straßenstaub.

Das Filtermaterial besteht aus ein- oder mehrlagigen synthetischen Mikrofaservliesen, die nach Fraktionsabscheidegrad, Staubkapazität und Strömungswiderstand spezifiziert werden.

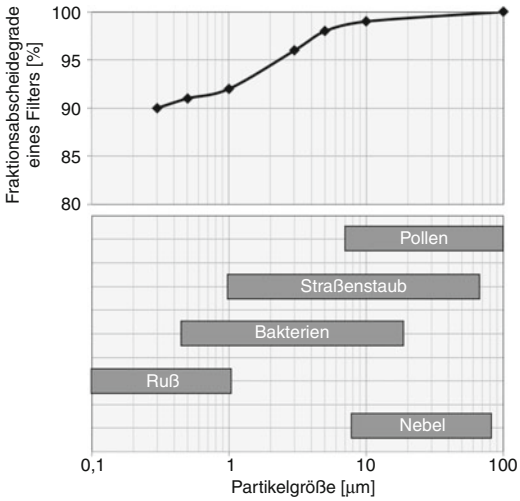



**Abb. 6.114** Partikelgrößen und Abscheidegrade

Abb. 6.114 zeigt die Fraktionsabscheidegrade eines Filters sowie das Größenspektrum verschiedener Partikel.

Gasförmige Luftverunreinigungen und Gerüche lassen sich durch Hybridfilter reduzieren, die zusätzlich zum Partikelfiltermaterial Aktivkohle enthalten (Abb. 6.115). Die Funktion der Aktivkohle beruht auf der enormen wirksamen Oberfläche von etwa 1000 $m^2$/g. Die Auslegung der Gesamtschicht erfolgt nach der Adsorptionskapazität bzw. der Adsorptionseffizienz und dem zulässigen luftseitigen Druckabfall des Filters.

Generell ist wichtig, dass sowohl die Frischluft als auch die Umluft gefiltert wird. Aufgrund der nicht zu vernachlässigenden Belastung der Umluft hat sich gegezeigt, dass eine reine Frischluftfiltration aus Komfort- und Gesundheitsgründen als nicht ausreichend bewertet werden können. Luftverunreinigungen können auch zu Korrosionsangriffen am Verdampfer führen oder diese zumindest begünstigen. Die Forderung nach einer Frisch- und Umluftfiltration führt dazu, dass Filter nach den Frischluft-/Umluftklappen, entweder saugseitig direkt vor, oder druckseitig nach dem Gebläse anzuordnen sind.

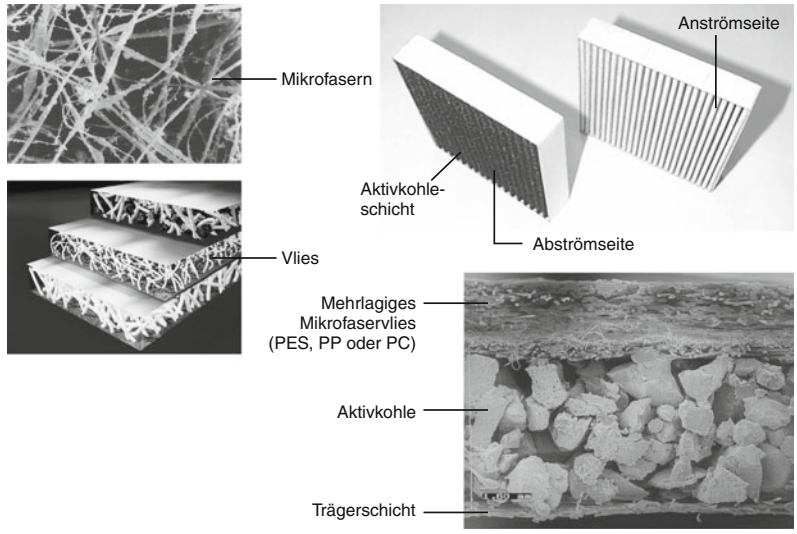



**Abb. 6.115** Partikel- und Hybridfilter

Die Nutzungsdauer von Filtern beträgt ca. 30.000 bis 50.000 km Fahrleistung, sollte allerdings 2 Jahre nicht überschreiten.

#### 6.4.3.2.3 Funktionen des Klimagerätes – Luft temperieren und entfeuchten

Die gereinigte Luft strömt anschließend durch den Verdampfer und wird dort bei Bedarf abgekühlt. Da kühlere Luft deutlich weniger Luftfeuchtigkeit aufnehmen kann als wärmere, wird ein Teil der Kälteleistung nur dazu verwendet, die Luft zu entfeuchten. Das abgeschiedene Kondenswasser fließt durch Öffnungen an der Unterseite des Klimagerätes aus dem Innenraum ins Freie ab. Die minimale Lufttemperatur nach Verdampfer sollte ca. 2 °C nicht unterschreiten. Bei niedrigeren Temperaturen würde das Kondenswasser im Verdampfer gefrieren und den Luftstrom durch diesen blockieren. Es ist speziell darauf zu achten, dass die Lufttemperatur nach dem Verdampfer besonders homogen ist, um maximale Kälteleistung ohne Vereisungserscheinungen zu erzielen.

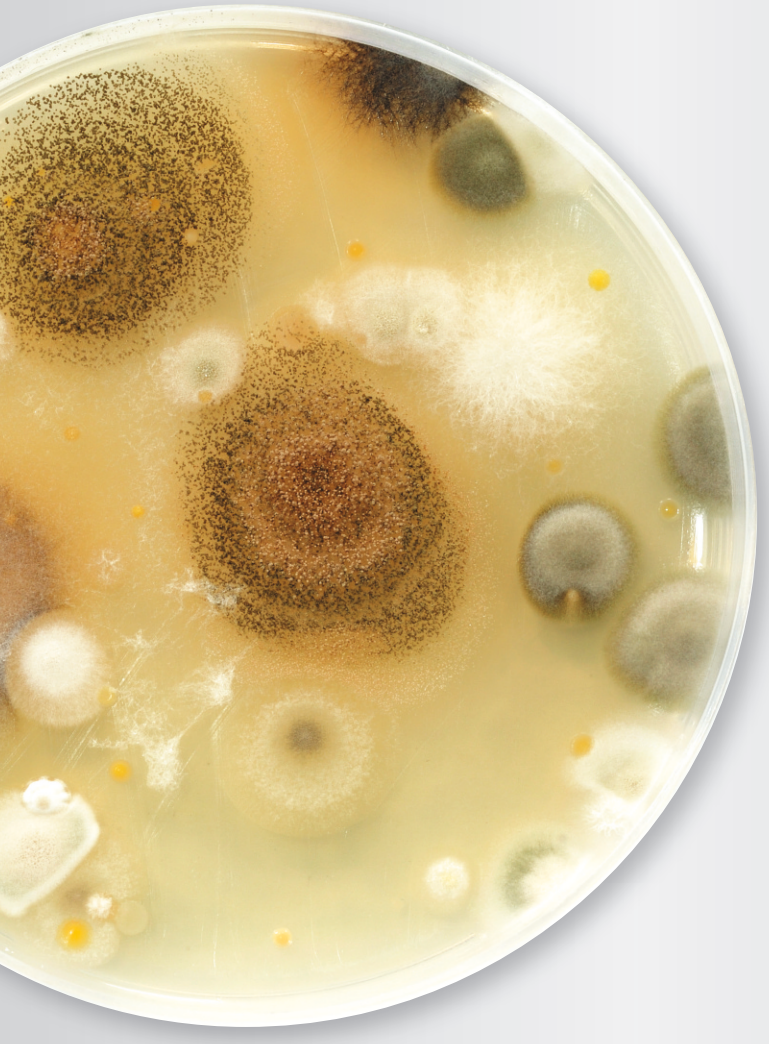
Nach dem Verdampfer wird der Luftstrom ganz oder zum Teil dem nachfolgenden Heizkörper zur Erwärmung zugeführt, um die gewünschten Auslasstemperaturen einzustellen. Hierbei sind zwei Varianten in Anwendung:

- Bei der wasserseitigen Regelung (siehe Abb. 6.116) wird der Volumenstrom des heißen Motorkühlmittels in den Heizkörper über kontinuierlich, manuell oder elektrisch, angesteuerte Ventile oder über quasikontinuierliche Taktventile eingestellt. Die Wärmemenge wird somit über den Volumenstrom des Kühlmittels gesteuert. Die gesamte Luftmenge strömt über den Heizkörper.
- Bei der luftseitigen Regelung (siehe Abb. 6.117) wird der Heizkörper kontinuierlich mit dem vollen Kühlmittel-Volumenstrom des Heizkreislaufes durchströmt. Der Luftstrom wird nach dem Verdampfer in zwei Teilluftströme geteilt, von denen einer durch den Heizkörper, der andere am Heizkörper vorbeigeführt wird. Mittels der Temperaturmischklappen können die Teilluftströme stufenlos eingestellt werden. Nach dem Heizkörper wird die im Heizkörper erwärmte Luft mit dem zweiten kälteren Teilluftstrom im sogenannten Mischraum vereinigt.

Im Mischbetrieb werden warme und kalte Luft so in den Mischraum gelenkt, dass aus den drei Hauptaustrittsebenen – Fußraum, Belüftungsdüsen im Cockpit und zu den Scheiben – die Luft mit

NEUE VDI RICHTLINIE FÜR KLIMAANLAGEN

# BYE, BYE BAKTERIEN



**Sehr geehrte Leserin,**
**sehr geehrter Leser,**

der VDI hat im Mai 2015 die Richtlinie 6032 „Hygieneanforderungen an die Lüftungstechnik in Fahrzeugen zur Personenbeförderung" neu gefasst und veröffentlicht. Damit umfasst die regelmäßige Wartung einer Klimaanlage neben der Technik auch die Hygiene.

Bei nicht regelmäßig gereinigten Klimaanlagen gelangen gesundheitsschädliche Schimmelpilze, Keime und Bakterien über das Lüftungssystem in den Fahrzeuginnenraum.

Verwenden Sie das ContraSept® Reinigungs System von TUNAP.

Wir erfüllen die neuen Hygiene-Anforderungen der Richtlinie 6032. ContraSept® ist Testsieger* für die Reinigung von Verdampfer und Pollenfilterumgebung.

*getestet nach den Vorgaben des Deutschen Allergie- und Asthmabundes

TUNAP | Chemie, die bewegt.

ContraSept®

CONTRA-SEPT.COM

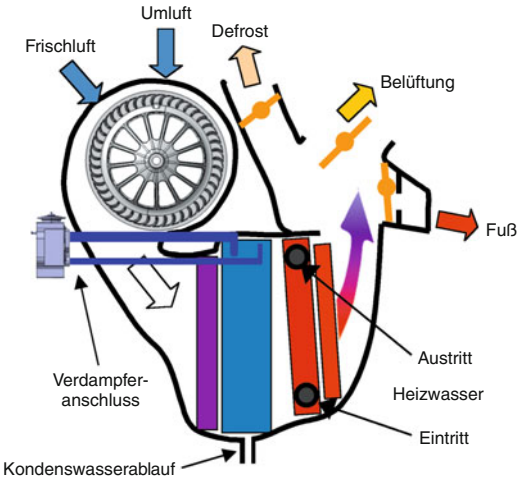



**Abb. 6.116** Schnitt Klimagerät wasserseitige Steuerung

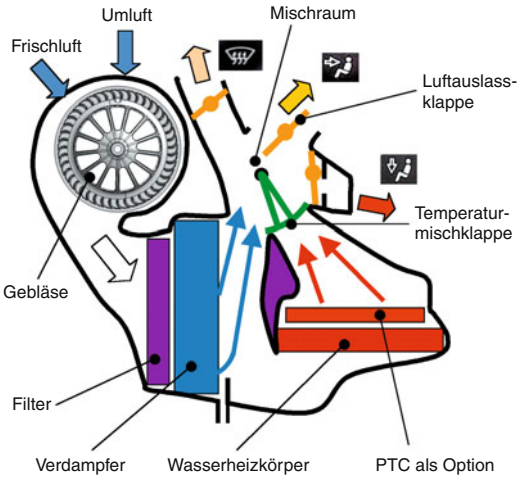



**Abb. 6.117** Schnitt Klimagerät luftseitige Steuerung

verschiedenen Temperaturen in die Kabine strömt. Dies ermöglicht eine als angenehm empfundene Temperaturschichtung in der Kabine „kühler Kopf und warme Füße".

Diese luftseitige Regelung besitzt eine besonders schnelle Ansprechcharakteristik, eine gute Regelbarkeit und eine Unempfindlichkeit gegenüber Drehzahlsprüngen des Fahrzeugmotors (Änderungen im Kühlmittelvolumenstrom). Allerdings benötigt diese Bauart etwas mehr Bauraum und Abstimmungsaufwand für den Mischraum.

Ein Nachteil dieser Ausführung ist eine im maximalen Kühlbetrieb nicht gewünschte Luftaufwärmung der kalten Luft nach dem Verdampfer um ca. 1 bis 3 °K durch den dauerhaft heißen Wasserwärmetauscher.

Heute wird überwiegend die luftseitige Variante eingesetzt.

Kann der Klimakompressor und somit der Kältekreislauf nur aus- und eingeschaltet werden, wird die Luft im Verdampfer entweder gar nicht oder aber maximal, also auf ca. 2 °C, abgekühlt. Soll die Luft im Klimagerät nur geringfügig gekühlt werden, z. B. von 25 °C auf eine Austrittstemperatur von 15 °C, wird die Luft im Verdampfer zunächst auf ca. 2 °C gekühlt, um anschließend im Heizkörper auf 15 °C erwärmt zu werden.

Geregelte Klimakompressoren erlauben es heute, die Verdampfer-Austrittstemperatur auch wärmer einzustellen, bis zu Temperaturen über 10 °C. Damit kann bedarfsgerechter und somit energetisch günstiger gekühlt werden. Weiterhin kann so auch der Grad der Luftentfeuchtung direkt beeinflusst werden.

Gezieltes Entfeuchten, z. B. zur Verhinderung von Scheibenbeschlag, wird als Reheat-Betrieb bezeichnet. Feuchte Luft wird abgekühlt, somit entfeuchtet und anschließend im Heizkörper erwärmt. Trockene warme Luft wird in die Kabine gefördert.

#### 6.4.3.2.4 Funktionen des Klimagerätes – Luft verteilen

Der Luftstrom aus dem Klimagerät wird, gesteuert von den Luftauslassklappen, über Kanäle und Düsen den drei Hautaustrittsebenen zugeführt:

- Fußraum,
- Belüftungsebene (Mittel- und Seitendüsen),
- Defrost (Front- und Seitenscheiben).

Bei aufwändigeren Anlagen kommen entsprechende Abgänge für die Fondbelüftung mittig und/oder in den B-Säulen sowie der Fondfußraum dazu (Abb. 6.118 und Abb. 6.119).

Für verschiedene Betriebszustände haben sich verschiedenen Luftverteilungen bewährt.

Zum Kühlen und Lüften wird hauptsächlich die Belüftungsebene genutzt. Im Heizungsfall wird die Luft zu den Fußraum- und anteilig zu den Defrostausströmern geführt.

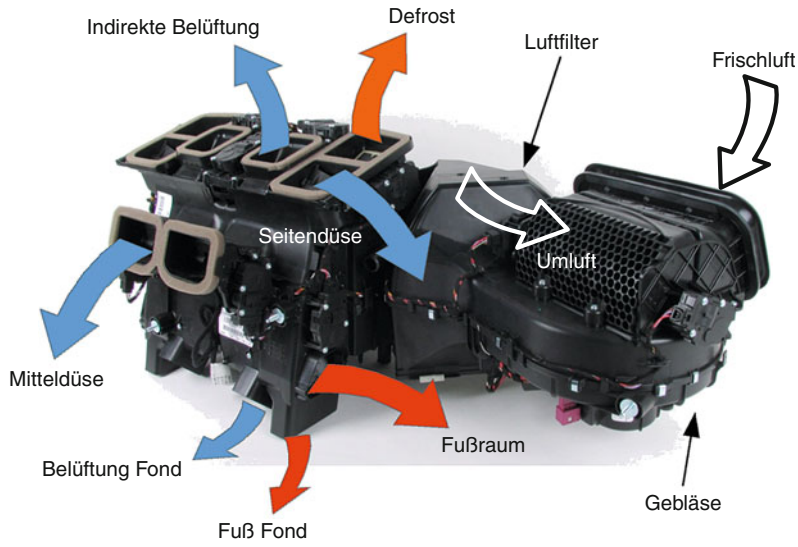



**Abb. 6.118** Luftauslässe am Klimagerät

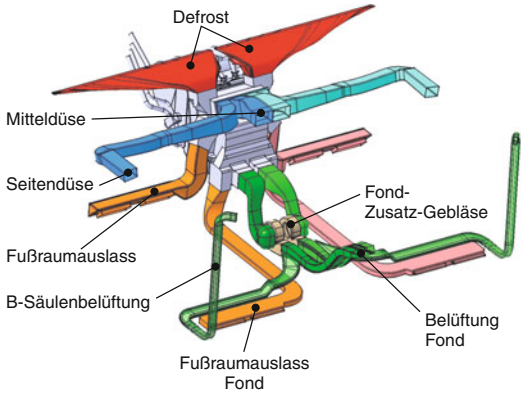



**Abb. 6.119** Luftführung vom Klimagerät zu den Auslässen

Durch kinematische Abhängigkeiten zwischen den Klappen oder durch Einzelaktuatoren werden viele weitere Konstellationen genutzt.

Vor allem beim Kühlen kann die Luftströmung aus der Mittel- und Seitendüse aufgrund von Zugerscheinungen als unangenehm empfunden werden. Um Fahrer und Beifahrer nicht direkt anzublasen wird in manchen Fahrzeugen eine zusätzliche indirekte Belüftung auf der Oberseite des Cockpits vorgesehen. Weiterhin sind sogenannte Komfortdüsen in Verwendung, welche anstelle der konventionellen Düsen verbaut werden und einen zusätzlichen zugfreien Modus bereitstellen [231].

#### 6.4.3.2.5 Bauformen von Klimageräten

Bis auf wenige Ausnahmen sind Klimageräte für die Insassen nicht sichtbar im Cockpit verbaut. Dort belegen sie einen beträchtlichen Anteil des Bauraumes.

Bedingt durch unterschiedliche Fahrzeug-Konzepte und den für andere Einbauten, wie Airbags, Handschuhkasten und Infotainment, benötigten Einbauraum werden zwei wesentliche Bauformen für das Klimagerät genutzt:

- Bei der symmetrischen Bauform sind Gebläse, Verdampfer und Heizkörper hintereinander in Fahrzeuglängsrichtung symmetrisch zur Fahrzeugmitte angeordnet. Diese Anordnung führt zu günstigen Strömungsverhältnissen, hat Vorteile beim Druckabfall, benötigt aber entsprechenden Bauraum in Fahrzeuglängsrichtung. Aufgrund der Symmetrie werden keine Varianten für Links- und Rechtslenkerfahrzeuge benötigt.
- Weniger Bauraum in Fahrzeuglängsrichtung jedoch mehr in der Breite erfordert die asymmetrische Bauform. Hier sind Verdampfer und Heizkörper weiterhin mittig, das Gebläse

jedoch seitlich angeordnet (bei Linkslenkerfahrzeugen i. d. R. rechts). Für Links- und Rechtslenker wird jeweils eine eigene Variante benötigt.

#### 6.4.3.2.6 Mehrzonigkeit und Zusatzgeräte

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Funktionalitäten lassen sich auf mehrere Zonen des Fahrzeuges erweitern – bereits in der unteren Mittelklasse ist eine links/rechts getrennte Temperatursteuerung für den Frontbereich oft schon Standard. Dazu wird im Klimagerät durch Duplizierung der Temperatursteuerungsmechaniken der Luftstrom in 2 Zonen aufgeteilt. Diese Möglichkeit ist auch für die Luftverteilung gegeben. Ausgehend von der einfachen einzonigen Basis-Anlage über zweizonige (links/rechts), dreizonige Anlagen (links/rechts/Fond) bis hin zur Anlage mit 4 getrennten Temperatur- und Luftverteilzonen für den Front- und Fondbereich sind heute Klimageräte verfügbar. Durch einen modularen Aufbau des Klimagerätes lassen sich Konzepte für komplette Fahrzeugplattformen verwirklichen.

Neu ist die individuelle Anpassung der Fußraumtemperatur, die sog. „variable Schichtung". Damit kann beispielsweise für Personen mit kälteempfindlichen Füßen die Fußraumaustrittstemperatur bei unveränderter Grundeinstellung angehoben werden.

Um auch große Fahrzeugkabinen gleichmäßig zu klimatisieren werden zusätzliche Geräte im Innenraum plaziert. Diese Zusatzgeräte reichen vom kleinen Zusatzgebläse, welches die Luftverteilung des Frontgerätes nach hinten unterstützt, bis hin zu kompakten eigenständigen Klimageräten mit Gebläse, Verdampfer, Heizkörper und Luftverteilung.

Zur Heizungsunterstützung werden auch kleine PTC-Zuheizer, teilweise kombiniert mit extrem flachen Gebläsen, in den Luftverteilkanälen eingesetzt (siehe auch ► Abschn. 3.3.2, ◘ Abb. 6.120).

### 6.4.3.3 Steuerung und Regelung von Klimaanlagen

In der Klimaregelung sind zusammengefasst die Bedienelemente zur Sollwertvorgabe, die Sensoren und Temperaturfühler zur Erfassung des aktuellen Zustandes von Kabine, Umgebung und Klimasystem, sowie die Stellglieder wie Aktuatoren, Gebläsemotor, Klimakompressor und PTC.



◘ **Abb. 6.120** Zusatz-Gebläse und Mini-PTC (Werkbild Behr)

#### 6.4.3.3.1 Regelung und Automatisierungsgrade

Klimaanlagen lassen sich in 3 Klassen einteilen:

- manuelle,
- halbautomatische,
- vollautomatische.

Manuelle Klimaanlagen werden heute meist noch in Kleinfahrzeugen angeboten. Dabei werden über mechanische Stellelemente im Bediengerät die Temperatur und die Luftverteilung, z. B. mittels Bowdenzügen oder Flexwellen, eingestellt. Zur Luftmengeneinstellung wird, meist über Drehsteller am Bediengerät, eine Vorwiderstandsgruppe am Gebläse angesteuert. Häufig ist zusätzlich für den Vereisungsschutz des Verdampfers eine einfache Regelung vorgesehen.

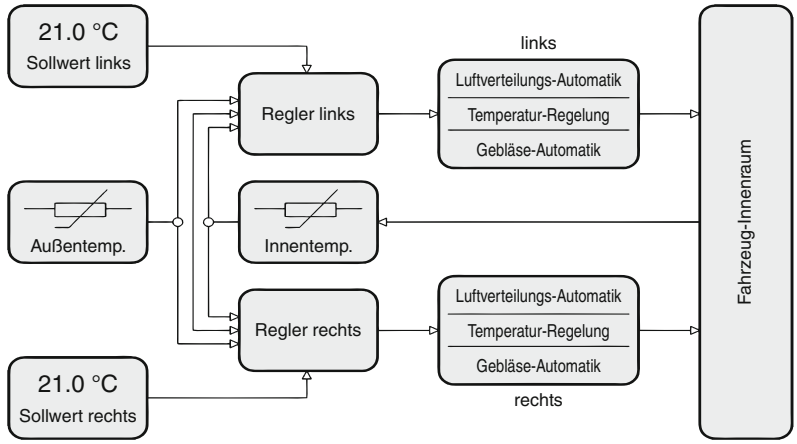



**Abb. 6.121** Regelung einer vollautomatischen Klimaanlage

Die Passagiere müssen das Klimagerät entsprechend ihrer Klimatisierungswünsche selbst manuell am Bedienteil einstellen.

Bei der halbautomatischen Klimaanlage wird zumindest die Innenraum-Temperatur auf einen voreingestellten Wert eingeregelt. Die Klima-Elektronik errechnet dann, z. B. aus der vorgegebenen Solltemperatur und der aktuellen Innenraumtemperatur, die benötigte Ausblastemperatur. Diese wird daraufhin durch das Mischungsverhältnis von warmer und kalter Luft (bei luftseitiger Regelung) oder über den Kühlmittelvolumenstrom (bei wasserseitiger Regelung) eingestellt.

Vollautomatische Klimaanlagen regeln zusätzlich zur Temperatur die Gebläseleistung und somit die Luftmenge und in der Maximalausführung auch die Luftverteilung. Das Gebläse wird hierbei stufenlos über einen elektronischen Regler eingestellt. Die Klappen für die Luftverteilung werden über Stellantriebe ebenfalls stufenlos in Position gebracht.

Der Regelkreis ist so aufgebaut (siehe Abb. 6.121), dass die Automatikfunktion möglichst schnell einen hohen thermischen Komfort für die Insassen einstellt und jeweils den sich verändernden Rahmenbedingungen anpasst [237]. Darüber hinaus gewinnt die energieeffiziente Klimaregelung ohne Komforteinbußen zunehmend an Bedeutung, da damit der Kraftstoffverbrauch im realen Fahrbetrieb reduziert werden kann [238].

Entsprechende Sensoren für die Klimatisierung (siehe ▶ Abschn. 6.4.3.2.3) sowie zusätzliche Daten (z. B. Außentemperatur, Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl, Kühlmittel-Temperatur, länderspezifische Einstellungen, etc.), die heute im Fahrzeugnetzwerk zur Verfügung stehen, werden im Regelkreis zur Störgrößenaufschaltung berücksichtigt.

Der eigentlichen Komfortregelung für Lufttemperatur, -menge und -verteilung sind weitere Steuerungs- und Regelungsfunktionen überlagert:

- Beschlagfreihaltung der Scheiben: Luftmenge an die Frontscheibe, Luftentfeuchtungsfunktion über den Verdampfer durch variable Leistungssteuerung des Kompressors (bei trockener Zuluft ist keine Entfeuchtung erforderlich → kraftstoffsparender Betrieb möglich),
- Defrostfunktion zum schnellen Abtauen der Scheiben,
- Frischluft-Umluftautomatik zur schnelleren Abkühlung durch Rezirkulation der bereits kühleren Kabinenluft oder zur Abschottung gegen schlechte Luftqualität von außen über einen Luftgütesensor,
- Kompressorlaststeuerung bei Beschleunigungsvorgängen,
- Steuerung von Zuheizeinrichtungen.

### 6.4.3.3.2 Bedienung

Unabhängig vom Automatisierungsgrad müssen dem System Sollwerte vorgegeben werden. Im einfachsten Fall einer manuellen Klimaanlage entspricht die Bedienung den Grundfunktionen des Klimagerätes. D. h. folgende Bedienfunktionen sind erforderlich: Ein- und Ausschalten der Klimaanlage, die Luftmenge erhöhen oder vermindern, die Temperatureinstellung ändern, die Luftverteilung ändern und auf Frischluft oder Umluft stellen.

Mit steigendem Automatisierungs- bzw. Ausstattungsgrad kommen weitere Funktionen hinzu, z. B. links/rechts Trennung, Restwärmeausnutzung (Nutzung der im Kühlmittel gespeicherten Energie bei kurzen Parkphasen), Luftgüteautomatik usw. (◘ Abb. 6.122).

Zur Temperatureinstellung ist eine Symbolik mit „rot“ und „blau“ entsprechend der Zuordnung „warm“ und „kalt“ allgemein verständlich, mit automatischer Temperaturregelung werden auch die entsprechenden „°C“-Sollwerte angezeigt. Die Luftverteilungssymbolik erfolgt mit Piktogrammen, auf denen die entsprechende Ausströmebene ersichtlich ist. Die Gebläseleistung wird oft mittels eines stilisierten Laufrades dargestellt, je höher die Luftmenge, umso mehr gefüllt dargestellte Gebläseschaufeln.

Es gibt grundsätzlich keine Standardbedienelemente für die Klimatisierung hier ist die Einbindung in das Gesamtbedien- und Designkonzept (siehe ► Abschn. 6.4.1) des Fahrzeugs mit durchgängigen Bedienelementen, Anzeigen und Beleuchtungen erforderlich.

### 6.4.3.3.3 Aktuatorik, Sensorik

Die stufenlos verstellbaren Klappen im Klimagerät werden mit kompakten elektrischen Gleichstrom- oder Schrittmotoren angetrieben, wobei Drehmomente zwischen etwa 10 (einfache mittig gelagerte Klappe) und 40 N cm (Umluftklappe mit Staudruckbelastung) erforderlich sind. Zur genauen Erkennung der Klappenposition wird bei Gleichstrommotoren häufig ein integriertes Potentiometer verwendet oder die Stromvariationen der Kommutatorrotation werden im Bediengerät elektronisch ausgewertet (pulse/ripple count). Bei den Schrittmotoren werden die Verstellschritte gezählt. Bei sogenannten direct-steppern befinden sich diese Zähler sowie Ansteuerung und Stromtreiber der Motorspulen im Bedien-/Steuergerät, bei Schrittmotoren mit Bussystem sind diese Funktionen auf einem ASIC im Aktuator integriert. In komplexen Anlagen mit vielen Klappen setzt sich zunehmend die LIN-Bus-Ansteuerung (LIN: Local Interconnecting Network) durch, um die Verkabelung und den Aufwand im Steuergerät gering zu halten.




◘ **Abb. 6.122** Bedienelemente

Der Klimaanlage werden primär folgende Sensoren zugeordnet (die Sensorik des Kältekreises ist in ► Abschn. 3.2 beschrieben):

**Verdampferfühler** – misst die Lufttemperatur direkt nach Verdampfer zum Schutz gegen Vereisung, auch benötigt zur gleitenden Kälteleistungsregelung. Besteht aus einer einfachen NTC-Pille (NTC: Negative Temperature Coefficient) mit Gehäuse und Schutz gegen Feuchtigkeit.

**Ausblasfühler** – misst die Temperatur der Luft nach Heizkörper (bei wasserseitigen Anlagen) oder die der in den Innenraum eingeblasenen Luft.

**Innenraumtemperaturfühler** – angeordnet im Bediengerät, Cockpit, oder im Bereich der Dachbedieneinheit; oft belüftet durch ein Miniaturgebläse. Zunehmend auch unbelüftete Sensoren, die mit Softwarealgorithmen kompensiert werden.

**Solarsensor** – erfasst die Sonneneinstrahlungsintensität und meist auch den Einfallswinkel. Der besonnte Bereich wird automatisch etwas stärker und mit kühlerer Luft angeblasen. Bei mehrzonigen Klimageräten werden auch mehrzonige Solarsensoren eingesetzt.

**Feuchtesensor** – dient zur Sicherstellung der Beschlagsfreiheit durch bedarfsgerechte Entfeuchtung mittels gleitender Kälteleistungsregelung (siehe auch [237–239]).

**Luftgütesensor** – erfasst schädliche Abgase (über Leitgase, meist CO und $NO_x$) und dient zur automatischen Abschottung über die Umluftklappe [242].

## 6.4.4 Fahrzeuginnenausstattung

### 6.4.4.1 Zur Geschichte des Innenraums

Seitdem die Menschen Hilfsmittel zur Fortbewegung nutzen, haben Sie den Wunsch, den Innenraum dieser Vehikel so bequem wie möglich zu gestalten. Lange Zeit war komfortables oder gar luxuriöses Reisen nur auf Schiffen möglich. Landfahrzeuge wurden meist für den Transport von Waren verwendet. Mit der Erfindung der Federung im 16. Jh. wurde aus dem Warentransporter ein Reisemobil, das gegenüber Fußgänger und Reiter einen Vorteil hatte: Man war vor Wind und Wetter geschützt. Linierer, Schreiner, Kürschner – quasi die ersten Zulieferer – bemühten sich den Reisekomfort stetig zu verbessern. Die Kutsche wurde zum Statussymbol.

Auch die ersten Automobile waren nichts anderes als motorisierte Kutschen [243]. Stetig steigende Fahrgeschwindigkeiten verlangten eine erste Ergänzung im Innenraum, nämlich Anzeigeinstrumente.

Ab 1930 entdeckte man den „Luftwiderstand" auch für die Serienentwicklung. Autos bekamen geschwungene Linien, die sich auf den Innenraum übertrugen. Bleche lösten den Hauptwerkstoff Holz ab. Das nackte Blech wurde an Türen und Seiten mit Stoff überspannter Pappe verschönert, das Dach mit einem in Drahtspriegeln verspannten Stoff verkleidet. Die Sitze waren durchgehende Bänke.

Erst etwa 1950 gab es Einzelsitze für vorne, die auch längs verstellbar waren und beim Fahrer eine verstellbare Lehne haben mussten. Heizungen gab es meist nur gegen Aufpreis. Klobige Röhrenradios brachten die Welt der Musik in den Innenraum.

Anfang der 70er Jahre fanden vermehrt moderne Kunststoffe Einzug in den Innenraum. Bleche wurden zunehmend mit Kunststoffteilen verblendet. 1979 gab es in Europa den ersten elektrisch verstellbaren Sitz. Die damals hohe Zahl von Verkehrstoten zwang die Hersteller zu mehr Sicherheitsmaßnahmen: Automatikgurte und Polsterungen wurden eingeführt. Anfang der 80er Jahre kam die Airbag-Technologie in Serie. Die Innenräume differenzierten sich mehr und mehr durch anspruchsvolle Farbeffekte bei Verkleidungen und Textilien.

**Tabelle 6.30** Zur Bestimmung des Wohlfühlfaktors

| subjektiv | objektiv |
|---|---|
| Optik (visueller Eindruck), Olfaktorik (Geruch), Haptik (Anfassqualität), Akustik (Klangfarbe) | Ergonomie, Thermischer Komfort, Sicherheit, Akustik (Lautstärke) |

Die 90er Jahre waren geprägt von der Zunahme von E/E Systemen und der Variabilität der Innenraumkonzepte. Beide Trends werden heute ergänzt durch den Wunsch des Kunden nach Individualität. Der Innenraum spielt mehr denn je bei der Kaufentscheidung eine wichtige Rolle [249, 252, 256]: Das Innenraumdesign soll Emotionen wecken, Komfort, Sicherheit und Funktionalität dürfen dabei nicht leiden – alles muss verschmelzen und die Markenidentität ausstrahlen [249].

### 6.4.4.2 Anforderungen an Innenraum und Komponenten

Diese Wohlfühlatmosphäre [250, 256] wird von subjektiven und objektiven Faktoren (Tab. 6.30) bestimmt. Für die daraus folgenden möglichst messbaren Anforderungen muss der Konstrukteur die Synthese aus konstruktiver Machbarkeit und Kostenverträglichkeit finden. Hinzu kommen Restriktionen für den zur Verfügung stehenden Bauraum und ein Zielgewicht der Innenraumkomponenten.

#### 6.4.4.2.1 Optik

Unter Optik ist der visuelle Gesamteindruck, auch Charakter des Innenraums, zu verstehen, der sich z. B. zwischen den Attributen sportlich – nüchtern – luxuriös bewegt (vgl. Design ▶ Abschn. 4.1). Der Kunde kann heute aus einer Fülle von Material- und Farbkombinationen wählen. Aktuell geht ein Trend zur Mehrfarbigkeit und dem Einsatz natürlicher Stoffe [249, 252]. Für den Konstrukteur bedeutet das:

- Beherrschen verschiedener Verfahren (Lackieren, Tiefziehen/Kaschieren Folien, Färben im Werkzeug),
- Ergänzung von Oberflächen durch natürliches Material (textile I-Tafel, Stein-Dekorleisten, Leder hinterschäumt, Kleinteilbelederung).

Für die optischen Anforderungen an Geometrie/Verarbeitung bedeutet das:

- Markenidentität/Wiedererkennungsfaktor muss bei Neukonstruktion berücksichtigt werden,
- Spaltmaß b. Premium 0 bis 1 mm (u. U. bis 3 mm),
- optische Passgenauigkeit (Übergänge Türbrüstung/Cockpit; Säulenverkleidung/Himmel),
- Strichrichtung von Textilien.

Abgerundet wird die Optik durch die Beleuchtung [248]. Durch die Ausleuchtung bestimmter Bereiche wird der Innenraum spezifischer, erscheint größer und strukturierter (höhere Wertigkeit/Sicherheitsgefühl). Konstruktiv herausfordernd sind die Integration von Beleuchtungsmitteln in die Verkleidungsteile und die Entwicklung von individuellen bzw. markenspezifischen Beleuchtungskonzepten, auch als ambiente Beleuchtung bezeichnet, was die Anmutung des Innenraums erhöht. Diese Konzepte erfahren einen größeren Zuwachs. Zusätzlich zu der Hinterleuchtung von Anzeigen und Funktionstasten wird indirekte Beleuchtung eingesetzt, um den Insassen ein behaglicheres Raum-/Lichtgefühl im Tag-/Nachtdesign zu vermitteln [273, 274].

#### 6.4.4.2.2 Olfaktorik

Der Geruch ist eine subjektive Empfindung, die sich durchaus als positiv oder negativ bewerten lässt. Ein Olfaktorikteam untersucht während der Entwicklungsphase Materialproben, Bauteile (bis zu 500 pro Fahrzeug) und den gesamten Innenraum [245]. Die Materialien werden zwei Stunden unter Vakuumatmosphäre einer Temperatur von 80° ausgesetzt. Anschließend wird der Einzelgeruch, wie auch die Wechselwirkung von Werkstoffen überprüft. Die Geruchsproben bekommen Schulnoten von 1 (geruchslos) bis 6 (unerträglich). Für die Entwicklung des Innenraums bedeutet dies konkret, dass bestimmte Materialien, Werkstoffe oder Kleber nicht mehr oder nur bedingt zur Verfügung stehen. Ziel ist es, einen möglichst neutralen Duft zu erreichen. Vielfach werden die Innenräume auch unter dem Aspekt der Tauglichkeit für Allergiker ganz speziell entwickelt.

#### 6.4.4.2.3 Ergonomie

Die konstruktive Umsetzung der in ▶ Abschn. 6.4.1 gezeigten Anforderungen betrifft fast alle Baugruppen:

**Cockpit** – Das Infodisplay wandert von der Mittelkonsole in die I-Tafel – erfordert Umstellung d. Geometrie (Doppelhutzen, Aussparungen für klappbare/versenkbare Schirme/HUD, neue Ablagefächer),

**Verkleidungsteile** – Integration von mehr Bedienelementen in Tür-, Sitz-, Dachverkleidungen (durch mehr E/E-Applikationen); Integration von Kinematiklösungen, Ablagefächer,

**Sitze** – Mechanismen für Sitzverstellung (bis zu 18-Wege Verstellung → Integration zusätzlicher Aktoren [250, 260]); Entwicklung leicht justierbarer Sitzkonzepte mit Einhandbedienung (kein Ausbau von Einzelsitzen, ebener Laderaum)

**Gepäckraum** – variable Ladekonzepte für SUV.

Grundsätzlich gilt, dass die Ergonomie auch in Zusammenhang mit der Haptik zu sehen ist. Auch die Auswirkung von Innenraumbeleuchtungen auf die subjektive Befindlichkeit von Fahrer und Passagieren ist hier zu berücksichtigen [265, 266]. Durch die gestiegene Anzahl der visuell übertragenen Informationen im Bereich des Cockpit, Center-Stack und Dachkonsole muss die Ablesbarkeit unter unterschiedlichen Bedingungen (Tag, Nacht, Sonne) sichergestellt werden [275, 276].

#### 6.4.4.2.4 Haptik

Die Haptik beinhaltet Bereiche der Physik, der Physiologie und der Psychologie [247]. Im Fahrzeuginnenraum ist zwischen der Anfassqualität der Bedienelemente und der Oberflächen zu unterscheiden. In beiden Fällen ergibt sich das Problem der Messbarkeit von Qualität (= subjektivem Empfinden) [246, 248, 249]. Seit einigen Jahren wird versucht, mit physikalischen Methoden die haptischen Eigenschaften der Materialien zu messen. Eine Messrobotic ermittelt die Drück-, Schiebe-, Zieh-, Dreh-Rückstellkräfte [246], die mit einer Bewertung durch Testpersonen verglichen werden. Die Bilanz aus beiden Methoden bildet die Grundlage für ein Lastenheft der Betätigungshaptik. Es beinhaltet u. a. die Punkte Leichtgängigkeit, mittlere Betätigungswege, definierte Endanschläge, exakte Führungen, Geräuscharmut und die eindeutige Rückmeldung am Schaltpunkt [253].

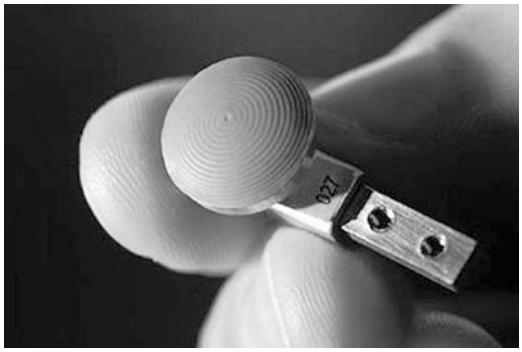


**Abb. 6.123** Papillartaster (künstliche „Fingerbeere“) zur Messung von Anfassqualität (Bild aus [254])

Ähnlich wird auch bei der Bewertung von Oberflächen vorgegangen [246, 254]. Zuerst werden die subjektiven Eindrücke von Testpersonen bezüglich bestimmter Materialproben festgehalten. Dabei wird „technische Narbung“ höherwertig eingestuft als eine unregelmäßige N. Gleiches gilt für weiches Leder gegenüber hartem Leder [254]. Dann werden die den haptischen Eindruck beeinflussenden Materialparameter (Abb. 6.123) wie statische Verformung, Rauigkeit, Dämpfung oder Reibwert ermittelt, teilweise mit einer Messgenauigkeit von bis zu 60 Nanometern [255]. So kann gefühlte Qualität in Zahlen ausgedrückt werden.

Der Ingenieur muss dann den Materialmix finden, der die Synthese aus angenehmer Haptik und vertretbaren Kosten bildet (siehe ► Abschn. 6.4.4.3). Die erforderliche Kratzfestigkeit steht dabei teilweise im Gegensatz zu den haptischen Anforderungen.

#### 6.4.4.2.5 Akustik

Wie beim Geruch ist ein geräuschloses Auto für die Insassen nicht angenehm (► Abschn. 3.4). Der Innenraumakustiker muss daher einen Kompromiss zwischen Schallisolierung und Sounddesign finden. Als grober Richtwert finden sich bei Autotests Messwerte für den Geräuschpegel im Innenraum, die zwischen 60 Dezibel (bei 100 km/h) und 80 Dezibel (180 km/h) liegen. Dies sagt wenig über die subjektive Qualität aus. Bei einem Sportwagen kann ein hoher lastabhängiger Geräuschpegel durchaus gewünscht sein. Um ein ausgewogenes Verhältnis der einzelnen Frequenzen zu bekommen, müssen bis zu 120 Bauteile im Innenraum berücksichtigt werden.

Dazu werden u. a. Schallabsorptions- und Schalldämmmessungen (Petite-Cabine), Verlustfaktormessungen (Vibrometer-Methode für Schäume) sowie Untersuchungen mit dem Laser-Scanning-Vibrometer durchgeführt. Eine gute Schallisolierung schlägt sich allerdings auf Gewicht (Körperschalldämpfungsschicht) oder Kosten (Alu-Polyolefin-Sandwich) nieder. Eine kosten- und gewichtsparende Alternative bilden PUR-Schäume [259]. Mit Akustik wird gleichzeitig ein Wertigkeitsgefühl vermittelt. Z. B. gibt es ein Akustik-Design für Schalter oder „satt“ schließende Handschuhkästen ohne klapperigen Schließmechanismus. Dabei spielen nicht nur die Materialauswahl sondern auch Konstruktionsprinzipien eine Rolle.

#### 6.4.4.2.6 Sicherheit

Insassen nehmen Sicherheitssysteme meist indirekt, d. h. über die Ausstattungsbeschreibung wahr (zu Grundlagen, Bestimmungen und Technik siehe ► Kap. 9). Sichtbare Airbagdeckel gelten heute als Zeichen für mindere Qualität. Daher ist man bestrebt, Airbags unsichtbar zu machen, dabei muss aber die problemlose Entfaltung sichergestellt sein. Außerdem gilt es, Bauraum für neue Sicherheitssysteme zu schaffen (Dachhimmel; Spurhalteassistent, Airbags dritte Sitzreihe, Laderaumsicherheit). Weitere konstruktive Herausforderungen ergeben sich durch die gesetzlichen Vorschriften für bestimmte Bereiche, die nicht durch einen Airbag gesichert werden können (Kopfstütze, Kniezone, Steifigkeit von Bodengruppen und Lehnen (siehe auch ► Abschn. 6.4.4.3)).

#### 6.4.4.2.7 Thermischer Komfort

Einfache Klimaanlagen sind im Kleinwagensegment fast Standard, in der Oberklasse geht nichts mehr ohne Mehrzonenklimaautomatik (► Abschn. 6.4.3). Die konstruktive Herausforderung liegt hier in der Integration des HVAC-Moduls im Cockpitmodul (inkl. Schnittstellenmanagement), in der Konstruktion der Luftkanäle (bspw. bis zur 3. Sitzreihe) und der Ausströmer (Vermeiden von Zugluft usw.). Eine Herausforderung im Premiumsegment

bertrandt

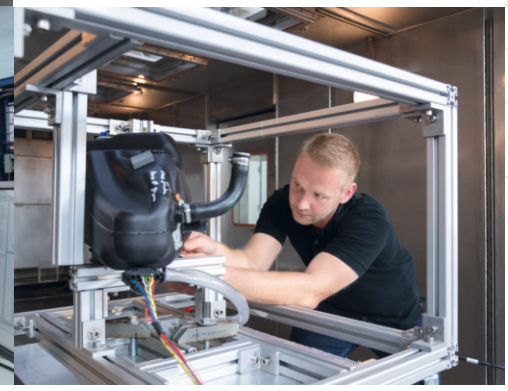
# BERTRANDT IST ...

DYNAMIK ... ENGINEERING-PARTNER ...
KUNDENORIENTIERUNG ... MOBILITÄT ...
INNOVATION ... KNOW-HOW



$CO_2$-Reduktion, Ressourcenschonung, Kosteneffizienz und innovative Mobilitätskonzepte sind zentrale Forderungen der mobilen Welt. Als einer der führenden Entwicklungspartner für die Automobil- und Luftfahrtindustrie unterstützen wir unsere Kunden entlang der gesamten Produktentstehung. Im Bertrandt-Engineering-Netzwerk stehen über 12.500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter international für kundenindividuelle Lösungen.





FÜR JEDEN KUNDEN DIE BESTE LÖSUNG.
www.bertrandt.com

ist die elektrische Ansteuerung des Ausströmers bei indirekter Belüftung [256, 260, 272].

#### 6.4.4.3 Baugruppen des Innenraums

Der Innenraum eines Fahrzeuges lässt sich durch sechs Baugruppen bzw. Module definieren, die jedoch konstruktiv stets in ihrer Gesamtheit zu betrachten sind.

##### 6.4.4.3.1 Cockpit/Tunnelkonsole

Hier sind die primären (Hutze/Lenksäule) und sekundären (Mittel-/Tunnelkonsole) Bedien- und Anzeigenelemente (Instrumente, Lichtschalter, Radio, Navibildschirm) untergebracht, ebenso die Airbagsysteme für Fahrer und Beifahrer. Zusätzlich zum klassischen Handschuhfach befinden sich heute weitere Staufächer in der Mittelkonsole sowie im oberen Bereich der Instrumententafel. Die Tunnelkonsole verfügt mittlerweile über deutlich mehr Funktionen als nur Schaltkasten und Handbremsenabdeckung, Telekomunikation- und Navigationssteuerung werden bevorzugt hier untergebracht, des Weiteren aufwendige Cupholder-Lösungen und Armauflagen.

Eine stärker werdende Bedeutung nimmt die Consumer Elektronik im Fahrzeug ein:

- Grafikdesigner fokussieren sich auch auf neue Bedien- und Anzeigekonzepte;
- die Positionierung und Ausführung des Monitors für Navigation und Bordcomputer wird neu bewertet;
- die Schnittstellen von Mobiltelefonen, externen Navigationsgeräten, Powerbooks werden mit der Fahrzeugelektronik gekoppelt;
- kapazitive Elemente übernehmen elektromechanische Funktionen. Für diese Funktionalitäten müssen entsprechende Bedien- bzw. Anzeigeelemente mit den dazugehörigen Bauräumen vorgesehen werden [277–281].

Das Cockpit ist ein überaus komplexes Bauteil des Innenraums (◘ Abb. 6.124). Es besteht aus den Hauptelementen Instrumententafel, Querrohrträger, Kabelbaum mit Schaltern sowie dem Heizklimagerät mit Luftführungen zu den Defrosterdüsen für die Scheiben bzw. zu den „Mannausströmern“. Die Instrumententafel kann als einteilig oder mehrteilig (mehr Designfreiheit) ausgeführt sein. An Bedeutung gewinnen außerdem Gleichteilkonzepte die sich für Rechts- wie Linkslenkervarianten sowie für Plattformderivate einsetzen lassen, ohne dass diese Gleichteile von den Insassen identifiziert werden können (Markenidentität).

Der Querrohrträger wird in Stahl, Aluminium oder Magnesium teilweise auch in Kunststoff ausgeführt. Aus Gewichtsgründen kommen zunehmend Hybridkonstruktionen zum Einsatz. Typische Querrohrträger wiegen bis zu 10 kg, ein Aluminium-Magnesium-Hybrid nur 6 kg bei vergleichbarer Steifigkeit. Eine Auslegung der Strukturen erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und Lastkollektive mit computergestützten Optimierungsverfahren, so dass als Ergebnis gewichtsoptimierte Bauteile mit verbesserter Steifigkeit bzw. Festigkeit vorliegen. Bei den Oberflächen stehen Leder oder Kunststoff zur Auswahl: Die Palette der Verfahren reicht von Spritzguss – lackiert, Oberfläche in kaschierter Ausführung oder tiefgezogene Folien hinterschäumt mit den unterschiedlichen Kunststoffträgern (früher Blechträger) bis hin zu formgesinterten Häuten in den Materialien PVC, PU (aromatisch als auch aliphatisch) bzw. TPU oder auch IMC-TPU (in-mould coated thermoplastisches Polyurethan [258]). Der Innenraumcharakter wird durch Zierblenden aus Kunststoff, Aluminium oder auch Echtholz definiert. Tendenz zu Kunststoffen als Metallimitat (Gewicht) und z. T. offenporigen natürlichen Werkstoffen.

Für die Unfallfolgen mildernde Sicherheit müssen alle Materialien im Cockpitbereich die Kriterien des Kopfaufpralls erfüllen sowie nicht Splittern bzw. keine scharfen Kanten aufweisen. Auch dürfen sich keine Teile im Falle eines Unfalls lösen bzw. herausfallen. Für den Beifahrerairbag wird die Schalttafel gezielt geschwächt. Diese Schwächungsverfahren sind je nach Aufbau unterschiedlich und erstrecken sich von mit Laser angebrachter Feinstlochung (Lochdurchmesser ca. 0,2 mm bei harten Oberflächen in Spritzguss) bis hin zur Laserung durch den gesamten Aufbau – durch Träger, Schaum und Haut. Airbagrisslinen können auch gefräst oder mittels Ultraschallmessern geschnitten werden. Neu sind Gieß- und Spritzverfahren, bei denen die Schwächung während des Prozesses

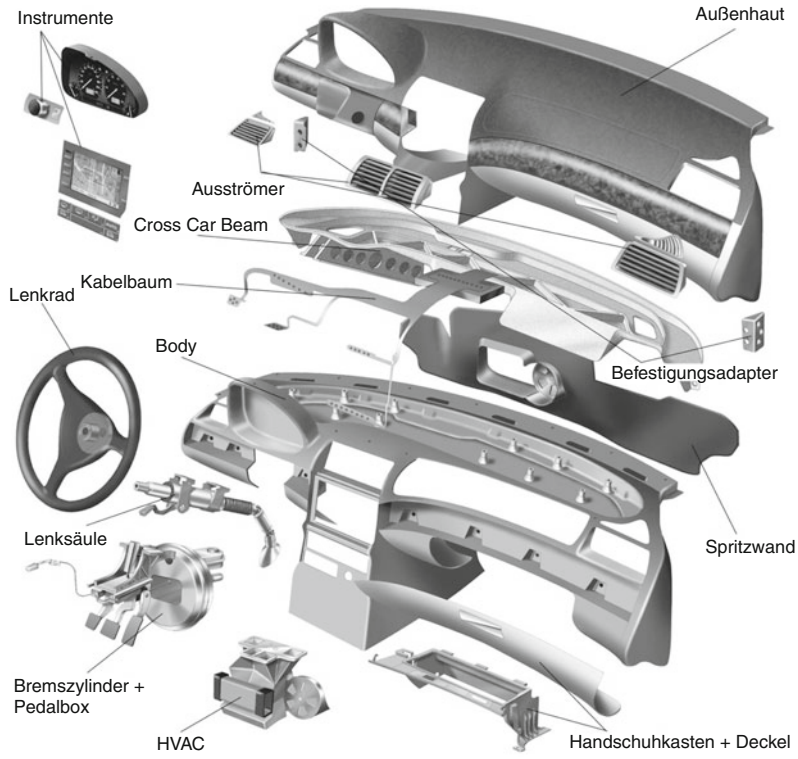



**Abb. 6.124** Aufbau des Cockpits mit Darstellung der wichtigsten Bauteile

eingebracht wird. Die Haut hat lediglich eine Restwandstärke von rund 0,4 mm.

#### 6.4.4.3.2 Sitze

Laut ADAC verbringt ein Autofahrer etwa 300 Stunden im Jahr auf einem Autositz, 25 % der Körperoberfläche sind dabei im Kontakt mit der Sitzfläche. Primäre Funktion des Sitzes (Sitzposition s. ▶ Abschn. 4.2) ist daher das Wohlbefinden sicherzustellen: einerseits durch optimale Einstellmöglichkeiten gemäß der Körperergonomie (bis zu 18 Wege, Seitenführung, Sitzpolsterlänge) andererseits durch die Integration von Komfortfunktionen wie Memory Funktion, Easy Entry-Einstiegs- und Ausstiegsposition, Multikonturmatten mit Massage und Lordosenunterstützung, Sitzheizung und Kühlfunktion zu steigern (Abb. 6.125) [250, 260]. Die Sitzbelegungserkennung (z. T. mit Gewichtsdetektierung) mit Rückkoppelung auf die Systeme der passiven Sicherheit und auf Warnsysteme werden immer mehr zum Standard. Ein Großteil dieser Funktionen ist bei fast allen Segmenten für Fahrer- und Beifahrersitz erhältlich. Für Fondsitze gibt es dies erst ab der Oberklasse. Neben den klassischen 5-Sitz-Konfigurationen gibt es für Minivans und Großraumlimousinen besondere Sitzanlagen für den Fond, die eine größere Variabilität der Raumunterteilung ermöglichen. Wichtigste Funktion: Die Sitzbänke können teilweise oder ganz in den Boden versenkt werden, um eine größere Nutzungsbreite zu ermöglichen. Leicht ausbaubare Sitze sind meist in Fahrzeugen niedrigeren Preisniveaus zu finden.

Sitze bestehen im Wesentlichen aus Sitzstruktur, Sitzpolsterung, Sitzbezug, Komfortmechanik/Elektrik und Sicherheitssystemen.

Die Sitzstruktur besteht heute weitestgehend aus Stahl, z. B. Formbleche oder Rohrrahmen, seltener aus anderen Materialien wie Aluminium, Magnesium oder Kunststoff. Dual- und Triple-Phasen Stähle ermöglichen immer dünnere Wandstärken (Reduzierung von 800–1000 Gramm an der Grund-




**Abb. 6.125** Vollausgestatteter Fahrersitz einer Premiumlimousine (Bild aus [260])

struktur des Sitzes) [263]. Ein Nachteil höherfesten Stahls ist die geringere Duktilität [263]. Die Anwendung von Magnesium in Druckgussbauteilen kann Sitzstrukturen um bis zu 30 % leichter machen, aber geringe Schlagzähigkeit steht dem gegenüber. Mit zunehmender Anforderung zur Gewichtreduzierung sind Leichtbauwerkstoffe zu bevorzugen (ein vollausgestatteter Fahrersitz der Luxusklasse wiegt heute bis zu 52 kg [251]). Die Schaumkissen sind meistens aus offenporigem Polyurethan-Schaum gefertigt. Teilweise werden diese Schaumkissen direkt auf die in die Sitzaußenform gezogenen Textildekore bzw. Folien hinterschäumt. Für höherwertige Fahrzeugsegmente sind sowohl Sitzkissen als auch Sitzlehnen Schaumkissen aus mehreren Lagen mit unterschiedlicher Dichte angefertigt, um den höchsten Komfort zu erreichen.

Sitzoberflächen sind genähte bzw. zum Teil geformte Bezüge (Pressformen, Vakuum tiefgezogen), sie können aus den unterschiedlichen Textilien, Kunststofffolien und aus Leder gefertigt werden. Diese werden im Montagevorgang über die Sitzkissen bzw. Sitzgestelle drapiert und mit Kunststoff- oder Metallclipsen am Gestell befestigt. Sitzstoffe müssen immer geringe Dehnwerte aufweisen, um jahrelang faltenfrei und gespannt als Sitzoberfläche zu dienen, zudem hinaus atmungsaktiv, schweißabsorbierend und mit niedrigen Abriebwerten behaftet. Die Verkleidungsumfänge bestehen weitestgehend aus Kunststoffen.

Seitenairbags sind bereits Standard bei Einzelsitzen und werden zunehmend auf allen Sitzplätzen eingesetzt, häufig auch als kombinierte Kopf-Thorax-Airbags ausgeführt. Aktive Kopfstützen nutzen Massenträgheit des Insassen zur Aktivierung und federn so den Kopf bei einem Aufprall ab. Dadurch reduziert sich der Neck-Injury Criteria Wert unter 60 % des Vergleichwerts von nichtaktiven Stützen

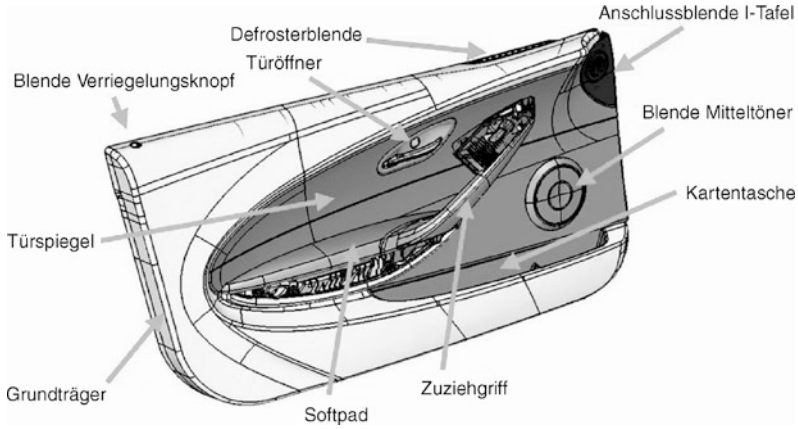



**Abb. 6.126** Aufbau Türverkleidung

(vgl. ► Kap. 9). Eine Alternative sind in die Lehne integrierte Kopfstützen (kein Spalt zwischen Lehne und Stütze). Die Sitze müssen alle die Kriterien des Whiplash-Test erfüllen. Ziel ist dabei eine Reduzierung der Dummybelastungswerte bei einer Rückverlagerung nach einem Anprall in den Sitz.

#### 6.4.4.3.3 Tür-, Seitenverkleidungen

Tür- und Seitenverkleidung sollen die Atmosphäre eines insgesamt stimmigen Innenraums unterstreichen (Bleche und „Mechanik" verdecken) und als zusätzliche Schallisolierung dienen. Zudem sind sie Bestandteil des Komfort- und Bedienkonzepts (Fensterheber, Spiegelsteuerung, Lautsprecher, Sitzverstellung, Türöffner). Die Türverkleidung bildet mit Fensterheber/Schließmechanik und ggf. Außenhaut oft ein Modul.

Türverkleidungen werden in unterschiedlichen Aufbauarten gefertigt. (Bestandteile der Türverkleidung s. Abb. 6.126).

Die Armauflagen sind je nach Komfortausstattung des Fahrzeuges in den seitlichen Verkleidungen angeformt bzw. bei hochwertigen Fahrzeugen zusammen mit dem Türzuziehgriff separat an der Türverkleidung bzw. an dem dahinter liegenden Rohbau angeschraubt. Ablagefächer mit Deckeln (oft auch mit Kinematik) werden als Modul angesteckt, einfache Kartentaschen werden teilweise mitgeformt.

Moderne Türverkleidungen werden üblicherweise in einem One-Step LPE/LPS-Prozess hergestellt, bei dem der Träger (z. B. ABS, PP etc.) und das Dekor (Folien und Stoffe) im gleichen Arbeitsschritt vereint werden. Die Zierleisten können aus Kunststoffen (mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit wie Metall, Carbon, Grafit, Alu usw.) oder unterschiedlichen Holzarten hergestellt werden. Armauflagen sind meist weich gepolstert, da die Oberflächen in PVC-Schaumfolie (oder Leder, Stoff etc. ausgeführt) gefertigt werden. Bei der Türbrüstung muss darauf geachtet werden, dass der Übergang zum Cockpit fließend gestaltet wird (oft durch Slushbrüstung). Bei den Tür- und Seitenverkleidungen ist der Seitenairbag mit Hilfe von Stoffspiegeln abgedeckt. Diese sind derart befestigt, dass sie im Auslösungsfall des Airbags zur Seite gedrückt werden. Zusätzliche Sicherheitsmerkmale sind energieabsorbierende Elemente, um durch gezielte Energieaufnahme den Energieabbau bei einem Seitenaufprall zu unterstützen.

#### 6.4.4.3.4 Dachhimmel, Säulenverkleidung

Die Primärfunktion des Himmels ist neben der Verkleidung und akustischer Dämmung des Daches die Unterbringung von Sonnenblenden und Beleuchtungen sowie die Einfassung von Schiebedächern und der dazugehörigen Schalter oder Mechaniken. Auch Luftführung, Leitungen und Kopfairbags werden in den Himmel integriert. Seit kurzem dient der Dachhimmel zusätzlich als Halterung für Unterhaltungselektronik (LCD-Bildschirme/DVD-Player) für die zweite und dritte Sitzreihe bzw. als

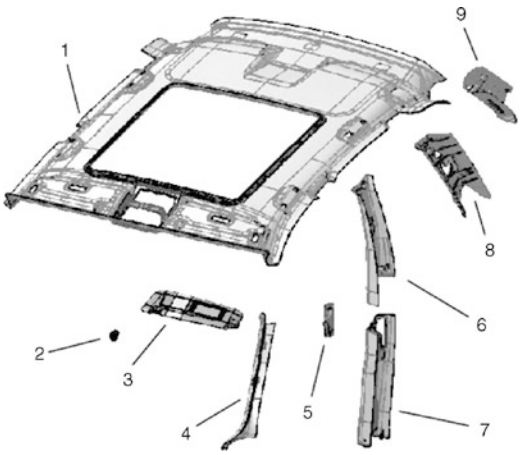



**Abb. 6.127** Aufbau Dachhimmel: (*1*) Dachhimmel mit Aussparung, (*2*) Befestigung Sonnenblende, (*3*) Sonnenblende, (*4*) A-Säule, (*5*) Gurtumlenker, (*6*) B-Säule, (*7*) B-Säule Abschluss, (*8*) C-Säule, (*9*) D-Säule/Dachabschluss

Möglichkeit um weitere Ablagemodule zu integrieren.

Zum Dachhimmelmodul gehören die Säulenverkleidungen. Sie sorgen für den harmonischen Übergang von der Seitenverkleidung zum Himmel und dienen als Abdeckung von Luftkanälen und Gurten (Abb. 6.127).

Das Dachhimmelmodul besteht aus dem eigentlichen Himmel, mit integrierter Luftführung und Elektrik und den anschließenden Verkleidungsteilen. A- und C-Säule sind meist einteilig, während die B-Säule immer aus zwei Teilen besteht. Je nach Ausführung (Kombi/Minivan) gehören auch D-Säulenverkleidung bzw. Dachabschluss dazu. Außerdem sind die meisten Leuchten im Innenraum im Himmel angebracht.

Der Dachhimmel ist meist in Sandwichbauweise ausgeführt. Das Dekor besteht aus Stoff (Vlies bzw. Alcantara stehen je am Ende des Spektrums). Der Aufbau darunter variiert je nach Hersteller (z. B. PU-Schaumschicht zwischen Stoffschichten).

Die Säulenverkleidungen bei preiswerteren Fahrzeugen sind reiner Spritzguss typischerweise aus Poly-Propylen, eine gängige Größenordnung ist ca. 35 mm Deformationsweg. Höherwertige Fahrzeuge haben stoffkaschierte Säulenverkleidungen (Dekor ABS-PC, PP jeweils mit PES-Gewirke) die heute im Hinterspritzverfahren (LPS) hergestellt. Dadurch entfällt der Produktionsschritt „Kaschieren" bzw. das dafür erforderliche Auftragen von Klebern.

Zu beachten ist hier der „Umbug" des Dekors im Sichtbereich, der Übergang zwischen Säulenverkleidung und Seitenteilen und die Strichrichtung der Textilien.

Die Kopfairbag-Variante kommt immer mehr zum Einsatz. Sie ist in den seitlichen Himmel-Bereichen angebracht. Kritisch im Auslösungsfall ist das Abtauchen der Himmelverkleidung bzw. ein entsprechendes Wegdrücken von Säulenverkleidungen um ein einwandfreies Öffnen des Kopfairbags der über die gesamte Fahrzeugseite wie ein Vorhang (man spricht auch vom *Curtain-Airbag*) geöffnet wird, zu ermöglichen. Weitere Möglichkeiten die Sicherheit zu erhöhen betreffen die Integration von intelligenten Energieabsorptionselementen, die den Insassenschutz gemäß FMVSS 201 übererfüllen.

#### 6.4.4.3.5 Gepäckraum/Laderaum

Angespornt durch den Erfolg von SUVs und Crossovermodellen hat sich der Laderaum zum Lifestyleprodukt entwickelt. Selbsttätige mit separat öffnendem Heckfenster versehene Heckklappen sind keine Seltenheit. In der Oberklasse sind auch elektrisch ausfahrbare Ladeböden möglich. Ein hochwertiger Laderaum verfügt meist über ein variables Verzurrsystem mit Ösen und Schienen.

Der Laderaum ist aufgebaut aus Seitenteilverkleidung, Bodenverkleidung mit Bodenplatte, Laderaumabdeckung bzw. Heckklappenverkleidung (Abb. 6.128).

Im unteren Segment bestehen die Seitenteile aus nacktem PP; bei höherwertigen Fahrzeugen ist der Träger mit Dekorstoff überzogen (z. B. Softscherdilour). Der Teppich für die Bodenverkleidung besteht meist aus Strickvelour oder Perlvelour. Die Bodenplatte, die den Zugang zu Reserverad oder weiteren Ablageflächen abdeckt wird meist in Spannholz ausgeführt, wegen des Gewichts aber zunehmend auch in Sandwichbauweise aus Pappwappen.

Im Gepäckraum geht es um die Sicherung der Ladung durch Verzurrösen, Netzsicherungen und Schienensysteme. Durch die Einführung von klappbaren Zusatzsitzen im Laderaum wird verstärkt

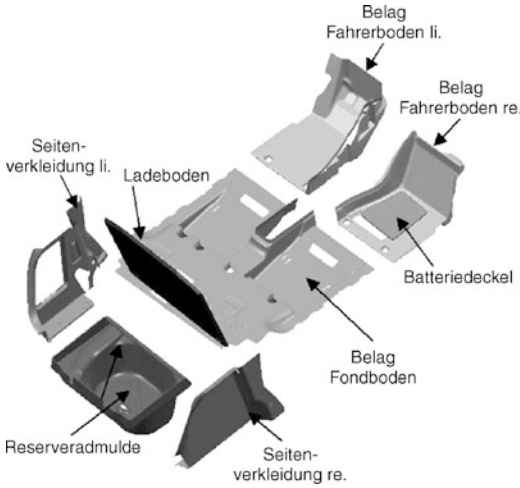



**Abb. 6.128** Gepäckraum/Bodenverkleidung

über zusätzliche Sicherungssysteme für Personen nachzudenken sein.

#### 6.4.4.3.6 Bodenverkleidung, Akustik

Die Teppichverkleidung dient in erster Linie zur Auskleidung des gesamten Innenraumbodens und der darunter liegenden Metallstrukturen und Kabelkanäle, sowie der Schalldämmung und Isolierung von Fahr- und Betriebsgeräuschen und ist damit wesentlicher Bestandteil der Gesamtfahrzeugakustik.

Die Bodenverkleidung setzt sich zusammen aus Fahrerboden, Fondboden und Kofferraumverkleidung (Abb. 6.128). Je nach Fahrzeuggröße kann die Auskleidung des Fahrgastraums einteilig oder mehrteilig sein (zum Aufbau der Dämmung und Isolierung vgl. ▶ Abschn. 3.4).

Die Materialien von den Teppichauskleidungen spannen sich vom preiswertesten Nadelvlies in den unteren Fahrzeugklassen bis zu den hochwertigsten Velouren mit Anteilen von Seide in den oberen Fahrzeugsegmenten. Bei höherwertigen Fahrzeugen geht der Trend zur integrierten Isolation mit Hilfe von direkt auf den Teppich geschäumten Schaum. Diese Ausführungen sind zwar als Teppichausführung teurer, aber in der Gesamtbilanz (Gewichtsbilanz, Montagefreundlichkeit etc.) als Kompakt-System bestehend aus einem Feder-Masse-Aufbau durchaus wettbewerbsfähig [259].

### 6.4.4.4 Entwicklungsablauf Innenraum

Bedingt durch die immer kürzeren Entwicklungszeiten („Virtuelle Entwicklung") konzentrieren sich die Automobilhersteller zunehmend auf ihre Kernkompetenzen und haben große Teile der Wertschöpfung auf Zulieferer verlagert. Diese übernehmen Verantwortung für die Entwicklung und Fertigung von Modulen, Systemen und teilweise sogar kompletten Fahrzeugen. So wird die Eigenleistung der Automobilhersteller pro „Durchschnittsauto" im Jahr 2015 wahrscheinlich nur noch ca. 23 % betragen [261]. Neben den klassischen Modulen wie Sitzen und Cockpit, werden heute bereits Dach- und Türmodule von den Lieferanten entwickelt und gefertigt [270]. Die Entwicklung ist gleichzeitig ein Spagat zwischen Innovationsdruck und Kostenersparnis. Der Kunde erwartet ein neues Auto mit einem neuen Innenraum. Andererseits versucht man natürlich möglichst viele carry over-Teile zu verwenden (Abb. 6.129 zeigt den gesamten Entwicklungsablauf).

#### 6.4.4.4.1 Lastenheft

Das Lastenheft wird bestimmt vom Finanzrahmen, der Machbarkeit, mit den eventuell vorgegebenen Produktionseinrichtungen und natürlich positioniert gegen den zukünftigen Wettbewerb und die Vertriebsmärkte. Wichtig ist die richtige Abschätzung der späteren Verkaufsstückzahlen. Sie bestimmt Ausführung und Anforderungen an Anzahl der Werkzeuge und Produktionseinrichtungen.

Zum Beispiel wird hier festgelegt, welche Verfahrenstechnik bspw. für die Instrumententafel verwendet werden soll und welche Anforderungen diese erfüllen muss (Tab. 6.31).

Selbst bei optimaler Großserienfertigung (etwa 200.000 Fahrzeuge/Jahr) bestehen die Herstellungskosten etwa zur Hälfte aus umgelegten Entwicklungskosten und Investitionen.

#### 6.4.4.4.2 Berechnung/Digital Mockup

Passend zum Lastenheft und abgestimmt auf parallel zum Design zu erarbeitenden „Mockups" werden eine mehrfache Anzahl von Modellen zeichnerisch entworfen und die favorisierten Entwürfe in so genannten „Sitzkisten" realisiert. Ist das Plastilinmodell als montierbar und herstellbar und optisch akzeptiert abgenommen, wird es für eine endgültige

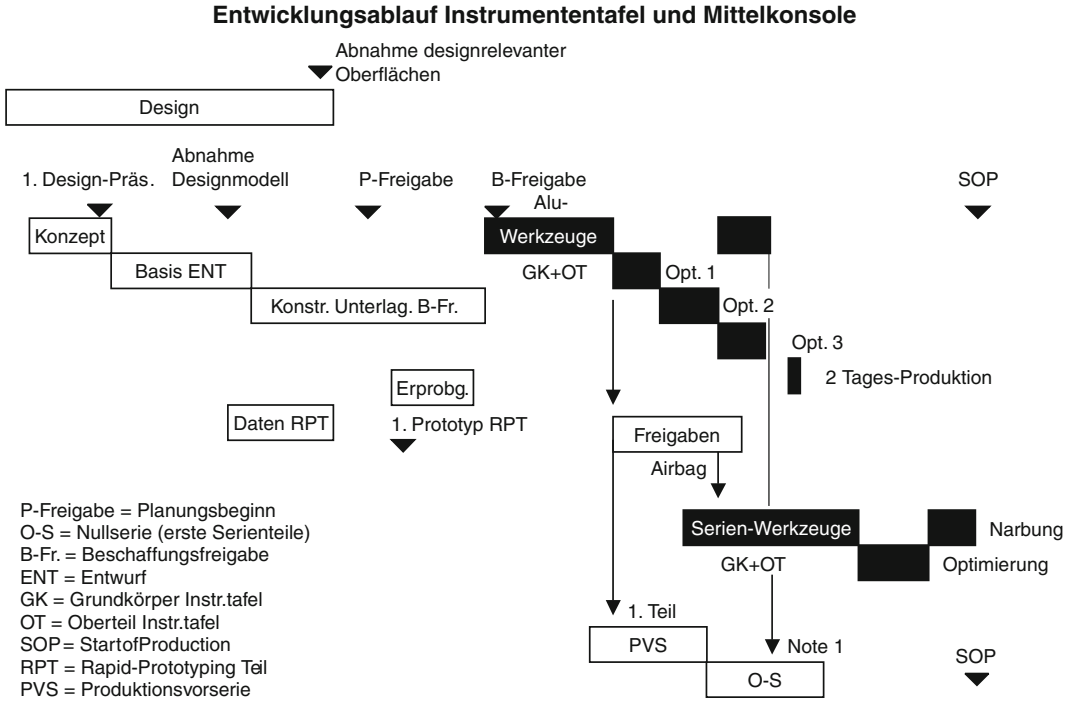



**Abb. 6.129** Entwicklungsablauf

**Tabelle 6.31** Anforderungen Oberfläche [258]

| Oberflächen-eigenschaften | Substrateigenschaften |
|---|---|
| Berührhaptik, Narbwiedergabe, Oberflächenbeständigkeit, Farbflexibilität, Mehrfarbigkeit, Alterungsbeständigkeit | Druckhaptik, Designfreiheit, physik. Eigenschaften, Anwendungsflexibilität |

Beurteilung mit Lack, Folie und Stoffen auf möglichst realistisches Aussehen getrimmt (► Abschn. 4.1 bzw. ► Abschn. 6.4.1).

Im Mockup wird parallel zum Styling in täglicher Abstimmung das Package (vgl. ► Abschn. 4.2) dargestellt. Für den Innenraum werden alle Modelle dann noch einmal in Einzelteilen in Gießharz gefertigt, um das Zusammenspiel nebeneinander liegender Bauteile in der Sitzkiste abzustimmen. Nach Abnahme des Stylingmodells werden die Oberflächen nach einem Rastergitter punktförmig abgenommen und „digitalisiert". Experten glätten diese „Punkte" zu „Flächen". Eine Betrachtung des digitalisierten Innenraums als virtuelles Modell am Bildschirm oder in 3-D Animationen, z. B. in einer sogenannten Cave, wird häufig zur Entscheidungsfindung herangezogen. Dabei lassen sich Fugenbilder aber auch Montagevorgänge nachbilden.

Bei der Berechnung der Werkzeugauslegung im Bereich Kunststoffe hat sich die Spritzgieß-Simulation zur Werkzeugauslegung (Moldflow, CADmould etc.) weitgehend als Standard etabliert. Mithilfe der Software können wichtige Eckdaten für die Füllbarkeit (Lufteinschlüsse, Faserorientierung, Verzug, Bindenähte, Druckverlust, Schließkraft) und Kostenkalkulation des Teils ermittelt werden.

#### 6.4.4.4.3 Teilekonstruktion

Diese von den Stylingmodellen abgenommenen Oberflächen dienen den Konstrukteuren als Basis zur Geometriebeschreibung der Einzelteile. Der geglättete Datensatz bildet die „Schokoladenseite" des Bauteiles (A-Flächen). Die Struktur und die Befes-

tigungen werden ankonstruiert. Bei allem ist darauf zu achten, dass die Teile mit möglichst wenig Hinterschnitten hergestellt werden können. Das werkzeug- und fertigungsgerechte Design vereinfacht die Werkzeuge und hilft die Kosten zu optimieren. Gleichzeitig arbeiten Konstrukteure der Rohkarosse an der Blechstruktur unter der ebenfalls stilistisch abgenommenen Fahrzeugaußenhaut. Zwischen Rohbau und Innenausstattung ergibt sich hier eine großflächige, alles umfassende Schnittstelle.



#### 6.4.4.4.4 Datenkontrollmodelle

Da gerade im Innenraum die Bauteile oft weich und flexibel sind, werden sogenannte Datenkontrollmodelle, meistens aus temperaturstabilen Kunststoffen, hergestellt. Es handelt sich hier immer um Teile und anliegende Teile, die mit entsprechender „Verstiftung" als Baugruppen exakt passen müssen. Diese Datenkontrollmodelle beziehen sich auf die erarbeiteten Datensätze der Teilekonstruktion. Die Grundlage ist ein ausgearbeitetes Funktionsmaßkonzept mit dem Ziel, die Bauteile kollisionsfrei im Datensatz vorliegen zu haben.

Aus den Datenkontrollmodellen entstehen dann „Lehren" für die Bauteile und Werkzeuge. Für die Werkzeuge muss bei den Datensätzen ein werkstoffgerechter „Schrumpffaktor" eingearbeitet werden.

Alle Teilehersteller haben die anschließenden Teile ihres eigentlichen Teiles als Referenzmodelle, nach denen die Qualitätsabnahme erfolgt. Es hat sich gezeigt, dass angrenzende Teile in Baugruppen von einem einheitlichen „Referenzsystem" konstruiert und auch so maßlich bestimmt werden. Hierdurch wird dann bei Werkzeugen, Lehren und bei den Bauteilen selbst vermieden, dass sich Toleranzen addieren.

#### 6.4.4.4.5 Prototypen/Testing

Sobald die Teilekonstruktion abgeschlossen ist, werden Hilfswerkzeuge für die Ausrüstung der Prototypen erstellt. Prototypen werden benötigt, um die Crashsicherheit zu beweisen, die Dauerhaltbarkeit zu ermitteln, Geräusche zu optimieren und die Funktion als Ganzes beurteilen zu können. Bis zu 70 technische Prüfungen müssen Verkleidungsteile bestehen, bevor sie zur Produktion freigegeben werden. Die Teile dürfen sich über die gesamte Fahrzeuglebensdauer nicht verformen oder verfärben (Prüfung durch extreme Freibewitterungszyklen). Auch muss der durch Alterung entstehende Schrumpf konstruktiv berücksichtigt werden, besonders bei Kunststoff-Materialien, da sonst „Verwerfungen" möglich sind. Qualität und Herstellungskosten hängen wesentlich von Produktionsprozessen ab. Die Tendenz zur virtuellen Abwicklung dieser Aspekte ist auch im Innenraum weiter fortschreitend [271, 272].

#### 6.4.4.4.6 Serienproduktion/Montage

Die meisten Baugruppen des Innenraums werden heute in Just-in-Time oder sogar Just-in-Sequenz gefertigt. Viele Zulieferer ziehen deshalb in die Zuliefererparks der OEM. Die Globalisierung zwingt Hersteller und Zulieferer zudem auch weltweit Produktionsstandorte zu betreiben. Dies bringt vor allem für den kritischen Punkt des Serienanlaufs große Herausforderungen mit sich: Die Werkzeuge sind neu, eventuell auch die Prozesse, was die Anfälligkeit für Fehler erhöht, die schnell zu Produktionsausfällen oder sogar Rückrufaktionen führen können. Vor allem die Individualisierung wird sich stärker auf die Serienproduktion auswirken. Gerade bei einem großen Grad der Individualisierung des Innenraums (viele Varianten) ist eine sequenzielle Belieferung mit Modulen sinnvoll. So betragen die Produktionsinvestitionen (ohne produktspezifische Werkzeugkosten) für eine Instrumententafelfertigung der gehobenen Mittelklasse rund 20 Millionen Euro und die Kosten für die produktspezifischen Werkzeuge sogar noch mehr: Alleine das Werkzeug des Trägers der I-Tafel kostet – je nach Ausführung – zwischen 500.000 und 900.000 Euro, bei einer Ausbringung von rund 1000 Teilen täglich. Daher kann für Nischenfahrzeuge und Kleinserien zukünftig Rapid-Manufacturing zunehmend interessant werden [262, 269]. Weiter wird zukünftig die ökologische Bilanz von Produktionsprozessen im Hinblick auf die Klimadiskussion und die existierende Altautoverordnung eine stärkere Rolle bei der Fertigung von Innenraumkomponenten spielen. Alternative Trägermaterialien, z. B. aus nachwachsenden Rohstoffen, werden relevanter werden [268].

#### 6.4.4.4.7 Variantenmanagement

Dies ist derzeit immer noch eine der größten Herausforderungen für die Automobilindustrie. Sie ist der Preis, der für die seit Jahren ungebrochene Ausweitung der Modellpaletten und das Individualisierungsangebot für Endverbraucher zu bezahlen ist. Alleine bei dem Modell einer Oberklassenlimousine hat sich die Zahl der Varianten bei Handschuhkästen von 20 auf 152 und bei Türverkleidungen von 608 auf 18.819 im Vergleich zum Vorgänger erhöht [257]. Allein bei den Rücksitzen einer Luxuslimousine ergeben sich fast 5000 Varianten [260]. Die Folgen schlagen sich in Logistikplanung und Produktionssteuerung, erhöhtem Platzbedarf und Handlingsaufwand nieder. Eine Lösungsmöglichkeit bildet ein ganzheitliches Variantenmanagement [257].

### 6.4.4.5 Ausblick

Für die Zukunft lassen sich einige Tendenzen erkennen [244]. Die Wohlfühlatmosphäre durch verbesserte Optik und Haptik wird auch für die Bereiche von Lkw und Kleinlastern zu beachten sein [267]. Die Integration von E/E-Komponenten wird in allen Baugruppenbereichen weiter fortschreiten. Dabei spielen die Themen der Ankopplung mobiler Geräte, wie z. B. Mobiltelefone und multimedialer Einheiten eine immer größere Rolle. Nicht nur die Datenverbindung sondern auch die Energieversorgung dieser mobilen Geräte spielt eine wichtige Rolle. Durch elektrische Betätigung von Getriebe, Handbremse und eventuell auch Lenkung wird weiter Bauraum eingespart. Leichtbau und neue Materialien werden Gewichtseinsparungen bringen. Die wichtigste, weil immer größer werdende Zielgruppe der Zukunft wird die Seniorengeneration sein. Einfache, intuitive Bedienung, verbesserter Komfort bei Einstieg und Beladen werden hier verlangt werden. Parallel dazu wird die Individualisierung weiter fortschreiten. Es ist zu erwarten, dass ähnlich wie bei Handys, es in Zukunft ein voll personalisiertes Auto geben wird. Beispielsweise können ab Werk persönliche Motive durch verschiedene Verfahren auf die Dekorelemente des Innenraums projiziert werden. Die Innenraumbeleuchtung kann dem Geschmack des Fahrers angepasst werden und die Sitzbezüge können „nach Gusto“ wöchentlich gewechselt werden. Für die Entwicklung wird sich auch in Zukunft alles um die technische und unternehmensübergreifende Integration drehen.

## Literatur

**Literatur zu Abschnitt 6.1.1**

1. http://www.unsere-autos.de
2. Hucho, W.-H.: Aerodynamik des Automobils, 5. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2005)
3. The all new Astra, Automotive Circle International Okt 2009, EuroCarBody 2009
4. Automotive Circle International Nov 2010. Dosis and Closures in Car Body Engineering 2010
5. Leuschen, B., Hopf, B.: Fügen von Stahl, Aluminium und deren Kombination. In: VDI-Bericht, Bd. 1264 (1996)
6. ATZ/MTZ-Extra „Der neue Passat“, April 2005
7. Hahn, O., Gieske, D.: Ermittlung fertigungstechnischer und konstruktiver Einflüsse auf die ertragbaren Schnittkräfte an Durchsetzfügeelementen. FAT-Bericht, Bd. 116 (1995)
8. Braess, H.-H.: Negative Gewichtsspirale. ATZ **101**(Nr. 1) (1999)
9. Weitere Informationen insbesondere in den VDI-Berichten 665 (1988), 818 (1990), 968 (1992), 1134 (1994) und 1398 (1998) sowie in der ATZ
10. Teske, L., Strehl, R., Hallik, M.: Das Karosseriekonzept des neuen OPEL Vectra C. In: VDI-Bericht, Bd. 1674, S. 85–98 (2002)
11. GZVB: Faszination Karosserie, 2. Braunschweiger Symposium, 2005
12. ATZ/MTZ-Extra-Ausgaben über Neuentwicklungen

**Literatur zu Abschnitt 6.1.2**

13. Rink, C.: Aluminium als Karosseriewerkstoff, Recycling und energetische Betrachtungen. Dissertation, Hannover (1996)
14. Haldenwanger, H.G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von Pkw-Rohkarosserien. Dissertation, TU Dresden (1997)
15. Stümke, A., Bayerlein, H., Eckl, F.: Laseranwendungen bei AUDI. In: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. BIAS Verlag, Bremen (1997)
16. Müller, S.: Robotereinsatz beim Fügen von Aluminium-Leichtbaustrukturen. In: Fügeverfahren zur Realisierung von innovativen Leichtbaukonzepten. Erding (1999)
17. Rottländer, H.P.: Laserverbindungstechnik im Automobilkarosseriebau. Aachener Kolloquium Lasertechnik, Aachen, 1998
18. Ullrich, W.: Das Kundendienstkonzept zur Aluminium-Karosserie. In: Auditorium, Aluminium-Technologie im Karosseriebau, Oktober 1993
19. Mayer, H., Venier, F., Koglin, K.: Die ASF-Karosserie des Audi A8. In: Der neue Audi A8. ATZ/MTZ Sonderheft (2002)
20. Ruch, W., Eritt, U., Wanka, R.: New technologies in the Audi A2. Aluminium World (2001)

21. Hoffmann, A., Birkert, A.: Gestaltungsrichtlinien für die Auslegung von innenhochdruckumgeformten Strukturbauteilen aus Aluminium. DGM Internationale Konferenz „Hydroumformung", Fellbach, 6./7. November 2001
22. Hoffmann, A.: Innenhochdruckumformen von Aluminiumprofilen. Aluminium-Kurier **3** (2002)
23. Niemeyer, M.: Lasergestützte Fügeverfahren im Aluminium-Karosseriebau. In: Sepold, G., Seefeld, T. (Hrsg.) Strahltechnik
24. Christlein, J., Schüler, L.: Audi A2: Realisierung eines zukunftsweisenden Leichtbaukonzepts mit Hilfe der Simulation. VDI-Tagung „Entwicklungen im Karosseriebau", 11./12. Mai 2002
25. Christlein, J.: Process chain simulation in aluminium car bodies. CRASHMAT 2002 „2nd Workshop for material and structural behaviour at crash processes", 15./16. April 2002
26. Schäper, S.: Zum Zielkonflikt Recyclingquoten versus Leichtbau/About the design conflict between recycling quotas and light weight construction. Vortrag, Gemeinschaftstagung Fachhochschule Hamburg/VDI Gesellschaft Fahrzeugtechnik, 7./8. Mai 2002. VDI Berichte, Bd. 1674, S. 213–229 (2002)
27. Timm, H., Koglin, K., Audi AG: Die neue Audi TT-Karosse. Konferenz „Automotive Circle International", EuroCarBody 2006, Bad Nauheim/Frankfurt, 26. Oktober 2006
28. Scheurich, H., Kappler, A., Audi AG: The new Audi A8 body. Conference „Automotive Circle International", Bad Nauheim/Frankfurt, 13./14. März 2007
29. Elend, L.-E., Hoffmann, A., Scheurich, H., Audi AG: Aluminium-Strangpreßprofile im Karosseriebau. DGM-Symposium Strangpressen, Weimar, 26./27. Oktober 2006
30. Koch, H., Audi AG: Duktiler Druckguss – Anwendungen und Tendenzen. Seminar „Eigenspannungen und Verzug beim Giessen von Leichtmetallen", Kassel, 6. September 2005
31. Timm, H., Audi AG: Zukunftswerkstoffe im Automobil. Augsburg, 11. Juli 2008
32. Müller, S., Audi AG: Fügetechnologien im Karosseriebau – Status und Trends, Bad Nauheim, 29. April 2009
33. Timm, H., Audi AG: Materialhybride für den Karosseriebau der Zukunft. Stuttgart, 25. Juni 2009
34. Reimold, A., Audi AG: Leichtbaukompetenz in der Fahrzeugproduktion. Neckarsulm, 7. September 2009
35. Hollerweger, H., Audi AG: Leichtbau Gesamtfahrzeug. Neckarsulm, 7. September 2009
36. Timm, H., Audi AG: Funktionsintegrativer Karosserieleichtbau. Braunschweig, 30. September 2009
37. Timm, H., Audi AG: Faszination Audi Karosserieleichtbau – Historie trifft Zukunft. Zwickau, 12. November 2009
38. Timm, H., Audi AG: An insight into 15 years of the ASF car body and it's future. Düsseldorf, 23. November 2009
39. Müller, S., Audi AG: Laserstrahlschweißen an Aluminium Karosserien. Stuttgart, 28. Januar 2010
40. Timm, H., Audi AG: Audi Leichtbaukompetenz, Zeitgeist erfassen, Trends analysieren, Zukunft entwickeln. Dresden, 17. Juni 2010
41. Dick, M., Audi AG: Leichtbau mit CFK – Herausforderungen für die Mobilität der Zukunft. Neckarsulm, 24. Juni 2010
42. Timm, H., Audi AG: Wo liegt der Bedarf für CFK im Automobilbau? Neckarsulm, 24. Juni 2010
43. Timm, H., AUDI AG: Audi Space Frame – Leichtmetallbau der Zukunft. MD Motordialog, Mobilitätsportal für Journalisten. Rosbach v. d. H., 23. März 2015
44. Timm, H., CCeV/AUDI AG: Zukunft Leichtbau. Hightech Zentrum Aargau Schweiz. Brugg, CH, 26. März 2015
45. Timm, H., Technologie Netzwerke/AUDI AG: Aluminium im Wettbewerb der Leichtbautechnologien für E-Fahrzeuge. TU-München & Bayern Innovativ. Fürstenfeldbruck, 29. April 2015
46. Timm, H., CCeV/AUDI AG: Leichtbau im Automobil – Bedarf, Potenzial, Herausforderung. Hochschule Albstadt. Albstadt, 30. April 2015
47. Timm, H., CCeV/AUDI AG: Materialhybride Automobilstrukturen. Technische Universität Wien – DGM-Tagung. Wien, 02. Juli 2015


**Literatur zu Abschnitt 6.1.3**


48. Eis, M.: Mobilität der Zukunft – Anforderungen aus dem Leichtbauansatz im BMW project i. 15. Kolloquium, Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik. Dechema, Köln (2015)
49. Graser, S.: Automotive Composite Bauteile – Status und Kostenpotentiale. CCeV, Dresden (2013)
50. Hillebrecht, M.: Generative Fertigungsverfahren. ATZ-Fachtagung Stuttgart. Fa. EDAG, Fulda (2014)
51. Hillebrecht, M.: Potenzialbewertung von neuen generativen Fertigungsmethoden für Leichtbaukonstruktionen. ATZ Werkstoffe im Automobilbau. Stuttgart (2014)
52. Hufenbach, W.E.: Elektromobilität in Ultraleichtbauweise. ATZextra. (2013).
53. Hufenbach, W., Frank, A.: Anwendungsperspektiven von multifunktionalen Hybridbauweisen und -komponenten im Mobilitätssektor. DLR – Wissenschaftstag, Braunschweig (2014)
54. Institute, A.I.: UltraLight Steel Auto Body Final Report. 1. Aufl. Washington, DC (1998)
55. Institute, A.I.: Ultralight Steel Auto Closures. Washington, DC (2000)
56. Institute, A.I.: ULSAB-Advanced Vehicle Concept. Washington, DC (2002)
57. Institute, S.M.: FutureSteelVehicle (2011)
58. Leeke, G.: Technology Readiness Level Assessment of Composites Recycling Technologies. Journal of Cleaner Production **108**(A 1) (2015)
59. Leohold, J.. P.A.: Von der Nische in die Großserie – Herausforderungen für Werkstoffe und Fertigungsverfahren im nachhaltigen Leichtbau. VDI Leichtbau Symposium. Wolfsburg (2013)

60. Ohlsen, J., H.F.: Funktionsintegrierte, bionisch optimierte Fahrzeugleichtbaustruktur in flexibler Fertigung. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift. (2015)
61. Plath, A.: Lightweight Design Materials and Sustainability for Automotive Applications. ITHEC, Bremen (2012)
62. Pyper, J.: World's First Three-Dimensional Printed Car Made in Chicago. Scientific American (2014)

**Literatur zu Abschnitt 6.1.4**

63. Kraftfahrt-Bundesamt: Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2012. Pressemitteilung Nr. 3 (2012)
64. BMW Broschüre und Technische Daten der 3er und 4er-Reihe (www.bmw.de)
65. Rund um VW: Innovation & Technik, Technik-Lexikon (2010), http://www.volkswagen.at/rund_um_vw/innovation_technik/technik_lexikon/karosseriesteifigkeit.html. Zugegriffen: 10.09. 2010
66. Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik. Vieweg + Teuchner (2009)
67. Webasto: Vortrag im Rahmen der Vortragsserie bei der HAW Hamburg (2014)
68. Kalinke, P., Gnauert, U.: Potenzialanalyse von aktiven Schwingungsreduktionssystemen zur Verbesserung des Schwingungskomforts bei Cabriolets. mobiles **28** (2002/2003)
69. Papenheim, T., Lüdorff, J.: Sicherheitsrelevante Auslegung von Cabriolets. VDI Tagung Innovativer KFZ – Insassen- und Partnerschutz, Berlin, September 2001
70. Schulte-Frankenfeld, N.: Fahrzeugstrukturen für hohen Insassenschutz bei Cabriolets. European Automotive Safety, Bad Nauheim, 2004
71. Franke, S., Oehmke, B.: Das innovative Dach- und Karosserie-Konzept des neuen Volkswagen EOS. Karosseriebautage, Hamburg, 2006

**Literatur zu Abschnitt 6.1.5**

72. HBPO GmbH, Lippstadt: Div. Firmenschriften, http://hbpogroup.com
73. Opperbeck, G., Hassdenteufel, K., Krasenbrink, C., Cheron, H.: Hochintegriertes Frontendmodul. ATZ **108**, 10–17 (2006)

**Literatur zu Abschnitt 6.2**

74. Stauber, R.: Metalle im Automobilbau – Innovationen und Trends. 9. Handelsblatt Jahrestagung Automobiltechnologien-Vision Automobil, München, April 2005
75. Bachsteffel, J., Rau, H., Laux, J. J.: IMC Slush Technologie im Interieur – Eine neue Werkstoffgeneration für hochwertige Oberflächen. VDI-K Tagung Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, April 2005
76. Timm, H.: Concept- and technology trends for a cost-attractive body lightweight construction. Aluminium **09** (2004)
77. Franke, H.-J.: Faszination Karosserie. 2. Braunschweiger Symposium, Braunschweig, Januar 2005
78. Pfestorf, M., Hooputra, H., Bassi, C.: Anforderungen an Aluminiumblechwerkstoffe im Spannungsfeld von Funktion und Fertigung. Proceedings of the 6th European Automotive Conference „The Process Chain Aluminium Automobile". Technik + Kommunikations-Verlag, Bad Nauheim (2004)
79. Lüdke, B.: Funktionaler Rohkarosserie-Leichtbau, von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an die Rohkarosseriewerkstoffe. VDI Bericht, Bd. 1543 (2000)
80. Sonsino, C.M.: Dauerfestigkeit – eine Fiktion. Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), Darmstadt (2005)
81. Staeves, J., Pfestorf, M.: Einsatz höherfester Stähle im Automobilbau. 8. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Darmstadt, April 2003
82. Lüdke, B.: Funktionaler Rohkarosserie-Leichtbau am Beispiel der neuen BMW Generation. Stahl und Eisen **119**(5) (1999)
83. Grünn, R.: Die Karosserie des neuen 6er Cabrios von BMW-Ableitungskonzept, Leichtbaustrategie und Fertigungsprozess. VDI Bericht, Bd. 1833 (2004)
84. Hicken, S.: Aluminiumeinsatz in der Karosseriestruktur. Praxisbeispiele von Rolls-Royce bis BMW 7er. BMW intern
85. Poweleit, A., Rebholz, C., Kettner, G.: Die neue BMW 7er Karosserie. Euro Car Body, Bad Nauheim, 2001
86. Korzonnek, J.: Die Kunststoffkarosserie – Außenhautspezifische Risiken. SKZ-Fachtagung Würzburg, Würzburg, November 2000
87. Mehn, R., Peis, R., Zhang, S.: Einsatz flächenhafter Sandwichbauteile im Automobil. 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2003
88. Lüdke, B.: Von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an den Werkstoff und die Prozesskette Presswerk-Rohbau-Lack. DVM-Tag, Berlin, April 2005
89. Schwager, H., Meyr, W., Derks, M.: Innovative Polyurethantechnologie im Premiumfahrzeugbau. KP Verlag (2001)
90. Mitzler, J., et al.: Hochwertige Innenraum-Oberflächen hergestellt im SkinForm-Verfahren. VDI-Tagung Kunststoffe im Automobilbau, S. 115, Mannheim, 2005
91. N.N.: Oberflächen aus einem Guss. AUTOMOBIL PRODUKTION Sonderausgabe Innenraum, 40 (2004)
92. Ludwig, H.-J.: Frontendmodule. VDI-K-Tagung Kunststoffe im Automobilbau, S. 165, Mannheim, 2001
93. Grevenstein, A., et al.: Kunststofffolien – Neue Konzepte für die Karosserie-Außenhaut. ATZ **12**, 1120 (2002)
94. Grevenstein, A.: Neue Technologien für Karosserieaußenteile. VDI-K-Tagung Kunststoffe im Automobilbau, S. 116, Mannheim, 2003

**Literatur zu Abschnitt 6.3**

95. Ondratschek, D., et al.: Besser Lackieren. Jahrbuch 2013. Vincentz-Network, Hannover (2010)

96. Schumacher, U., et al.: Das Lernbuch der Lackiertechnik. Vincentz-Network, Hannover (2010)
97. Brock, T., et al.: Lehrbuch der Lacktechnologie. Vincentz-Network, Hannover (2009)
98. Kühn, W.: Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen. Vincentz-Network, Hannover (2009)
99. Streitberger, H.-J., et al.: Automotive Paints and Coatings. Wiley-VCH, Weinheim (2008)
100. Pfaff, G.: Special Effect Pigments. Vincentz-Network, Hannover (2008)
101. Gscheidle, R.: Fachkunde Karosserie- und Lackiertechnik. Europa Lehrmittel Verlag, Haan-Gruiten (2012)
102. Kittel, H., et al.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Hinzel, Stuttgart (2008)
103. Sapeur, S.: Nanotechnologie. Vincentz-Network, Hannover (2008)
104. Poth, U.: Automotive Coatings Formulation. Vincentz-Network, Hannover (2007)
105. Goldschmidt, A., et al.: BASF Handbook on Basics of Coating Technologies. Vincentz-Network, Hannover (2007)
106. Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.): Automobildesign und Technik. Vieweg, Wiesbaden (2007)
107. Kühn, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Carl Hanser, München (2006)
108. DIN-Taschenbücher aus dem Bereich der Normenausschüsse Anstrichstoffe und ähnliche Beschichtungsstoffe, Pigmente und Bindemittel. Beuth, Berlin
109. VDMA-Einheitsblätter „Oberflächentechnik". Beuth, Berlin
110. VDI-Richtlinien und -Handbücher. Beuth, Berlin
111. JOT – Journal für Oberflächentechnik. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (erscheint monatlich)
112. Besser Lackieren. Vincentz-Network, Hannover (erscheint 2 × im Monat)
113. MO – Metalloberfläche. I.G.T. Informationsgesellschaft Technik, München (erscheint monatlich)
114. European Coatings Journal. Vincentz-Network, Hannover (erscheint monatlich)
115. Farbe und Lack. Vincentz-Network, Hannover (erscheint monatlich)
116. Adhäsion KLEBEN & DICHTEN. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (erscheint 10 × pro Jahr)
117. Karosserielackierung 2012 (jährlich, Bad Nauheim) – 29. Arbeitstagung des 1. Deutschen Automobilkreises. Vincentz-Network, Hannover (2012)
118. Karosserielackierung intensiv 2012 (jährlich). Vincentz-Network, Hannover (2012)
119. Strategien der Karosserielackierung 2012 (alle 2 Jahre, Berlin). Vincentz-Network, Hannover (2012)
120. European Automotive Coating 2012 – 19. DFO Automobiltagung (jährlich). Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung (DFO), Neuss (2012)

**Literatur zu Abschnitt 6.4.1**

121. Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R.E., Vollrath, M.: Automobilergonomie. Springer-Vieweg, Wiesbaden (2015)
122. Stein, M.: Informationsergonomie – Ergonomische Analyse, Bewertung und Gestaltung von Informationssystemen. Habilitationsschrift (2008)
123. Geiser, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. ATZ **87**, 77–84 (1985)
124. Rassl, R.: Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw – Systemergonomische Analyse und Prognose. Dissertation an der Technischen Universität München (2004)
125. Schmidtke, H.: Die Ermüdung. Symptome - Theorien - Meßversuche. Huber Verl., Bern und Stuttgart (1965)
126. De Waard, D.: The Measurement of Driver's Mental Workload. Proefschrift, Dissertationsschrift an der Rijksuniversiteit Groningen (1996)
127. Warm, J. S., Parasuraman, R., Matthews, G.: Vigilance Requires Hard Mental Work and Is Stressful. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society **50**(3), 433–441. doi:10.1518/001872008X312152 (2008)
128. Körber, M.: Hypovigilanz durch automatisiertes Fahren. Seminarvortrag am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München am 24.01.2014
129. Zhang, L., Helander, M.G., Drury, C.G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. Human Factors **38**(3), 377–389 (1996)
130. Helander, M.G., Zhang, L.: Field studies of comfort and discomfort in sitting. Ergonomics **40**, 895–915 (1997)
131. Vink, P., Hallbeck, S.: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model. Applied Ergonomics 07/2011; **43**(2), 271-6. DOI: 10.1016/j.apergo.2011.06.001. (2012)
132. Krist, R.: Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie. Dissertation Katholische Universität Eichstätt (1993)
133. Knoll, C.: Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)
134. Kersten, B.: Was uns gefällt. Gehirn und Geist **3**, 50–57 (2006)
135. Braun, C., Gründl, M., Marberger, C., Scherber, C.: Beautycheck – Ursachen und Folgen von Attraktivität. Projektabschlussbericht. http://www.beautycheck.de/bericht/bericht.htm (2001)
136. Bubb, H.: Systemergonomie. Teil 5. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München, Wien (1993)
137. Bengler, K.: Aspekte der multimodalen Bedienung und Anzeige im Automobil. In: Jürgensohn, Th., Timpe, K.-P. (Hrsg.) Kraftfahrzeugführung, S. 195–206. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2001)
138. Bengler, K.: Potenzial von MMK-Technologien für zukünftige Fahrzeug-Bedienkonzepte. In: Fastl, H.,

Fruhmann, M. (Wiss. Hrsg.) Fortschritte der Akustik: Tagungsband und CD-ROM der 31. Deutschen Jahrestagung für Akustik, DAGA 2005, München, Band I und II. DEGA, Berlin (2005)
139. Bengler, K., Bubb, H., Totzke, I., Schumann, J., Flemisch F.: Automotive. In: Sandl, P., Stein, M. (Hrsg.) Information Ergonomics – A theoretical approach and practical experience in transportation. Springer, Berlin, Heidelberg (2012)
140. Rühmann, H.: Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München (1993)
141. Schmid, M., Maier, T.: Ergonomie versus Ästhetik? Die funktionale und formale Integration im Fahrzeugcockpit. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **02-03**, 12–32 (2012)
142. Israel, B.: Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
143. Treisman, A., Gelade, G.: A feature integration theory of attention. Cognitive Psychology **12**, 97–136 (1980)
144. Goldstein, E.B.: Sensation and perception. Wadsworth Cengage Learning, Belmont, CA (2009)
145. Lorenz, S.: Assistenzsystem zur Optimierung des Sitzkomforts im Fahrzeug. Dissertation Technischen Universität München (2011)
146. Bergmeier, U.: Kontaktanalog markiertes Nachtsichtsystem – Entwicklung und experimentelle Absicherung. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
147. Bubb, H.: Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (1975)
148. Bubb, H.: The Influence of Braking Distance Indication on Driver's Behaviour. In: Oborne, D.J., Levis, J.A. (Hrsg.) Human Factors in Transport Research. Vol. II, 388–346. Academic Press London, New York (1981)
149. Schneid, M.: Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
150. Zaindl, A., Zimmermann, A., Dörner, K., Kohrs, C.: Kamera-Monitor-System als Spiegelersatz beim Nutzfahrzeug. ATZ 05/2015, 28–33 (2015)
151. Reinig, H.J.: Anthropometrische Untersuchung von Schriftzeichen im öffentlichen Personenverkehr. ETR **12**(26), 843–847 (1977)
152. Fricke, N.: Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug. Dissertationsschrift Technische Universität Berlin (2009)
153. Thoma, S.: Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich. Dissertation an der Technischen Universität München (2010)
154. Arlt, F., Bubb, H.: Simulation of target directed movements within the CAD man model RAMSIS. In: Proceedings of SEA Conference on Human Modeling, The Hague, 18–20. Mai 1999, SAE International (1999)
155. McKenzie, C.L.: A note on information-theoretic basic for Fitt's law. Journal of Motor Behavior **21**, 323–330 (1989)
156. McKenzie, C.L., Paulignan. Y., Marteniuk, R. Jeannerod, M.: The coupling of arm and finger movements during prehension. Experimental Brain Research **79**, 432–435 (1990)
157. Reisinger, J.: Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
158. Kühner, M.: Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen. Dissertation an der Technischen Universität München (2014)
159. Norman, D.: New Views in Information Processing: Implications for Intelligent Decision Support Systems. In: Hollnagel, E., Manchini, G., Woods, D.D. (Hrsg.) Intelligent Decision Support in Process Environments. Springer-Verlag, Berlin (1986)
160. Norman, D.: Categorization of Action Slips. Psychological Review **88**, 1–15 (1981)
161. Spies, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Touchpadbedienkonzeptes mit adaptiv haptisch veränderlicher Oberfläche zur Menübedienung im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
162. Schmidtke, H., Rühmann, H.: Kräfte an Fußstellteilen. In: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.) Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)
163. Göktan, A.G.: Optimale Bremspedal-Kraft-Weg-Charakteristiken bei Pkw-Bremsanlagen. Automobil-Industrie 2/87, 161–169 (1987)
164. Bill, K.H., Leber, M., Becker, H., Breuer, B.: Forschungswerkzeug zur Untersuchung der Schnittstelle Fahrer/Bremspedal. Automobiltechnische Zeitschrift **101/2**, 86–93 (1999)
165. Hamberger, W., Gößmann, E.: Bedienkonzept Audi: die nächste Generation. In: VDI Wissenforum GmbH (Hrsg.) Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Berichte 2075, 677–686. VDI-Verlag, Düsseldorf (2009)
166. Bechstedt, U., Bengler, K., Thüring, M.: Randbedingungen für die Entwicklung eines idealen Nutzermodells mit Hilfe von GOMS für die Eingabe von alphanumerischen Zeichen im Fahrzeug. Urbas, L., Steffens, C. (Hrsg.) VDI-Fortschritt-Berichte, Zustandserkennung und Systemgestaltung, Reihe 22, Bd. 22, S. 125–130. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2005)
167. Götz, M.: Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)
168. Martin, R.: Lehrbuch der Anthropologie. 3. Aufl v. Karl Saller. Fischer, Stuttgart 1956–1958 (1914)
169. Geuß, H.: Entwicklung eines anthropometrischen Meßverfahrens für das CAD-Menschmodell RAMSIS.

Dissertation, Technische Universität München Göhler (1994)
170. Helbig, K., Jürgens, H. W.: Entwicklung einer praxisgerechten Körperumrißschablone des sitzenden Menschen. Bd. 187: Forschungsbericht/Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Wirtschaftsverl. NW in Komm., Dortmund, Bremerhaven (1977)
171. Carrier, R., Gilbert, R., Schiettekatte, J., Belanger, A., De Chamlain, B., Fortin, C., Lachapelle, M.: Safework: A Micro Computer-Aided Workstation Design and Analysis. In: Proceedings of the 20th Annual Conference of Human Factors Association of Canada, 14.–17. Oktober 1987. Human Factors Association of Canada, Mississanga, Ontario (1987)
172. Müller, A.: Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzeptes als Grundlage des Interior- und Exteriordesigns. Dissertation an der Universität Stuttgart (2010)
173. Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: New Concepts in Vehicle Interior Design Using Aspect: Technical Paper 1999-01 0967. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1999)
174. Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: Automobile Occupant Posture Prediction for Use With Human Models: Technical P per 1999-01-0966. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1999)
175. Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: A Statistical Method for Predicting Automobile Driving Posture. In: Human Factors **44**(4) (2002)
176. Dassault Systems: ENOVIA V5 DMU: Using 3D Manikins to Optimize Vehicle Occupant Packaging for Vehicle Occupant Accomodation. (2009)
177. Bothe, A.: Entwicklung eines parameterbasierten CAD-Modells zur Ergonomieabsicherung einer Mittelklasselimousine. Diplomarbeit am Institut für Konstruktionstechnik der Universität Stuttgart (2010)
178. Mergl, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen. Dissertation Technischen Universität München (2005)
179. Zenk, R., Franz, M., Bubb, H.: Spine load in the context of automotive seating, SAE Digital Human Modeling Conference 2007, SAE No. 2007-01-2485 (2007)
180. Hartung, J.: Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz. Dissertation Technischen Universität München (2005)
181. Schmidt , S., Schmid, L., Kaiser, R., Schwirtz, A. (2015): Designing an optimum accelerator pedal and foot rest based on biomechanical knowledge. International Journal of Vehice Design (under review).
182. Schmidt, S.: Systematische Generierung ergonomischer Vorgaben in der Fahrzeugentwicklung unter Berücksichtigung biomechanischer Aspekte. Dissertation an der technischen Universität München (2015)
183. Lorenz, D.: Äußere Einflussparameter auf Sitzpositionen im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München. Audi Dissertationsreihe, Göttingen, Cuvillier (2013)
184. Hudelmaier, J.: Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegungen und individuellen Körpercharakteristika. Dissertation Technischen Universität München (2003)
185. Remlinger, W.: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (2013)

**Literatur zu Abschnitt 6.4.2**

186. Eberspächer, J, Vögel, H.-J., Bettstetter, Ch., Hartmann, Ch.: GSM – Architecture, Protocols and Services. 3. Aufl. Wiley (2008)
187. http://www.gsma.com
188. http://www.gsmaintelligence.com
189. GSMA Intelligence: Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. Analysis, Dezember 2014
190. Bundesrepublik Deutschland: Straßenverkehrsordnung, I. – Allgemeine Verkehrsregeln, §23 Sonstige Pflichten von Fahrzeugführenden, Absatz (1a)
191. ETSI: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Point-to-Point (PP) Short Message Service (SMS) support on mobile radio interface (GSM 04.11). GTS GSM 04.11 V5.1.0 (1996-03)
192. European Commission: Digital Agenda – eCall, https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/ecall-time-saved-lives-saved
193. Heumann, M.: Abschied von der Mittelwelle. Deutschlandfunk, 17.12.2015, http://www.deutschlandfunk.de/abschied-von-der-mittelwelle-der-gefuerchtete-wellensalat.724.de.html?dram:article_id=340167
194. ETSI: Radio Broadcasting Systems – Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers; EN 300 401
195. ETSI: Digital Audio Broadcasting (DAB); Guide to DAB standards; Guidelines and Bibliography; TR 101 495
196. http://www.rds.org.uk
197. http://tisa.org
198. http://www.gps.gov/technical/ps
199. http://www.vics.or.jp/en
200. Xi, D., Weifeng, L., Tongyu, Z.: Improved Dynamic Location Reference Method Agora-C Based on Rule Optimization. Proceedings: 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. IEEE, S. 139–144. 12.–14. Dezember 2008
201. http://www.usb.org/home
202. https://www.bluetooth.com
203. http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html
204. http://www.3gpp.org
205. http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte
206. http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced
207. https://www.metis2020.com

208. http://www.siriusxm.com
209. http://hdradio.com
210. http://genivi.org
211. http://www.w3.org
212. http://java.com
213. http://www.autosar.org
214. Hickson, I., Berjon, R., Faulkner, S., Leithead, T., Doyle Navara, E., O'Connor, E., Pfeiffer, S.: HTML5; Recommendation, W3C, 28.10.2014; https://www.w3.org/TR/html5
215. http://www.nuance.com
216. http://www.apple.com/de/ios/siri
217. https://www.google.com/landing/now
218. http://www.apple.com/de/ios/carplay
219. https://www.android.com/intl/de_de/auto
220. http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdregs.htm
221. ISO: Road vehicles – Diagnostic systems – Requirements for interchange of digital information. ISO 9141:1989. ISO/TC 22/SC 31, 21.09.1989
222. http://www.spotify.com
223. http://www.napster.com
224. http://www.deezer.com

**Literatur zu Abschnitt 6.4.3**

225. Bubb, H.: Ergonomie in Mensch-Maschine-Systemen, Lehrgangsunterlagen „Komfort und Ergonomie im Kraftfahrzeug". Haus der Technik, Essen (1995)
226. Fanger, P.O.: Thermal Comfort. Analysis and Application in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen (1970)
227. DIN EN ISO 7730: Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit. Normentwurf Stand 10/2003
228. Bureau, C., et al.: MARCO, Method to Assess Thermal Comfort. VTMS6, Paper C599/051/2003, Brighton, 2003
229. Frühauf, F.: Thermische Behaglichkeit im Fahrzeug von morgen. IIR-Fachkonferenz „Innovative Konzepte für Thermomanagement im Kfz", Stuttgart, 2002
230. Kühnel, W., et al.: CFD. Cabin flow analysis as part of the product development process. VTMS6, Paper C599/053/2003, Brighton, 2003
231. Fritsche, U., Feith, T.: Komfortdüsen für mehr Klimakomfort in der Fahrzeugkabine. ATZ **9** (2007)
232. Temming, J.: Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit. Auswirkungen sommerlichen Klimas in Kfz auf die Leistungsfähigkeit der Fahrer, Schriftenreihe 177. Frankfurt (2003)
233. Arminger, G., et al.: Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen im Straßenverkehr. ATZ **9** (1999)
234. Taxis-Reischl, B.: Wärmebelastung und Fahrverhalten. ATZ **9** (1999)
235. Kroner, P., et al.: Modulares Luftgütesystem für den Innenraumkomfort. ATZ **1** (2010)
236. Schmiederer, K.: Flexible HVAC-systems for global cross-car and cross-brand application. Auto-Technology **4** (2004)
237. Kampf, H.: Die physiologisch geregelte Klimaanlage. ATZ **9** (2001)
238. Trapp, R., et al.: Potenziale zur Energieeinsparung bei intelligetem Betrieb von Klimaanlagen. VDI-Berichte, Bd. 2033 (2008)
239. Knittel, O., Ruf, C.: Von der Erfassung der Luftfeuchtigkeit zum komfortoptimierten Klimabetrieb. VDI-Berichte, Bd. 1415
240. Knittel, O., Ruf, C.: Feuchtesensor für Klimaautomaten. ATZ **1** (2000)
241. Käfer, O.: Pkw-Klimatisierung – Umluftautomatik mit Feuchteregelung im Fahrzeuginnenraum. ATZ **6** (1998)
242. N.N.: Luftgütesensor AQS. Firmenschrift der Fa. Paragon AG, Delbrück (2005)

**Literatur zu Abschnitt 6.4.4**

243. Möser, K.: Geschichte des Autos. Frankfurt (2002)
244. Wildemann, H.: Entwicklungstrends in der Automobil- und Zulieferindustrie. München (2004)
245. Lüßmann-Geiger, H.: Geruchs- und Emissionsmessung in der Automobilindustrie. Vortrag, Fraunhofer WKI Workshop „Sensorische Prüfung von Produkten für den Innenraum", Braunschweig, 20./21. Februar 2003
246. Grundler, E.: Lässt sich gefühlte Qualität objektiv beurteilen? Technische Rundschau **22**, 36–38 (2004)
247. Grunwald, M., Beyer, L. (Hrsg.): Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel (2001)
248. Pietzonka, S., Bluhm, M., Zwick, H.: Technik und Design, Neue Möglichkeiten für automobile Innenlichtkonzepte. ATZ **106**(3), 211–217 (2004)
249. Schlott, S.: Fachtagung Innenraum – Emotion und Technik vereint. Automobil Produktion 70–74 (Dezember 2004)
250. Jung, C., et al.: Das Interieur des Maybach. ATZ (Maybach Sonderausgabe), 92–118 (2002)
251. Friedrichs, B., Baumeister, A.: Mobile Innenarchitektur – Harmonie und Ästhetik. ATZ (BMW 6er Sonderausgabe), 21–24 (2004)
252. Schlott, S.: Innenraumtrends – Sehnsucht nach Einzigartigkeit. Automobilproduktion (Sonderausgabe Innenraum), 6–12 (2004)
253. Mauter, G.: Haptische Anforderungen an Bedienelemente. 3. Fachtagung Fortschritte im Automobil Innenraum, Ludwigsburg, 2004
254. N.N.: Ein Gespür für Qualität. DaimlerChrysler HighTech Report **2**, 60–63 (2004)
255. Weinhold, W.: Innovative Oberflächen-Messtechnik für Mikromechanik und Haptik. Vortrag, Material Innovativ, Würzburg, März 2004
256. Feichter, E., et al.: Interieur – intelligentes Wohlfühlen mit Niveau. ATZ/MTZ (VW Passat Sonderausgabe), 26–40 (2005)
257. Alders, K.: Komplexitätsmanagment bei der Audi AG. Vortrag, Automobilforum Graz, Oktober 2004
258. Bachsteffel J., Laux, J.: IMC Slush-Technologie im Interieur – Eine neue Werkstoffgeneration für

hochwertige Oberflächen. Tagungsband, VDI-Kongress Kunststoffe im Automobilbau, März 2005
259. Stricker, K.: Ganzheitliche Akustikentwicklung vom Radlauf bis zur Windschutzscheibe. ATZ **3**, 184–193 (2005)
260. Fromm, P., Cerhak, A., Hamberger, W.: Innenraum erleben. ATZ (Sonderausgabe Audi A8), 24–39
261. N.N.: Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015. Mercer Management Consulting & Frauenhofer Gesellschaft, München (2003)
262. Büchling, J.: Rapid manufacturing – Auf direktem Weg zur Serie. Automobil Industrie **1–2**, 38–41 (2005)
263. Schlott, S.: AGR-Sitze – Komfort für alle Klassen. Automobilproduktion **3**(Sonderausgabe Innenraum), 32–34 (2004)
264. Laux, J.: Neue Werkstoffgeneration für hochwertige Oberflächen. ATZ 1014–1019 (2006)
265. Ehling, K.: „Gefühl Licht": Lichtwahrnehmung durch den Fahrer. Vortrag, CTI Automotive Interior Lighting Conference, 9./10. Oktober 2006
266. Wambsganß, H.: Licht im Fahrzeuginnenraum. Vortrag beim Festsymposium zum 50jährigen Bestehen des Fachgebietes Lichttechnik an der TU Darmstadt, 24. November 2006
267. ATZ: Sonderausgabe „Der Neue Sprinter von Mercedes Benz" (Juni 2006)
268. Roscher, M.: Serieneinsatz, Weiterentwicklung und Neuerungen von naturfaserverstärkten Trägerwerkstoffen im automobilen Innenraum. Vortrag, 5. Fachkongress Fortschritte im Automobilinnenraum, Ludwigsburg, 14./15. November 2006
269. Miller, M.: Revolution von Oberflächendesign, Prototyping und Produktionstechnik. Vortrag, 5. Fachkongress Fortschritte im Automobilinnenraum, Ludwigsburg, 14./15. November 2006
270. Rottig, H.-J.: Der Schritt von der Innenverkleidung zum Türmodul. Kunststoffe **10**, 113–116 (2006)
271. Audi AG: Aspekte der virtuellen Entwicklung beim Innenraum des Q7. Presseinformation, Audi Q7, Februar 2006
272. Schneider, T., et al.: Modernes Thermomanagement am Beispiel der Innenraumklimatisierung. ATZ **02** (2007)
273. Wambsganß, H.: Lichtdesign – ein ganzheitlicher Ansatz in der frühen Konzeptphase. Vortrag, 9. Fachkongress Innenraum, Stuttgart, 16./17. November 2010
274. Enz, E.: Innenraum-Lichtgestaltung mit Textil-, Leder- und Holzflächen. Vortrag, 9. Fachkongress Innenraum, Stuttgart, 16./17. November 2010
275. Heers, R.: HMI experience for future cockpit electronic systems. Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
276. El-Khoury, H.: Automotive touchscreens: Innovation, solutions and the new role for a semiconductor company. Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
277. Steiner, P.: Infotainment im neuen Audi A8. Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
278. Seydel, D.: Ort- und zeitunabhängige Multimedianutzung – unterwegs, zu Hause und im Fahrzeug. Vortrag, 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
279. Lamberti, R.: Smartphone Apps und Automobil – eine Symbiose? Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
280. Lindlbauer, M.: Das Internet kommt ins Fahrzeug: offenere Use Cases mit Security absichern und früher realisieren. Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010
281. Carmody, T.: Trends in connectivity and location 2012 and beyond. Vortrag. 1. Fachtagung Infotainment, München, 12./13. Oktober 2010

# Fahrwerk

*Dr.-Ing. Andreas Bootz, Dipl.-Ing. Steffen Gruber, Dr. Jens Holtschulze, Hugo Kroiss, Dr. Klaas Kunze, Dipl.-Ing. (FH) Roman Müller, Dr.-Ing. Axel Pauly, Dipl.-Ing. James Remfrey, Dr.-Ing. Hansjörg Rieger, Dr.-Ing. Erich Sagan, Dipl.-Ing. Martin Schwarz, Dipl.-Ing. Ludwig Seethaler, Dr.-Ing. Jan Sendler, Dipl.-Ing. Hubert Strobl, Dipl.-Ing. Thomas Unterstraßer und Dipl.-Phys. Heiner Volk*

7.1 **Einführung** – **736**

7.2 **Bremssysteme** – **746**

7.3 **Reifen, Räder, Gleitschutzketten** – **800**

7.4 **Fahrwerkauslegung** – **834**

7.5 **Beurteilungskriterien** – **908**

**Literatur** – **917**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_7

## 7.1 Einführung

Automobile sind Fahrzeuge, deren Bewegung auf einer vorgegebenen Oberfläche, in der Regel einer Fahrbahn, vom Fahrer in Längs- und Querrichtung sowie um die Hochachse (Gierachse) in bestimmten, vom Straßenverlauf oder physikalisch vorgegebenen Grenzen, frei bestimmt werden kann, wobei die Quer- und Gierbewegung eng miteinander gekoppelt sind. Hierbei können sich Eingriffe fahrdynamischer Regel- und Assistenzsysteme den Eingaben des Fahrers überlagern mit dem Ziel das Verhalten des Fahrzeugs günstig zu beeinflussen bzw. den Fahrer zu unterstützen.



In senkrechter Richtung zur Fahrbahn muss das Automobil hingegen dem Straßenverlauf ohne aktiven Eingriff des Fahrers folgen (Berg- u. Talfahrt). Kurzwellige Fahrbahnunebenheiten sollten jedoch nur soweit auf das Fahrzeug übertragen werden, wie es die Fahrsicherheit, der Fahrerwunsch nach Fahrbahnkontakt und das subjektive Fahrkomfortempfinden erfordern.

Das quer-, längs- und vertikaldynamische Verhalten eines Automobils wird durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. In vielen Bereichen liegen nicht-lineare Zusammenhänge und komplexe Kopplungen der Zustandgrößen vor. Daher stellt das Fahrwerk und in erweitertem Sinne die Fahrdynamik ein hoch interessantes Themengebiet dar, insbesondere wenn neben dem Fahrer als Zustandsbeobachter, Regler, Aktuator und subjektiver Beurteiler, auch Regelsysteme und Assistenzsysteme aktiv in fahrdynamische Funktionen eingreifen.

### 7.1.1 Definition des Begriffs Fahrwerk

Mit Ausnahme der Schwerkraft und der aerodynamischen Kräfte und Momente werden alle äußeren Kräfte und Momente dem Fahrzeug über die Kontaktzone der Reifen mit der Straße aufgeprägt. Die aerodynamischen Kräfte und Momente werden in der Regel als Störgrößen betrachtet. Aerodynamische Kräfte und Momente sind jedoch einsetzbar zur Optimierung des Fahrverhaltens. Wegen der starken Interaktion zwischen Fahrwerk und Aerodynamik bei hohen Geschwindigkeiten sind beide gemeinsam zu betrachten.

Das Fahrwerk im engeren Sinn kann als Verbund der Systeme des Kraftfahrzeugs verstanden werden, die zur Erzeugung und Beeinflussung der Kräfte in den Kontaktzonen Fahrbahn/Reifen als auch zu deren Übertragung auf das Fahrzeug dienen: Rad/Reifen, Radbremsen, Radträger/Radführung/Lenksysteme, Federung/Dämpfung.

Im erweiterten Sinn werden zusätzlich alle Systeme mit einbezogen, die für das Führen eines Kraftfahrzeugs erforderlich sind: Brems-, Kupplungs- und Gasbetätigung, Lenkrad, Lenksäule, fahrdynamische Regelsysteme zur Unterstützung der Funktionen des Fahrwerks, sowie Fahrerassistenzsysteme, die zur Entlastung des Fahrers seine Führungsaufgaben teilweise und in einigen Fällen ganz übernehmen. Dazu gehören aktive Sicherheitssysteme, die bei Unfallgefahr entweder fahrdynamische Regelsysteme praekonditionieren oder unmittelbar Aktionen zur Vermeidung eines Unfalls bzw. zur Reduzierung der Unfallschwere einleiten. Mit Hilfe der Umfelderkennung können die fahrdynamischen Regelsysteme auf wertvolle Informationen zugreifen, während andererseits die Assistenzsysteme die vorhandenen fahrdynamischen Aktuatoren nutzen.

Im vorliegenden Kapitel wird ein Überblick über die Funktionen der Radführung, Lenkung und Federung sowie der fahrdynamischen Regelsysteme gegeben. Die Brems- und Antriebsschlupfregelsysteme werden in ► Abschn. 7.2.5 und ► Abschn. 7.2.6 eingehend behandelt, Fahrerassistenzsysteme in ► Abschn. 8.5.5.

### 7.1.2 Aufgaben des Fahrwerks

Mit seiner Rolle als Verbindungsglied zwischen Straße und Fahrzeug liefert das Fahrwerk einen wesentlichen Beitrag zu Fahrdynamik und Fahrkomfort. Das Fahrwerk beeinflusst Raumnutzung, Gewicht, Aerodynamik und Kosten.

Der hohe Stellenwert des Fahrwerks im Gesamtsystem Automobil lässt sich aus Folgendem ableiten:

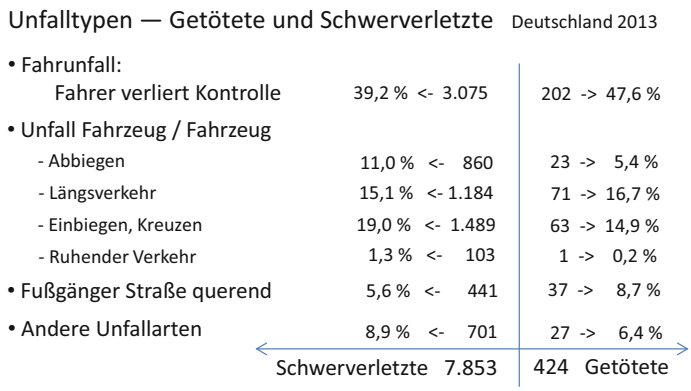



**Abb. 7.1** Verteilung von Schwerverletzten und Getöteten in Abhängigkeit vom Unfalltyp (Zahlen aus: Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 7, 2013)

1. Ein fahrdynamisch gut abgestimmtes Automobil ist für den Fahrer mit geringem Aufwand zu fahren. Es setzt die vom Fahrer eingegebenen Stellgrößen unmittelbar vorhersehbar und präzise um und vermittelt ein Gefühl der Sicherheit bis hin zur Befriedigung [2]. Dieser erlebbare Eindruck ebenso wie die fahrdynamische Bewertung in der Fachpresse, ist ein wichtiges Entscheidungskriterium beim Kauf.
2. Die Fahrdynamik eines Automobils bestimmt ganz wesentlich die Möglichkeiten des Fahrers, kritische Situationen zu vermeiden oder zu beherrschen. In Deutschland waren 2013 etwa die Hälfte der Verkehrstoten und 40 % der Schwerverletzten als Folge des Verlustes der Kontrolle über das Fahrzeug durch den Fahrer zu beklagen. Da das Fahrzeug in der Folge die Fahrbahn verlässt oder mit einem anderen Fahrzeug kollidiert überrascht die hohe Zahl der Opfer nicht (Abb. 7.1). Wegen der Häufigkeit von Unfällen als Folge des Kippens von Fahrzeugen mit hohem Schwerpunkt wurde von der nordamerikanischen Behörde NHTSA der „fish hook"-Test zur Bewertung der Kippsicherheit eingeführt [1]. Ohne Einzelanalyse der Unfallabläufe ist eine quantitative Aussage über das Potenzial einer weiteren Optimierung des Fahrverhaltens und des Einsatzes fahrdynamischer Regel- und Assistenzsysteme nicht möglich, doch erscheint eine deutliche Verringerung der Zahl der Unfallopfer durch Abkommen von der Fahrbahn und Zusammenstoß mit entgegenkommenden Fahrzeugen realistisch. Die Fahrwerkregelsysteme in Verbindung mit den Fahrerassistenzsystemen ermöglichen, nicht nur die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Fahrer zu erhöhen sondern auch die Unfallfolgen zu reduzieren (crash mitigation). So kann z. B. bei Unvermeidbarkeit eines Zusammenstoßes automatisch eine Vollbremsung eingeleitet werden. Hierzu ist eine sehr gute Interpretation des Umfeldes erforderlich sowie eine sichere Prognose für den möglichen Bewegungsablauf des eigenen Fahrzeugs als auch der anderen beteiligten Verkehrsteilnehmer.
3. Das Fahrwerk setzt mit den Fahrwerkregelsystemen die Voraussetzungen für die Einführung von Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer bei seiner Fahrzeugführungsaufgabe unterstützen. Ebenfalls werden hiermit die Voraussetzungen geschaffen für eine Automatisierung von Teilfunktionen des Fahrens, wie z. B. automatische Abstandsregelung, Stoppen und Anfahren im Stau, selbständiges Einparken und Fahrspurassistenz. Für voraussichtlich begrenzte Anwendungen ist vollautomatisches Fahren realisierbar. Bei den Systemen, die die Funktion des Fahrers übernehmen, besteht sowohl eine juristische als auch eine technisch-wirtschaftliche Herausforderung. Juristisch ist die Haftungs-Frage im Fall eines Unfalls zu klären. Analog zur Luftfahrt wird der Fahrer voraus-

**Tabelle 7.1** Beteiligung der Fahrzeugfreiheitsgrade an Längs-, Quer- und Vertikaldynamik

| Bezeichnung | Primäre Freiheitsgrade | Sekundäre Freiheitsgrade |
|---|---|---|
| Längsdynamik | Längsbewegung<br>Nickbewegung | Hubbewegung |
| Querdynamik | Querbewegung<br>Gierbewegung<br>Wankbewegung | Nickbewegung<br>Hubbewegung |
| Vertikaldynamik | Hubbewegung<br>Nickbewegung<br>Wankbewegung | Querbewegung |



sichtlich gezwungen sein die automatisierten Funktionen zu überwachen um bei einer Fehlfunktion eingreifen zu können.

4. Hoher Fahrkomfort wird nicht nur subjektiv als angenehm empfunden und stellt somit ein Wettbewerbskriterium dar, sondern es besteht ein nachgewiesener Einfluss auf das physische und psychische Leistungsvermögen des Fahrers und somit auf die Sicherheit [2]. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass hoher Fahrkomfort im Widerspruch zu hoher Fahrdynamik und Sicherheit stehen kann. Dieser Zielkonflikt kann durch den Einsatz adaptiver Systeme gelöst werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung des Fahrkomforts durch den Fahrer subjektiv erfolgt und daher sowohl von seiner fahrzeugbezogenen Erwartungshaltung als auch von seiner Motivation abhängt.

Das Fahrwerk ist nicht allein maßgebend für Fahrdynamik und Fahrkomfort, von gleichrangiger Bedeutung sind Gesamtfahrzeugparameter wie Schwerpunkthöhe, Achslastverteilung, Trägheitsradien, Radstand und Spurweite sowie im höheren Geschwindigkeitsbereich die aerodynamischen Eigenschaften. Wegen der erforderlichen Reduzierung der zur globalen Erwärmung beitragenden Emissionen und der Verknappung und Verteuerung der Kraftstoffe, ergeben sich neue Antriebskonzepte mit höherem Bauraumbedarf und Gewicht. Da das Fahrwerk einen hohen Bauraumbedarf im Fahrzeug hat, sollte Ziel sein, mit geringerem Bauvolumen und Gewicht die fahrdynamischen Ziele zu erreichen.

Es sei noch angemerkt, dass eine Zusammenstellung der häufig vorkommenden Formelzeichen und Begriffe den Rahmen dieses einführenden Abschnitts würde. Es wird daher auf die Literatur hingewiesen, z. B. [3].

### 7.1.3 Fahrdynamik und Fahrwerkskräfte

Geht man von der bereits skizzierten Vorstellung aus, dass das Fahren eines Automobils die Bewegung eines Körpers in einer Gasatmosphäre und einem Schwerkraftfeld ist, wobei die vertikalen Kräfte, die Antriebs- und Bremskräfte sowie die seitlichen Führungskräfte über die Kontaktflächen der Reifen auf die Fahrbahn übertragen werden, erscheint es naheliegend, die Dynamik des Fahrens ausgehend von diesen Kräften zu analysieren.

Dieser Ansatz geht konform mit der oft vorgenommenen Unterteilung der Fahrdynamik in Längs-, Quer-und Vertikaldynamik. Die 6 Freiheitsgrade des Fahrzeugs, hier vereinfachend als ein Einmassensystem betrachtet, sind wie in Tab.7.1 dargestellt an Längs-, Quer- und Vertikaldynamik beteiligt.

Die Längs-, Quer- und Vertikaldynamik sind weder bei den primär betroffenen Freiheitsgraden noch bei den sekundären Freiheitsgraden voneinander unabhängig. Darüber hinaus bestehen gegenseitige, komplexe Abhängigkeiten der Reifenkraftkomponenten (▶ Abschn.7.3.4).

#### 7.1.3.1 Querdynamik: Fahrwerkskräfte in Querrichtung

In Fahrzeugquerrichtung werden hauptsächlich die Reifenseitenkräfte von der Fahrbahn auf den Fahrzeugaufbau übertragen. Bei gelenkten Rädern ergeben sich in Fahrzeugquerrichtung Komponenten aus den Reifenumfangskräften, die bei größe-

ren Lenkwinkeln nicht vernachlässigt werden können.

Definitionsgemäß besteht die primäre Aufgabe der Radführungskräfte darin, die Querdynamik des Fahrzeugs bezüglich Einhaltung der vom Fahrer gewünschten Bahn sowie der Drehbewegung um die Hochachse zu kontrollieren. Durch die Höhe des Schwerpunktes zur auf den Aufbau einwirkenden Seitenkraftkomponente ergibt sich die Wankbewegung des Fahrzeugs. Sie entkoppelt die Querbewegung des Fahrzeugschwerpunktes von der Querbewegung der Radaufstandsflächen. Das Fahrzeug mit dem Umfeld stellen die Regelstrecke dar, der Fahrer den Regler. Die in der Regelungstechnik üblichen Begriffe und Verfahren finden daher auch in der Fahrdynamik Verwendung, z. B. [4].

Die Reifenseitenkräfte sind im Wesentlichen eine Funktion des Schräglaufwinkels der Räder mit der Radlast und der Umfangskraft als wichtigste Parameter (► Abschn.7.3.4.4). Reifenseitenkraftkomponenten, die aus dem Radsturz des Reifens resultieren, sind bei Reifen für Automobile im Gegensatz zum Motorrad von geringerer Bedeutung und werden hier nicht berücksichtigt. Sie sind jedoch für die Feinabstimmung des Fahrverhaltens, den Reifenverschleiß und die erzielbare maximale Seitenkraft von Wichtigkeit.

Die Schräglaufwinkel und mit ihnen die Reifenseitenkräfte lassen sich entsprechend ihres Entstehungsmechanismus in unterschiedliche Komponenten einteilen: als Folge vom Lenken der Räder, als Folge der Bewegung des Fahrzeugs relativ zur Fahrbahn und als Folge von Querbewegungen der Räder relativ zum Fahrzeug.

#### 7.1.3.1.1 Lenken der Räder

Durch Aufprägen eines Lenkwinkels an den Rädern der Vorderachse und bei Allradlenkung auch an der Hinterachse erzeugt der Fahrer unmittelbar eine Änderung der Schräglaufwinkel dieser Räder. Die resultierende Seitenkraft oder Seitenkraftänderung stellt die erste Phase des Reifenseitenkraftaufbaus dar. Sie erzeugt eine Änderung der Querbeschleunigung und, da sie exzentrisch zum Fahrzeugschwerpunkt angreift, ebenfalls eine Drehbeschleunigung. Letztere enthält eine Komponente um die Gierachse und eine Komponente um die Wankachse [5]. Da die Quer-, die Gier- und die Wankbeschleunigung im ersten Augenblick ausschließlich von der Seitenkraft der gelenkten Räder verursacht werden, sind sie zueinander proportional. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Anfangsbewegung des Fahrzeugs um eine fahrzeugfeste Momentanachse erfolgt. Bei ausschließlichem Lenken der Vorderräder ist die Momentane Drehachse das räumliche Analogon zum Stoßmittelpunkt bei einer ebenen Bewegung. Als Folge der Änderung des Bewegungszustandes des Fahrzeugs bilden sich sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse in den Radaufstandspunkten Geschwindigkeitskomponenten quer zum Reifen aus, die den ursprünglichen Schräglaufwinkel der Vorderachse reduzieren bzw. den weiteren Aufbau verzögern, während an der Hinterachse durch die sich dort aufbauende Quergeschwindigkeit der Seitenkraftaufbau erst beginnt. Die anfängliche Richtung der Seitenkraft an der Hinterachse hängt von der Lage des Schwerpunktes, den Trägheitsradien für Gieren und Wanken, dem Radstand und der Höhe der Rollzentren an Vorder- und Hinterachse ab (◘ Abb.7.2). Die anfängliche Richtung prägt wesentlich das Anlenkverhalten des Fahrzeugs. Erst danach entstehen als Folge des sich aufbauenden Schwimmwinkels und der Giergeschwindigkeit die Schräglaufwinkel und Reifenseitenkräfte wie sie für stationäre Kurvenfahrt leicht herleitbar sind. Der für ein Fahrzeug mit nicht gelenkter Hinterachse geschilderte Ablauf lässt sich durch kontrolliertes Lenken der Hinterräder im Sinne einer Optimierung des Anlenkverhaltens verändern.

Lenkbewegungen der Räder werden außer durch den Fahrer auch durch konstruktive Maßnahmen, den Vorspuränderungen, verursacht. Diese entstehen:

- durch die vertikalen Federbewegungen teils als Folge der Kinematik der Radführung, teils als Folge der Änderung der Kräfte in der Radführung durch die Feder- und Dämpferkräfte und der hiermit einhergehenden elastischen Verformungen,
- durch Reifenlängs- und -querkräfte sowie Reifenrückstellmomente als Folge der elastokinematischen Eigenschaften der Radführung,
- durch elastische Verformungen im Lenkungsstrang,
- durch aktive Lenksysteme (► Abschn.7.4.6).

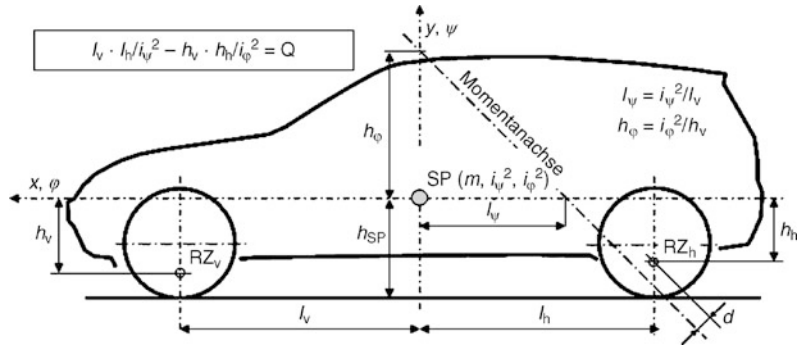



**Abb. 7.2** Einfluss der Fahrzeugarchitektur auf die erste Fahrzeugreaktion bei schnellen Lenkwinkeländerungen. Lage der Momentanachse relativ zum Rollzentrum der Hinterachse: vor: $Q > 1$, auf: $Q = 1$, hinter: $Q < 1$

7

Die beschriebenen Möglichkeiten zur Lenkwinkeländerung werden gezielt eingesetzt um den erforderlichen Grad an Fahrstabilität einzustellen, die Phasenlage zwischen Lenkwinkel, Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung bei instationären Fahrmanövern zu verbessern und die Kurshaltung beim Lastwechsel und Bremsen in der Kurve zu optimieren.

Konventionelle passive Fahrwerke können als eine Art einfache „mechanische Regelung" verstanden werden, die situativ automatisch korrigierende Lenkbewegungen an Vorder- und Hinterrädern durchführt. Zur Verbesserung von Anlenkverhalten und Stabilität gehört es zur Auslegung vieler Hinterachsen, dass sich bei Kurvenfahrt ein Lenkwinkel aufbaut, der den Gradienten der Achsseitenkraft über dem Schräglaufwinkel der Achse erhöht, während an der Vorderachse die entgegengesetzte Wirkung vorgesehen wird.

Der Nachteil dieser mechanischen passiven Regelung besteht in den sehr einfachen Abhängigkeiten der induzierten Lenkwinkelkomponente vom Einfederzustand und den einwirkenden Kräften. Außerdem sind diese Größen nicht die optimalen Zustandsgrößen für die Beschreibung des momentanen fahrdynamischen Zustandes. Es kann beispielsweise nicht unterschieden werden, ob die am Reifen wirkende Seitenkraft vom Fahrer herbeigeführt wurde um eine Richtungsänderung zu bewirken, oder ob es sich um eine Störkraft handelt. Deshalb werden von einigen Fahrzeugherstellern aktive Systeme an der Hinterachse eingesetzt um mittels rechnergeregeltem Lenken den Seitenkraftaufbau zu beeinflussen. Bekannt sind ebenfalls Systeme (z. B. Aktivlenkung von BMW [6]), die an der Vorderachse eine intelligente Interpretation der Eingabe des Fahrers ermöglichen und das Verhalten des Regelsystems Fahrer/Fahrzeug/Straße optimieren.

Es wird häufig der Begriff „steer by wire" verwendet, falls die eindeutige mechanische Verbindung zwischen dem Betätigungsorgan und den Rädern mittels Regelsystemen aufgebrochen wird.

#### 7.1.3.1.2 Querverschiebung des Radaufstandspunktes

Verschiebungen des Radaufstandspunktes quer zur Rollrichtung eines Rades erzeugen Schräglaufwinkel, da die sich aus Längs- und Quergeschwindigkeit ergebenden Geschwindigkeitsvektoren nicht mit der Rollrichtung des Rades zusammenfallen. Die resultierenden Seitenkräfte widersetzen sich der Querverschiebung. Die Querbewegung an den Radaufstandspunkten kann zwei Ursachen haben:

- Die gesamte Achse wird als Folge von Quer-, Gier- und Wankbewegung des Fahrzeugs quer zur eigentlichen Rollrichtung der Räder bewegt. Dies kann eine Folge von z. B. Lenkbewegungen, Kurvenfahrt, Seitenwind oder Straßenquerneigung sein. Die Zusammenhänge hierzu sind in den ► Abschn. 7.1.3.1.1 und ► Abschn. 7.1.3.1.3 näher beschrieben.
- Die Radführungen erzeugen in der Regel eine Querbewegung des Radaufstandspunktes beim Ein- und Ausfedern. Das Verhältnis der

Querbewegung zur Vertikalbewegung wird durch die Höhe des Rollzentrums bestimmt. Das Verhalten von Einzelradaufhängungen, Verbundlenkerachsen und Starrachsen ist unterschiedlich. Die Höhe des Rollzentrums beeinflusst sowohl die Wankmomentenabstützung der Achse unabhängig von Federung und Dämpfung bei Kurvenfahrt als auch das Anlenkverhalten. Nachteilig wirkt sich die kinematisch bedingte Querverschiebung des Radaufstandspunktes aus, wenn sie durch Fahrbahnunebenheiten hervorgerufen wird, da störende Reifenkräfte in Querrichtung entstehen, die sich ungünstig auf Geradeauslauf und Kurshaltung auswirken.

#### 7.1.3.1.3 Stabilisieren des Fahrzeugs auf einer vorgegebenen Bahn

Die Schräglaufwinkel und damit die Reifenseitenkräfte entstehen in diesem Fall durch Abweichen von der ungestörten Fahrzeugbahn infolge äußerer Einwirkungen, z. B. Seitenwind, Straßenseitenneigung und -unebenheiten, aber auch durch Störung des Seitenkraftverhältnisses an Vorder- und Hinterachse durch z. B. eine vom Fahrer ausgelöste Längsbeschleunigung. Geht man vereinfachend von einem stabilen, eingeschwungenen Zustand aus, so erfolgt durch die Störung eine Quer-, Wank- und Gierbewegungskomponente. Bei einer korrekten fahrdynamischen Auslegung des Fahrwerks resultieren Kraftänderungen an den Rädern, die zu einem neuen eingeschwungenen Fahrzustand führen mit nur geringer Abweichung von der ursprünglichen Bahn. Die Größe der Abweichung ist ein Maß für die querdynamische Störempfindlichkeit eines Fahrzeugs.

Die Störempfindlichkeit nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zu. Gründe hierfür sind:

- die Abhängigkeit des resultierenden Schräglaufwinkels von der Geschwindigkeit. Hieraus folgt, dass doppelte Fahrgeschwindigkeit doppelte resultierende Quergeschwindigkeit bedeutet bei Annahme einer gleichen seitlichen Störkraft,
- die näherungsweise umgekehrt proportionale Abhängigkeit der Gierdämpfung von der Fahrgeschwindigkeit,
- die proportionale Zunahme der aerodynamischen Seitenkräfte und Giermomente bei gleicher Seitenwindgeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs,
- die quadratische Abhängigkeit des Auftriebs von der Geschwindigkeit.

Aktive Lenksysteme bieten ein hohes Potenzial, Abweichungen vom Sollwert ausregeln bzw. verringern zu können. Voraussetzung ist jedoch ein ausreichend schnelles Erkennen der Abweichung und Reagieren der Regelsysteme um Interferenz mit der Fahrerreaktion zu vermeiden.

### 7.1.3.2 Längsdynamik: Fahrwerkskräfte in Fahrzeuglängsrichtung

In Fahrzeuglängsrichtung werden im Wesentlichen die Antriebs- und Bremskräfte von der Fahrbahn auf den Fahrzeugaufbau übertragen. Bei gelenkten Rädern wirken in Fahrzeuglängsrichtung ebenfalls Komponenten aus den Reifenseitenkräften, die bei größeren Lenkwinkeln nicht vernachlässigt werden können.

Die primäre Aufgabe der Antriebs- und Bremskräfte besteht darin, die Längsdynamik des Fahrzeugs bezüglich Beschleunigung und Geschwindigkeit zu kontrollieren. Durch Längsbeschleunigungen in Verbindung mit der Höhe des Fahrzeugschwerpunktes entstehen dynamische Achslaständerungen wodurch Nick- und Hubbewegung angeregt werden. Bei Kurvenfahrt wird wegen des unterschiedlichen Einfederzustandes links und rechts in der Regel auch der Wankwinkel beeinflusst und die Wankmomentenabstützung zwischen Vorder- und Hinterachse verändert.

Die Kopplung der Längs- und der Vertikaldynamik hängt von der Schwerpunktlage, dem Radstand und der Radführungskinematik (Antriebs- und Bremskraftabstützwinkel, ► Abschn.7.4.1) ab. Nick- und Hubsteifigkeit sowie Dämpfung sind die stabilisierenden Größen. Bei angetriebenen Starrachsen ist zusätzlich das auf den Aufbau als Wankmoment wirkende Kardanwellenmoment zu beachten.

Folgende physikalische Zusammenhänge bewirken eine Beeinflussung der Querdynamik durch die Längsdynamik:

Die dynamische Achslastveränderung infolge Beschleunigen oder Verzögern des Fahrzeugs ergibt eine gegensinnige Veränderung der momentanen Normalkraft an Vorder- und Hinterachse. Wegen der in einem weiten Bereich annähernd linearen Abhängigkeit der Reifenseitenkraft von der Normalkraft verändert sich die Seitenkraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse merklich, woraus beim Verzögern ein in die Kurve hineindrehendes übersteuerndes Moment, beim Beschleunigen ein aus der Kurve hinausdrehendes untersteuerndes Moment entsteht.

*Vorspuränderungen*, unmittelbar hervorgerufen durch die Änderung der Umfangskräfte (elastokinematische Vorspuränderung), mittelbar durch die Änderung des Einfederzustands der Räder (kinematische Vorspuränderung) erzeugen Seitenkraftkomponenten, die das Fahrverhalten beeinflussen (► Abschn.7.4.1 und ► Abschn.7.4.2). Die Vorspuränderungen ermöglichen das Abstimmen des Fahrverhaltens beim Lastwechsel oder beim Bremsen in der Kurve.

*Umfangskraftdifferenzen* zwischen dem linken und dem rechten Rad können durch die Bremsen oder den Antrieb verursacht werden. Sie erzeugen unmittelbar ein Moment um die Fahrzeughochachse. In der Regel wird versucht den Unterschied gering zu halten, bei den Bremsen durch das Konzept, bei angetriebenen Achsen durch die Verwendung eines Differenzialgetriebes. Bei den Brems- und Antriebsschlupfregelsystemen ist teilweise ein Kompromiss zwischen der Höhe der resultierenden Längskraft und dem infolge Asymmetrie erzeugten Giermoment erforderlich.

Das durch ungleiche Umfangskräfte erzeugte Giermoment wird jedoch auch positiv eingesetzt. Bei Sperrdifferenzialen erzeugt die Sperrwirkung je nach Fahrzustand unterschiedliche Wirkungen. Bei geringer Querbeschleunigung in Verbindung mit einem kleinen Kurvenradius ergibt sich ein in die Geradeausfahrt rückdrehendes Giermoment das sich der Zunahme der Untersteuerneigung durch die Achslastverlagerung überlagert. Um in diesem Fahrzustand ein ausgeprägtes Untersteuern zu vermeiden, wird die Sperrwirkung des Differenzials begrenzt bzw. geregelt. Beim Verzögern mit dem Motorbremsmoment hingegen hilft das Sperrmoment, das durch die dynamische Achslastverlagerung bewirkte übersteuernde Moment zu kompensieren.

Bei höherer Geschwindigkeit und hoher Querbeschleunigung ändert sich jedoch der Wirkmechanismus der Quersperrung. Sowohl beim Beschleunigen als auch beim Verzögern mit dem Motor stellt sich nun als Folge der unterschiedlichen Radlasten kurvenaußen und -innen eine höhere Umfangskraft am kurvenäußeren Rad ein. Durch das Beschleunigen wird das Fahrzeug nun, im Gegensatz zu vorher, übersteuernder, beim Gaswegnehmen bleibt die Untersteuertendenz jedoch auch hier erhalten. Um letzteren Effekt, der sich positiv auf das Lastwechselverhalten auswirkt, verstärkt zu nutzen, kann die Sperrwirkung des Differenzials im Schiebebetrieb höher gewählt werden als beim Antreiben.

Bei Differenzialen mit regelbarem Sperrmoment können die geschilderten Wirkprinzipien genutzt werden um zusätzlich zur Radschlupfregelung eine Stabilitätsregelung des Fahrzeugs zu realisieren. Während bei einem geregelten Sperrdifferenzial bei höherer Geschwindigkeit eine fahrdynamische Wirkung nur beim Antreiben oder Verzögern erzielt wird, können mittels spezieller Achsgetriebe auch ohne Antriebs- oder Schleppmomente ein hinein- und hinausdrehendes Giermoment bzw. Gierdämpfung erzeugt werden [7, 8].

Bei Bremsregelsystemen wird ein geregelter einseitiger, vom Fahrer unabhängiger Bremseneingriff gezielt eingesetzt, um das Fahrzeug im Grenzbereich zu stabilisieren [9]. Auch außerhalb des Grenzbereiches werden die Möglichkeiten einer asymmetrischen Bremskraftverteilung genutzt um das Fahrverhalten beim Bremsen in der Kurve zu verbessern.

Die *Abhängigkeit der Reifenseitenkraft von der Umfangskraft* ermöglicht es beim Bremsen über die Bremskraftverteilung zwischen Hinter- und Vorderachse das Seitenführungsvermögen einer Achse gegenüber der anderen zu schwächen und auf diese Weise mittelbar ein Moment um die Hochachse zu erzeugen. Beim Antreiben und Verzögern mit dem Motorantriebs- bzw. -Schleppmoment kann analog das Seitenführungsvermögen reduziert werden. Bei Allradantrieb beeinflusst daher die Antriebskraftverteilung auf Vorder- und Hinterachse das Fahrverhalten. Der Einfluss ist jedoch im üblichen

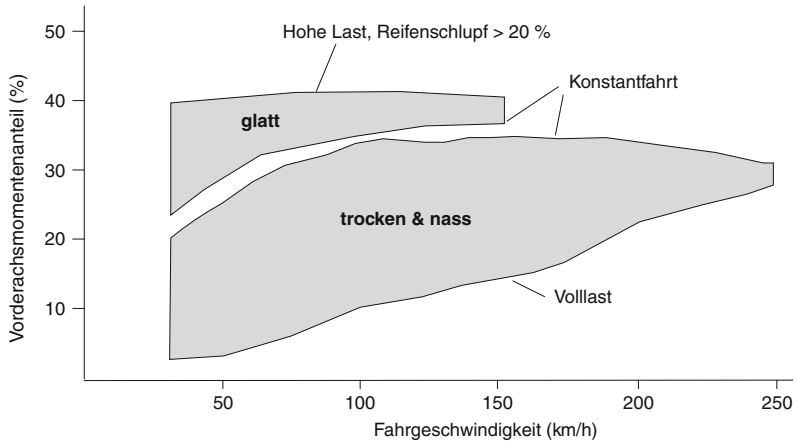



**Abb. 7.3** Antriebskraftverteilung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit beim Porsche Carrera [10]

Bereich des Brems- und Antriebschlupfes gering und wird vom Einfluss der Achslaständerung überdeckt. Jedoch im Bereich der maximal übertragbaren Kräfte an einer Achse, ist eine gezielte Verteilung der Bremskräfte und bei Allradantrieb der Antriebskräfte von wesentlichem Einfluss [7, 8, 10]. Die momentanen Radlasten und der zur Verfügung stehende Reibbeiwert sind wichtige Einflussgrößen bei der Optimierung der Querdynamik (Abb. 7.3).

#### 7.1.3.3 Vertikaldynamik: Fahrwerkskräfte in Fahrzeughochrichtung

Die vertikalen Kräfte, die zwischen Fahrwerk und Aufbau wirken, ergeben sich aus Feder- und Dämpferkräften sowie aus den vertikalen Reaktionskräften der Reifenquer- und -längskräfte. Die Reifennormalkräfte differieren von den resultierenden Feder-, Stabilisator- und Dämpferkräften um die Trägheitskräfte der ungefederten Massen. Die Aufgabe der Vertikaldynamik ist es, die Aufbaumasse auf den Rädern abzustützen und Hub-, Wank- und Nickbewegungen des Fahrzeugs relativ zur Fahrbahn in engen Grenzen zu halten, bzw. bei aktiven Systemen wenigstens die Wankbewegung zu eliminieren. Das Wanken ist ein notwendiger Freiheitsgrad, der die Querdynamik jedoch negativ beeinflusst. Der Aufbau soll, soweit es der Federweg zulässt, gegenüber den Fahrbahnunebenheiten isoliert werden, jedoch soll der gefühlte Kontakt zur Fahrbahn erhalten bleiben. Um die Übertragung der Längs- und Seitenkräfte möglichst wenig zu beeinträchtigen ist eine weitere Aufgabe der vertikaldynamischen Systeme die dynamischen Radlastschwankungen ausreichend klein zu halten. Die Maxima der Radlastschwankungen treten im Bereich der Eigenfrequenz der ungefederten Massen und der Aufbaueigenmode auf. Während höherfrequente Radlastschwankungen nur oberhalb des linearen Bereiches von Seiten- und Umfangs- zur Normalkraft das Potential der Reifen merklich reduzieren, können die niederfrequenten Radlastschwankungen zum Anregen einer Gier-/Querschwingung des Fahrzeugs führen.

Wegen der degressiven Abhängigkeit der Reifenseitenkraft von der Radlast lässt sich ab mittleren Querbeschleunigungen der Grad der Untersteuerneigung mittels der Wanksteifigkeitsverteilung zwischen Hinter- und Vorderachse beeinflussen. Dabei hängt das von der Achse erbrachte Wankmoment nicht nur vom Wankwinkel, sondern auch von der Hubbewegung und dem Nickwinkel des Fahrzeugs ab, so dass hier ein wirkungsvolles Werkzeug zur Abstimmung des Kurvenverhaltens auch beim Lastwechsel und Bremsen besteht.

Wie bereits erwähnt wirken neben den Feder- und Dämpferkräften über die Radführung auch vertikale Reaktionskräfte aus den Reifenseiten- und -umfangskräften auf den Aufbau sowie auf die ungefederten Massen. Diese Kräfte resultieren aus den Brems-, Antriebs- und Seitenkraftabstützwinkeln als Folge der kinematischen Kopplung der Längs- und Querbewegung der Radaufstandspunkte mit

der Vertikalbewegung. Diese Effekte werden genutzt um Wank- und Nickwinkel zu reduzieren. Bei rasch eingeleiteten Manövern wirkt sich hierbei besonders günstig im Vergleich zur Stabilisierung über die Federrate aus, dass die Wank- und Nickbeschleunigungen und Geschwindigkeiten geringer sind, wodurch Anlenken und Wanküberschwingen günstig beeinflusst werden. Die Achskinematik ist dabei jedoch so auszulegen, dass unerwünschte Effekte wie Aufstützen bei Kurvenfahrt, Stempeln beim Bremsen und Antreiben sowie zu starke Beeinträchtigung des Geradeauslaufs vermieden werden.



Die Zielkonflikte zwischen den Anforderungen an Komfort, Bodenhaftung, sowie fahrdynamisch adäquater Radlastverteilung und guter, als angenehm empfundene Ankopplung des Fahrzeuges an die Fahrbahn sind mit konventionellen, passiven Federungssystemen nur bedingt lösbar. Erschwerend ist, dass Gewicht und Achslastverteilung wegen der Zuladung schwanken [4]. Niveauregelung, semi-aktive Fahrwerke mit situativer Anpassung von Systemparametern und vor allem aktive geregelte Federungs- und Dämpfungssysteme bieten hohes Potenzial diese Zielkonflikte zu verringern (► Abschn. 7.4.4.4). Der Einfluss auf Verbrauch, Emissionen und Kosten setzt der allgemeinen Einführung Grenzen.

Bei der Vertikaldynamik wirken als äußere Kräfte und Momente neben Gewicht und Reifennormalkräften auch die aerodynamische Auftriebskraft und das aerodynamisches Nick- und Wankmoment. Auftriebskraft und Nickmoment werden oft mittels des Auftriebs an Vorder- und Hinterachse beschrieben (► Abschn. 3.2). Größe und Verteilung der aerodynamischen Auftriebskräfte haben insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten einen bedeutenden Einfluss auf das querdynamische Verhalten, da sie die Reifennormalkraft und die Achsparameter Vorspur, Seiten- und Längskraftabstützwinkel sowie Federkraftverlauf verändern. Bei Kurvenfahrt mit hoher Geschwindigkeit bewirkt der Schwimmwinkel eine aerodynamische Seitenkraft und ein aerodynamisches, übersteuerndes Moment. Zur Kompensation wird hinten ein niedrigerer Auftriebsbeiwert als vorne angestrebt.

### 7.1.4 Basis-Zielkonflikte

Bei der Optimierung des Fahrverhaltens treten mehrere Zielkonflikte auf, deren Größe sowohl ein Indikator für die Qualität des gewählten Fahrwerks als auch des Gesamtfahrzeugkonzeptes ist:

- Zur Erzielung eines guten Anlenk- und Kurvenverhaltens sind in Abhängigkeit vom Massen-Package des Fahrzeugs Mikrolenkbewegungen als Funktion von Radeinfederung, Reifen-Seitenkraft und -Rückstellmoment erforderlich. Das Fahrwerk sollte jedoch auf unebener Fahrbahn möglichst geringe, den Geradeauslauf störenden Reifenkräfte und -momente erzeugen. Bei der Auswahl des Fahrzeugkonzeptes und des Package sollte daher die Rückwirkung auf das fahrdynamische Potenzial berücksichtigt werden.
- Die unmittelbare Abhängigkeit des elastokinematischen Eigenlenkverhaltens von der Quersteifigkeit der Radträgeranbindung erfordert bei einigen Achstypen eine hohe Querlenkerlagersteifigkeit. Zur Isolierung der höherfrequenten Transversalschwingungen des Rad/Reifensystems ist jedoch eine ausreichende Elastizität der Radführung in Querrichtung wünschenswert. Es sind daher die Achskonzepte zu bevorzugen, die neben hoher Längsfederung auch ausreichende Querelastizität bei gutem elastokinematischem Eigenlenkverhalten zulassen.
- Die Antriebs- und Bremskräfte sollten möglichst direkt, d. h. ohne Schwingungen anregende Phasenverschiebungen und Koppeleffekte auf den Fahrzeugaufbau übertragen werden. Diese Anforderung steht in Konflikt mit der Zielsetzung, von der Fahrbahn herrührende Stöße durch Längsfederung und -Dämpfung zu mildern. Der Zielkonflikt lässt sich fahrwerkseitig entschärfen bei Auswahl von Achskonzepten mit hoher Drehsteifigkeit der Radträger um die Querachse bei gleichzeitiger ausreichender Längselastizität zur Karosserie. Die Längsfederung und -Dämpfung hat bei gelenkten Rädern auch

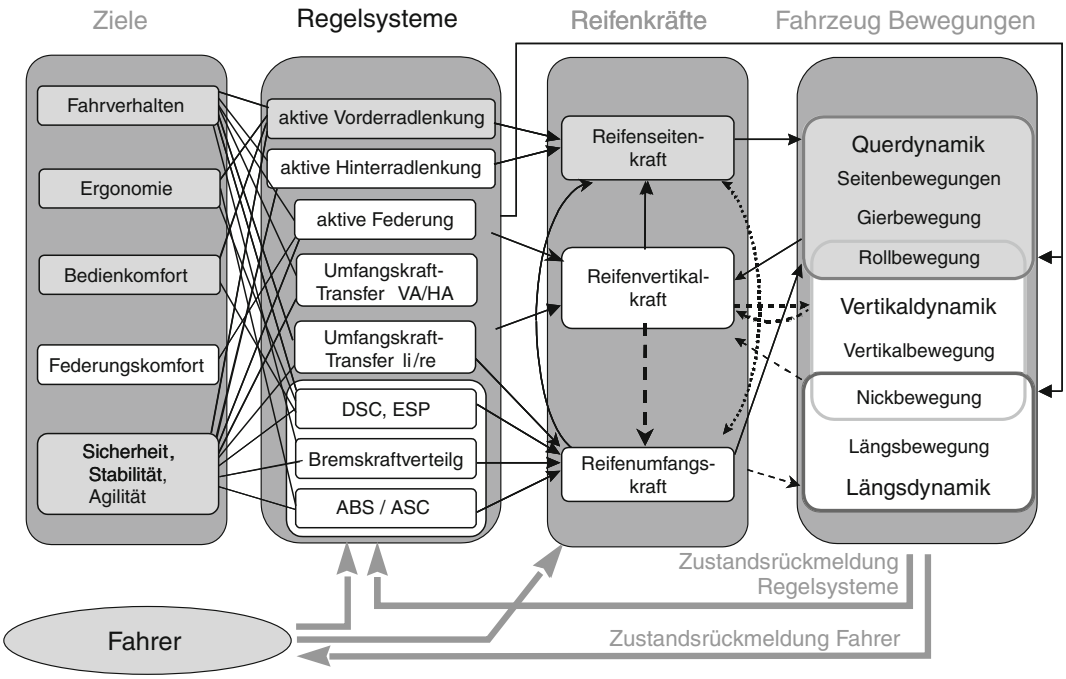



**Abb. 7.4** Wirkzusammenhänge fahrdynamischer Regelsysteme [11]

einen wesentlichen Einfluss auf die Anregung von Lenkraddrehschwingungen. Hierbei ist die Lage der Eigenfrequenzen der Längs- und Lenkschwingungsformen der ungefederten Massen sowie die Kopplung dieser Schwingungsformen von Bedeutung.

- Bei der Auslegung des Federdämpfersystems besteht eine wesentliche Aufgabe darin, einen guten, dem Charakter des Fahrzeugs gerecht werdenden Kompromiss zwischen Fahrverhalten und Fahrkomfort zu finden. Dies wird dadurch erschwert, dass die jeweils günstigste Abstimmung von der Fahrbahn, der Fahrgeschwindigkeit und von dem Fahrmanöver abhängt. Um den Zielkonflikt bei der Federdämpferabstimmung zu entschärfen, sollte deshalb bei der Festlegung des Gesamtfahrzeugkonzeptes die Interaktion mit Schwerpunkthöhe, Nick- und Wankträgheitsradien sowie Radstand und Spurweite Berücksichtigung finden. Semi-aktive und aktive Systeme haben hier großes Potenzial, den Zielkonflikt zu mildern.

Anhand der aufgeführten Zielkonflikte ist zu ersehen, dass das Fahrwerk eine komplexe Aufgabe zu erfüllen hat, insbesondere auch da in seine Bewertung das subjektive Empfinden des Menschen eingeht. Die genannte Aufgabenvielfalt sollte das Fahrwerk mit geringem Gewicht, Bauraumbedarf und niedrigen Kosten erfüllen und dies möglichst unbeeinflusst von Umweltbedingungen und bei gleichbleibender Funktionsqualität über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs.

Bei dieser komplexen Aufgabenstellung können die Möglichkeiten geregelter fahrdynamischer Systeme (Abb. 7.4) einen wichtigen Beitrag leisten sowohl zur Entschärfung der genannten funktionellen Zielkonflikte als auch zur Erzielung einer hohen Qualität der Fahrdynamik. Hierbei ist die Aufgabenverteilung zwischen der passiven mechanischen Radführung und den Eigenschaften der Regelsysteme einer Optimierung zuzuführen. Wegen der sich verschärfenden globalen Emissions- und Energiesituation sind aktive Systeme jedoch nur sinnvoll, wenn sie einen relevanten Vorteil gegenüber passiven Lösungen bieten [13].

### 7.1.5 Ausblick

Im Bereich der Fahrwerkentwicklung erfolgte eine weitere deutliche Funktionssteigerung durch die Einführung von Fahrwerkregelsystemen, die unmittelbar oder mittelbar das Fahrverhalten verändern [11]. Sind verschiedene fahrdynamische Regelsysteme in einem Fahrzeug vorhanden, wird Integration ihrer Funktionen erforderlich um Synergie-Effekte zu nutzen und schädliche Interferenzen zu vermeiden [12]. Bei der funktionalen Integration (ICM: Integrated Chassis Management) ist eine Schnittstelle zum Antriebstrang-Management, zum Bremsen-Management (ESP) und zu den Fahrerassistenzsystemen zu berücksichtigen. Die Koppelung der Fahrdynamik-Regelsysteme mit den Fahrerassistenzsystemen führt zu einer deutlichen Funktionserweiterung der Fahrdynamik-Regelsysteme, wenn Informationen über die Bahn des Fahrzeugs, den Straßenverlauf und weitere Verkehrsteilnehmer zur Verfügung stehen.

Die funktionale Integration kann zu einer weitgehenden Zusammenfassung der fahrdynamischen Regelung in ein Steuergerät führen oder zu einer Verteilung der Regelfunktionen auf mehrere Steuergeräte bei gleichzeitiger Vernetzung. Zwischen diesen beiden extremen sind sinnvolle Kombinationen anzustreben.

Zwischen der Architektur der Hardware und der Funktionsstruktur besteht gegenseitige Abhängigkeit. Für ein Szenario integrierter Regelfunktionen gehen zwingend Ansätze zur Beherrschung der Komplexität, Variantenvielfalt, Verfügbarkeit und Sicherheit einher.

- einen optimalen, auf funktionale Integration ausgerichteten Regelsystem-Baukasten für eine schnelle und bestmögliche Konfigurierbarkeit produktspezifischer Funktionsinhalte.
- ein Sicherheitskonzept, das wo erforderlich, funktionale Redundanz und „fail silent"-Verhalten verbunden mit „gracefull degradation" und Rekonfiguration des restlichen Systems beinhaltet.
- ein Funktions- und Konfigurationsmanagement für einen skalierbaren Funktionsumfang abhängig von Anzahl, Art und Verfügbarkeitszustand der fahrzeugindividuell verbauten Fahrdynamik-, Fahrzeugführungs-, Aktuatorik- und Sensorsysteme.
- eine offene Architektur mit standardisierten Schnittstellen, die obige Anforderungen unterstützt.
- und schließlich neue Geschäftsmodelle mit Zulieferern bei eindeutig definierten Schnittstellen in Technik und Verantwortung.

Die Beherrschung der funktionalen Integration und der Hardware Architektur stellt eine wesentliche, systemübergreifende Aufgabe bei der Entwicklung fahrdynamischer Systeme dar. Da eine Standardisierung der Schnittstellen sowie eine offene Systemarchitektur zu den Voraussetzungen zählen, hängt die zukünftige Verbreitung fahrdynamischer Regelsysteme auch von der Zusammenarbeit der Fahrzeughersteller und den Zulieferern ab. Hier sind gemeinsame Anstrengungen im Rahmen von AUTOSAR erkennbar (► Abschn. 8.1).

## 7.2 Bremssysteme

### 7.2.1 Einführung

Das Bremssystem gehört zu den sicherheitsrelevanten Systemen im Fahrzeug. Es deckt in seiner Gesamtheit den gesetzlich geforderten Funktionsumfang des Betriebsbremssystems, des Hilfsbremssystems (Redundanz) und des Feststellbremssystems ab. Von seiner Funktionstüchtigkeit in allen Fahrsituationen hängt die Sicherheit der Fahrzeuginsassen und der anderen Verkehrsteilnehmer ab. Die ursprünglichen Funktionen, wie das Verringern der Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend dem Fahrerwunsch oder das temporäre Halten des Fahrzeugs um Stillstand, wurden in den letzten Jahren um umfangreiche elektronisch geregelte Funktionen erweitert. Die zunehmenden Komfortansprüche an moderne Fahrzeuge, die damit verbundene Zunahme des Fahrzeuggewichts und die heute erreichbaren Höchstgeschwindigkeiten, führen zu erweiterten Leistungsanforderungen an moderne Bremssysteme.

Continental
The Future in Motion



# Die unerwarteten Situationen sicher meistern

## Das elektronische Bremssystem MK100®

Fast jeder von uns hat schon mal den Eingriff in die Fahrdynamik erlebt: das Surren der Bremsen, das Aufblinken der Kontrolllampe in der Instrumententafel und die straffere Einstellung des Fahrwerks.

Wieder einmal hat die intelligente Fahrdynamikregelung eine brenzlige Fahrsituation entschärft. Ganz entspannt können Sie jetzt weiterfahren. Das Unerwartete kann warten.



Mehr zu unseren elektronischen Bremssystemen erfahren Sie unter:

**www.continental-automotive.com**

Wichtige Schritte zu heutigen Bremssystemen waren:

- **1924** Einführung hydraulisch betätigter Trommelbremsen; davor ausschließlich mechanisch betätigte Trommelbremsen,
- **1950** Einführung unterdruckunterstützter Bremskraftverstärker (Hilfskraftbremse),
- **ca. 1957** hydraulische Teilbelagsscheibenbremse ausgeführt als Festsattel,
- **1965** erste Vorläufer des ABS (Einkanal-ABS),
- **1972** Schwimmrahmensattel für Fahrzeuge mit negativem Lenkrollradius,
- **1978** Faustsattel löst Schwimmrahmensattel ab,
- **1978** elektronisch geregeltes ABS-System,
- **1987** Antriebs-Schlupf-Regelsysteme (ASR),
- **1994** elektronische Bremskraftverteilung (EBV),
- **1995** elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP),
- **1996** Bremsassistent (BAS),
- **2001** Elektrohydraulische Bremse (EHB),
- **2002** Fahrzeuge mit Bremsenergierückgewinnung.

Die in diesem Buch beschriebenen Bremssysteme beschränken sich zunächst auf Systeme mit Reibungsbremsen und hydraulischer Übertragungseinrichtung, wie sie heute überwiegend in Pkw und Leicht-Lkw verwendet und wohl auch in zukünftigen Fahrzeugen Anwendung finden werden. Die in den letzten Jahren vermehrt auf den Markt gekommenen Fahrzeuge mit Hybrid-Antrieb (Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor) oder reinem Elektroantrieb stellen neue und teilweise erweiterte Anforderungen an Bremssysteme. Als weiterführende Literatur wird das Vieweg Bremsenhandbuch [14] empfohlen.

## 7.2.2 Auslegung von Bremssystemen

Die physikalische Grundauslegung einer konventionellen Bremsanlage wird im Wesentlichen durch folgende Größen bestimmt:

- Leistungsanforderungen (performance) an Fahrzeug und Bremsanlage,
- Leer- und zulässiges Gesamtgewicht des Fahrzeugs,
- Lastverteilung auf Vorder- und Hinterachse leer und beladen,
- Maximalgeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen,
- Radstand,
- Schwerpunktpositionen von Fahrzeug und Beladung,
- Verfügbare Rad-/Felgen-Größe,
- Reifentyp,
- (Hilfs-)Energieversorgung für Bremssystem (z. B. Vakuum aus dem Verbrennungsmotor für Bremskraftverstärker),
- Aerodynamik im Radhaus, Kühlbedingungen.

**Bremskreisaufteilungen** Die Aufteilung in getrennte Bremskreise erhöht die Sicherheit gegen Ausfall eines Teils der Bremsanlage. Das Fahrzeug muss mit dem intakt gebliebenen Bremskreis noch gemäß der gesetzlichen Bestimmung abgebremst werden können.

Auf Grund unterschiedlicher Fahrzeug-Achslast-Verteilungen und Schwerpunktlagen ergeben sich verschiedene Möglichkeiten zur Aufteilung der Bremskreise. Am häufigsten sind (siehe auch DIN 74000): Vorder-/Hinterachs-Bremskreisaufteilung („schwarz/weiß“: S/W-Aufteilung). Hierbei werden Vorderräder und Hinterräder des Fahrzeugs jeweils von einem separaten Bremskreis versorgt. Wesentliche Aspekte hierbei sind:

- kein Schiefziehen des Fahrzeugs bei Kreisausfall,
- Einsatzmöglichkeit eines gestuften Tandem-Haupt-Zylinders (unterschiedliche „äußere Übersetzung“ für Vorder- und Hinterachse),
- verbleibende HA-Bremswirkung bei thermischer Überlastung der Vorderachse (z. B. bei Dampfblasenbildung).

Diagonale Bremskreisaufteilung („X-Aufteilung“, „X-Split“): Bei dieser Anordnung werden jeweils die diagonal gegenüber liegenden Bremsen von einem Bremskreis versorgt mit folgenden Merkmalen:

- Höherer Bremskraftanteil der Vorderachse wird dabei auch bei einem Kreisausfall immer an einem Rad genutzt.
- Schiefziehen bei Kreisausfall infolge der unsymmetrischen Bremskraftverteilung, zwischen links und rechts kann durch entspre-

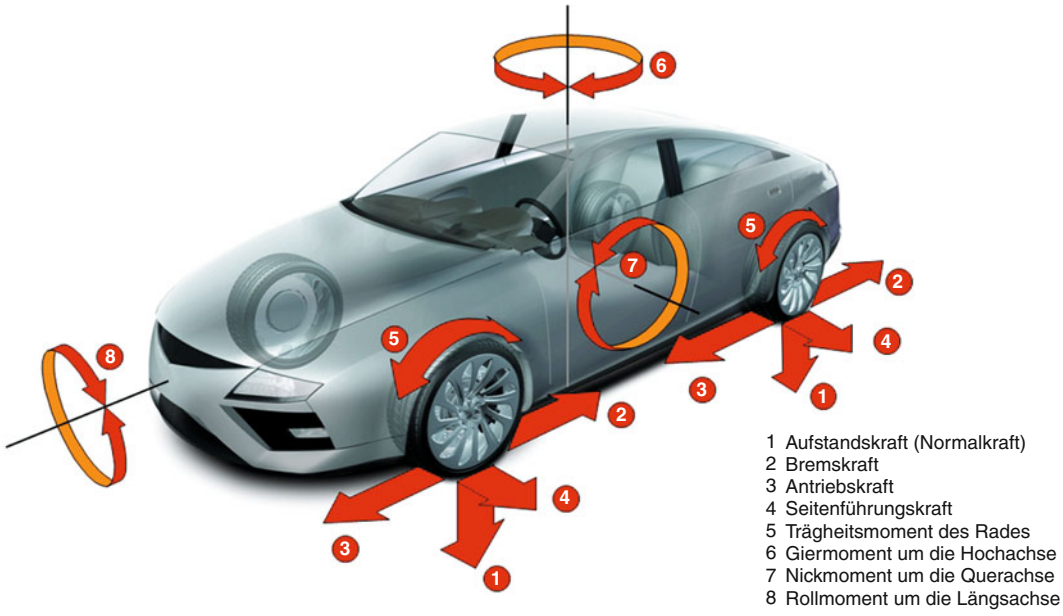



**Abb. 7.5** Kräfte und Momente am Fahrzeug (1 Radlast, 2 Bremskraft, 3 Antriebskraft, 4 Seitenführungskraft, 5 Brems-/Antriebsmoment, 6 Giermoment, 7 Nickmoment um die Querachse, 8 Rollmoment um die Längsachse)

chende Achskonstruktion, z. B. durch einen negativen Lenkrollradius, kompensiert werden.

- Diagonale Bremskreisaufteilung wird vorwiegend in Fahrzeugen mit höherem Vorderachslastanteil verwendet.

### 7.2.2.1 Physikalische Grundlagen

Bewegungsänderungen von Fahrzeugen (Lenken, Beschleunigen, Bremsen) werden von Kräften bewirkt. Alle Kräfte zur Änderung der Fahrzeugbewegung, die der Fahrer eines Fahrzeuges direkt beeinflussen kann, werden ausschließlich durch die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn übertragen (siehe Abb.7.5). Die maximale Höhe dieser Reibkräfte hängt u. a. von den Normalkräften an den Rädern, den Radlasten ab. Sie werden durch die Fahrzeuggewichtskraft bestimmt und zusätzlich durch aerodynamischen Auf-/Abtrieb beeinflusst. Zu diesem statischen Anteil kommen im instationären Fahrbetrieb noch dynamische Anteile hinzu. Achslastverlagerungen (z. B. beim Beschleunigen/Bremsen, Kurvenfahrt), bedingt durch die Schwerpunktlage des Fahrzeugs oder durch Fahrbahnunebenheiten, erzeugen dynamische Radlasten, die sich den statischen Anteilen überlagern. Mit diesen Radlastschwankungen variieren im Fahrbetrieb auch die auf die Fahrbahn übertragbaren Kräfte.

Bremsanlagen werden in heutigen Fahrzeugen so ausgelegt, dass sie eine wesentlich höhere Abbremsung leisten können, als durch die gesetzlichen Vorschriften gefordert wird. Der Bremskraftübertragung wird letztendlich durch die begrenzte Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn eine physikalische Grenze gesetzt. Unter Berücksichtigung von Reifen-Fahrbahnreibwert $\mu$, Erdbeschleunigung $g$, Fahrzeugmasse $m$, aerodynamischem Auf-/Abtrieb $F_{\text{aero}}$ und der Eigenverzögerungskraft $F_{\text{EV}}$ (Luftwiderstand, Reibung) lässt sich die maximal mögliche Fahrzeugverzögerung abschätzen:

$$\ddot{x}_{\max} = \mu g + \frac{\mu F_{\text{aero}}}{m} + \frac{F_{\text{EV}}}{m}$$

Damit kann über die dynamische Achslastverlagerung näherungsweise die maximal übertragbare

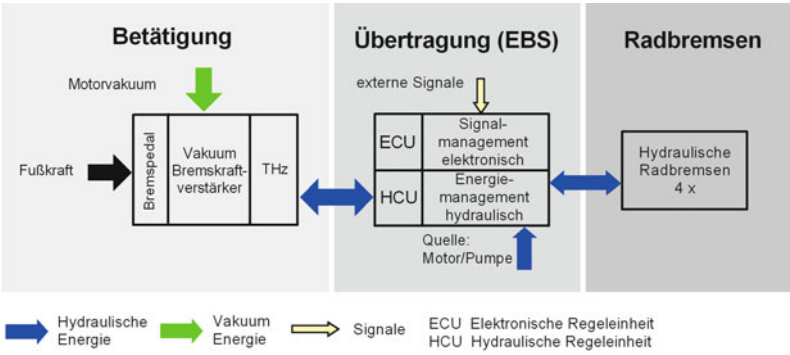



**Abb. 7.6** Hydraulisches Bremssystem mit elektronischer Regelung

Vorderachsbremskraft ermittelt werden:

$$F_{\max,V} = \mu \cdot \left( G \frac{l_H}{l} + F_{\text{aero},V} + m\ddot{x}_{\max} \frac{h_S}{l} \right)$$

Die Radbremse ist nun so auszulegen, dass dieser Wert immer erreicht wird. Die Bremskraft am Rad wird von der Betätigungskraft (Fußkraft auf das Bremspedal) zuzüglich einer Hilfskraft aus dem Bremskraftverstärker erzeugt (Abb. 7.6). Im (Tandem-)Hauptzylinder wird die Betätigungskraft in hydraulischen Druck gewandelt. Überschlägig lassen sich nachfolgende Gleichungen aufstellen. Der hydraulische Bremsdruck $p$ errechnet sich aus Fahrerfußkraft $F_{\text{Fahrer}}$, Pedalübersetzung $i$, Bremskraftverstärkung $V$, Hauptzylinderfläche $A_{\text{HZ}}$ und Wirkungsgrad $\eta$:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F_{\text{Fahrer}} i_{\text{Pedal}} V}{A_{\text{HZ}}} \eta_{\text{Betätigung}}$$

Dieser Druck wirkt auf die Radbremszylinder, welche die Reibflächen der Bremsen mit Spannkräften beaufschlagen. Dadurch wird ein Bremsmoment am Rad erzeugt, welches über die Reifen als Bremskraft auf die Fahrbahn übertragen wird. Diese Bremskraft $F_{\text{B}}$ am Rad errechnet sich aus hydraulischem Druck $p$, Radbremszylinderfläche $A_{\text{RBZ}}$, Wirkungsgrad $\eta$, innerer Übersetzung $C^*$, wirksamem Reibradius $r$ und dynamischem Reifenrollradius $R$:

$$F_{\text{B}} = p A_{\text{RBZ}} \eta C^* \frac{r_{\text{wirk}}}{R_{\text{roll}}}$$

Die innere Übersetzung $C^*$ wird auch als Bremsenkennwert bezeichnet. Sie beschreibt das Verhältnis von Umfangs-/Reibkraft an den Bremsbelägen zur Spannkraft am Radbremszylinder:

$$C^* = \frac{\sum F_{\text{Umfang}}}{F_{\text{Spann}}}$$

Als äußere Übersetzung $i_{\text{ä}}$ wird das Verhältnis zwischen Spannkraft am Radbremszylinder und Betätigungskraft am Bremspedal bezeichnet. Sie kann auch unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades als Verhältnis von Pedalweg zu den Spannwegen (inkl. Verlustwege) an $n$ Bremsen dargestellt werden:

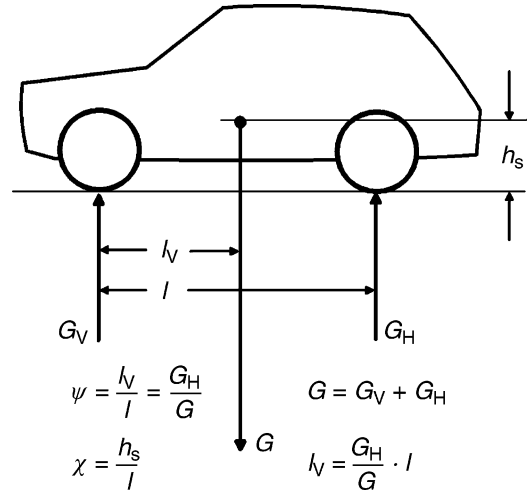
$$i_{\text{ä}} = \frac{F_{\text{Spann}}}{F_{\text{Betätigung}}} = \eta_{\text{Betätigung}} \frac{S_{\text{Pedal}}}{n \cdot S_{\text{Spann}}}$$

Kombiniert man obige Gleichungen erhält man (in stark vereinfachter Form und mit begrenztem Gültigkeitsbereich) die Radbremskraft als Funktion der Fahrerfußkraft, welche von den Eigenschaften der drei Subsysteme „Mechanik Betätigung“, „Hydraulik“ und „Mechanik Radbremse“ abhängt (siehe auch Abb. 7.6):

$$F_{\text{B}} = \underbrace{i_{\text{Ped}} \cdot i_{Vs} \cdot \eta_{\text{Bet}}}_{\substack{\text{Mechanik} \\ \text{Betätigung}}} \cdot \underbrace{\frac{A_{\text{RZ}}}{A_{\text{HZ}}} \cdot \eta_{\text{RZ}}}_{\text{Hydraulik}} \cdot \underbrace{C^* \cdot \frac{r_{\text{wirk}}}{R_{\text{dyn}}}}_{\substack{\text{Mechanik} \\ \text{Radbremse}}} \cdot F_{\text{Ped}}$$

Als rotierende Massen besitzen die Räder Trägheitsmomente. Deren Beharrungsvermögen gegenüber Drehzahlveränderungen muss insbesondere beim Bremsen mit Schlupfregelung ebenfalls berücksichtigt werden.

Neben diesen längsdynamischen Betrachtungen spielen auch querdynamische Effekte eine Rolle bei Brems- und Fahrstabilitätssystemen (siehe ◘ Abb. 7.5). Ein Drehmoment um die Fahrzeug-Vertikalachse wird als Giermoment bezeichnet. Es wird entweder durch den Fahrer (z. B. Lenken) oder durch äußere Einflüsse (z. B. Seitenwind, reibwertbedingt unterschiedliche Antriebs-/Bremskräfte auf beiden Fahrzeugseiten) erzeugt. Die sogenannten Seitenführungskräfte wirken der Zentrifugalkraft bei Kurvenfahrt entgegen und halten das Fahrzeug in der Spur. Bei Überbeanspruchung der Reibpaarung Reifen–Fahrbahn können Zentrifugalkräfte bzw. Giermoment nicht mehr ausreichend über die Seitenführungskräfte an den Rädern abgestützt werden, d. h. der stabile Fahrzustand geht verloren und das Fahrzeug kommt ins Schleudern. Im Rahmen der physikalischen Grenzen können Fahrstabilitätssysteme den Fahrer durch gezielten radselektiven Bremseneingriff in solchen Situationen unterstützen (siehe ► Abschn. 7.2.5.5).




◘ **Abb. 7.7** Prinzipskizze Schwerpunktlage

### 7.2.2.2 Bremskraftverteilung

Ziel der Bremskraftverteilung ist ein neutrales bzw. stabiles Fahrverhalten auf homogener Fahrbahnoberfläche im gebremsten Zustand. Dafür ist idealerweise bei jeder Verzögerung an allen Rädern die gleiche Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn anzustreben.

Die auf die Fahrbahn übertragbaren Bremskräfte sind abhängig von den in der jeweiligen Fahrsituation vorhandenen Radaufstandskräften und Reifeneigenschaften. Die Abbremsung des Fahrzeuges verursacht eine Veränderung der Radaufstandskräfte in Abhängigkeit von der Verzögerung. Die Belastung der Vorderachse nimmt zu, die der Hinterachse ab (dynamische Achslastverlagerung).

Für ein Fahrzeug lässt sich damit für jeden Beladungszustand und jede Verzögerung eine optimale achsenspezifische Bremskraft ermitteln, die so genannte „ideale Bremskraftverteilung". Sie wird ausschließlich durch geometrische Fahrzeugdaten und Achslastverteilung bestimmt. Das Bremskraftverteilungsdiagramm verdeutlicht Abhängigkeiten zwischen Fahrbahnreibwert, dynamischer Achslast und Fahrzeugverzögerung. Indem es die ideale Bremskraftverteilung der installierten Bremskraftverteilung gegenüberstellt, bildet dieses Diagramm die Grundlage für die Auslegung von Bremsanlagen.

Üblicherweise werden in der Bremssystemauslegung einige Größen dimensionslos dargestellt. Dazu gehört die Abbremsung $z$ als Verhältnis der Fahrzeugverzögerung $b$ zur Erdbeschleunigung $g$:

$$z = \frac{b}{g}$$

Außerdem werden die Größen $\psi$ als Verhältnis von Schwerpunktlage in Längsrichtung $l_v$ zum Radstand $l$, sowie $\chi$ als Verhältnis von Schwerpunktlage in vertikaler Richtung $h_s$ zum Radstand $l$ verwendet (siehe ◘ Abb. 7.7). Damit lassen sich die idealen Bremskräfte für Vorder- und Hinterachse ($F_{BV}$ und $F_{BH}$) bezogen auf die Fahrzeuggewichtskraft $G$ darstellen:

$$\frac{F_{BV}}{G} = [1 - \psi + zX]z$$

$$\frac{F_{BH}}{G} = [\psi - zX]z$$

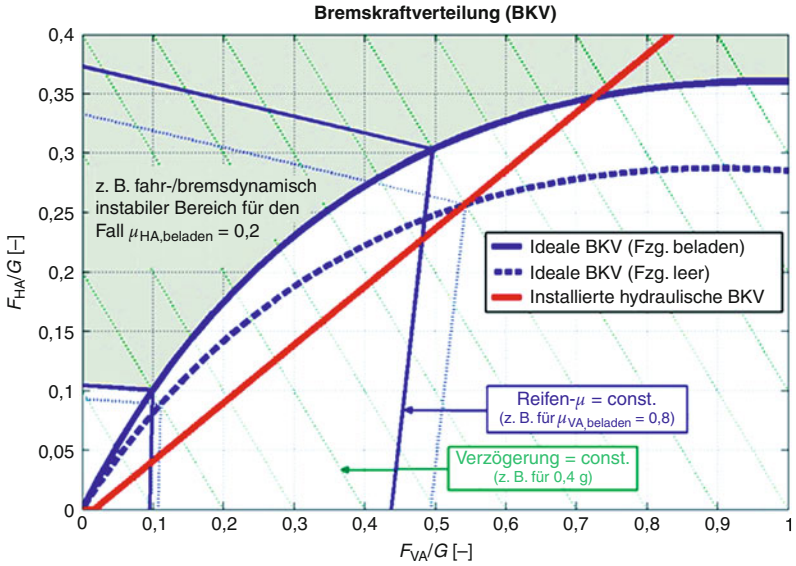



**Abb. 7.8** Ideale und installierte Bremskraftverteilung (dimensionslose Darstellung: Bremskraft dividiert durch Gewichtskraft)

Unter Zuhilfenahme dieser Gleichungen lässt sich die ideale Bremskraftverteilung (ideale Hinterachsbremskraft als Funktion der Vorderachsbremskraft) herleiten. Die ideale Bremskraftverteilung (Abb. 7.8) ist eine nichtlineare Funktion (Wurzelfunktion zuzüglich eines linearen Anteils):

$$\frac{F_{BH}}{G} = \sqrt{\frac{(1-\psi)^2}{4X^2} + \frac{1}{X}\frac{F_{BV}}{G}} - \frac{1-\psi}{2X} - \frac{F_{BV}}{G}$$

Die ideale Bremskraftverteilung errechnet sich wie bereits beschrieben aus den Fahrzeugdaten (Achslasten, Schwerpunkthöhe, etc.). Gemeinsam mit den fahrsituationsspezifischen Reifen-Fahrbahn-Kraftschlusskennlinien begrenzt sie den fahrdynamisch stabilen Bremsbereich des Fahrzeugs (im Beispiel instabiler Bereich dargestellt in grau). Dagegen ergibt sich die tatsächlich installierte Bremskraftverteilung über die an Vorder- und Hinterachse installierten hydraulischen Radbremskomponenten. Mit dieser installierten Bremskraftverteilung ist es jedoch nicht bei allen Fahrzeug-Beladungszuständen möglich, beide Achsen im gesamten Reibwert- und Verzögerungsbereich gleichzeitig bis zur Blockiergrenze abzubremsen. Daher sorgt z. B. ein ABS mit elektronischer Bremskraftverteilung bei Bedarf durch Regeleingriffe (= Anpassen der installierten Bremskraftverteilung) dafür, dass das Fahrzeug stets im stabilen Betriebsbereich bleibt, und dies sowohl bei Geradeaus- als auch bei Kurvenbremsungen.

### 7.2.2.3 Bremspedalcharakteristik

Die Bremspedalcharakteristik ist primär durch Maßnahmen an Betätigung, Radbremse und Pedalbox beeinflussbar. Fahrzeughersteller nutzen die Pedalcharakteristik zur marken- und modellspezifischen Ausprägung ihrer Fahrzeuge, wobei das „subjektive Pedalgefühl" anhand der quasistatischen und dynamischen Zusammenhänge zwischen Pedalweg, Pedalkraft und Fahrzeugverzögerung bewertet wird [35]. Wesentliche Beurteilungsparameter hierbei sind:

- Ansprech-/Löse-Verhalten bzw. Ansprechkräfte und Leerwege,
- Springer-Funktion (bewirkt, dass im Anfangsbereich der Bremskraftverstärkung die Fahrzeugverzögerung spürbar einsetzt),
- Intensität der Bremskraftverstärkung (Verstärkungsfaktor),
- Kraft/Weg-Charakteristik am Pedal und resultierende Fahrzeugverzögerung,

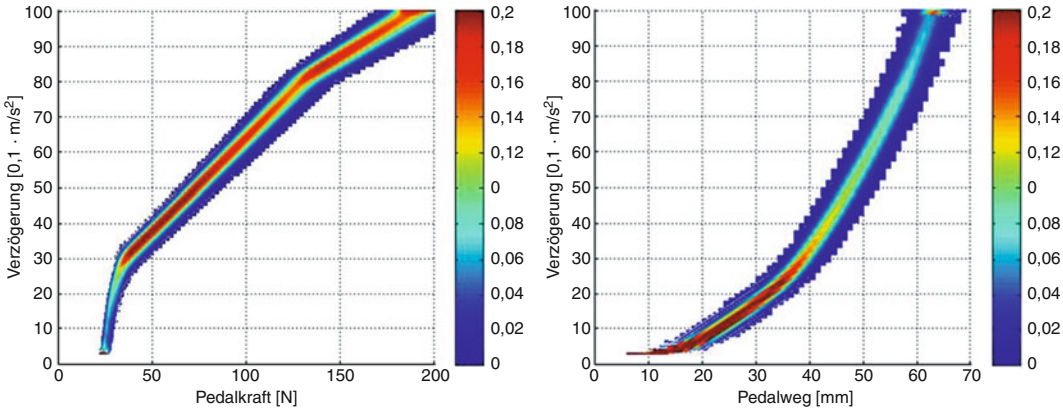



**Abb. 7.9** Exemplarische Pkw-Verzögerung über Pedalkraft bzw. Pedalweg inkl. Streuung (die Farbskala quantifiziert die relative Häufigkeit), ermittelt mittels statistischer MonteCarlo-Simulation

- Modulationspräzision und Hystereseverhalten bei langsamer und schneller Pedalbetätigung (inkl. Fahrzeugverzögerungsrückmeldung),
- Erreichen des Aussteuerpunkts (maximales Arbeitsvermögen des Bremskraftverstärkers bei gegebener Hilfskraft, z. B. Unterdruck),
- Pedalrückwirkungen aufgrund von (ABS-) Regelungseingriffen,
- Pedalwegverlängerung und Pedalkrafterhöhung bei Fading.

Bei der Beurteilung der Pedalcharakteristik sollte zwischen verschiedenen Verzögerungsintensitäten unterschieden werden, da z. B. beim Rangieren auf einem Parkplatz andere Beurteilungsparameter im Vordergrund stehen, als bei einer Notbremsung. Zudem regelt ein menschlicher Fahrer die gewünschte Fahrzeugverzögerung aufgrund der nichtlinearen Pedalkraft-/Pedalwegcharakteristik bei niedrigen Verzögerungen eher mit Hilfe des Pedalwegs, bei hohen Verzögerungen eher über die Pedalkraft. Dies ist bei Subjektivbeurteilungen ebenso zu berücksichtigen, wie die teilweise sehr unterschiedlichen Fahrzeugherstellervorgaben hinsichtlich des „optimalen Pedalgefühls“ [16].

Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Pedalgefühlbeurteilung stehen oft in Widerspruch zu anderen Bremssystemanforderungen. Exemplarisch sei der Wunsch nach möglichst direktem Ansprechen der Bremse erwähnt, was u. a. ein geringes Bremssattellüftspiel erfordert, aber damit in Widerspruch zur Forderung nach möglichst geringem Restbremsmoment (unvollständiges Lösen der Radbremse, welches nach einer Bremsbetätigung auftreten kann; führt u. a. zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch) steht. Somit stellen Pedalcharakteristiken konventioneller hydraulischer Bremsanlagen oft einen Kompromiss dar zwischen technischen und haptischen Anforderungen.

Bei der Auslegung einer Bremsanlage werden schon in der Frühphase der Systementwicklung mittels Simulation Prognosen zur Pedalkraft-/Pedalwegcharakteristik durchgeführt, um die Einhaltung von Fahrzeugherstellervorgaben zu gewährleisten. Damit lassen sich z. B. bereits in der Projektangebotsphase gezielt Anforderungen an die Einzelkomponenten zur Systemoptimierung ableiten. Auf diese Weise kann schon sehr früh im Entwicklungsprozess die Basis für eine spätere gute Subjektivbeurteilung des Pedalgefühls geschaffen werden. Abb. 7.9 zeigt eine statistische Pedalcharakteristik-Darstellung, die mittels MonteCarlo-Simulation ermittelt wurde. Diese Methodik ermöglicht die Berücksichtigung von Bauteiltoleranzverteilungen und Betriebsparameterstreuungen und lässt auf diese Weise Prognosen zur Streuung wesentlicher System-Funktionen in den späteren Serienproduktionsfahrzeuge zu.

### 7.2.2.4 Thermische Dimensionierung

Beim Bremsen wird die kinetische Energie des Fahrzeugs via Reibung in thermische Energie umgewandelt, welche primär in den Bremsscheiben/-trommeln zwischengespeichert wird, bevor sie von dort aus über Wärmestrahlung und Konvektion letztendlich an die Umgebung abgegeben wird. Dabei spielt die Aerodynamik im Radhaus bzw. die Umströmungsbedingungen an Bremsscheiben und -belägen eine signifikante Rolle.

Von „Fading" spricht man, wenn die Bremsleistung aufgrund zu hoher thermischer Belastung nachlässt. Ursache ist ein (bremsbelagspezifisches) Absinken der Reibwerte zwischen Bremsscheibe/-trommel und -belag bei hohen Temperaturen. Als Folge erhöhen sich die zum Erreichen der Wunschverzögerung erforderlichen Spannkräfte und somit das hydraulische Druckniveau. Zudem können sich aufgrund der Temperaturerhöhung zusätzlich die Steifigkeiten bzw. Kompressibilitäten von im Kraftfluss stehenden Bauteilen negativ verändern. All dies kann zu erhöhter hydraulischer Volumenaufnahme führen. Letztendlich sind Pedalkraftanstieg und Pedalwegverlängerung unausweichlich. Im schlimmsten Fall kann der Pedalkraftanstieg derart hoch ausfallen, dass er von einem Normalfahrer kaum mehr zu bewältigen ist; oder die (hydraulische) Elastizität nimmt derart zu, dass sich der Bremsflüssigkeitsvorrat im Hauptbremszylinder erschöpft. Als Folge sinkt die noch erreichbare Fahrzeugverzögerung signifikant. Daher werden während einer Bremssystementwicklung zahlreiche Bremsszenarien (z. B. Vollbremsungen aus Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit, wiederholtes Beschleunigen und Abbremsen des Fahrzeugs, Passabfahrten im Gebirge ohne Ausnutzen der Motorbremswirkung, etc.) sowohl am Prüfstand als auch am Gesamtfahrzeug getestet.

Um Fadingeffekten auslegungsseitig vorzubeugen ist die „thermische Speichermasse" (Bremsscheiben/-trommeln) für die umgewandelte kinetische Energie des Fahrzeugs ausreichend groß zu dimensionieren. Um auch bei wiederholtem Bremsen ein kontinuierliches Aufschaukeln der Scheibentemperaturen zu minimieren (siehe Abb. 7.10), muss außerdem mittels geeigneter Radhaus- und Felgengestaltung für hohe Kühlluftzufuhr und gute Bremsscheibenumströmung (Maximierung des Wärmeübergangskoeffizienten) gesorgt werden. Zudem ist die Wärmeabgabe der Bremsscheiben via Wärmestrahlung möglichst wenig zu behindern. Hochwertige Reibbeläge sorgen zudem auch unter thermisch schwierigen Bedingungen für stabiles Reibverhalten. In der Praxis stehen den beschriebenen Fading-Gegenmaßnahmen sehr oft konkurrierende Anforderungen entgegen (z. B. Bauteilkosten, Bauraumbegrenzungen bzw. Packaginganforderungen, aerodynamische Optimierung der Fahrwiderstände).

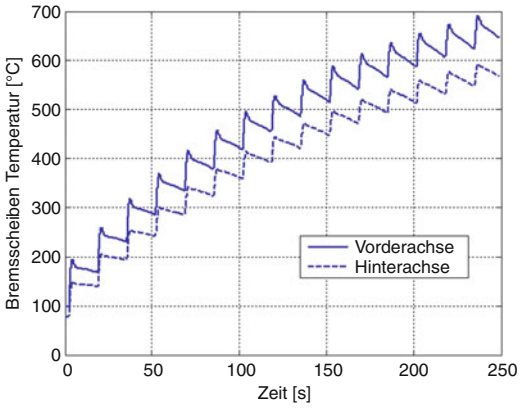



**Abb. 7.10** Aufschaukeln der Bremsscheibentemperatur bei wiederholtem starken Bremsen und Beschleunigen. Der Krümmungsgrad der Kurve bzw. die Höhe der Sättigungstemperatur (= Gleichgewicht zwischen Reibenergiezufuhr und Abkühlung) wird maßgeblich durch die fahrzeugmodellspezifische Aerodynamik im Radhaus bestimmt

Trommelbremsen sind gegenüber Scheibenbremsen thermisch weniger belastbar, da mit der geschlossenen Bauweise Kühlungsnachteile einhergehen und thermisch bedingte Bauteildeformationen oft deutliche Reibwert- bzw. $C^*$-Schwankungen ergeben.

Hinsichtlich der Hydraulik sind mit Blick auf alle Komponenten eine sorgfältige Volumenaufnahmebilanzierung durchzuführen und der Hauptbremszylinder ausreichend groß zu dimensionieren, so dass im Fadingfall genügend Ausstoßvolumenreserve zur Verfügung steht, um höhere Bremsdrücke und/oder erhöhte Volumenaufnahme abzudecken.

Zudem ist durch geeignete Werkstoffauswahl und Konstruktionsart sicherzustellen, dass die thermischen und mechanischen Belastungen keine

Bauteilschäden verursachen und die dauerhafte Funktion der Bremsanlage gewährleistet bleibt.

Bei der Auswahl der Bremsflüssigkeit muss berücksichtigt werden, dass deren Siedepunkt deutlich oberhalb von im Fahrbetrieb potenziell auftretenden Flüssigkeitstemperaturen liegen soll: Die aus Siedevorgängen resultierenden Dampfblasen würden einen Hydraulikdruckaufbau unterbinden und ein plötzliches Versagen der Bremsanlage wäre die Folge. Bremsflüssigkeit absorbiert aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaft im Laufe der Zeit Wasser aus der Umgebungsluft. Der so eingebrachte Wasseranteil reduziert allmählich den Siedepunkt der Bremsflüssigkeit (= Nasssiedepunkt), weshalb regelmäßige Austauschintervalle heute schon vorgesehen sind.



#### 7.2.2.5 Auslegungsaspekte bei regenerativen Bremssystemen

Bei konventionellen Bremsanlagen sind die Radbremsen über Hydraulik und Bremsgerät direkt mit dem Bremspedal in einer Wirkkette verbunden. Bei regenerativen bzw. rekuperativen Bremssystemen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen ergibt sich hingegen die Aufgabe, diese mechanisch/hydraulische Wirkkette definiert zu unterbrechen, um (zeitweise) das Reibungsbremsmoment durch das Generatorbremsmoment einer elektrischen Maschine zu ersetzen oder mit diesem zu kombinieren. So soll wenigstens ein Teil der kinetischen Energie des Fahrzeugs zurückgewonnen werden, um diese später als Antriebsenergie nutzen zu können. Ein simples Hinzuaddieren des nicht-konstanten Generatorbremsmoments zum konventionellen Reibungsbremsmoment wäre aus Gründen der Rekuperationsgradoptimierung und der Vorhersehbarkeit von Pedalcharakteristik und Fahrzeugverzögerungsverhalten nicht akzeptabel.

Statistisch betrachtet finden Bremsvorgänge am häufigsten aus geringen Fahrgeschwindigkeiten und mit niedrigen Verzögerungen statt (siehe ◘ Abb. 7.11). Auch genormte Kraftstoffverbrauchszyklen (z. B. New European Driving Cycle NEDC) orientieren sich meist an derartigen Kollektiven. Daher ist es das Ziel, diesen Bereich möglichst allein durch den Generator (d. h. ohne konventionelle Reibbremseingriffe) abzudecken.

Das maximale Bremsmoment eines Generators nimmt mit zunehmender Drehzahl stark ab (siehe ◘ Abb. 7.12). Je nach gewünschter Rekuperationsleistung bzw. Generatorbremsmoment sind E-Maschinen sehr unterschiedlicher Leistungsklassen verfügbar. Trotzdem reicht die Bremsleistung Pkw-tauglicher Generatoren derzeit nicht aus, den kompletten Verzögerungsbereich eines modernen Fahrzeugs abzudecken. Die konventionelle Reibungsbremse ist daher auch in Hybrid- und Elektrofahrzeugen unverzichtbar. Für das situationsabhängige und möglichst harmonische Kombinieren von Generator- und Reibungsbremsmoment (Torque-Blending) existieren unterschiedliche mechatronische Ansätze am Markt (siehe ► Abschn. 7.2.6.2 Regeneratives Bremsen). Bei deren Entwicklung ist ein durchdachtes fail-safe-Konzept aufgrund der beschriebenen Pedalentkopplung unverzichtbar. Außerdem muss die Rekuperationsstrategie insbesondere bei Fahrzeugen, bei denen das Generatorbremsmoment ausschließlich auf die Hinterachse wirkt, auch im Hinblick auf Fahrstabilität abgestimmt werden.

### 7.2.3 Bremssystemkomponenten

Für Bremssystemkomponenten bestehen hohe Anforderungen hinsichtlich Robustheit, Funktionssicherheit bei unterschiedlichsten Umweltbedingungen, Umweltverträglichkeit, Akustik (NVH = noise, vibration, harshness) und Ausfallsicherheit.

#### 7.2.3.1 Bremspedal

Das Bremspedal ist die wesentliche Schnittstelle zwischen Fahrer und Bremssystem. Über die Pedalcharakteristik (funktionaler Zusammenhang zwischen Pedalkraft, Pedalweg und Fahrzeugverzögerung) erfolgt eine Rückmeldung über die Bremsung und den Zustand der Bremsanlage.

Typischerweise ist ein Bremslichtschalter in dem Pedalmodul integriert. Bei Hybridfahrzeugen werden zur Fahrerwunscherkennung zusätzliche Sensoren eingesetzt, die häufig den Pedalweg oder die Pedalkraft indirekt messen (Winkel- bzw. Drucksensoren).

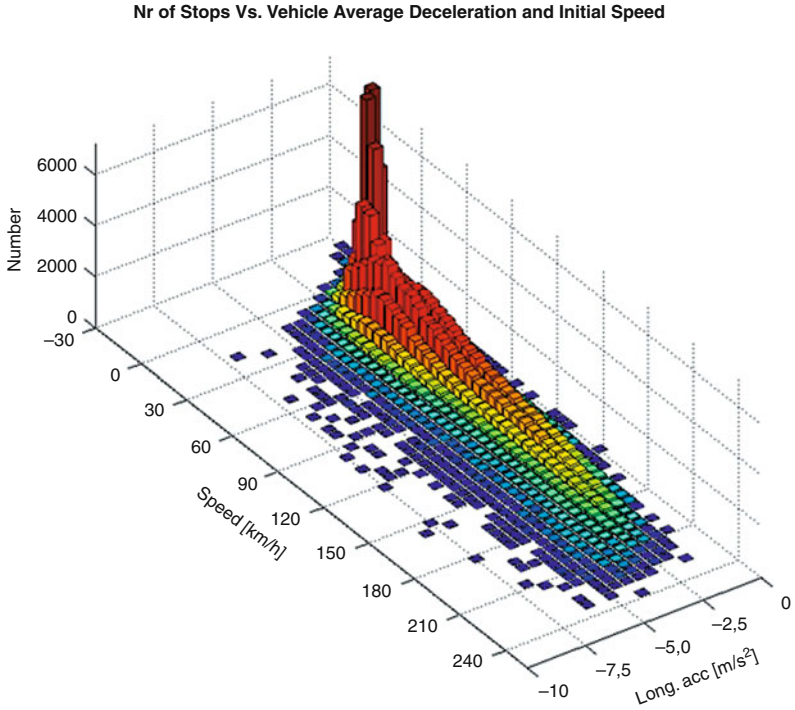



**Abb. 7.11** Gemessene Bremshäufigkeitsverteilung eines Normalfahrers als Funktion von Fahrgeschwindigkeit und jeweils gemittelter Verzögerung (Quelle: Continental)

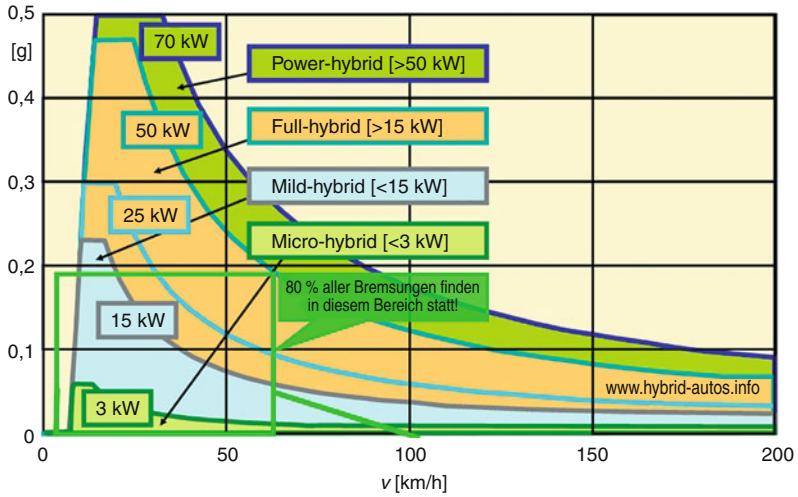



**Abb. 7.12** Exemplarisches Fahrzeugverzögerungspotenzial einer elektrischen Maschine als Funktion von Fahrgeschwindigkeit und installierter Generatorleistung

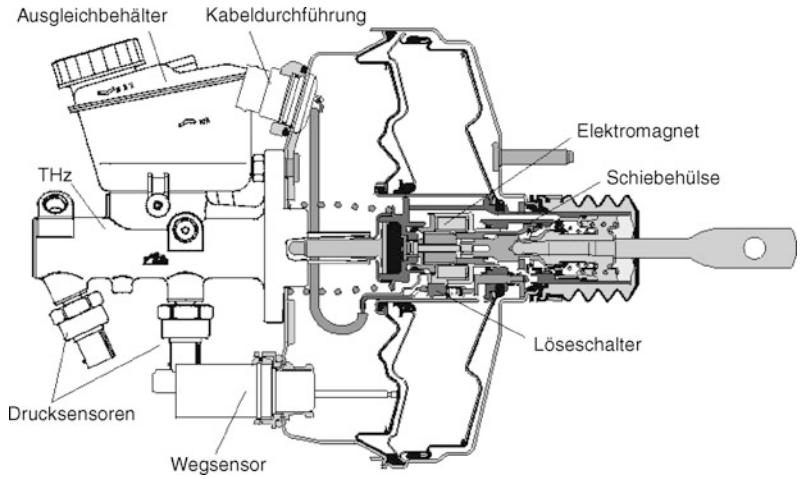



**Abb. 7.13** Aktiver Bremskraftverstärker in Tandem-Bauweise



### 7.2.3.2 Bremskraftverstärker

Bremskraftverstärker verstärken die am Pedal aufgebrachte Fußkraft durch eine sogenannte „Hilfskraft". Sie erhöhen damit den Bedienkomfort und die Fahrsicherheit. Es werden heute hauptsächlich zwei Bauarten verwendet:

- Vakuum-Bremskraftverstärker,
- Hydraulik-Bremskraftverstärker.

**Vakuum-Bremskraftverstärker** Der Vakuum-Bremskraftverstärker – auch Vakuum-Booster genannt – hat sich bisher trotz seiner deutlich größeren Abmessungen gegenüber dem Hydraulik-Bremskraftverstärker behaupten können. Wesentliche Gründe hierfür sind seine kostengünstige Bauart und die kostenlose Verfügbarkeit der Vakuumenergie bei den meisten Saugmotoren.

Die Vakuumkammer des Bremskraftverstärkers ist über eine Unterdruckleitung mit dem Ansaugrohr des Motors oder einer separaten Vakuumpumpe (z. B. bei Dieselmotoren und direkteinspritzende Otto-Motoren mit sehr geringem Unterdruckniveau im Ansaugrohr) verbunden. Tiefer gehende Details zur Funktionsweise sind z. B. in [14] erläutert.

**Aktiver Bremskraftverstärker** Zur Darstellung von Zusatzfunktionen werden „aktive Bremskraftverstärker" eingesetzt, die zusätzlich elektrisch ansteuerbar sind (siehe Abb. 7.13). Genutzt werden können diese für die Funktionen ESP-Vorladung (► Abschn. 7.2.4.5), elektronischer Bremsassistent (► Abschn. 7.2.4.6) und ACC (► Abschn. 7.2.4.7).

Aktive Bremskraftverstärker weisen einen im Steuergehäuse integrierten Magnetantrieb auf. Mittels einer Schiebehülse ist es möglich, mit dem elektrisch betätigten Magnetantrieb das Tellerventil zu betätigen. Dabei wird zunächst die Verbindung zwischen Vakuumkammer und Arbeitskammer geschlossen; mit einer weiteren Strombeaufschlagung wird die Verbindung der Arbeitskammer zur Außenluft geöffnet und der Bremskraftverstärker betätigt.

Zur sicheren Erkennung des Fahrerwunsches wird ein „Löseschalter" in das Steuergehäuse integriert.

**Hydraulik-Bremskraftverstärker** Im Vergleich zu Vakuumbremskraftverstärkern haben hydraulische Bremskraftverstärker Vorteile im Hinblick auf die erzeugbare Hilfskraft (deutlich höherer Aussteuerpunkt) bei gleichzeitig höherer Energiedichte. Dem stehen nachteilig die höheren Kosten und das bei bisherigen Hydraulikverstärkern auftretende „stumpfe Pedalgefühl" (Springerfunktion nicht realisiert) gegenüber. Hydraulische Verstärker werden insbesondere in schweren Pkw (z. B. gepanzerten Sonderschutz-Fahrzeugen) eingesetzt. Hier ist die hohe Verstärkungskraft vorrangig vor der Pedalcharakteristik.



**Abb. 7.14** Elektrische Vakuumpumpe

#### 7.2.3.3 Vakuumpumpe

Die bei Fahrzeugen mit Otto-Motor im Ansaugtrakt verfügbare Vakuumenergie stellt eine kostengünstige Energiequelle für den Bremskraftverstärker dar. Durch fehlendes bzw. vermindertes Vakuum z. B. bei Einspritzmotoren (Diesel-Motor und Benzin-Direkteinspritzmotoren) werden Vakuumpumpen erforderlich. Diese Pumpen sind zumeist Flügelzellenpumpen und können mechanisch über eine Motorwelle oder bedarfsgerecht elektrisch angetrieben werden.

**Elektrische Vakuumpumpe** Die elektrische Vakuumpumpe (EVP) ist in der Lage, den gesamten Vakuumbedarf des Fahrzeugs abzudecken.

Daraus ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten in

- Hybrid- und Elektrofahrzeugen,
- Dieselfahrzeugen und
- Saugverlustoptimierten Verbrennungsmotoren.

Eigenschaften und Vorteile am Beispiel einer aktuellen EVP in Membranpumpenausführung (siehe Abb. 7.14):

- hocheffiziente Vakuumquelle, „Vakuum on demand“,
- hohe Verfügbarkeit durch robustes Systemdesign mit 2 redundanten Zylinderkammern,
- reibungsarme Vakuumerzeugung,
- geringe Wärmeentwicklung auf Grund eines hohen mechanischen Wirkungsgrads,
- hohe Lebensdauer,
- niedriges Geräusch- und Schwingungsniveau durch Boxeranordnung der Zylinder,
- Ansteuerung durch das Bremsen-Steuergerät oder durch ein autonomes Vakuumpumpen-Steuergerät.

#### 7.2.3.4 (Tandem)-Hauptzylinder

Der (Tandem)-Hauptzylinder hat die Aufgabe die Ausgangskraft des Bremskraftverstärkers in hydr. Druck umzuwandeln.

Auf Grund der gesetzlich geforderten Zweikreisigkeit der Bremsanlage werden (Einfach)-Hauptzylinder nur noch in Sonderfällen (z. B. Rennfahrzeugen) eingesetzt.

Der heute generell eingesetzte Tandem-Hauptzylinder (THz) entspricht einer Kombination zweier hintereinander geschalteter Hauptzylinder in einem Gehäuse. Er ermöglicht den Druckauf- und -abbau in der Bremsanlage. Bei Volumenänderungen im Bremssystem, z. B. bei Temperaturänderungen oder Verschleiß der Bremsbeläge, wird über die Ausgleichbohrung und den Ausgleichbehälter der Volumenausgleich sichergestellt.

Die Kolben begrenzen zwei Kammern, die des Primärkreises (auch Druckstangenkreis genannt) und des Sekundärkreises (auch Schwimmkreis genannt). Fällt ein Kreis aus (z. B. Leckage), wird dies über einen verlängerten Pedalweg spürbar, da der jeweilige Kolben bis zum Anschlag vorgeschoben werden muss, bevor sich im anderen, intakten Bremskreis Druck aufbauen kann. Je nach Bauart werden unterschieden:

- Schnüffelloch-Tandem-Hauptzylinder,
- Zentralventil-Tandem-Hauptzylinder,
- Plunger-Tandem-Hauptzylinder.

Tiefer gehende Details zur Funktionsweisen der verschiedenen Bauarten sind z. B. in [14] erläutert.

#### 7.2.3.5 Ausgleichbehälter

Der Ausgleichbehälter

- beinhaltet das Reservevolumen für die zusätzliche Volumenaufnahme durch Belagverschleiß,

- gewährleistet den Volumenausgleich innerhalb der Bremsanlage unter verschiedenen Umgebungsbedingungen,
- verhindert bei unterschiedlichen Fahrsituationen das Ansaugen von Luft in das Bremssystem,
- reduziert das Aufschäumen der Bremsflüssigkeit,
- trennt bei absinkendem Flüssigkeitsspiegel das Reservevolumen der beiden Hauptzylinderkreise.



Er wird mittels sogenannter „Behälterstopfen" von oben in den Tandem-Hauptzylinder eingeknöpft. Üblicherweise ermöglicht eine zusätzliche Befestigung mit dem Tandem-Hauptzylinder eine Erst-Befüllung des Bremssystems mit Bremsflüssigkeit auch mit höheren Drücken. Außerdem ist so gewährleistet, dass bei einem Unfall die brennbare Bremsflüssigkeit nicht austreten kann. Darüber hinaus

- kann er als Volumenspeicher für eine hydraulisch betätigte Kupplung oder auch für eine ESP-Vorladepumpe dienen und
- bevorratet gegebenenfalls die Bremsflüssigkeit, die zum Laden eines Hydrospeichers benötigt wird (z. B. Hydraulikverstärker).

Um sicherzustellen, dass die Bremsanlage in Lösestellung drucklos ist, ist der Behälterinnenraum über die Behälterverschraubung (Schraubdeckel) mit der Atmosphäre verbunden.

Der Bremsflüssigkeitsstand ist von außen sichtbar, da der Behälter aus durchscheinendem Material gefertigt ist. So ist Bremsflüssigkeitsverlust am Unterschreiten der „Min"-Marke erkennbar. Zusätzlich erfolgt über die Behälterwarneinrichtung eine Anzeige durch die Bremsenwarnleuchte im Armaturenbrett.

### 7.2.3.6 Bremsflüssigkeit

Im hydraulischen Teil der Bremsanlage ist Bremsflüssigkeit das Medium für die Energieübertragung zwischen Tandem-Hauptzylinder, hydraulischer Regeleinheit und den Radbremsen. Zusätzlich hat sie die Aufgabe, bewegte Teile wie z. B. Dichtungen, Kolben und Ventile zu schmieren und vor Korrosion zu schützen.

Bremsflüssigkeit muss auch bei Tieftemperaturen (bis zu −40 °C) gute Fließeigenschaften besitzen (geringe Viskosität), um sowohl ein gutes Ansprech- und Löseverhalten der Bremsen als auch eine gute Funktion der elektronischen Regelsysteme zu ermöglichen. Darüber hinaus muss die Bremsflüssigkeit eine hohe Siedetemperatur aufweisen, damit es selbst bei stärkster thermischer Belastung der Bremsanlage nicht zur Dampfblasenbildung kommt. Die Kompressibilität von Dampfblasen würde dazu führen, dass wegen des begrenzten Ausstoßvolumens des Tandem-Hauptzylinders kein ausreichend hoher Druck mehr aufgebaut werden kann. Bei Bremsflüssigkeiten wird unterschieden zwischen glykolbasierten und Silikonbremsflüssigkeiten.

**Glykol-Bremsflüssigkeiten**, die auf Polyglykolen und Polyglykol-Ether basieren, sind hygroskopisch. Sie nehmen Wasser auf und binden es. So wird vermieden, dass eingedrungenes Wasser ungelöst bleibt und beim Sieden Dampfblasen bilden kann. Zahlreiche internationale Normen, z. B. DOT3, DOT4, DOT5.1, fordern für die nach einem bestimmten Verfahren mit Wasser angereicherte Bremsflüssigkeit eine möglichst hohe sogenannte „Nasssiedetemperatur". Um im Betrieb einen ausreichend geringen Wassergehalt sicherzustellen, ist ein regelmäßiger Wechsel der Bremsflüssigkeit erforderlich.

**Silikonbremsflüssigkeiten** nach DOT5 basieren auf hydrophobem Silikonöl, das nur Spuren von Wasser aufnehmen kann. Eventuell vorhandenes ungelöstes Wasser kann u. U. sieden (Dampfblasenbildung, s. o.) oder zu Korrosion von Bauteilen führen. Die Kompressibilität und die Menge an gelöster, u. U. ausgasender Luft ist bei Silikonbremsflüssigkeiten höher als bei Glykol-Bremsflüssigkeiten. Wegen ihres besonderen Eigenschaftsbildes dürfen diese Bremsflüssigkeiten nur nach ausdrücklicher Zustimmung des Fahrzeugherstellers eingesetzt werden. Hauptsächlich ist das der Fall bei Fahrzeugen, die über mehrere Jahre eingelagert werden (z. B. bei militärischen Kfz).

Bremsflüssigkeit ist heute im Allgemeinen recyclingfähig. Grundvoraussetzung hierfür ist sortenreine Sammlung, Reinigung und chemische Aufarbeitung.

### 7.2.3.7 Bremsleitungen und -schläuche

Zur Verbindung der hydraulischen Komponenten eines Bremssystems werden hochdruckfeste Bremsrohr- und Bremsschlauchleitungen sowie armierte Bremsschlauchleitungen (Flexleitungen) verwendet. Wesentliche Anforderungen sind Druckfestigkeit, mechanische Belastbarkeit, geringe Volumenaufnahme, chemische Beständigkeit zum Beispiel gegen Öl, Kraftstoffe und Salzwasser sowie thermische Unempfindlichkeit.

**Bremsrohrleitungen** stellen die hydraulische Verbindung zwischen unbeweglichen Anschlusspunkten dar. Sie bestehen aus doppelt gewickelten, hartgelöteten Stahlrohren. Zum Schutz gegen Umgebungseinflüsse wird die Rohroberfläche verzinkt und mit einem Kunststoffüberzug versehen.

**Bremsschlauchleitungen** finden sich an den Übergängen zu beweglichen, dynamisch stark beanspruchten Teilen wie Achsschenkel oder Bremssattel. Sie stellen die einwandfreie Weiterleitung des Flüssigkeitsdrucks zu den Bremsen auch unter extremen Bedingungen sicher. Bremsschlauchleitungen bestehen aus einem Innenschlauch, einem zweilagigen Geflecht als Druckträger und einer äußeren Gummischicht zum Schutz des Druckträgers vor äußeren Einflüssen.

**Armierte Bremsschlauchleitungen (Flexleitungen)** werden ähnlich wie Bremsschlauchleitungen an den Übergängen zu dynamisch beanspruchten Teilen verbaut. Sie bestehen aus Poly-Tetrafluor-Ethylen (PTFE)-Leitungen mit Edelstahlgeflecht als Druckträger und gegebenenfalls einem anderen thermoplastischen Elastomer als äußere Schutzschicht. Dadurch ergibt sich eine gewisse Flexibilität, so dass Flexleitungen nur für Verbindungen mit geringer Bewegung genutzt werden, wie sie zum Beispiel durch Belagverschleiß an den Bremssätteln auftreten. Flexleitungen dämpfen die Körperschallübertragung und werden deshalb auch zur Verbesserung des akustischen Komforts, zum Beispiel zwischen THz und Hydraulikeinheit eingebaut.

### 7.2.3.8 Bremskraftverteiler

Beim Bremsvorgang bewirkt die dynamische Achslastverteilung eine Entlastung der Hinterräder. Diese können dadurch nur einen geringer werdenden Anteil der Bremskraft übertragen. Im gleichen Maße nimmt die dynamische Vorderachslast und demzufolge auch die an der Vorderachse übertragbare Bremskraft zu. Zur Realisierung kurzer Bremswege ist es daher wichtig, den Bremskraftanteil der Hinterräder möglichst gut auszunutzen, ohne dass diese früher blockieren als die Vorderräder. Dieser gesetzlichen Forderung wurde zunächst durch kleiner dimensionierte Hinterradbremsen Rechnung getragen. Ausreichend ist diese Maßnahme wegen der nichtlinearen idealen Bremskraftverteilungs-Kennlinien in der Regel nicht, so dass „Bremskraftverteiler“ (siehe ◘ Abb. 7.15) eingesetzt wurden, die seit Mitte der neunziger Jahre weitgehend von der elektronischen Bremskraftverteilung EBV abgelöst wurden (siehe ► Abschn. 7.2.5.2). Man unterscheidet drei Bauformen:

**Bremsdruckbegrenzer** limitieren den ausgangsseitigen Druck zu den Radbremsen auf einen konstruktiv festgelegten Abschaltdruck.

**Druckabhängige (festeingestellte) Druckminderer** werden in Fahrzeugen eingesetzt, bei denen nur geringe Achslaständerungen zu erwarten sind. Die auch Bremskraftregler genannten Minderer haben einen fest eingestellten Umschaltpunkt, ab dem der Hinterachsdruck in einem festen Verhältnis zum Vorderachsdruck abgeregelt wird.

**Lastabhängige Druckminderer** (◘ Abb. 7.16) werden vor allem in Fahrzeugen verbaut, bei denen die Achslasten durch hohe Zuladung stark variieren können. Auch bei Kleinwagen mit hohem Schwerpunkt und kurzem Radstand und damit stark verzögerungsabhängiger Achslastverteilung sind lastabhängige Druckminderer sinnvoll. Die Zuladung wird hierbei indirekt über die Einfederung des Fahrzeugs ermittelt, wobei der beim Einfedern verringerte Abstand zwischen Karosserie und Hinterachse zu einer Erhöhung der Federkraft und damit zu einer Erhöhung des Umschaltpunktes führt.

### 7.2.3.9 Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU)

Die hydraulisch/elektronische Regeleinheit heutiger ABS/ASR/ESP-Anlagen (z. B. Continental MK 100, ◘ Abb. 7.17) besteht aus einem zentralen Hydraulikblock mit Magnetventilen, einer integrierten Pumpe mit einem angeflanschten Elektromotor (HCU = hydraulic control unit) und einem Spulenträger einschließlich der darin enthaltenen Elektro-

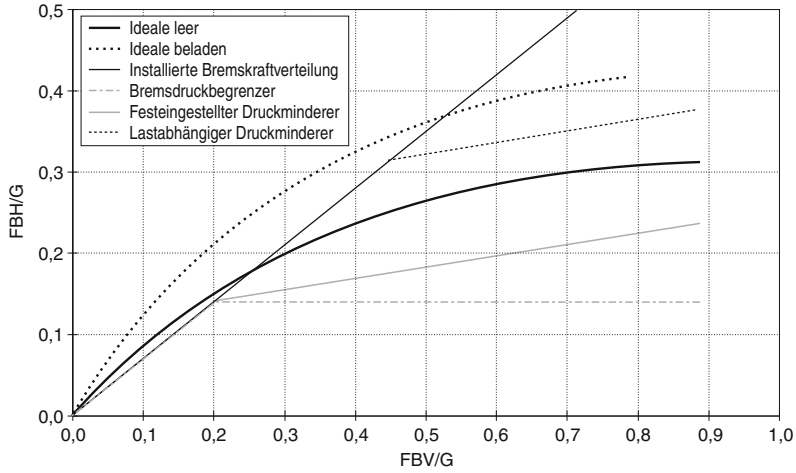



**Abb. 7.15** Kennlinien von Bremskraftverteilern mit Wirkung auf die Hinterachsbremse

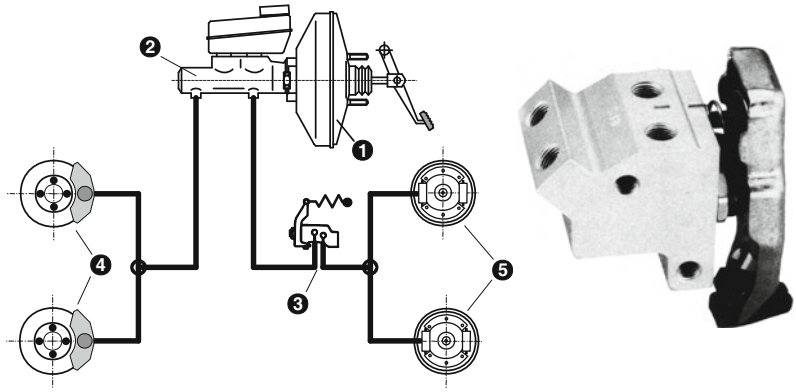



**Abb. 7.16** Lastabhängiger Druckminderer: 1 Vakuum-Bremskraftverstärker, 2 Tandem-Hauptzylinder mit Ausgleichsbehälter, 3 Bremskraftregler, 4 Radbremse Vorderachse, 5 Radbremse Hinterachse

nik (ECU = electronic control unit). Der Spulenträger wird mittels eines „magnetischen Steckers" aufgesetzt.

Die hydraulisch/elektronische Regeleinheit ist durch zwei Hydraulikleitungen mit den Bremskreisen des THz verbunden, von der HCU führen Bremsleitungen zu den Radbremsen (Abb. 7.18).

**Ventile** Die elektromagnetischen Ein- und Auslassventile sind im Hydraulikblock zusammengefasst. Sie ermöglichen die Modulation der Radbremsdrücke. Jedem geregelten Bremskreis sind ein Einlassventil mit parallel geschaltetem Rückschlagventil sowie ein Auslassventil zugeordnet. Wie in Abb. 7.19 gezeigt, ist das Einlassventil im ungeschalteten Zustand offen (stromlos offen, SO), das Auslassventil geschlossen (stromlos geschlossen, SG).

**Pumpe** Während der ABS-Regelung wird das aus den Radbremsen entnommene Volumen in die Niederdruckspeicher zwischengespeichert. Die in die HCU integrierte zweikreisige Kolbenpumpe fördert dieses Bremsflüssigkeitsvolumen aus dem Niederdruckspeicher zurück in die jeweiligen Bremskreise des THz. Während aktiver Regelvorgänge der ASR oder des ESP, die ohne Pedalbetätigung ablaufen, stellt die Pumpeneinheit das in der Druckauf-

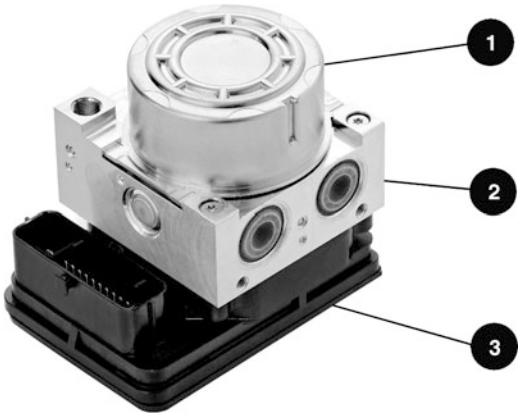



**Abb. 7.17** ESP-Anlage mit angeflanschtem Motor 1, Hydraulikblock 2 und Spulenträger mit Elektronik 3

bauphase benötigte Flüssigkeitsvolumen zur Verfügung.

**Elektronische Regeleinheit für (Brems-)Regelsysteme**
Auf Basis von Sensorinformationen (Raddrehzahlen, Gierrate, Lenkradwinkel, etc.) berechnet der elektronische Regler (ECU) in einer komplexen Regellogik die Steuerung der Stellglieder für den Bremsen- und Motoreingriff. Ziel dieser Eingriffe ist, dass sich die Räder mit dem für den jeweiligen Fahrzustand optimalen Schlupf drehen. Weitere wichtige Aufgaben des elektronischen Reglers sind die Pegelanpassung und Wandlung der Ein- und Ausgangssignale, die Sicherheitsüberwachung des elektronischen Regelsystems und die Fehlerdiagnose. Der Regler ist als Mikroprozessorsystem ausgeführt. Eingangsgrößen sind zum Beispiel:

- Sensorsignale (Raddrehzahl, ABS-Pumpenmotordrehzahl, Lenkradwinkel, Gierrate, etc.),
- Schaltsignale (zum Beispiel Bremslichtschalter),
- Informationen vom Verbrennungsmotor für die in das Motormanagement eingreifenden Regelsysteme,
- Betriebsspannung.

Ausgangsgrößen sind zum Beispiel:

- Schaltsignale (Magnetventile, ABS-Pumpenmotor der HCU, Warn- und Funktionsleuchten, etc.),
- Signale zur Anpassung des Schlepp- oder des Antriebsmoments des Verbrennungsmotors,
- Signale zur Überwachung sicherheitsrelevanter Baugruppen,
- Informationen über Fehlerzustände.

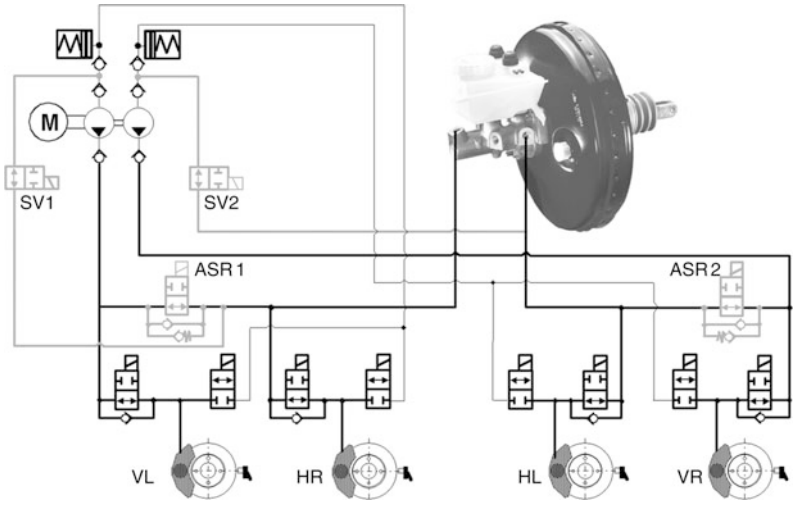



**Abb. 7.18** ABS-Hydraulikschaltbild (*schwarz*) mit Zusatzkomponenten für ASR (*grau*). Pkw mit Frontantrieb und diagonaler Bremskreisaufteilung

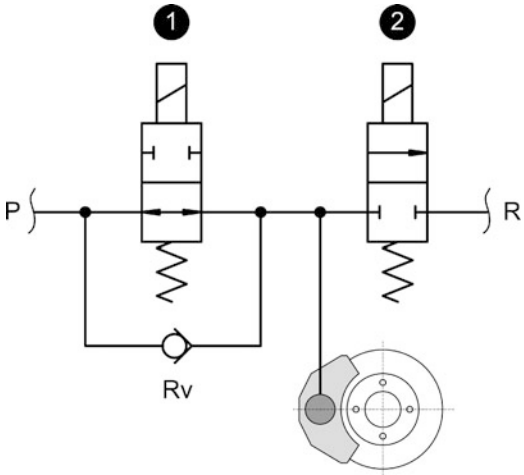



**Abb. 7.19** ABS Ventilkonfiguration: 1 Einlassventil (SO), 2 Auslassventil (SG), P Anschluss zur Betätigung, R Rücklauf, Rv Rückschlagventil

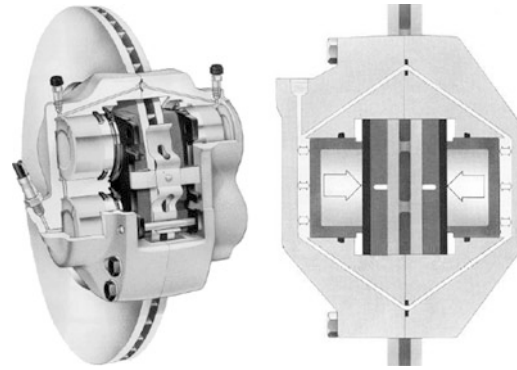


**Abb. 7.20** Festsattel

Die in der Regellogik realisierte Struktur lässt sich als Regler mit adaptivem Verhalten bezeichnen. Das heißt: Der Arbeitspunkt wird durch Suchverfahren kontinuierlich an das jeweilige Optimum der Regelstrecke angepasst. Die Regellogik beinhaltet:

- vom jeweiligen Fahrzeug unabhängige grundlegende Algorithmen,
- Algorithmen, die durch geeignete Einstellung von Parametern auf verschiedene Fahrzeugmodelle angepasst werden,
- Maßnahmen, die speziell für einen Fahrzeughersteller oder ein Modell entwickelt wurden.

Die Algorithmen werden in der Programmierhochsprache „C“ erstellt und sind in zahlreiche Module aufgeteilt. Das erlaubt eine schnelle Anpassung der Software, die Wartbarkeit der Software bei vertretbarer Komplexität und die Kombinierbarkeit verschiedener Module wie z. B. ABS, ASR und Giermomentenregelung (GMR).

### 7.2.3.10 Scheibenbremsen

Die Scheibenbremsen erzeugen Bremskräfte am Rad. Nahezu alle Pkw-Vorderradbremsen sind Scheibenbremsen. Bei heutigen Fahrzeugen sind häufig auch die Hinterachsbetriebsbremsen als Scheibenbremsen ausgeführt.

Scheibenbremsen sind Axialbremsen. Die Zuspannkräfte des Bremssattels werden über hydraulische Zylinder in axialer Richtung auf die Bremsbeläge aufgebracht, die beidseitig auf die Planreibflächen der Bremsscheibe (auch „Rotor“ genannt) wirken. Die Kolben und Beläge sind in einem sattelartig über den Außendurchmesser der Scheibe greifenden Gehäuse untergebracht. Die Beläge stützen sich in Drehrichtung der Scheibe an einem am Achsschenkel befestigten Bauteil ab.

Die Bremsbelagflächen bedecken jeweils einen Teil einer ebenen Ringfläche (Teilscheibenbremse). Im Allgemeinen ist unter dem Begriff „Scheibenbremse“ immer eine Teilscheibenbremse zu verstehen. Vollscheibenbremsen, bei denen die gesamte Scheibe mit einem ringförmigen Belag in Berührung gebracht wird, sind im Pkw-Bau nicht gebräuchlich. Bei Scheibenbremsen werden Fest-, Rahmen- und Faustsättel unterschieden: Festsättel beinhalten Kolben zu beiden Seiten der Bremsscheibe (Abb. 7.20); die verschiebbar gelagerten Schwimmrahmen- und Faustsättel nur auf einer Seite (Abb. 7.21 und Abb. 7.22).

Der Bremsenkennwert $C^*$ einer Scheibenbremse ist linear abhängig vom Belagreibwert (Abb. 7.23).

Weitere Merkmale sind:

- hohe thermische Belastbarkeit,
- geringere Empfindlichkeit gegenüber Reibwertschwankungen des Belags (s. o.),

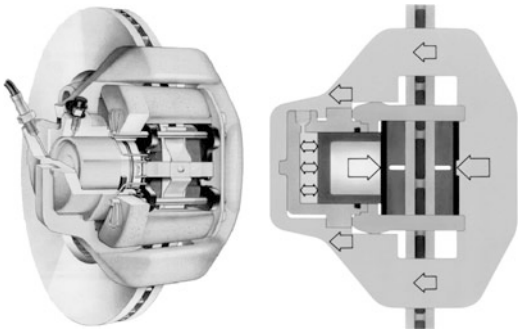


**Abb. 7.21** Schwimmrahmensattel

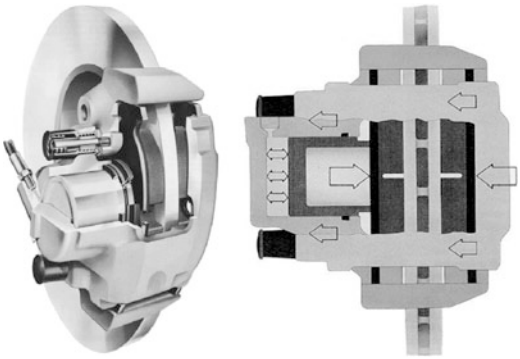


**Abb. 7.22** Faustsattel Bauart Teves FN

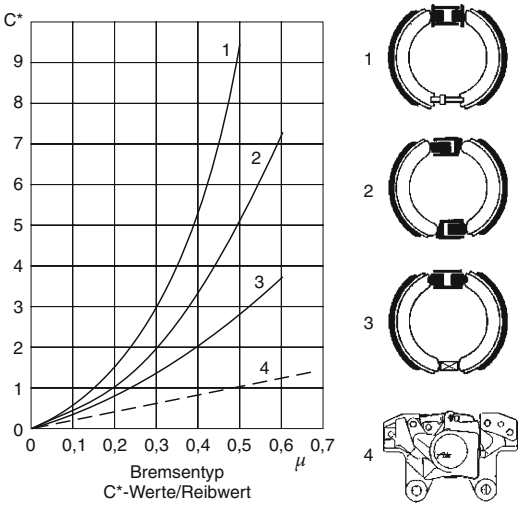



**Abb. 7.23** $C^*$-Kennwerte von Bremsen: 1 Duo-Servo Trommelbremse, 2 Duplex-Trommelbremse, 3 Simplex-Trommelbremse, 4 Scheibenbremse

- gleichmäßiges Ansprechen (Reproduzierbarkeit),
- gleichmäßiger Belagverschleiß,
- einfache (selbsttätige) Nachstellung,
- einfacher Belagwechsel.

Die Abdichtung der Kolben im Sattel erfolgt durch Kolbendichtringe mit quadratischem Querschnitt in einer profilierten Gehäusenut. Sie erzeugen nach dem Bremsvorgang ein Zurückziehen des Kolbens (rollback) und sorgen dadurch für ein sogenanntes „Lüftspiel" (geringes Restbremsmoment). Bei starker axialer Verformung und Verschiebung der Bremsscheibe (z. B. Radlagerspiel) wird mit der Dichtungsgeometrie das Wiedervorziehen des Kolbens erreicht (knockback).

Eine Schutzkappe sichert den Bereich zwischen Kolben und Gehäusebohrung gegen das Eindringen von Feuchtigkeit und Schmutz. Sie ist als Faltenbalg geformt, da sie sich dem veränderlichen Hub anpassen muss, der durch Verschleiß der Beläge und der Scheibenreibflächen sowie axiale Toleranzen entsteht.

An der höchstgelegenen Stelle des Zylinders ist zum Entlüften der Bremsanlage (z. B. durch Werkstätten) eine Entlüfterschraube angebracht, um eventuell eingedrungene Luft aus der Bremshydraulik zu entfernen.

**Sattel-Werkstoffe** Die Gehäuse der Faustsättel werden im Allgemeinen aus Kugelgraphitguss in den Qualitäten GGG50 … 60 gegossen. Bei Anforderungen an geringes Gewicht setzt man verschraubte Gehäuse ein, wobei die Zylinderseite aus hochfestem Aluminiumguss und die Gehäusepratze, die über die Scheibe auf den Belag der Felgenseite führt, aus hochwertigem Kugelgraphitguss ist. Bei besonderen Anforderungen an geringes Gewicht wird das gesamte Gehäuse als ein Teil in Aluminium ausgeführt (siehe Abb. 7.25 Faustrahmensättel).

Bremskolben werden aus a) Grauguss, b) Stahl, c) Aluminium-Legierungen und d) spritzbaren Kunststoffen hergestellt. Bei Stahlkolben ist Tiefziehen und Fließpressen üblich. Um die erforderliche Oberflächengüte und vor allem die Durchmessertoleranz sicherzustellen, ist ein Schleifen des Außendurchmessers notwendig.

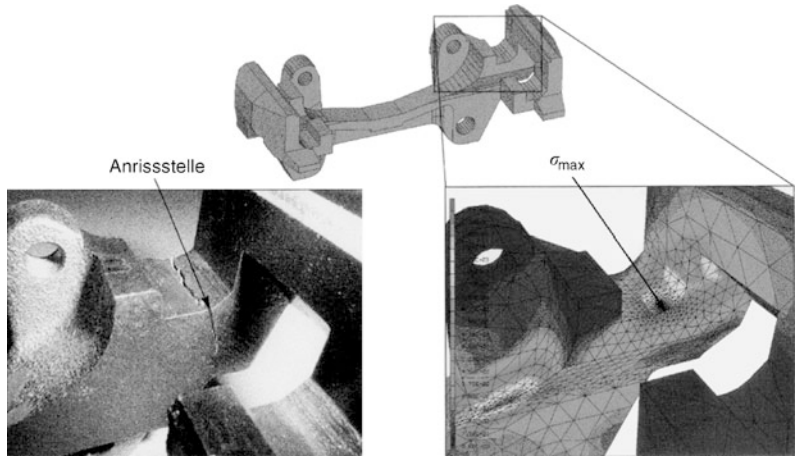



**Abb. 7.24** Spannungsverteilung in der Simulation

**Sattelauslegung** Hier verwendet man (siehe auch ▶ Abschn. 7.2.3.13 Trommelbremse) einen $C^*$-Wert, der sich aus dem Verhältnis von Reibkraft und Zuspannkraft des Kolbens ergibt. Bei Scheibenbremsen gilt näherungsweise:

$$C^* = 2\mu$$

Die Zuspannkraft wird in der Kolbenmitte angreifend angenommen. Übliche Reibwerte für Scheibenbremsen liegen zwischen $\mu = 0{,}35$ bis 0,50 (d. h. $C^* = 0{,}7 \ldots 1{,}0$), wobei $\mu$ als mittlerer Betriebsreibwert der Belagsorte definiert ist. Er kann in Abhängigkeit von Scheibentemperatur, Fahrzeuggeschwindigkeit, Flächenpressung, etc. schwanken.

Die Steifigkeit eines Bremssattels wird indirekt über seine Fluidaufnahme über dem hydraulischen Druck im Zylinder definiert, die „Volumenaufnahme". Man berechnet die Volumenaufnahme mittels 3D-Modellen und überprüft dies durch Messungen im Versuch.

Der auf das Fahrzeugleben bezogene Festigkeitsnachweis eines Faustsattelgehäuses erfolgt durch hydraulische Druckbeaufschlagung mit pulsierender Belastung. Diese Erprobung erfolgt im praktischenVersuch mit genau definierten Parametern, da Gestalteinflüsse noch nicht einwandfrei mit elektronischen Rechenprogrammen erfasst werden können.

Die Spannungsverteilung im Bauteil wird heute mit modernen FEM-Werkzeugen ermittelt und dargestellt, ◘ Abb. 7.24.

**Festsattel** An der Vorderachse schwerer Pkw mit Heckantrieb sind Festsättel weit verbreitet, da diese Fahrzeuge ausreichend Einbauraum an der Vorderachse bieten.

Festsättel sind durch beidseitig der Scheibenreibflächen angeordnete Bremszylinder und durch ein feststehendes Gehäuse gekennzeichnet (siehe ◘ Abb. 7.20). Das Gehäuse besteht oft aus zwei Hälften, die axial miteinander verschraubt sind. Die auf beiden Scheibenseiten befindlichen Kolben sind durch Kanalbohrungen in den Gehäusehälften hydraulisch miteinander verbunden. Die Kanalbohrungen sind an der Kontaktfläche mit Dichtungen nach außen abgedichtet. Der Übergang dieser Bohrungen über den Scheibenaußendurchmesser ist thermisch sensibel. Besondere Maßnahmen zur Kühlluftführung und ausreichend gute Bemessung der Scheibe verhindern eine Dampfblasenbildung, die zum Bremsenausfall durch zu hohe Bremsflüssigkeitsaufnahme (= Pedal am Boden) führen könnten. Die Beläge stützen sich tangential an Anschlagführungen seitlich der Kolben ab.




**Abb. 7.25** Faustrahmensättelvarianten: *FNR-AL*: Aluminium, *FNRG*: Composite, d. h. Halter Aluminium, Brücke und Sattel aus Grauguss, *FNR*: Grauguss

Vorteil dieser Sattelkonstruktion ist die durch hohe Steifigkeit bedingte geringe Volumenaufnahme.

**Rahmensattel** Dadurch, dass beim Rahmensattel sich nur auf einer Seite Kolben befinden, lässt sich die Bremsscheibe axial tiefer in die Felgenschüssel (d. h. zur Felgenaußenseite) verlagern. Dies erleichtert im Allgemeinen die Realisierung eines negativen Lenkrollradius (s. ► Abschn. 7.4.5) [15].

Die Reaktionskraft des Kolbens wird mit einem Rahmen über die Scheibe auf den felgenseitigen Belag übertragen. Das Zylindergehäuse ist im Rahmen befestigt. Beide Beläge stützen ihre jeweiligen tangentialen Bremsumfangskräfte unmittelbar auf zwei Arme des mit der Radnabe bzw. Achsschenkels festverschraubten Halters ab. Der Vorteil von Rahmensätteln ist die niedrige Bremsflüssigkeitstemperatur im Zylinder, da zum einen die Bremsflüssigkeit nicht über die Bremsscheibe geführt wird, zum anderen der große, offene Belagschacht der Kühlluft guten Zutritt zu den Belägen erlaubt.

**Faustsattel** Faustsättel bieten die gleichen Einbauvorteile wie Rahmensättel. Weitere wesentliche Vorteile von Faustsätteln sind:

- großflächige Beläge,
- optimale Belagform,
- geringes Gewicht,
- kleine Baugröße.

Das meist einteilige Gehäuse gleitet auf zwei Armen eines festgeschraubten Halters oder des Achsschenkels selbst. Die beiden Halterarme können auf der Felgenseite mit einer angegossenen Brücke verbunden sein oder, wie beim Teves FN-Prinzip, Abb. 7.22, über hakenförmige Enden der Belagträgerplatte. Auf diese Weise ist es möglich, die Beläge beim Bremsvorgang zumindest teilweise als gezogene Beläge auszuführen (pull-push Prinzip). Die axialen Reibungskräfte in den Halterführungen liegen auf der Scheibeneinlaufseite. Mit dieser Bauweise werden zwei wesentliche Funktionsvorteile erreicht: zum einen „schmiegen" sich die Beläge gleichmäßig an die Scheibenreibfläche an, was zum parallelen Belagverschleiß (gewünscht) wesentlich beiträgt; zum anderen werden Geräusche reduziert.

**Faustsattel FN** Durch eine spezielle Faustsattelkonstruktion (FN-Ausführung) lassen sich größere Reibradien und damit höhere Bremsmomente bei gleichem Bremsdruck realisieren. Die Gehäusebrücke kann an der engsten Konturenstelle in der Felge sehr lang und deshalb dünn gehalten werden, ohne dass die Sattelsteifigkeit (Volumenaufnahme) sich verschlechtert.

**Faustsattel FNR** Eine weitere Vergrößerung des Scheibenaußendurchmessers ist bei Einsatz eines Faust-Rahmen-Sattels (FNR) möglich, Abb. 7.25. Hierbei wird die Gehäusebrücke, wie beim Faustsattel beschrieben, ebenfalls nach außen um die beiden Haltearme herumgeführt und felgenseitig mit der mittleren Gehäusepratze zu einem einzigen Gussstück fest verbunden.

**Kombinierter Faustsattel** Beim Kombi-Faustsattel (FNc) werden die Funktionen von Betriebs- und Feststellbremse in einem Scheibenbremssattel zusammengefasst, wobei dieselben Reibpartner für beide Aufgaben genutzt werden.

Die Betriebsbremse funktioniert analog dem des Faustsattels. Die Feststellbremse wird über einen Bowdenzug aktiviert, welcher über einen Hebelmechanismus dieBetätigungswelle (Abb. 7.26) verdreht. Da eine Scheibenbremse im Gegensatz

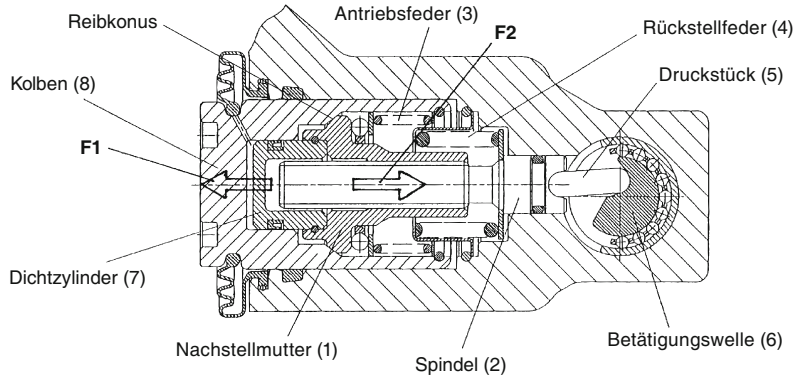



**Abb. 7.26** Nachstellung

zu einer Trommelbremse über keine Selbstverstärkung verfügt, muss für die Feststellbremsfunktion eine erhöhte Kraft auf den Bremskolben aufgebracht werden. Die Betätigung erfolgt entweder klassisch über einen im Cockpit befindlichen Handbremshebel (Abb. 7.32) oder bei einigen neueren Fahrzeugen über einen elektrisch betriebenen Zentralaktuator („cable puller").

Gegenüber der Verschleißnachstellung der Betriebs(scheiben)bremse – Kolben rutscht unter dem Dichtring vor – ist die Nachstelleinrichtung für die Feststellbremse aufwändiger.

Tritt während einer Bremsung zusätzlich zu Belagkompression und Verformungen des Gehäuses noch Verschleiß auf, kann dieser Verschleißweg durch Gehäuseentlastung, bzw. durch die Rückstellfähigkeit des Dichtrings, nicht vollständig kompensiert werden, es erfolgt eine Verschleißnachstellung.

Die Spindel (2) wird dann durch die Kraft der Rückstellfeder (11.2) wieder zur Anlage am Druckstück (11.3) gebracht. Da die Rückstellfederkraft etwa der dreifachen Antriebsfederkraft entspricht, wird die Nachstellmutter (1) von der Spindel (2) mitgenommen, und der Reibkonus öffnet sich. Die Nachstellmutter wird nun durch die Wirkung der Antriebsfeder zur Drehung veranlasst und schließt den Reibkonus wieder. Damit ist ein axialer Längenausgleich (Nachstellung) erfolgt.

### 7.2.3.11 Bremsscheiben

Ca. 90 % der beim Bremsen umgesetzten Energie geht zunächst in die Scheibe und wird von dort an die Umgebungsluft weitergegeben. Im Reibring werden, z. B. bei wiederholten Bremsungen aus höherer Geschwindigkeit, Temperaturen bis zu 700 °C (Rotglut) erreicht. Um eine höhere Wärmeaufnahmekapazität zu erreichen, gibt es außerdem Entwicklungskonzepte für Systeme mit Doppelbremsscheiben.

**Innenbelüftete Bremsscheiben** Innenbelüftete Bremsscheiben können die gespeicherte Wärmeenergie effizienter abgeben, Abb. 7.27. Auf dem europäischen Markt haben sich aufgrund gängiger Leistungsanforderungen innenbelüftete Bremsscheiben an der Vorderachse etabliert. An der Hinterachse kommen abhängig von fahrzeugvariantenspezifischen Parametern (Fahrzeugmasse, Achslastverteilung, Motorisierung, Marketingaspekte) wahlweise massive oder innenbelüftete Bremsscheiben oder Bremstrommeln zum Einsatz.

Eine weitere Maßnahme zur Verbesserung der Kühlung und darüber hinaus zum Ansprechverhalten bei Nässe (Wasserempfindlichkeit) bildet der Einsatz von gelochten oder genuteten Bremsscheiben. Allerdings ist dies mit höheren Kosten und u. U. einer stärkeren Geräuschbildung verbunden.

Um derartige Nachteile zu vermeiden, wurde die „ATE Power Disc" entwickelt, in deren Ringflächen eine Endlosnut eingearbeitet ist. Weitere Vorteile dieser Multifunktionsnut sind:

- optische Erkennung der Verschleißgrenze,
- verbessertes Bremsen bei Nässe,
- riefenfreies Verschleißbild von Belag und Scheibe.



**Abb. 7.27** Massive Bremsscheibe (*links*) und innenbelüftete ATE Power Disc (*rechts*)

Aufgrund der im Allgemeinen unsymmetrischen Anbindung des Reibrings an den Bremsscheibentopf kommt es bei Erwärmung zur sogenannten Schirmung der Bremsscheibe. Das heißt, die Reibflächengeometrie geht von einer Planfläche in eine Kegelfläche über. Das kann zu ungleichem Belag- und Scheibenverschleiß durch punktuelle Anlage der Belagreibfläche auf dem Reibring führen [31]. Schirmung kann eine Ursache für Geräuschentwicklung und Rubbeln sein (für weitere Ursachen siehe z. B. [14], Kapitel 28). Als Rubbeln wird eine Kombination von Lenkradschwingung, Pedalpulsation und niederfrequenter Geräuschbildung bezeichnet. Durch konstruktive Maßnahmen kann die Schirmung reduziert werden (Abb. 7.28). Zum Erreichen einer guten Bremsenqualität werden hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit von Bremsscheiben gestellt. Darüber hinaus sind im Fahrzeug entsprechende Laufgenauigkeit der Scheibenanflanschfläche und optimiertes Lagerspiel sicherzustellen.

**Schwimmend gelagerte Bremsscheiben** Schwimmend gelagerte Bremsscheiben bestehen aus zwei Einheiten: ein völlig planer äußerer Reibring ist in axialer Richtung verschiebbar auf einem inneren, nabenfesten Scheibenträger angebracht. Vorteile sind z. B.:

- keine Schirmung,
- minimierte Wärmeleitung in die Radlagerung,
- reduziertes Lüftspiel, da die beweglich gelagerte Scheibe nicht die Beläge (und damit die Kolben) zurückdrückt.

Schwimmend gelagerte Bremsscheiben werden in Kombination mit Festsätteln eingesetzt, sie finden vorwiegend bei Motorrädern Verwendung.

**Scheiben-Werkstoffe** Für Standard-Bremsscheiben werden Legierungen auf Basis von Gusseisen mit

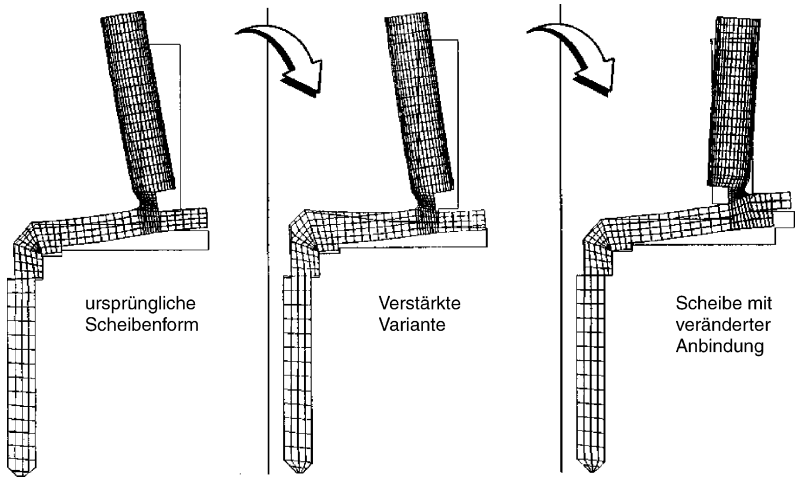


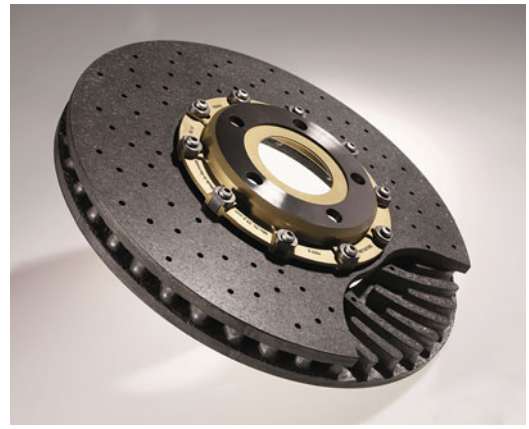

**Abb. 7.28** FE-Analyse zur Reduzierung der Scheibenschirmung

Lamellengraphit eingesetzt (siehe z. B. EN 1561 oder DIN 1691), davon meist die Qualitäten EN-GJL-150 … 250 (bzw. GG15 … GG25). Der im vorwiegend perlitischen Grundgefüge als Graphit vorliegende Kohlenstoff hat dabei im Wesentlichen eine lamellare Form. Spezielle Legierungszusätze wie Chrom, Kupfer, Molybdän, etc. ermöglichen eine Anpassung an spezielle Anforderungen für Bremsscheiben. So lassen sich Werkstoffeigenschaften wie Belastungsmechanik, Wärmeleitfähigkeit, Bearbeitbarkeit, Korrosions- und Verschleißverhalten verbessern.

Bei sehr hohen Standfestigkeitsanforderungen an die Bremsanlage (z. B. Hochleistungssportwagen, Rennbetrieb) können für die Reibringe der Bremsscheiben auch Carbon-Keramik-Materialien eingesetzt werden, welche über eine Flanschverbindung mit dem (metallischen) Scheibentopf verbunden werden (◘ Abb. 7.29). Ein solcher Verbundwerkstoff-Reibring besteht aus Kohlenstofffasern (Verstärkung), sowie Siliziumkarbid und metallischem Silizium (Matrix). Diese C/C-SiC-Kombination resultiert einerseits in einer hohen mechanischen Festigkeit, andererseits aber auch in einer hohen Härte des Werkstoffs bei relativ geringem Gewicht, was einige deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Grauguss-Bremsscheiben hervorbringt:

- sehr hohe Verschleißfestigkeit mit einer Lebensdauer bis 300.000 km,
- extreme Temperatur(wechsel)beständigkeit im Vergleich zu GG-Werkstoffen,
- Korrosionsbeständigkeit (dadurch Entfall einiger negativen Begleiterscheinungen von GG-Scheiben, wie z. B. Bremsstaubbildung oder festrostende Bremsbeläge),
- Verringerung der ungefederten Massen im Fahrwerk.

Allerdings sind solche Carbon-Keramik-Bremsscheiben erheblich teurer als GG-Bremsscheiben. Das dabei eingesetzte LSI-Verfahren (Liquid Silicon Infiltration) gliedert sich im Wesentlichen in das Warmpressen eines Rohlings, dessen Karbonisierung/Pyrolyse und das anschließende Silizieren [36]. Diese Prozessschritte finden teilweise bei sehr hohen Temperaturen und Schutzgas- bzw. Vakuum-Atmosphäre statt, was zu einem sehr hohen technischen und zeitlichen Aufwand für die Herstellung führt.



◘ **Abb. 7.29** C/SiC-Bremsscheibe. Quelle: SGL Group

### 7.2.3.12 Bremsbeläge

Der wesentliche Faktor für die Wirksamkeit einer Bremse ist der Bremsbelag. Seine physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmen die Qualität einer Bremsanlage entscheidend [17, 18]. Anforderungen an einen Bremsbelag sind u. a.:

- Reibwerthöhe $\mu$,
- Reibwertkonstanz (z. B. bei unterschiedlicher Temperatur, Nässe, Salz oder Schmutz),
- geringer Belagverschleiß sowie geringer Verschleiß des Reibpartners (Trommel oder Scheibe),
- minimale Geräuschbildung bzw. hohe Geräuschdämpfung, z. B. gegen (hochfrequentes) Quietschen und (niederfrequentes) Rubbeln,
- geringe Kompressibilität.

### 7.2.3.13 Trommelbremsen

Trommelbremsen sind Radialbremsen. Sie haben zwei Bremsbacken, die durch hydraulische Radzylinderbetätigung beim Bremsen nach außen gegen die Reibfläche der Trommel gedrückt werden. Bei Beendigung der Bremsung ziehen Federn die Bremsbacken wieder nach innen, so dass zwischen Trommelreibfläche und Bremsbelägen ein „Lüftspiel“ entsteht.

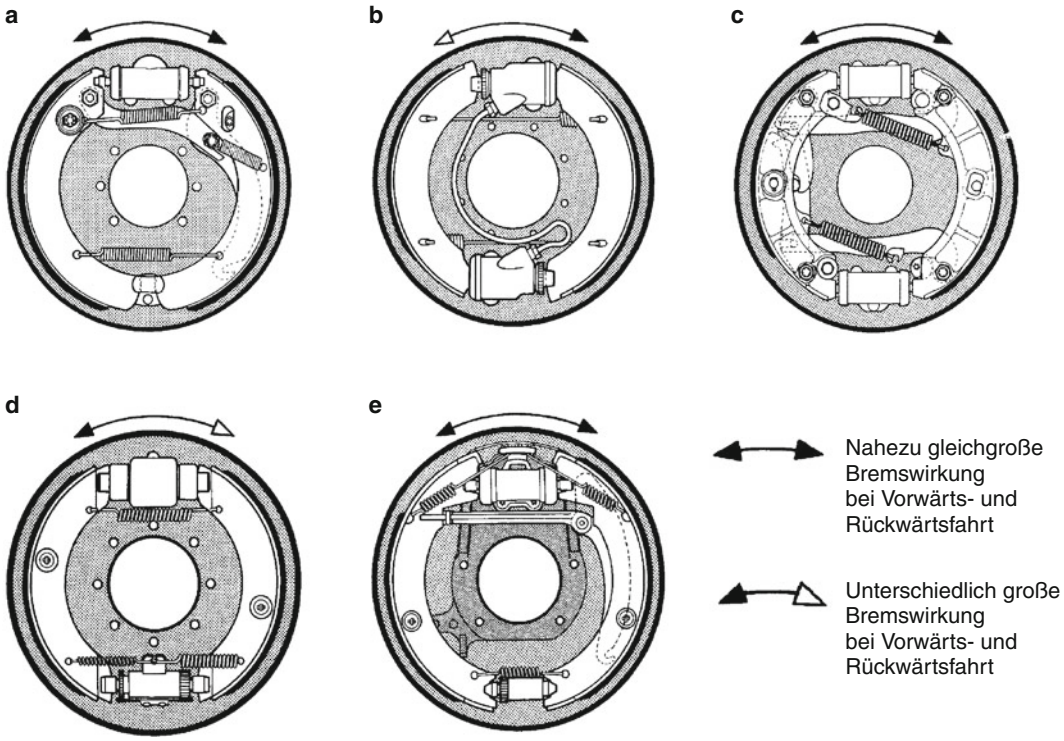



**Abb. 7.30** **a** Simplex-Trommelbremse, **b** Duplex-Trommelbremse, **c** Duo-Duplex-Trommelbremse, **d** Servo-Trommelbremse, **e** Duo-Servo-Trommelbremse

**Simplex-Trommelbremse** Bei Personenwagen kann diese Bauart an der Hinterachse aus Kostengründen (Integration der Feststellbremsfunktion) eingesetzt werden. Das erzeugte Bremsmoment ist nur wenig von Reibwertschwankungen abhängig ($C^* = 1{,}8$ bis 2,3, Abb. 7.23), so dass eine gleichmäße Bremswirkung (links/rechts) erreicht wird und damit das Fahrverhalten während der Bremsung ausreichend stabil ist.

Die in Fahrtrichtung vorn liegende Bremsbacke, die Primärbacke, erzeugt rund 65 % des Bremsmomentes, die hinten liegende Sekundärbacke nur etwa 35 %. Der Primärbelag wird daher zum Verschleißausgleich dicker ausgeführt, oder der Umfangswinkel beider Backen wird unterschiedlich groß gewählt. Der Umfangswinkel ist der Winkel in Umfangsrichtung, über den der Belag Kontakt mit der Trommel hat (Abb. 7.30a).

**Duplex-Trommelbremse** Bei der Duplex-Trommelbremse sind beide Backen gleich ausgeführt. Jede Backe stützt sich an einem eigenen Festpunkt am Bremsträger ab und wird über einen einfach wirkenden Sackloch-Radzylinder gegen die Trommel gedrückt. Hierbei sind beide Bremsbacken Primärbacken mit hoher Selbstverstärkung. Der $C^*$-Wert liegt bei etwa 2,5 bis 3,5 und erschwert die Dosierung. Die Integration einer Feststellbremseinrichtung ist überdies aufwändig, so dass diese Bauart nur geringe Bedeutung hat (Abb. 7.30b).

**Duo-Servo-Trommelbremse** Diese Bremse (Abb. 7.30e) erzeugt ein sehr hohes Bremsmoment, da das Nacheinanderschalten der beiden Bremsbacken eine besonders wirksame Selbstverstärkung erzeugt ($C^* = 3{,}5$ bis 6,5). Duo-Servo-Trommelbremsen werden daher häufig in Fahrzeugen mit hoher Nutzlast, etwa kleinen bis mittleren Lkw, verbaut.

Durch Befestigung eines Hebels an der Sekundärbacke und einer Druckstange zur Übertragung einer Reaktionskraft auf die Primärbacke lässt sich eine Feststelleinrichtung leicht integrie-

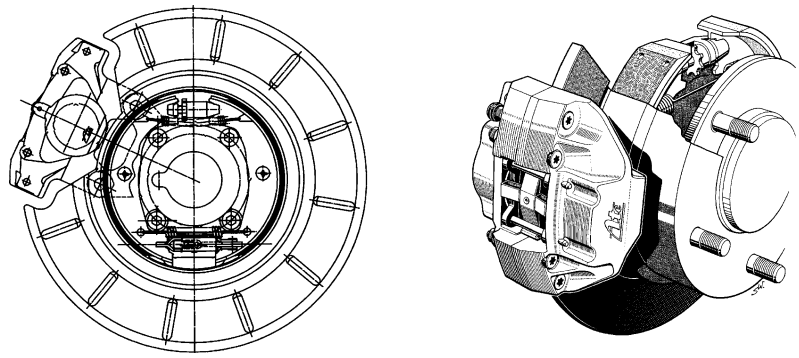


**Abb. 7.31** Kombination aus Scheiben- und Duo-Servo-Trommelbremse (Topf-Bremse)



ren. Sehr zweckmäßig ist der Einsatz der Duo-Servo-Trommelbremse in Kombination mit einer Scheibenbremse („drum-in-hat"). Die nur mechanisch betätigte Trommelbremse übernimmt hierbei die Funktion der Feststellbremse und die Scheibenbremse den Betriebsbremsanteil der Hinterachse. Ein Vorteil dieser Kombination ist, dass die Beläge für Feststell- und Betriebsbremse unabhängig voneinander optimal ausgelegt werden können (Abb. 7.31).

**Bremstrommel-Werkstoffe** Aufgrund der kostengünstigen Herstellung sind Bremstrommeln aus Grauguss heute allgemein verbreitet. Für besondere Anwendungen gibt es gewichtsoptimierte Lösungen. Beispiele hierzu sind:

- Zweiteilig in Verbundguss hergestellt. Der äußere Bereich besteht aus einer Aluminiumlegierung, innen ist wegen der geeigneteren Reibpaarung ein Graugussring eingesetzt,
- Matrix aus Keramik bzw. Aluminiumoxid eingegossen in Aluminiumtrommel.

Bremstrommeln aus Aluminium sind anspruchsvoll in der Herstellung und haben wegen der niedrigen Temperaturbeständigkeit einen eingeschränkten Leistungsbereich. Am besten eignen sie sich daher für Hinterachsbremsen besonders leichter Fahrzeuge.

**Nachstellung** Reibbelagverschleiß bei Trommelbremsen kann durch manuelle Nachstellung mit einfachen Werkzeugen ausgeglichen werden. Da die Wartungsintervalle moderner Fahrzeuge aber immer länger werden und sich dadurch bis zur Nachstellung unerwünschter Bremspedalhub einstellen würde, werden automatische Nachstelleinrichtungen verbaut.

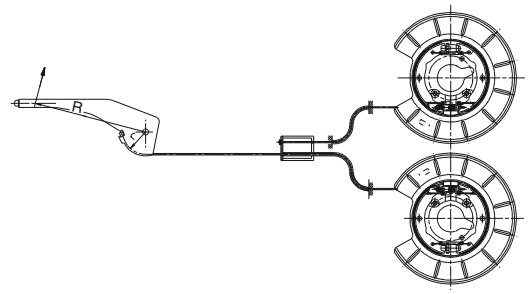


**Abb. 7.32** Betätigungsmechanismus Feststellbremse (hier „Handbremshebel"); für EPB-Funktion siehe ▶ Abschn. 7.2.5.10

**Mechanische Feststellbremsen** Mit einer Trommelbremse ist die Feststellbremsfunktion leicht zu realisieren. Die Betätigungskraft wird über Seilzüge (Bowdenzüge) von der Betätigungseinrichtung auf die Hebel der Trommelbremse übertragen. Heute sind fast ausschließlich Systeme mit rein mechanischer Betätigung über Hand- oder Fußhebel in Gebrauch (Abb. 7.32). Sie werden zunehmend von einer elektromotorischen Betätigung, der „elektrischen Parkbremsfunktion" (EPB) ersetzt.

## 7.2.4 Sensoren

Die nachfolgend beschriebenen Sensoren wandeln physikalische Größen in elektrische Signale um.

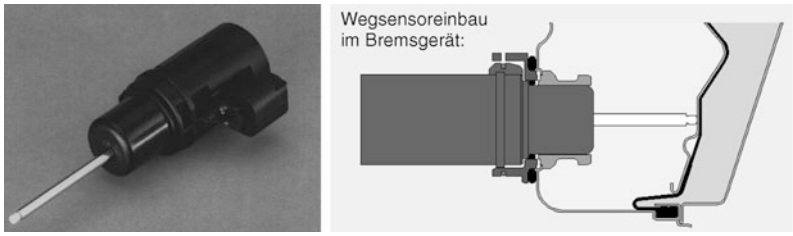



**Abb. 7.33** Betätigungswegsensor

Teilweise findet eine Rohsignalauswertung bereits im Sensor statt. Die Signale werden z. B. direkt verkabelt oder über CAN-Bus an elektronische Steuergeräte weitergeleitet.

### 7.2.4.1 Betätigungswegsensor

Der Wegsensor wird für den Bremsassistenten genutzt. Dort stellt er ein elektrisches Signal zur Verfügung, aus dem die Position des Bremspedals und die Betätigungsgeschwindigkeit abgeleitet werden. Der Wegsensor ist ein Schleifpotentiometer mit linearer Kennung. In Abhängigkeit von der Schleiferposition wird der Elektronik des Bremsassistenten eine definierte Spannung zur Auswertung geliefert, Abb. 7.33.

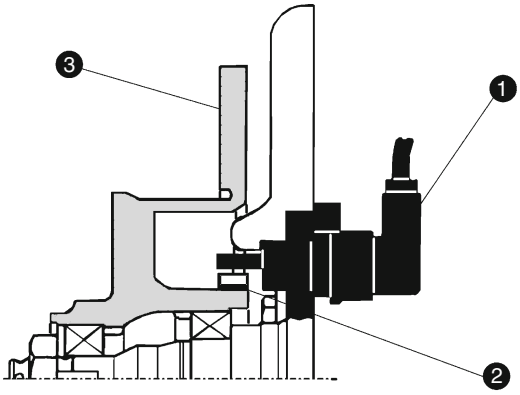



**Abb. 7.34** Radial angeordneter Raddrehzahlsensor. 1 Sensor, 2 Impulsrad, 3 Bremsscheibe

### 7.2.4.2 Raddrehzahlsensor

Der Raddrehzahlsensor (auch Drehzahlfühler genannt) erfasst die aktuelle Drehzahl eines Rades. Ein am Achsschenkel befestigter Sensor und das sich mit dem Rad drehende Impulsrad bilden eine Sensoreinheit (Abb. 7.34).

Bei Fahrzeugen mit Hinterachsantrieb lassen sich die Raddrehzahlen der Hinterachse auch mit nur einem Sensor erfassen. Er sitzt antriebsseitig im Differenzial. Das Sensorsignal entspricht in diesem Fall dem arithmetischen Mittel beider Hinterraddrehzahlen.

Je nach Einbauverhältnissen und Ausführung des Impulsrades wird der Sensor axial oder radial angeordnet. Es werden zwei Sensor-Bauarten (passiv oder aktiv) unterschieden:

**Induktive (passive) Raddrehzahlsensoren** Passive Raddrehzahlsensoren arbeiten nach dem Induktionsprinzip. Im Sensorkopf befinden sich – wasserdicht in Kunststoff eingespritzt – ein Dauermagnet, eine Spule und eine Kabelverbindung (Abb. 7.35).

Durch die vorbeilaufenden Zähne des Impulsrades aus ferromagnetischem Material verändert sich der magnetische Fluss. Durch die magnetische Induktion entsteht eine Wechselspannung (s. Abb. 7.36), deren Frequenz proportional der Drehzahl des Rades ist. Sie kann vom elektronischen Regler nur ausgewertet werden, wenn die Amplitude innerhalb eines vorgegebenen Spannungsbereichs liegt. Um diesen Spannungsbereich sicherzustellen, ist ein festgelegter Abstand (Luftspalt) zwischen Sensor und Impulsrad einzuhalten.

**Magnetoresistive (aktive) Raddrehzahlsensoren** Heutzutage werden üblicherweise magnetoresistive Raddrehzahlsensoren eingesetzt. Die Sensorbaugruppe (s. Abb. 7.37) besteht aus der Kombination einer Brückenanordnung dünner magnetoresistiver Metallschichten (Elementarsensoren) mit einer elektronischen Folgeschaltung zur Signalaufbe-

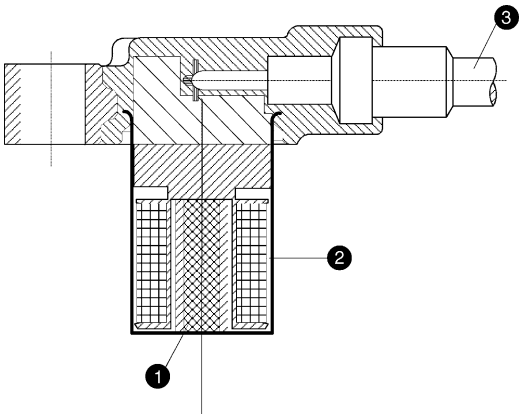



**Abb. 7.35** Induktiver Raddrehzahlsensor: 1 Permanentmagnet, 2 Spule, 3 Kabelverbindung

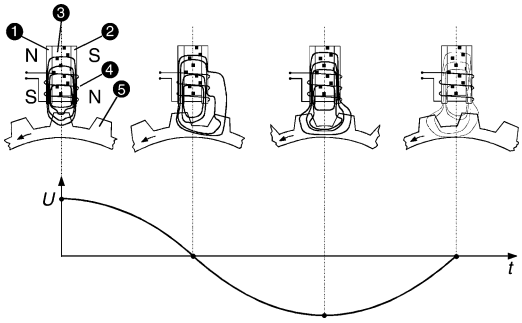



**Abb. 7.36** Funktionsweise des induktiven Raddrehzahlsensors ($t$ Zeit, $U$ Spannung, $N$ Nordpol, $S$ Südpol, $1 + 2$ Permanentmagnete, 3 Weicheisenkern, 4 Spule, 5 Impulsrad)

reitung. Das Wirkprinzip des Elementarsensors beruht darauf, dass sich der elektrische Widerstand der magnetoresistiven Schichten ändert, sobald sich ein parallel durch diese Schichten verlaufendes Magnetfeld ändert.

Es gibt zwei Varianten aktiver Raddrehzahlsensoren. Bei der ersten wird dem Elementarsensor zur Erzeugung des Magnetfeldes ein Permanentmagnet hinterlegt. Die Änderung der Feldstärke im Substrat ergibt sich durch ein ferromagnetisches Impulsrad, das zum Beispiel als Zahnrad ausgeführt sein kann. Bei der zweiten Variante rotiert ein magnetischer Encoder vor dem Sensor, der das Sensorelement und einen kleinen Stützmagneten enthält. Das erzeugte Stützfeld verhindert einen Frequenzverdoppelungseffekt im Sensorelement bei kleinen

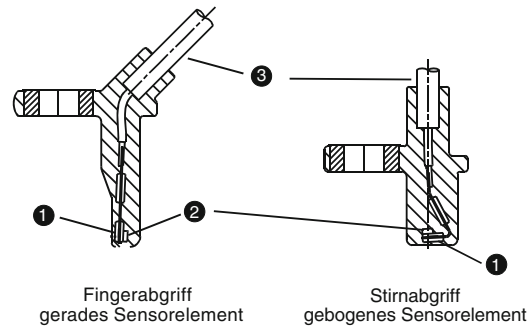



**Abb. 7.37** Magnetoresistiver Raddrehzahlsensor im Schnitt. 1 Sensorelement, 2 Stützmagnet, 3 Kabelverbindung

Luftspalten. Eine Folge gleichartiger, einander abwechselnder Nord- und Südpol-Areale bildet die Encoderspur des magnetischen Encoders. Zwei aufeinander folgende Nord-/Südpole bilden ein Inkrement und entsprechen einem Zahn bei einem ferromagnetischen Impulsrad. Der elektronische Regler versorgt die Sensoren im Betrieb mit elektrischer Energie. Die Sensoren erzeugen einen rechteckförmigen Signalstrom, dessen Frequenz proportional der Drehgeschwindigkeit der Räder ist. Die Vorteile von magnetoresistiven Raddrehzahlsensoren gegenüber induktiven sind unter anderem:

- Sensierung bis zum Stillstand ($v = 0\,\mathrm{km/h}$),
- Verbesserung der Signalqualität (digitales Signal mit hoher Auflösung ermöglicht großen Luftspalt),
- weitgehende Unempfindlichkeit des Signals gegenüber Temperaturschwankungen und Vibrationen,
- Reduzierung von Gewicht und Bauraum.

### 7.2.4.3 Beschleunigungssensor

Der Beschleunigungssensor (siehe Abb. 7.38) erzeugt ein zur Beschleunigung des Fahrzeugs proportionales Signal. Es gibt Varianten zur Erfassung der Fahrzeugbeschleunigung längs, quer und kombiniert. Gemeinsam mit dem Gierratensensor liefert er die für die Giermomentenregelung des ESP benötigten Informationen über den querdynamischen Zustand des Fahrzeugs. Der Beschleunigungssensor besteht aus einem mikromechanischen Biegebalken, der unter dem Einfluss der Be-

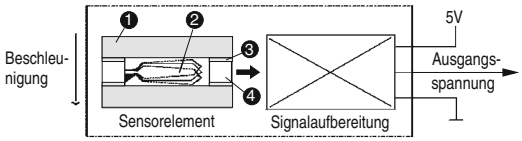



**Abb. 7.38** (Quer-)Beschleunigungssensor. 1 Außenelektrode, 2 Biegebalken (seismische Masse), 3 Isolator und Verbindungselement für die Elektroden, 4 Mittelelektrode

schleunigung seine Lage ändert und damit zu einer Kapazitätsänderung einer Kondensatoranordnung führt. Die Kapazitätsänderung wird elektronisch ausgewertet.

### 7.2.4.4 Gierratensensor

Der Gierratensensor erfasst die Drehwinkelgeschwindigkeit eines Fahrzeugs um seine Hochachse, die Gierrate. Dazu erzeugt er ein der Gierrate proportionales Signal und liefert damit – gemeinsam mit dem Querbeschleunigungssensor – die für die Giermomentenregelung des ESP benötigten Informationen über den Fahrzustand.

Zwei miteinander verbundene, parallel zur Fahrzeughochachse angeordnete Quarz-Stimmgabeln bilden das Sensorelement. Eine elektronische Schaltung regt die obere Stimmgabel zu sinusförmigen Schwingungen an. Beim Gieren des Fahrzeugs wirkt auf die Zinken der Stimmgabel eine von der Drehrate abhängige Corioliskraft. Diese wird auf die untere Stimmgabel übertragen, wo sie eine sinusförmige Schwingung erzeugt, die über eine Verstärkerschaltung in ein der Drehrate proportionales Signal umgewandelt wird. Das Schaltungskonzept beinhaltet außer der Schwingungserzeugung für die obere Stimmgabel die Signalverarbeitung und Sicherheitselemente zur Erkennung interner Sensorfehler.

Der Gierratensensor befindet sich idealerweise im Fahrzeugschwerpunkt. Die Kombination des Gierratensensors mit dem Querbeschleunigungssensor in einem gemeinsamen Gehäuse mit einem Stecker wird als „Cluster“ bezeichnet, ◘ Abb.7.39. Analog der Erfassung der Gierrate wird das gleiche Sensorprinzip auch für die Erfassung der Rollrate genutzt (siehe ► Abschn.7.2.5.8).



**Abb. 7.39** Sensorcluster – Zusammenfassung von Beschleunigungs- und Gierratenssensor in einem Gehäuse



**Abb. 7.40** Lenkradwinkelsensor

### 7.2.4.5 Lenkradwinkelsensor

Der Lenkradwinkelsensor übermittelt dem ESP-Steuergerät Informationen über den aktuellen Lenkwinkel und damit über die gewünschte Fahrtrichtung. Der Lenkradwinkel wird durch eine geeignete Anordnung mehrerer Fotozellen und Lichtschranken optisch gemessen und in Datenworte übersetzt. Aus Sicherheitsgründen erfolgt die Übersetzung in zwei Mikroprozessoren. Über z. B. einen CAN-Datenbus gelangen die Datenworte an den elektronischen Regler. Vom Lenkradwinkelsensor (◘ Abb.7.40) werden neben hoher Winkelauflösung, Sicherheit und Zuverlässigkeit auch möglichst geringe Abmessungen gefordert, da im Lenksäulenbereich nur wenig Einbauraum zur Verfügung steht.

### 7.2.4.6 Drucksensor

Der Drucksensor misst den über das Bremspedal eingesteuerten Bremsdruck. Dieser wird z. B. bei der ESP-Funktion zur Erfassung des Fahrerwunsches genutzt. Er besteht aus einer Keramikanord-



**Abb. 7.41** Fernbereichs-Radarsensor



**Abb. 7.42** Nahbereichs-Infrarotsensor (für den Notbremsassistenten im Stadtverkehr)



nung und verändert seine Kapazität bei Druckbeaufschlagung. Das keramische Messelement ist zusammen mit einer elektronischen Auswerteschaltung in einem Metallgehäuse untergebracht.

### 7.2.4.7 Abstandssensoren

**Abstandsmessung mit Radar- oder Infrarot-Technologie** Der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug kann, abhängig von der zu messenden Entfernung, mit einem 77-GHZ-Radar (Abb.7.41) nach dem Puls-Doppler-Prinzip oder mit einer Infrarot-Sensorik, (Nahbereichs-Infrarotsensor, siehe Abb. 7.42) gemessen werden. Die leistungsfähige aber aufwändige Radar-Variante ist für große Entfernungen von ca. 200 m und höhere Fahrzeuggeschwindigkeiten einsetzbar. Damit findet sie z. Zt. hauptsächlich Anwendung in gehobenen Fahrzeugklassen.

Die kostengünstigere Infrarot-Technologie (Nahbereichs-Infrarotsensor, Abstandsmessung bis ca. 15 m) ermöglicht jedoch die Nutzung für entsprechend eingeschränkte Funktionen auch in der Mittel- und Kompaktwagen-Klasse.

## 7.2.5 Assistenzfunktionen des Bremssystems

Das heute im Automobilbau erreichte Maß an Komfort und aktiver Sicherheit wäre ohne elektronische Regelsysteme nicht möglich. Dabei müssen diese Regelsysteme eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigen, Abb.7.43. Sie werden auch künftig eine vielfältige Erweiterung der individuellen Mobilität ermöglichen. Um Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bremsanlage trotz zunehmender Komplexität zu gewährleisten, beinhalten elektronische Regelsysteme aufwändige Sicherheitsschaltungen und modular aufgebaute Sicherheitsalgorithmen.

Zum Beispiel werden bei Ausfall eines Teilsystems die noch verbleibenden Restfunktionen der jeweils niedrigeren Ebene bis hinunter zur mechanisch/hydraulischen aufrecht erhalten. Die Bremsbetätigung bleibt auch dann gesichert, wenn die Funktion des Regelsystems vollständig ausfällt, zum Beispiel durch eine gestörte Spannungsversorgung.

### 7.2.5.1 Antiblockiersystem (ABS)

Die Aufgabe der Schlupfregelsysteme, Brems- und Vortriebskräfte durch geeignete Eingriffe in Bremsanlage und Motormanagement so zu modulieren, dass das bestmögliche fahrdynamische Verhalten unter den gegebenen Umständen erreicht wird, lässt sich auf unterschiedliche Weise lösen. Die Methoden und Algorithmen sind von den Grundzügen her bei allen Systemherstellern ähnlich, da auch die verwendeten Eingangsgrößen sowie die Steuergrößen gleich sind. Was die regelungstechnische Ausführung angeht, unterscheiden sich aber die Programme erheblich. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die jeweilige Anpassung der Elektronik (sowohl Hardware als auch Software) an die einzelnen Sensoren (mit z. T. unterschiedlichen Wirkprinzipien), an die Stellglieder des Systems, an die spezifischen

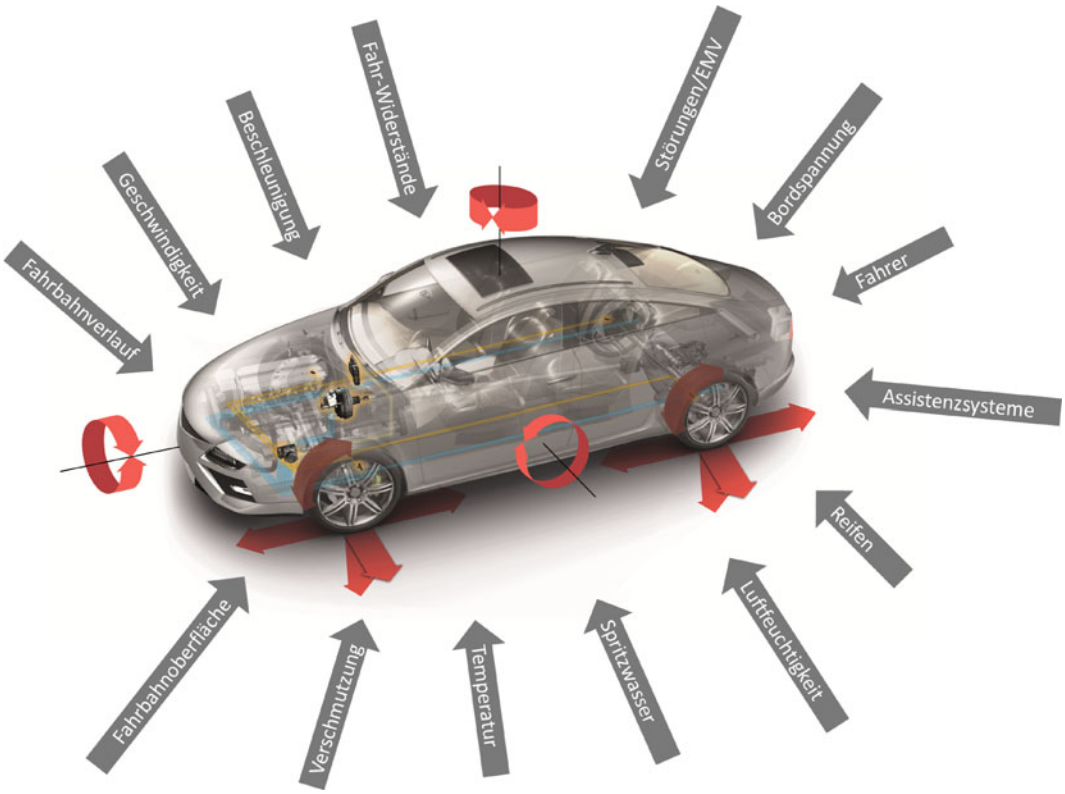



**Abb. 7.43** Wichtige innere und äußere Einflussfaktoren auf die Assistenz- und Regelfunktionen des Bremssystems

Eigenschaften aller beteiligten Komponenten und insbesondere an das Fahrzeug [19].

**Kraftschluss in Längsrichtung – Bremsschlupf/Antriebsschlupf** Die Gesetzmäßigkeiten, die für den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn gelten, sind komplexer als die der Coulomb'schen Reibung. Der Grund dafür liegt in den Eigenschaften des Gummireifens (siehe ▶ Abschn.7.3 Reifen).

Ein Reifen kann nur dann Kräfte auf die Fahrbahn übertragen, wenn Gleitschlupf vorliegt. Die Umfangsgeschwindigkeit des gebremsten Rades ist folglich kleiner als die Geschwindigkeit des Fahrzeuges.

Zur Vereinfachung dieser Zusammenhänge werden spezielle Verhältniszahlen eingeführt, der Bremsschlupf $\lambda_B$ und der Antriebsschlupf $\lambda_T$:

$$\lambda_B = \frac{(v_F - v_U)}{v_F} \cdot 100\,\%$$

$\lambda_B$ Bremsschlupf in %,
$v_F$ Fahrzeuggeschwindigkeit,
$v_U$ Umfangsgeschwindigkeit des Rades,

$$\lambda_T = \frac{(v_U - v_F)}{v_U} \cdot 100\,\%$$

$\lambda_T$ Antriebsschlupf in %.

**Bremskraftbeiwert und andere Einflussgrößen** Die charakteristische Größe für das Bremsvermögen eines Fahrzeugs ist der Kraftschlussbeiwert oder auch Bremskraftbeiwert $\mu_B$.

$$\mu_B = \frac{F_B}{F_A}$$

$\mu_B$ Bremskraftbeiwert,
$F_B$ Radbremskraft,
$F_A$ Radaufstandskraft.

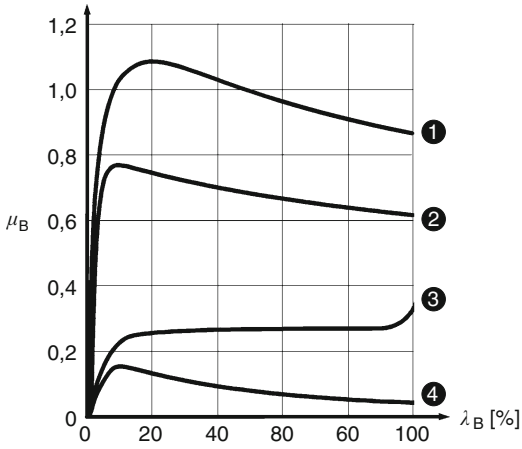



**Abb. 7.44** Exemplarische Bremskraftbeiwertverläufe: $\lambda_B$ Bremsschlupf, $\mu_B$ Bremskraftbeiwert, 1 trockener Asphalt, 2 nasser Asphalt, 3 Neuschnee, 4 Eis

Für jede Kombination von Reifen und Fahrbahn existiert ein bestimmter funktionaler Zusammenhang zwischen Bremskraftbeiwert und Schlupf (Abb.7.44).

Der Bremskraftbeiwert zeigt in Abhängigkeit vom Schlupf unter fast allen Bedingungen einen ähnlichen, charakteristischen Verlauf. Ein Bremskraftbeiwert und ein Schlupf von Null kennzeichnen das frei rollende Rad. Bei einem Bremsschlupf von in der Regel zwischen 8 und 30 % erreicht der Bremskraftbeiwert seinen Maximalwert. Er fällt mit weiter steigenden Schlupfwerten mehr oder weniger stark ab. Bei einem Bremsschlupf von 100 % ist das Rad blockiert.

Der ansteigende Bereich der $\mu$-Schlupf-Kurve (Bremskraftbeiwert-Kurve) wird als stabiler Bereich bezeichnet. Das Fahrzeug bleibt weitestgehend lenkbar und stabil. Jenseits des kritischen Schlupfes beginnt der instabile Bereich. Wird der Bremsdruck in diesem Schlupfbereich nicht schnell genug reduziert, kommt es innerhalb kurzer Zeit zum Blockieren des Rades.

Wesentlichen Einfluss auf den Kraftschlussbeiwert hat die Fahrbahnoberfläche. Weiterhin ist die Bremskraftbeiwertkurve stark abhängig vom Reifen. Wichtige Einflussgrößen sind Art und Profil des Reifens (z. B. Gummimischung, Profilform und Abnutzungsgrad), Dimension, Fülldruck, Temperatur und Radaufstandskraft.

Eine Besonderheit zeigt die Bremskraftbeiwertkurve für losen Neuschnee und Schotter. Ihr Maximum liegt auf solchen Untergründen bei einem Schlupf von 100 %. Diese Eigenheit wird von einem Keil aus Schnee oder Schotter bewirkt, der sich mit zunehmendem Schlupf vor den blockierten Rädern aufbaut. Auch hier existiert jedoch ein kritischer Schlupfwert. Wird er erreicht, nimmt zwar nicht das Bremsvermögen ab, doch das Fahrzeug verliert an Lenkbarkeit und Stabilität.

**Kraftschluss in Querrichtung** Ähnliche Zusammenhänge zwischen Reifenverformung und Kraftübertragung, wie sie beim Bremsen und beim Antreiben die Längsdynamik des Fahrzeugs bestimmen, zeigen sich auch bei der Querdynamik. Eine Seitenführungskraft, um z. B. das Fahrzeug in der gewünschten Spur zu halten, kann der Reifen nur dann aufbauen, wenn er seitlich verformt und „Seitenschlupf“ aufgebaut wird.

Dazu müssen die Bewegungsrichtung des Radmittelpunktes und die Längsrichtung des Reifens voneinander abweichen. Der Winkel zwischen diesen beiden Richtungen wird Schräglaufwinkel $\alpha$ genannt.

Für das Seitenführungsvermögen wird der „Seitenkraftbeiwert“ $\mu_S$ definiert:

$$\mu_S = \frac{F_S}{F_A}$$

$\mu_S$ Seitenkraftbeiwert,
$F_S$ Seitenführungskraft,
$F_A$ Radaufstandskraft.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Seitenkraftbeiwert und Schräglaufwinkel $\alpha$ ist beispielhaft in Abb.7.45 dargestellt.

**Kombination des Kraftschlusses in Längs- und Querrichtung** Unter den vorgegebenen Bedingungen von Reifen, Fahrbahn und Radaufstandskraft (Normalkraft) kann ein Rad nur eine begrenzte Gesamtkraft übertragen. Die Aufteilung der Gesamtkraft in die beiden Komponenten Bremskraft und Seitenführungskraft kann näherungsweise durch den

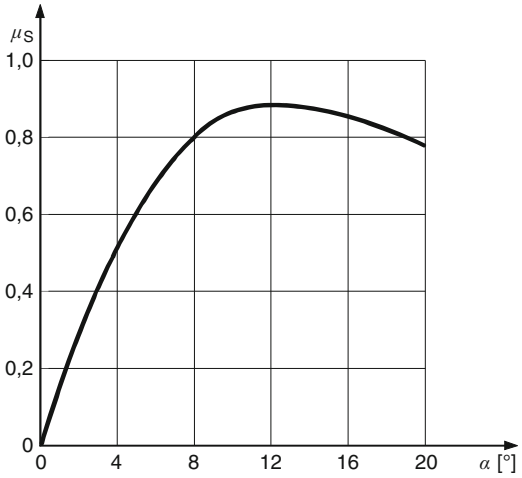



**Abb. 7.45** Seitenkraftbeiwert $\mu_S$ in Abhängigkeit vom Schräglaufwinkel $\alpha$

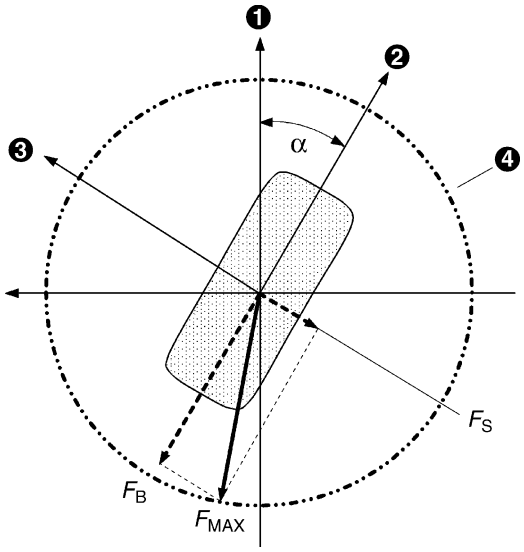



**Abb. 7.46** Kamm'scher Reibungskreis: $F_N$ Normalkraft, $F_{max}$ maximal übertragbare Gesamtkraft, $F_{Rad}$ Gesamtkraft am Rad, $\mu$ Kraftschlussbeiwert Reifen/Fahrbahn, $F_B$ Bremskraft, $F_S$ Seitenführungskraft, $\alpha$ Schräglaufwinkel, 1 Bewegungsrichtung des Radmittelpunktes, 2 Längsrichtung des Rades, 3 Querrichtung des Rades, 4 Kamm'scher Reibungskreis (mit Radius $F_{max}$)

Kamm'schen Reibungskreis (siehe Abb. 7.46) graphisch dargestellt werden.

Die geometrische (vektorielle) Summe beider Kraftkomponenten kann nicht größer werden als

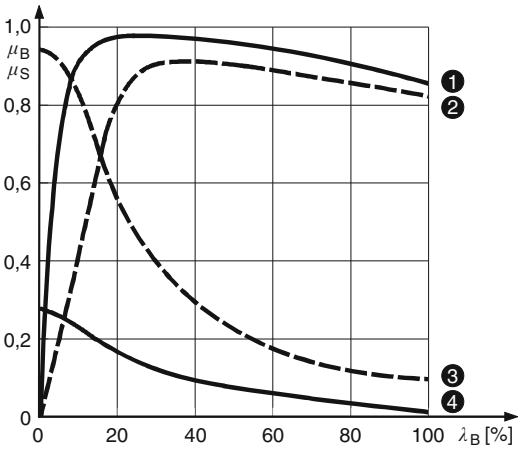



**Abb. 7.47** Brems- und Seitenkraftbeiwerte als Funktion des Bremsschlupfes bei zwei verschiedenen Schräglaufwinkeln auf trockener Betonfahrbahn: $\lambda_B$ Bremsschlupf, $\mu_B$ Bremskraftbeiwert, $\mu_S$ Seitenkraftbeiwert, 1 Bremskraftbeiwert bei Schräglaufwinkel $\alpha = 2°$, 4 Seitenkraftbeiwert bei Schräglaufwinkel $\alpha = 2°$, 2 Bremskraftbeiwert bei Schräglaufwinkel $\alpha = 5°$, 3 Seitenkraftbeiwert bei Schräglaufwinkel $\alpha = 5°$

die vom Reifen maximal übertragbare Gesamtkraft. Hieraus wird deutlich:

- nur bei Geradeausfahrt ist die maximale Bremskraft erreichbar,
- bei extremer Kurvenfahrt ist die übertragbare Bremskraft erheblich kleiner als bei Geradeausfahrt,
- bei einer starken Verzögerung ist die Lenkbarkeit gegenüber dem ungebremsten Zustand eingeschränkt.

Eine Vollbremsung mit blockierten Rädern führt zum vollständigen Verlust der Seitenführungskräfte und damit zum Verlust der Lenkbarkeit und der Stabilität.

Anhand von Abb. 7.47 wird deutlich, wie mit zunehmendem Schlupf aufgrund der Beanspruchung des Bremskraftbeiwertes in Längsrichtung der Seitenführungskraftbeiwert abnimmt.

**ABS-Funktionalität** Zu starkes Bremsen ohne ABS verursacht je nach Fahrbahnzustand oder Fahrsituation ungünstig große Radschlupfwerte oder gar Blockieren der Räder. Ausbrechen des Fahrzeugs aus der Spur und eine Beeinträchtigung der

Lenkbarkeit sind mögliche Folgen. Abgesehen von wenigen Ausnahmefällen verlängert sich auch der Bremsweg. ABS erlaubt Vollbremsungen ohne blockierende Räder und ohne die daraus resultierenden Gefahren. Mit Hilfe des Bremspedals ist die erforderliche individuelle Dosierung der optimalen Bremskraft an jedem Rad nicht möglich. Besonders deutlich wird dies auf unterschiedlich griffigem Untergrund (z. B. rechts/links), weil der optimale Bremsdruck an den einzelnen Rädern dann unterschiedlich groß ist. ABS verbessert:

- die Fahrstabilität, indem es das Blockieren der Räder verhindert, wenn bei einer Vollbremsung der Bremsdruck bis zur Blockiergrenze und darüber hinaus steigt. Eine Drehung des Fahrzeugs um die Fahrzeughochachse (Schleudern) bei Verlust der Seitenführungskräfte an der Hinterachse wird zum Beispiel verhindert.
- die Lenkbarkeit bei Vollbremsungen auch bei den unterschiedlichsten Fahrbahnzuständen. Trotz voll betätigter Bremse kann das Fahrzeug durch eine Kurve gelenkt werden oder einem Hindernis ausweichen.
- den Bremsweg, da es den jeweils verfügbaren Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn bestmöglich ausnutzt. Insbesondere reagiert es adaptiv auf Veränderungen der Fahrbahngriffigkeit, etwa von trockenem auf nassen Asphalt. Der Bremsweg mit ABS ist kürzer als bei einer Bremsung ohne ABS.

Die Erkennung und Plausibilisierung eines notwendigen ABS-Eingriffs findet üblicherweise in wenigen 10 ms statt, die Radstabilisierung benötigt aufgrund von Rad- und Hydraulikträgheit wenige 100 ms. Der Fahrer kann sich auf die Bewältigung der Verkehrssituation konzentrieren, ohne sich um die optimale Dosierung der Bremsleistung Gedanken zu machen (z. B. gebremstes Umfahren eines Hindernisses). Außerdem verhindert ABS das Entstehen von Flachstellen auf der Lauffläche der Reifen (Bremsplatten).

**Grenzen des ABS** Sonderfälle wie Neuschnee oder Kies, der bei blockierenden Rädern einen bremsenden Keil vor den Rädern bildet, sind im Alltag kaum relevant. Hier ist die Verbesserung von Lenkbarkeit und Fahrstabilität durch ABS wichtiger als der kürzest mögliche Bremsweg bei blockierten Rädern. ABS kann die physikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht außer Kraft setzen. Auf glatter Fahrbahn ist der Bremsweg trotz ABS-Regelung länger als auf trockener, griffiger Straße, denn die höchstmögliche Bremskraft bestimmt stets der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Bremsen bei zu hohen Kurvengeschwindigkeiten führt auch mit ABS dazu, dass das Fahrzeug aus der Kurve getragen wird.

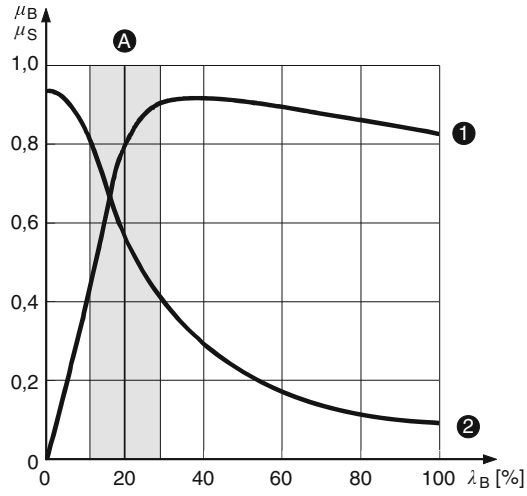



**Abb. 7.48** Regelbereich (A) des ABS mit $\lambda_B$ Bremsschlupf, $\mu_B$ Bremskraftbeiwert (Verlauf 1), $\mu_S$ Seitenkraftbeiwert (Verlauf 2)

**Arbeitsbereich des ABS** Der optimale Schlupf und damit die beste Bremswirkung wird nicht durch maximalen, sondern durch genau dosierten Bremsdruck erreicht (Abb. 7.48). Ziel der ABS-Regelung ist es, den kritischen Schlupf nicht zu überschreiten, der von den jeweiligen Bedingungen zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt wird. Der Arbeitsbereich der ABS-Regelung wird stets so gewählt, dass zugleich bestmögliche Fahrstabilität und Lenkbarkeit gegeben sind. Wird ein Rad so abgebremst, dass es den Bereich optimalen Schlupfes überschreitet, beginnt die ABS-Regelung.

Abb. 7.49 zeigt einen Bremsvorgang ohne ABS-Regelung. Bereich I entspricht der ungebremsten Fahrt. Die Radumfangsgeschwindigkeit gleicht der (konstanten) Fahrzeuggeschwindigkeit, es liegt kein Schlupf vor. Im Bereich II ist die Bremse leicht

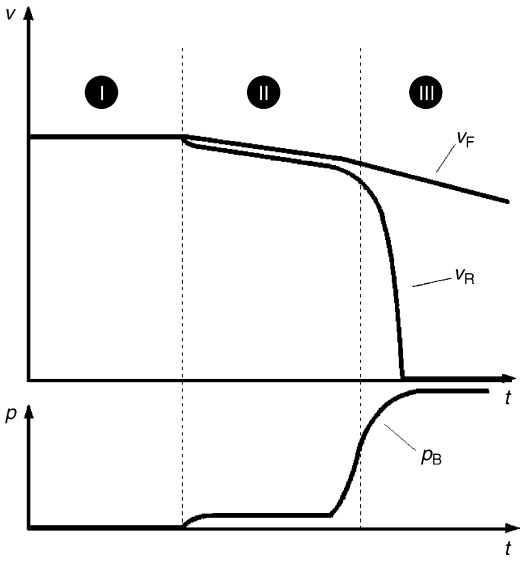



**Abb. 7.49** Bremsung ohne ABS (ein Rad). $t$ Zeit, $v$ Geschwindigkeit, $p$ Druck, I ungebremste Fahrt, II Teilbremsung, III Vollbremsung ohne ABS, $v_F$ Fahrzeuggeschwindigkeit, $v_R$ Radumfangsgeschwindigkeit, $P_B$ Betätigungsdruck

betätigt, es liegt ein geringer Bremsdruck an. Daher ist die Radumfangsgeschwindigkeit um einen bestimmten Anteil geringer als die Fahrzeuggeschwindigkeit, die stetig abnimmt. Der Schlupf liegt im stabilen Bereich. Bereich III entspricht einer Vollbremsung, bei der der Radbremsdruck über die Blockiergrenze steigt. Die Radumfangsgeschwindigkeit verringert sich zunehmend bis zum Stillstand des Rades. Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird ebenfalls geringer, wobei der Blockierreibwert die Verzögerung bestimmt.

Die sehr rasche Drehzahlabnahme eines Rades ist charakteristisch für eine Blockierneigung, da die Radverzögerung größer ist als die maximal mögliche Fahrzeugverzögerung. Erkennt der elektronische Regler über den Raddrehzahlsensor den Abfall der Raddrehzahl, gibt er entsprechende Befehle zur Bremsdruckmodulation an die Magnetventile. Jeweils zwei Ventile pro Regelkreis – das in stromlosem Zustand offene Einlassventil und das stromlos geschlossene Auslassventil – führen diese Modulation durch.

**Regelungsphasen** Der ABS-Regelungszyklus läuft prinzipiell in drei Phasen ab (Abb. 7.50).

**Druckhalten (Phase 1)** Bei Pedalbetätigung steigt der Radbremsdruck an und die Radumfangsgeschwindigkeit verringert sich progressiv. Zeigt die Radumfangsgeschwindigkeit eine Blockierneigung, wird das Einlassventil geschlossen. Selbst bei Erhöhung des Betätigungsdrucks kann der Radbremsdruck nicht weiter ansteigen.

**Druckabbau (Phase 2)** Nimmt die Radumfangsgeschwindigkeit trotz konstanten Bremsdrucks weiter ab, so dass der Radschlupf zunimmt, reduziert der elektronische Regler den Bremsdruck an diesem Rad. Dazu hält er das Einlassventil geschlossen und öffnet das Auslassventil. Daraus folgt ein vermindertes Bremsmoment an der Radbremse. Mit Hilfe der Radverzögerung lässt sich abschätzen, wie lange dieser Druckabbaupuls sein muss, damit das Rad in einer gewissen Zeit wieder beschleunigt („prädiktive Regelung“). Verhält sich das Rad nach Ablauf dieser Zeit nicht wie erwartet, kann der Regler einen weiteren Bremsdruckabbau einsteuern. In extremen Fällen, wie etwa einem Reibwertsprung von Asphalt auf Eis, dauert diese Phase bis zur gewünschten Wiederbeschleunigung des Rades länger.

**Druckaufbau (Phase 3)** Erhöht sich die Radumfangsgeschwindigkeit so weit, dass sie den Bereich des optimalen Schlupfes unterschreitet, baut der elektronische Regler wieder stufenweise Bremsdruck auf. Hierzu bleibt das Auslassventil geschlossen, während das Einlassventil mehrfach kurz geöffnet wird.

Dieser Drei-Phasen-Regelzyklus mit den Phasen Druck halten, Druck abbauen und Druck aufbauen wiederholt sich mehrmals pro Sekunde. Die Reihenfolge der drei Phasen ist variabel.

**Spezielle Regelalgorithmen** Durch die kontinuierliche Auswertung der Raddrehzahlsensorsignale kann der elektronische Regler stets mit einer der Situation angepassten Regelstrategie reagieren.

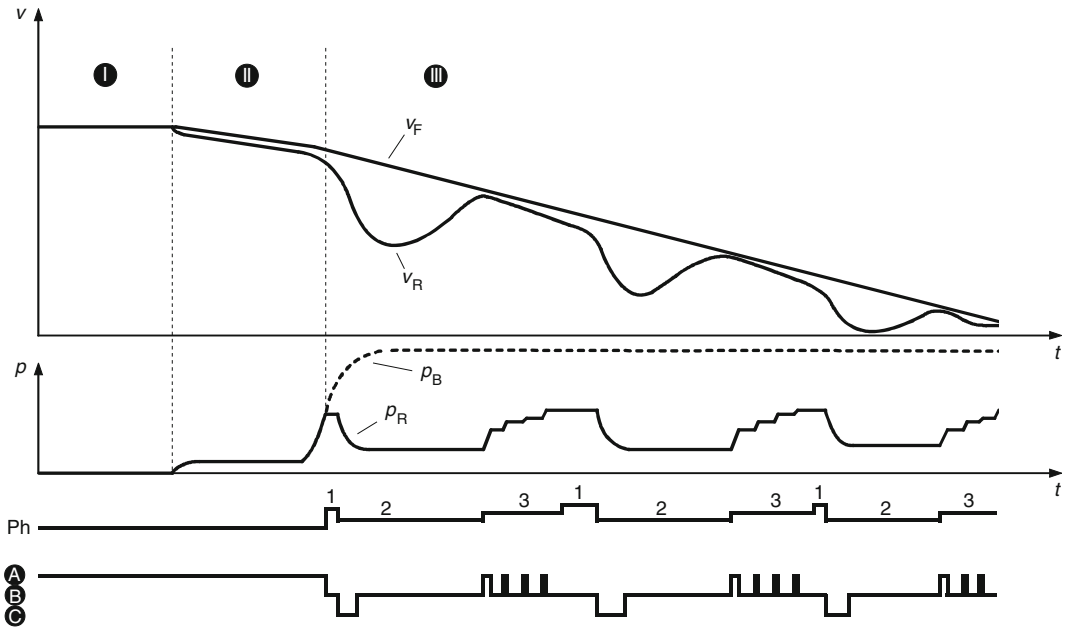



**Abb. 7.50** Ablauf einer ABS-Regelung (ein Rad). $t$ Zeit, $p$ Druck, $v$ Geschwindigkeit, *Ph* Phase, I ungebremste Fahrt, II Teilbremsung, III ABS-Bremsung, $v_F$ Fahrzeuggeschwindigkeit, $P_B$ Betätigungsdruck, $v_R$ Radumfangsgeschwindigkeit, $P_R$ Radbremsdruck, $A$ Druckaufbau, $B$ Druckhalten, $C$ Druckabbau

Die Regelung der Vorderachse erfolgt radindividuell. An den Hinterrädern kommt das „Select low"-Prinzip zum Einsatz, das heißt: Das Hinterrad mit der stärkeren Blockiertendenz bestimmt das Druckniveau für beide Hinterräder. So wird die Bremskraftausnutzung an der Hinterachse vermindert zugunsten höherer Seitenführungskraft und damit zu erhöhter Fahrstabilität. Besonderen Fahrbahn- und Fahrzustands-Bedingungen wird der ABS-Regler durch speziell hierfür entwickelte Algorithmen gerecht. Zu nennen sind hier etwa Eis-Fahrbahnen, seitenweise unterschiedlich griffige Fahrbahnen („$\mu$-Split"), Kurvenfahrt, Schleudervorgänge, Einsatz von Noträdern und vieles mehr.

### 7.2.5.2 Elektronische Bremskraftverteilung (EBV)

Die elektronische Bremskraftverteilung ersetzt den hydraulischen Bremskraftverteiler (▶ Abschn. 7.2.3.8) durch einen zusätzlichen Softwarealgorithmus in der ABS-Software. Dieser Algorithmus ermöglicht im Teilbremsbereich eine optimierte Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse. Damit wird die Kraftschlussausnutzung an der Hinterachse optimiert bei gleichzeitigem Erhalt der Fahrstabilität [20].

Hierzu nutzt der EBV-Algorithmus die jeweilige Fahrzeugverzögerung und die Querbeschleunigung. Beide Größen werden aus den vier gemessenen Radgeschwindigkeiten errechnet. Erkennt der elektronische Regler eine Überbremsung der Hinterachse, schließt er das entsprechende Hinterrad-Einlassventil und verhindert so einen weiteren Druckaufbau. Bei weiterer Überbremsung kann durch Öffnen des Hinterrad-Auslassventils Druck abgebaut werden. Zur bestmöglichen Ausschöpfung des Kraftschlusspotenzials führt EBV den Druck der hinteren Radbremsen bei Unterbremsung wieder pulsweise an das Druckniveau im Hauptzylinder heran. Die EBV-Funktion benötigt keine zusätzlichen Bauteile, sie nutzt die beim ABS vorhandenen Komponenten. Die Integration in das ABS-Sicherheitskonzept sorgt im Gegensatz zum hydraulischen Regler für die Überwachung der Wirksamkeit der Bremskraftverteilung.

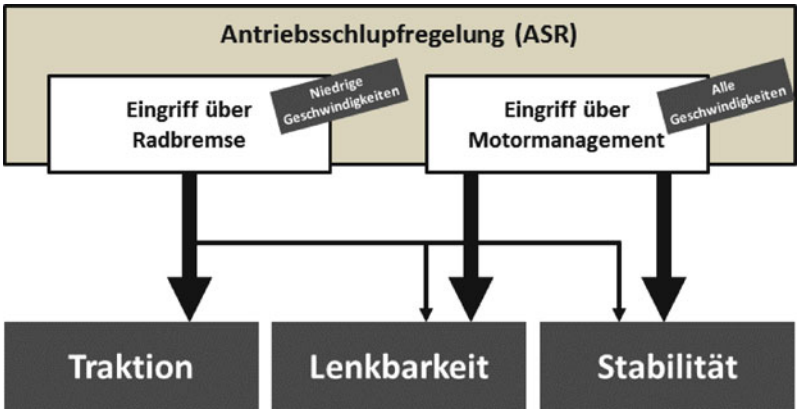



**Abb. 7.51** Konzepte der Antriebsschlupfregelung

### 7.2.5.3 Erweitertes Stabilitäts-Bremssystem (ABSplus)

ABSplus sorgt durch gezielt unterschiedliches Einstellen von Bremskräften an beiden Fahrzeugseiten für ein korrigierendes Giermoment, so dass das Fahrzeug stabilisiert und die Lenkbarkeit verbessert wird. Diese Erweiterung des ABS-Regelalgorithmus ist als ABSplus oder CBC (Cornering Brake Control) bekannt. Allein aus den Verläufen der Raddrehzahlen erkennt dieses System die Fahrsituation – insbesondere Kurvenfahrt – ohne Gierraten- oder Querbeschleunigungssensor. ABSplus optimiert den (Brems-)Schlupf und damit die Bremskraftverteilung, zugleich bewirkt es eine Gierratenkompensation. Besonders wirkungsvoll ist ABSplus bei dynamischen Fahrmanövern wie Kurvenfahrten im Grenzbereich und Spurwechseln. Dies gilt bei Vollbremsungen (aktive ABS-Regelung) und insbesondere bei Teilbremsungen [21].

### 7.2.5.4 Antriebsschlupfregelung (ASR)

ASR verhindert unnötiges Durchdrehen der Antriebsräder durch einen gezielten Bremseneingriff und/oder durch einen Eingriff in das Motormanagement.

Die Antriebsschlupfregelung basiert sowohl hardwareseitig (Hydraulik, Sensorik) als auch softwareseitig auf ABS. Zum aktiven Druckaufbau ist eine Erweiterung der HCU um Trenn- und Saugventile erforderlich (Abb. 7.19, Abb. 7.51).

**ASR-Funktionalität** Die Antriebsschlupfregelung

- sichert die Fahrstabilität heckgetriebener bzw. die Lenkbarkeit frontgetriebener Fahrzeuge,
- kann kurzzeitig die Funktion eines Sperrdifferenzials darstellen,
- passt die Vortriebskräfte den Fahrbahnbedingungen an,
- warnt durch eine Informationsleuchte vor Erreichen der physikalischen Stabilitätsgrenze (etwa bei Glätte) und
- verringert den Reifenverschleiß.

**Bremsenregelung der ASR** Auf unterschiedlich griffiger Fahrbahn ($\mu$-split) kann die auf der griffigen Fahrbahnseite mögliche Vortriebskraft nicht ausgenutzt werden. Die Ursache hierfür liegt im Differenzialgetriebe zwischen den Rädern der angetriebenen Achse, bei dem die Seite mit dem geringeren Kraftschlusspotenzial das Moment auf der gegenüber liegenden Seite begrenzt. Mit Hilfe der Raddrehzahlinformation wird das Überschreiten der Kraftschlussgrenze an einem Rad erkannt und das Durchdrehen mittels eines entsprechenden, aktiven Bremseneingriffs verringert. Das dadurch aufgebrachte Bremsmoment wirkt als zusätzliche Abstützung auf das Differenzial und steht somit am gegenüber liegenden Rad als Antriebsmoment zur Verfügung.

Bremsen-ASR regelt im wesentlichen den Anfahrbereich. Um eine thermische Überlastung der Bremse zu vermeiden, wird durch den elektroni-

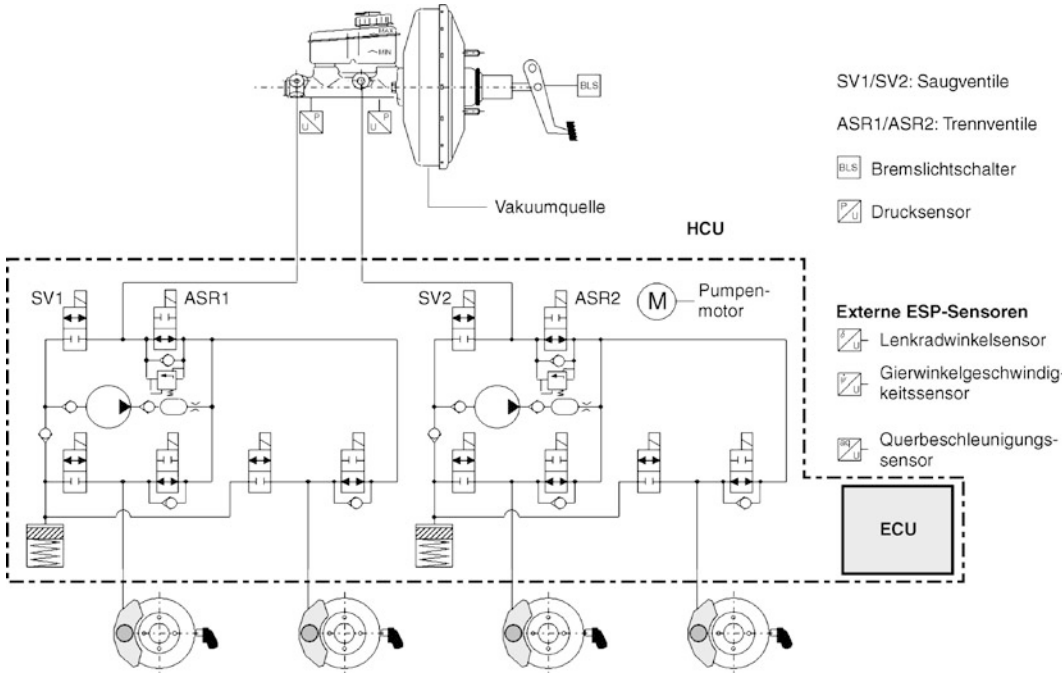



**Abb. 7.52** Elektronisches Stabilitätsprogramm, Systemschaltbild: *SV1/SV2* Saugventile, *ASR1/ASR2* Trennventile

schen Regler über ein Temperaturmodell die Bremseneingriffsdauer begrenzt.

**Motorregelung der ASR** Zur Entlastung der Bremsen reduziert ASR bei niedrigen Geschwindigkeiten zusätzlich zur Bremsenregelung das Motordrehmoment so weit, dass auch ohne beidseitigen Bremseneingriff an den Antriebsrädern die bestmögliche Haftwertausnutzung für den Vortrieb erreicht wird. Im oberen Geschwindigkeitsbereich, ab etwa 40 km/h, kommt es kaum noch zu Bremseneingriffen, da die Motorregelung frühzeitig das Antriebsmoment reduziert, um die Fahrstabilität zu erhöhen.

**Motor-Schleppmomenten-Regelung (MSR)** Hohes Motorschleppmoment, zum Beispiel bei Gaswegnahme oder Herunterschalten, erzeugt Bremsmomente an den angetriebenen Rädern, ohne dass die Bremse betätigt wird. Insbesondere bei niedrigen Reibwerten wird dadurch deutlicher Schlupf an den Antriebsrädern hervorgerufen. Vor allem bei heckangetriebenen Fahrzeugen kann es dadurch zu instabilem Fahrverhalten kommen. Die MSR reduziert durch dosiertes, aktives „Gasgeben" den durch das Motorschleppmoment generierten Schlupf. Der Eingriff ins Motormanagement erfolgt in aller Regel über CAN-Bus.

### 7.2.5.5 Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP/DSC/VSC/…)

Das elektronische Stabilitätsprogramm (Abb. 7.52) kombiniert die Funktionen der Radschlupfregelungen (ABS, EBV, ASR) mit der Giermomentenregelung (GMR). Die Giermomentenregelung ist eine elektronische Regelung zur Verbesserung des querdynamischen Fahrverhaltens. Unabhängig von einer Pedalbetätigung stabilisiert sie das quer- und längsdynamische Fahrverhalten durch Bremsen- und Motoreingriff [20, 22].

Mit Hilfe von Echtzeitsimulationsmodellen errechnet das elektronische Stabilitätsprogramm aus Raddrehzahlen, Lenkradwinkel und Hauptzylinderdruck das gewünschte Fahrverhalten. Das tatsächliche Fahrverhalten erfasst das elektronische Stabilitätsprogramm mit Hilfe der Gierrate und der Querbeschleunigung.

Vor allem bei sehr schnellen Lenkbewegungen kann ein Fahrzeug den Lenkradeinschlag nicht mehr in die erwartete Richtungsänderung umsetzen. Es kommt entweder zum Untersteuern oder zum Übersteuern, im Extremfall bis zum „Schleudern". Die Abweichung zwischen Fahrer-Wunsch (Richtung, Geschwindigkeit) und Fahrzeug-Verhalten (Gierrate, Querbeschleunigung) wird ermittelt und durch die Giermomentenregelung mittels Bremseneingriff (an bis zu drei Rädern gleichzeitig) ausgeregelt.

Untersteuern korrigiert GMR primär durch Einbremsen des kurveninneren Hinterrades, Übersteuern durch Einbremsen des kurvenäußeren Vorderrades. Dieses selektive, aktive Bremsen baut einseitig wirkende Längskräfte und dadurch das gewünschte Giermoment auf. Eine unterstützende Wirkung entsteht durch die gezielte Reduzierung von Seitenführungskräften infolge der über Bremsmomente aufgebauten Längskräfte. Zu hohes Antriebsmoment reduziert das elektronisches Stabilitätsprogramm – wenn erforderlich – durch Eingriff ins Motormanagement.

Die erweiterte ABS/ASR-Hydraulik mit dem integrierten elektronischen Regler ist Kernstück des elektronischen Stabilitätsprogramms. Diese Hydraulik ermöglicht den radindividuellen, aktiven Aufbau von Bremsdruck unabhängig von einer Betätigung des Bremspedals.

Bei extremer Kälte ist wegen veränderter Bremsflüssigkeitsviskosität das Ansaugverhalten der ABS-Pumpe allein nicht ausreichend. Über verschiedene Vorladeeinrichtungen kann in solchen Situationen die notwendige Fördermenge der Pumpe erreicht werden. Ein extern ansteuerbarer Bremskraftverstärker (aktiver Booster) kann die bei extremer Kälte benötigte Vorladung für die Hydraulikpumpe sicherstellen. Eine weitere Lösungsmöglichkeit ist eine elektrische Vorladepumpe, die Bremsflüssigkeit aus dem Ausgleichbehälter ansaugt und am THz-Ausgang einspeist. Durch eine hydraulische Blende bildet sich ein Staudruck, der als Vorladedruck vor der ESP-Hydraulikpumpe anliegt und somit die erforderliche Fördermenge sicherstellt.

### 7.2.5.6 Bremsassistent (MBA, EBA, HBA)

Der Bremsassistent ist ein System zur Fahrerunterstützung bei Gefahr- resp. Notbremsungen. Der BA greift automatisch in den Bremsablauf ein, sobald er eine Notbremssituation erkennt, auf die der Fahrer nicht ausreichend reagiert. Diese Situation wird erkannt, indem das Betätigungsmuster des Bremspedals – bei elektronischen Systemen in Kombination mit der Fahrzeuggeschwindigkeit – bewertet wird. Der Einsatz des Bremsassistent-Systems verkürzt in einem derartigen Fall den Bremsweg, indem schnellstmöglich die volle Bremskraft aufgebaut wird (siehe durchgezogene Verzögerungslinie in ◘ Abb. 7.53).

Die Bremsassistent-Funktion wird derzeit durch die nachfolgend beschriebenen Systeme realisiert [23].

**Mechanischer Bremsassistent** Für den mechanischen Bremsassistenten MBA (► Abschn. 7.2.3.2 und ◘ Abb. 7.54) findet als Vollbremshilfe in Notsituationen ein besonderer Bremskraftverstärker Verwendung. Bei diesem wird die Massenträgheit von Komponenten des Bremskraftverstärkers ausgenutzt, die bei schneller Betätigung dazu führt, dass das Tellerventil einen bestimmten Öffnungshub überschreitet. Mit Überschreiten dieses Öffnungshubs wird das maximale Arbeitsvermögen des Bremskraftverstärkers unmittelbar freigesetzt. Der Mechanismus ist vollständig in das Steuergehäuse des Bremskraftverstärkers integriert, die Charakteristika des Vakuum-Bremskraftverstärkers bleiben erhalten.

**Elektronischer Bremsassistent** Die Notsituation wird mit Hilfe eines Wegsensors über die Betätigungsgeschwindigkeit erkannt. Die Verstärkung der Fahrerfußkraft wird über einen Magnetantrieb im Bremskraftverstärker (siehe ► Abschn. 7.2.2) ausgelöst. Für viele Funktionserweiterungen moderner Bremssysteme werden elektrisch ansteuerbare, so genannte „aktive Booster" eingesetzt (◘ Abb. 7.13):

- in ESP-Systemen (► Abschn. 7.2.5.5) als Vorladung der Pumpe zur Gewährleistung einer hohen Druckaufbaudynamik, insbesondere bei tiefen Temperaturen,
- als Vollbremshilfe in Notsituationen,
- beim Adaptive Cruise Control (ACC) (s. ► Abschn. 7.2.5.9) zum Einregeln einer von einer Bremspedalbetätigung unabhängigen und komfortablen Teilbremsung.

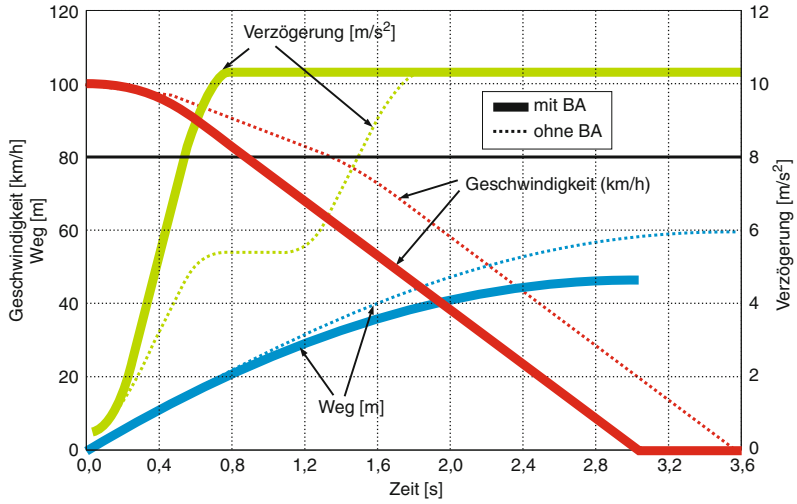



**Abb. 7.53** Geschwindigkeit und Bremsweg über der Zeit mit und ohne Bremsassistent

Aktive Bremskraftverstärker weisen einen im Steuergehäuse integrierten Magnetantrieb auf. Mittels einer Schiebehülse ist es möglich, mit dem elektrisch betätigten Magnetantrieb das Tellerventil zu betätigen. Dies geschieht so, dass zunächst die Verbindung zwischen Vakuumkammer und Arbeitskammer geschlossen wird; mit einer weiteren Strombeaufschlagung wird die Verbindung der Arbeitskammer zur Außenluft geöffnet und der Bremskraftverstärker betätigt.

**Hydraulischer Bremsassistent** Die Fähigkeit der ESP-Hydraulik, unabhängig von der Bremspedalbetätigung Druck in den Radbremsen aufzubauen, wird für eine weitere Zusatzfunktion genutzt, den „hydraulischen Bremsassistent" (HBA). Der HBA

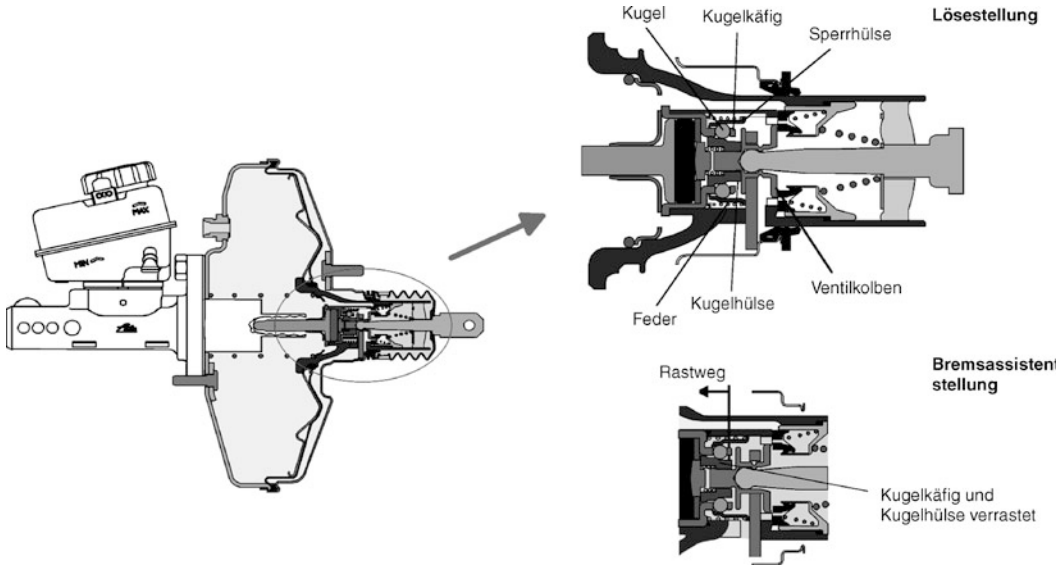



**Abb. 7.54** Mechanischer Bremsassistent

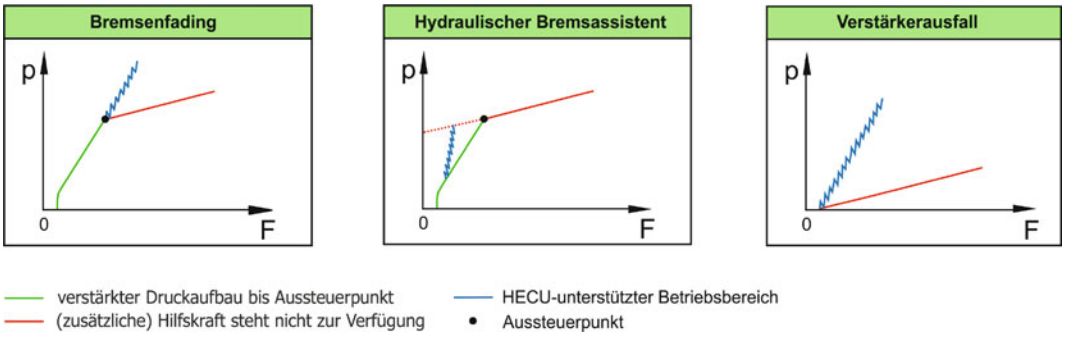



**Abb. 7.55** Funktionalitäten der Bremskraftverstärkerunterstützung ($F$ = Fußkraft, $p$ = Bremsdruck)

nutzt die vorhandene Sensorik. Drucksensorsignale dienen dem elektronischen Regler zur Erkennung einer Vollbremsung in Notsituationen. Wird ein kritischer Druckgradient überschritten, schließt der elektronischer Regler die ASR-Trennventile (Abb. 7.52), öffnet die elektri-schen Ansaugventile und aktiviert die Pumpe. Die Pumpe steigert den über das Pedal eingebrachten Druck nun auf Rad-Blockierdruckniveau. Im Gegensatz zum mechanischen Bremsassistent wird der Radbremsdruck vom elektronischen Regler analog zum THz-Druck (Fahrerwunsch) moduliert. Beim Unterschreiten eines Mindestdrucks schaltet sich die HBA-Funktion wieder ab.

### 7.2.5.7 Erweiterte Bremskraftverstärkungsfunktionen

Die Hilfskraftunterstützung ist durch das zur Verfügung stehende Vakuum, sowie durch die bauliche Ausführung des Bremskraftverstärkers begrenzt. Diese Grenze wird als Aussteuerpunkt bezeichnet, welcher mit zusätzlicher Sensorik erkannt werden kann. Diese Erkennung wird für nachfolgend beschriebene Funktionen genutzt.

Die erweiterten Bremskraftverstärkungsfunktionen basieren darauf, dass der hydraulische Druck in den Radbremsen über den Druck im THz hinaus erhöht werden kann. Hierzu wird die Verbindung zwischen THz und Hydraulikeinheit über Magnetventile getrennt, die Pumpe angesteuert und der Druck in den Radbremskreisen moduliert. Hiermit können Unterstützungsfunktionen für folgende Betriebszustände dargestellt werden (Abb. 7.55):

- Bremsenfading: Durch die hydraulische Unterstützung wird die Verstärkung über den Aussteuerpunkt des Vakuum Bremskraftverstärkers hinaus aufrecht erhalten,
- hydraulischer Bremsassistent,
- reduziertes Vakuum in der Kaltstartphase des Verbrennungsmotors,
- Verstärkerausfall: Durch Druckaufbau mit Hilfe der ABS/ESP-Einheit wird der Ausfall des Bremskraftverstärkers kompensiert.

### 7.2.5.8 Active Rollover Protection (ARP)

Fahrzeuge mit kritischem Wankverhalten (z. B. hoher Schwerpunkt, „weiches“ Fahrwerk) neigen unter Extrembedingungen zum Umkippen. ARP als Softwareerweiterung des ESP-Systems wirkt der Kipptendenz bei hoher Querbeschleunigung durch aktiven Bremseneingriff entgegen [24].

Mithilfe einer fahrzeugspezifischen Modellbildung sowie zusätzlicher Erkennungsmöglichkeiten (z. B. Wank-Sensorik) und geeigneter Algorithmen wird bei Kippgefahr das kurvenäußere Vorderrad überbremst, das Fahrzeug untersteuert. Durch die Reduzierung der Querkraft wird die Kippneigung reduziert.

### 7.2.5.9 Abstandsregelsysteme

**Notbrems-Assistent für den Stadtbereich** Die Notbrems-Assistenz-Funktion für den Stadtverkehr basierend auf einem CV-Sensor (Closing Velocity) soll Auffahrunfälle bei geringen Geschwindigkeiten bis zu ca. 30 km/h verhindern, Abb. 7.42. Bei höheren Stadtgeschwindigkeiten können Auswirkungen

von Auffahrunfällen auf die Fahrzeuginsassen zumindest gemindert werden.

Dieses System überwacht den Raum vor dem Fahrzeug bis zu einer Entfernung von etwa 10 m zum vorausfahrenden oder stehenden Fahrzeug und ist im Bereich des Innenspiegels hinter der Windschutzscheibe angebracht. Es errechnet den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Annäherungsgeschwindigkeit. In begrenztem Maß werden auch seitlich Objekte erfasst.

Zur Vermeidung einer Kollision wird das Bremssystem aktiviert und autonom bis zum Fahrzeugstillstand vor dem Hindernis eingebremst. Voraussetzung dafür ist ein fremdansteuerbares Fahrzeug-Bremssystem wie z. B. ESP.

Im Stadtgeschwindigkeitsbereich über 30 km/h wird der Fahrer vom System unterstützt, sobald er das Bremspedal betätigt. Das System übersteuert dann den vom Fahrer eingestellten Bremsdruck derart, dass eine Kollision möglichst vermieden wird [33].

**Abstandsregelsystem (Adaptive Cruise Control)** Das radarbasierte (siehe ► Abschn. 7.2.4.7) Abstandsregelsystem Adaptive Cruise Control ACC (auch „intelligenter Tempomat“ genannt) passt die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeuges automatisch an den Verkehrsfluss an und hält einen zeitlich vorgegebenen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auch bei Geschwindigkeiten außerhalb des Stadtbereichs. Dies wird erreicht durch selbsttätige Änderung des Motormoments oder durch Bremsen. Als Komfortsystem nutzt das ACC im Vergleich zum Notbrems-Assistenten nicht das volle Potenzial beim Bremsen. Auch beim Beschleunigen steht der Komfort im Vordergrund (siehe ► Abschn. 8.5.5).

### 7.2.5.10 Elektrische Feststellbremse (Parkbremse) EPB

Um den Anforderungen an Sicherheit, Vernetzung im Fahrzeug und Komfort für den Fahrer gerecht zu werden, verdrängt die elektromechanische Parkbremse vermehrt die mechanische Feststellbremse.

Die Hauptgründe für den Einsatz einer EPB sind verbesserte Absicherung des Fahrzeugs unter Zuhilfenahme von Sensoren und automatische Betätigungen der Parkbremse ohne mechanischen Eingriff des Fahrers. Im Zusammenspiel mit anderen Fahrerassistenzsystemen wird das sogenannte „Stillstandsmanagement“ realisiert, welches den Fahrer durch Automatikfunktionen weiter entlastet. Neue Gestaltungsmöglichkeiten des Fahrzeuginnenraumes ergeben sich durch den Wegfall des Hand- oder Fußbremshebels. Das notwendige elektrische Bedienelement lässt sich ergonomisch günstig integrieren. Die von der EPB aufgebrachte Kraft zum Halten des Fahrzeuges ist somit unabhängig von der individuellen Betätigungskraft des Fahrers.

**Systemarchitektur und Komponenten** Drei Ansätze zur Systemarchitektur sind im Markt heute verbreitet:

- EPB mit direkt betätigten Kombisätteln,
- EPB Seilzugsystem mit Zentralaktuator,
- EPB mit direkt betätigten DuoServo-Feststellbremsen.

Zukünftig wird die Ansteuerung der Aktuatoren in das Steuergerät des elektronischen Bremssystems (ESP) integriert.

Die notwendigen Komponenten einer EPB in allen Varianten sind:

- elektronisches Steuergerät,
- Bedienelement,
- Motor-/Getriebeeinheit,
- mechanische Schnittstelle zur konventionellen Bremse.

**EPB mit direkt betätigten Kombisätteln** Die EPB-Aktuatorik ist direkt mit dem Kombisattel verbunden, der sowohl die hydraulische Betriebsbremse als auch die elektromechanische Parkbremsfunktion realisiert. Die Ansteuerung erfolgt üblicherweise über ein zentrales Steuergerät. Mit einem derartigen System ist die EPB Funktionalität kostengünstig darstellbar. Begrenzt wird die Verwendbarkeit durch die prinzipbedingt limitierte Zuspann- bzw. Bremskraft, die mit dem Kombisattel aufgebracht werden kann.

Die EPB Aktuatoren bestehen bei diesem System im Wesentlichen aus je einem Elektromotor, einem von diesem angetriebenen hochübersetzendem Getriebe und einer Mutter-Spindeleinheit. Diese wandelt die Abtriebsdrehbewegung des Getriebes in eine Zuspannbewegung des Bremskol-

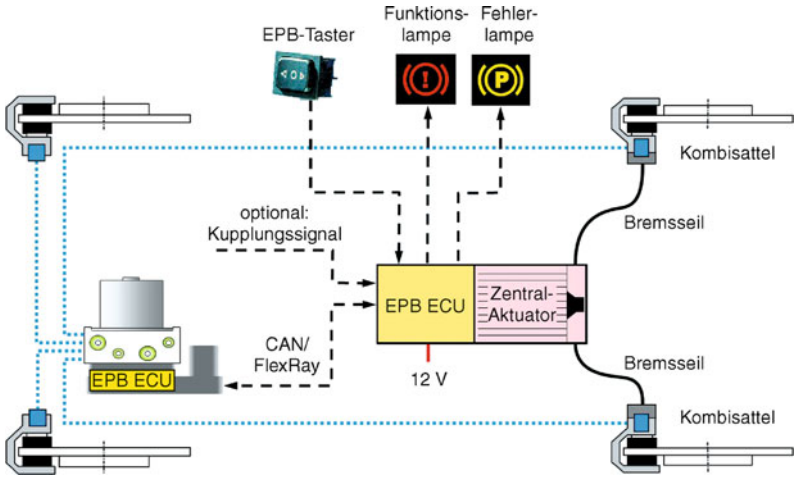



**Abb. 7.56** Systemlayout EPB Seilzugsystem mit Zentralaktuator

bens um. Das die elektromechanischen Komponenten des Aktuators aufnehmende Gehäuse ist fest mit dem Bremssattel verbunden. Optional ist auch bei diesem System eine mechanische Löseeinrichtung integriert.

**EPB Seilzugsystem mit Zentralaktuator** Eine zentral angeordnete Einheit, bestehend aus Steuergerät und Elektromechanik, betätigt über Bowdenzüge die konventionellen Feststellbremsen an der Hinterachse (Kombisattel oder DuoServo-Bremse) (Abb. 7.56).

Diese Systemarchitektur weist einen hohen Grad an Flexibilität bei der Fahrzeugintegration auf. Der Einsatz konventioneller Feststellbremsen macht den optionalen Verbau einer EPB einfach möglich. Die Platzanforderungen für den Einbau von Ansteuerung (EPB-Taster), zentralem Aktuator und Verlegung der Bremsseile müssen entsprechend berücksichtigt werden.

Die Betätigungskraft auf die Bremsseile wird beim Zentralaktuator durch einen Elektromotor aufgebracht, der über ein Untersetzungsgetriebe auf eine Keilwelle wirkt. Diese arbeitet nach dem Mutter/Spindel Prinzip und ist selbsthemmend ausgeführt, so dass die Feststellbremsen ohne weitere Zufuhr von (elektrischer) Energie in Betriebs- oder Lösestellung gehalten werden. Als Zwei-Seil-Aktuator arbeitet diese EPB nach dem Reaktionsprinzip; auf beide Bremsseile wirken gleiche Kräfte und die Aktuator-Gehäusebefestigung bleibt weitgehend kraftfrei. Die Zuspannkraft im Betriebs- sowie das Belaglüftspiel der Bremse im Lösefall werden durch eine Kraft/Weg-Sensorik überwacht. Optional ist eine manuelle Notlöseeinrichtung vorhanden mit deren Hilfe die Parkbremse bei Ausfall der Spannungsversorgung gelöst werden kann.

**EPB mit direkt betätigten DuoServo-Feststellbremsen** Das Feststellbrems-System „EPB DuoServo-integriert" ist ein teilintegriertes Bremssystem an der Hinterachse. Bei diesem System ist die hydraulische Betriebsbremse baulich von der Feststellbremse getrennt. Die DuoServo-Feststellbremsen werden direkt – ohne Bremsseil – von jeweils einem entsprechenden elektromechanischen Aktuator betätigt. Diese sind am Radträger verbaut und werden durch ein zentral angeordnetes elektronisches Steuergerät angesteuert.

Bedingt durch die große Selbstverstärkung der DuoServo Bremse wird eine große Feststellbremskraft mit vergleichsweise kleinen Aktuatoren erzeugt. Damit eignet sich dieses System insbesondere für den Einsatz in schweren Fahrzeugen oder Fahrzeugen (insbesondere Sportwagen), die Festsättel an der Hinterachse aufweisen.

Die Aktuatoren der integrierten DuoServo-Bremse betätigen die Bremsbacken der Trommelbremse an der Hinterachse direkt. Die Gehäuse der Aktuatoren nehmen die Umfangskräfte der Brems-

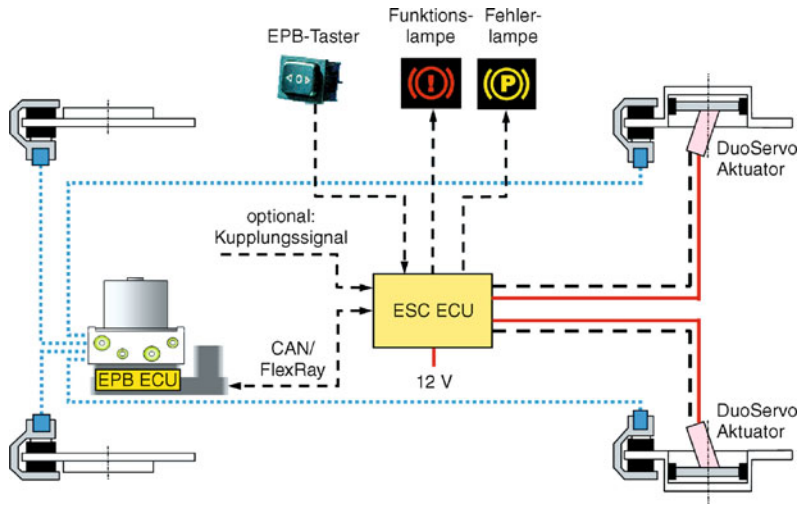



**Abb. 7.57** Systemlayout EPB DuoServo-integriert

backen der Trommelbremse im Betriebsfall auf und leiten diese an den Radträger weiter (siehe Abb. 7.57). Ein Aktuator dieses Systems besteht aus einem Elektromotor, der über ein Untersetzungs- und ein Schneckengetriebe eine Gewindespindel betätigt, das in Wirkverbindung mit den Bremsbacken steht. Die Gewindespindel ist selbsthemmend und verbleibt ohne weitere Energiezufuhr in Betriebs- bzw. Lösestellung. Zur Überwachung des Lüftspiels der Bremse, sowie zur Regelung der Zuspannkraft weist der Aktuator einen Drehgeber am Motor auf, mit dem indirekt der Betätigungsweg der Spindel erfasst wird. Optional ist eine mechanische Notlöseeinrichtung vorhanden, mit deren Hilfe bei Ausfall der Spannungsversorgung die Bremse in Lösestellung gebracht werden kann.

## 7.2.6 Neue und zukünftige Systemarchitekturen

Aktuelle Entwicklungstrends wie der verantwortungsvolle, d. h. genügsame, Umgang mit fossilen Energieträgern, die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und das automatisierte Fahren begünstigen oder erfordern neue Systemarchitekturen. Ausgewählte ausgeführte Beispiele werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 7.2.6.1 Entkoppelte Bremssysteme

Bei den entkoppelten Bremssystemen besteht im Gegensatz zu konventionellen gekoppelten Hilfskraftbremsanlagen keine energetische Kopplung zwischen Betätigungs- und Übertragungseinrichtung. Man spricht bei solchen Systemen, bei denen der Betätigungswunsch ausschließlich elektronisch, also „per Draht", als Information an ein Steuergerät übertragen, die Energie zur eigentliche Bremsbetätigung aber ausschließlich einer mitzuführenden Energiequelle entnommen wird, auch von Fremdkraftbremsanlagen oder Brake-by-Wire-Systemen. Die Form der Energieübertragung zwischen Energiequelle und Radbremse variiert. So wurden im Pkw-Bereich Systeme mit hydraulischer Übertragung ebenso realisiert wie mit elektrischer Übertragung. Ist lediglich eine Achse des Fahrzeugs energetisch entkoppelt ausgeführt, während die zweite Achse konventionell gekoppelt abgebremst wird, spricht man auch von einem teilentkoppelten System.

Entkoppelte Bremssysteme ermöglichen im Umfeld von regenerativen bzw. rekuperativen Bremssystemen die Synthese (Brake Blending) der Reibbremswirkung mit der rekuperativen Bremswirkung, so dass dem Fahrer stets ein authentisches, konsistentes und intuitiv bedienbares Bremsverhalten garantiert werden kann.

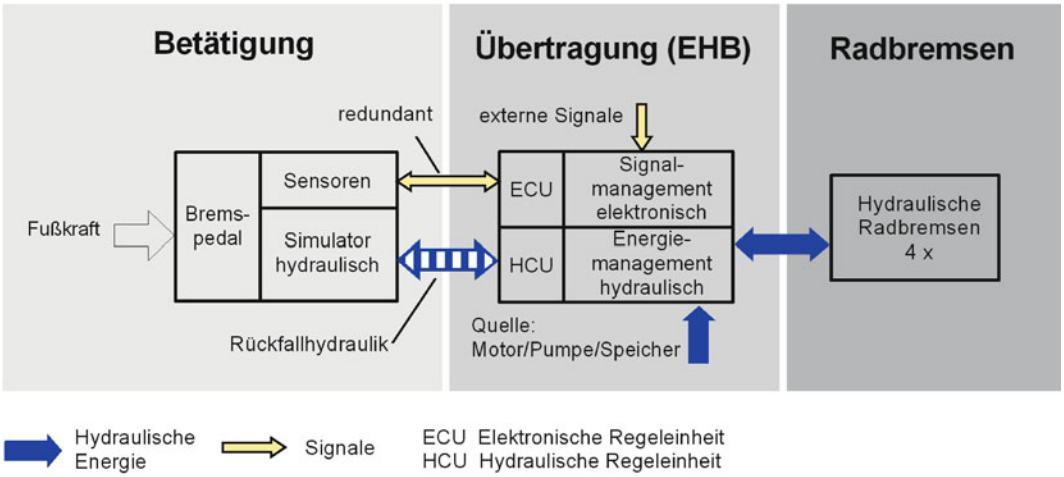



**Abb. 7.58** Elektro-Hydraulisches Bremssystem

**Elektro-Hydraulisches Bremssystem (EHB) mit Hochdruckspeicher** Die elektro-hydraulische Bremse ist ein Fremdkraftbremssystem [25]. Die wesentlichen Merkmale sind: geringe Baugröße, zeitoptimiertes Ansprechverhalten des Bremssystems und modellierbare Bremspedal-Charakteristik. Die EHB ist sowohl bei Normalbremsung als auch in der Radschlupfregelung ein von der Betätigung (Bremspedal) energetisch entkoppeltes und dadurch rückwirkungsfreies Bremssystem. Es besteht aus den Baugruppen (Abb.7.58):

- Bremspedalcharakteristik-Simulator (Bremspedal mit Sensoren und Elementen für die synthetische Pedalcharakteristik-Erzeugung),
- hydraulisch/elektronische Regeleinheit (HECU = hydraulic electronic control unit),
- Hochdruckspeicher in Speicherladeschaltung,
- hydraulische Radbremsen.

Aus dem gemessenen Pedalwegsignal und dem im Simulator aufgebauten Druck wird die gewünschte Verzögerung abgeleitet. Der mit Magnetventil absperrbare Simulator nimmt einen Teil des Haupzylindervolumens auf, um gemeinsam mit einem Federpaket die Bremspedalcharakteristik darzustellen (Abb.7.59). Weg- und Drucksignale werden an den elektronischen Regler geleitet („per Draht“ bzw. „by-wire“) und mit weiteren, den Fahrzustand und Fremdbremseingriffe beschreibenden Sensorsignalen (z. B.: Raddrehzahlen, Lenkwinkel, Gierrate, Querbeschleunigung) verarbeitet. Der elektronische Regler errechnet daraus die Vorgaben für – hinsichtlich Bremsverhalten und Fahrstabilität optimale – radindividuelle Bremsdrücke.

Versorgt aus einem Druckspeicher wird mit Hilfe der hydraulischen Regeleinheit die Bremsenergie entsprechend dieser Vorgabe erzeugt. Die Vorladung des Druckspeichers erfolgt durch eine integrierte Motor-Pumpen-Einheit.

Beim Bremsen wird die hydraulische Verbindung zwischen THz und hydraulischer Regeleinheit unterbrochen. Der Bremsdruck im Rad wird aus der vorgeladenen Speichereinheit über Regelventile eingestellt.

Neben den bereits genannten Vorteilen ist das System geräuscharm, zeigt ein besseres Crashverhalten und ermöglicht eine verbesserte Pedalergonomie.

Vorteile für den Fahrzeughersteller sind:

- höhere Bremsdynamik (Druckspeichersystem),
- verbessertes Packaging und vereinfachte Montage durch Wegfall des Vakuumbremskraftverstärkers im Spritzwandbereich,
- Verwendung einheitlicher Baugruppen für unterschiedliche Fahrzeugvarianten,
- einfache Realisierung von Fremdbremseingriffen über externe Signale,

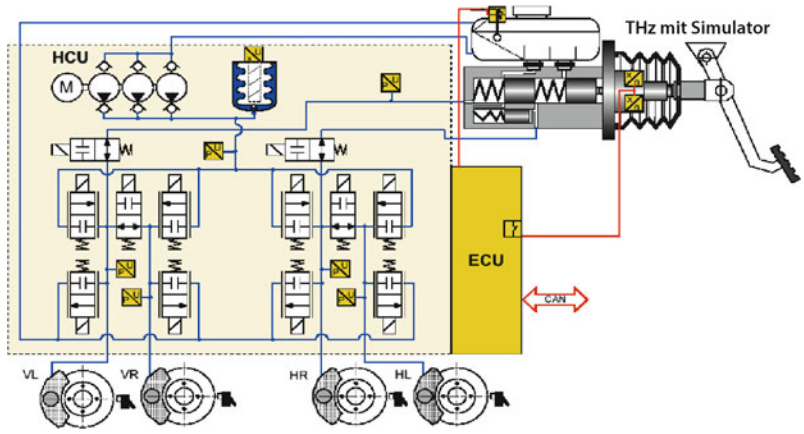



**Abb. 7.59** Schaltbild EHB mit schematischer Darstellung der Systemkomponenten

- vakuumunabhängig, daher optimale Eignung für saugverlustoptimierte Verbrennungsmotoren sowie für Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge,
- einfache Vernetzbarkeit mit zukünftigen Verkehrsleitsystemen.

Der Aufbau der Regeleinheit ermöglicht die Integration aller heutigen Bremseingriffs- und Radschlupf-Regelfunktionen (z. B. ABS, EBV, ASR, ESP, BA, ACC, …) ohne weiteren Hardware-Aufwand (ABS: Anti-Blockier-System, EBV: Elektronische Bremskraftverteilung, ASR: Antriebs-Schlupf-Regelung, ESP: Elektronisches Stabilitätsprogramm, BA: Bremsassistent, ACC: Abstands-Regel-Tempomat).

Bei Störungen des Systems stehen zwei Rückfallebenen zur Verfügung:

- Erste Ebene: Bei einem Ausfall des Hochdruck-Speichers bleibt die „Brake-by-Wire"-Funktion weiterhin erhalten, die Bremsen werden jedoch ausschließlich von der Pumpe versorgt.
- Zweite Ebene: Bei einer Störung der „Brake-by-Wire"-Funktion (z. B. wegen eines Ausfalls der elektrischen Energieversorgung) bleiben die hydraulischen Verbindungen des Hauptzylinders zu den beiden Radbremskreisen erhalten und es wird ohne Verstärkung proportional zur aufgebrachten Fußkraft mit allen vier Radbremsen gebremst. Die Simulatorfunktion ist dabei vorzugsweise abgeschaltet.

Die gesetzlich geforderte hydraulische Zweikreisigkeit des Bremssystems bleibt trotz Teilausfall erhalten.

**Integriertes Bremssystem** Eine elektro-hydraulische Bremsbetätigung mit elektrisch angetriebenem Zylinderkolben (z. B. MK C1 der Firma Continental) kann deutlich schneller als konventionelle hydraulische Systeme Bremsdruck aufbauen und ist Motorvakuum-unabhängig. Sie erfüllt die gestiegenen Druckdynamikanforderungen von neuen Fahrerassistenzsystemen zur Unfallvermeidung und Fußgängerschutz. Des Weiteren kann das System die Anforderungen, die an ein rekuperatives Bremssystem gestellt werden, auf hohem Komfortniveau erfüllen. Die Funktionen von Bremsbetätigung, Bremskraftverstärkung und Regelsystem (ABS, ESP) können in einem kompakten und gewichteinsparenden Bremsmodul zusammengefasst werden (Abb. 7.60) [34].

**Elektromechanisches Bremssystem (EMB)** Die elektromechanische Bremse – auch „trockenes Brake-by-Wire" genannt – arbeitet ohne Bremsflüssigkeit.

Das System besteht aus einer Bremsbetätigung mit integrierter Steuerelektronik und vier elektromechanischen Radbremsmodulen. Die Übertra-

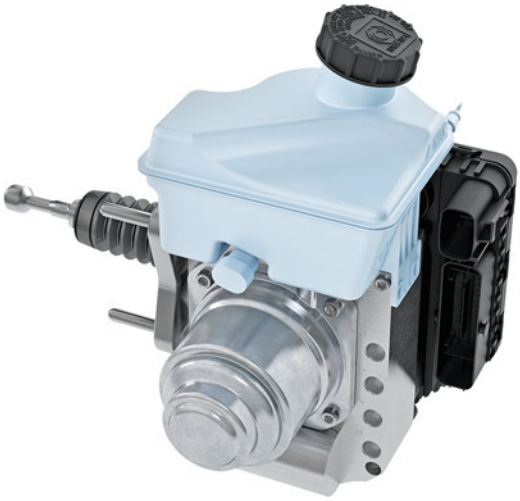


**Abb. 7.60** Elektro-Hydraulische Bremsbetätigung MK C1 (Continental AG)

gung von Bremssignalen und Bremsenergie erfolgt rein elektrisch/elektronisch, Abb. 7.61. Wie bei der EHB (Elektro-hydraulische Bremse) ist die Betätigung rückwirkungsfrei durch die Entkopplung des Pedals (Sollwertvorgabe) von den Radbremsen. Zur Sicherstellung der Zweikreisigkeit wird ein redundantes Signal- und Energienetz benötigt. Wegen der für die Vorderachsbremsen benötigten höheren Leistung ist eine 12 V-Architektur nicht mehr ausreichend. Die oben genannten Anforderungen bedingen neue E/E-Architekturen (► Abschn. 8.1) [32].

Die Betätigung besteht aus einem elektronischen Bremspedal, welches als Bestandteil eines verstellbaren Pedalmoduls ausgeführt werden kann, das neben dem Brems- auch das Gaspedal und die zentrale Elektronik enthält. Das elektronische Bremspedal setzt sich zusammen aus dem Pedalgefühlsimulator und Sensoren zur Fahrerwunscherfassung. Die Pedalweg- bzw. Pedalkraft-Signale werden von der zentralen Elektronik mit weiteren, den Fahrzustand und Fremdbremseingriffe beschreibenden externen Signalen (z. B.: Raddrehzahlen, Gierrate, Querbeschleunigung) verarbeitet und in hinsichtlich Bremsverhalten und Fahrstabilität optimale radindividuelle Bremsenzuspannkräfte umgerechnet. Die entsprechenden elektrischen Informationen werden über ein redundantes Bussystem (by-Wire) an die Radbremsmodule übertragen. Jedes der elektromechanischen Radbremsmodule besteht aus einer Radbremsen-ECU und einem elektromechanischen Aktuator (Motor-Getriebeeinheit).

Die Feststellbremsfunktion wird durch eine integrierte Arretiervorrichtung sichergestellt. Die Ansteuerung erfolgt über einen Taster und eine rein elektrische Signalankopplung.

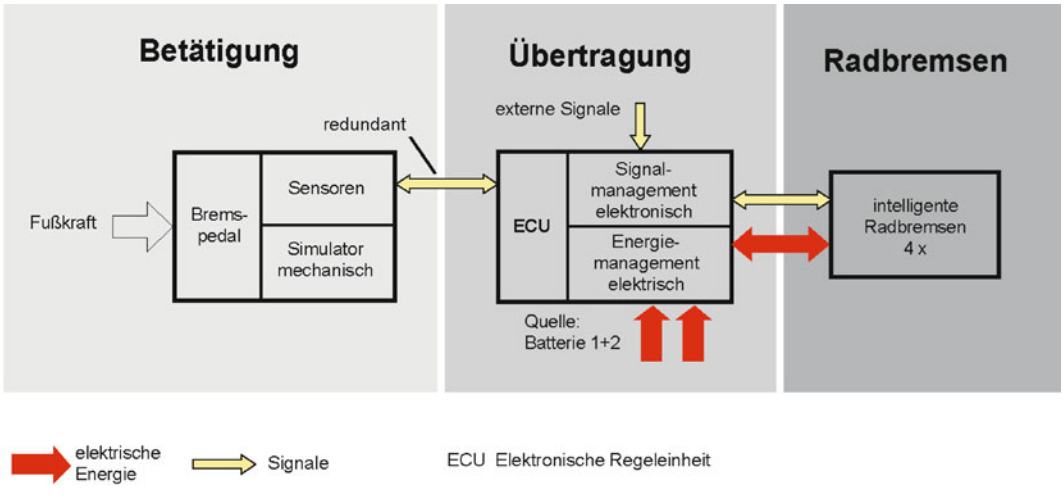



**Abb. 7.61** Elektromechanisches Bremssystem

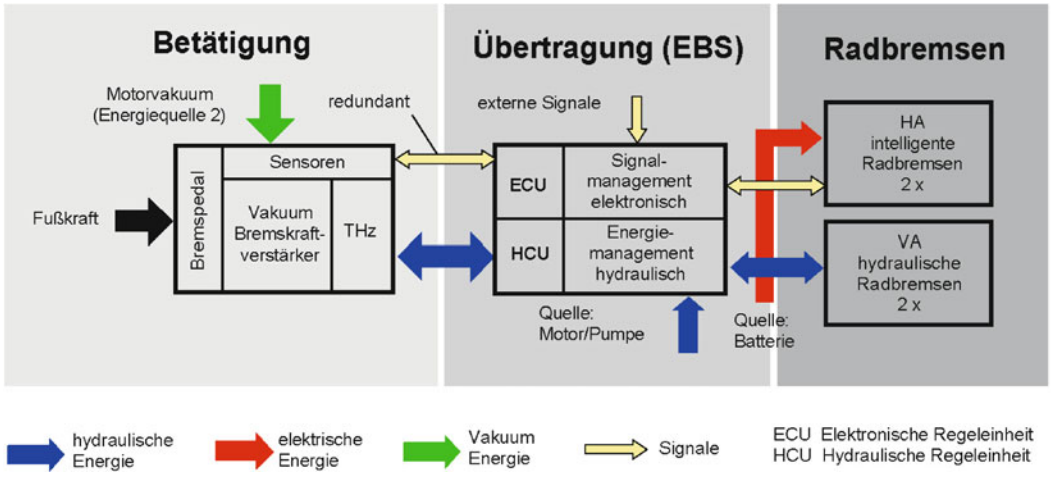



**Abb. 7.62** Elektrisch-Hydraulische Combi Bremse

Bei Radschlupf-Regelungsvorgängen (z. B. durch ABS, ASR, ESP) ist die Bremsmomenten-Modulation dem vom Fahrer eingesteuerten Bremsenwunsch übergeordnet.

Das System hat gegenüber hydraulischen Bremssystemen folgende Vorteile:

- höhere Bremsdynamik,
- optimales Brems- und Stabilitätsverhalten,
- einstellbare Bremspedalcharakteristik,
- keine Betriebsgeräusche,
- verbesserte Ergonomie durch verstellbares Pedalmodul,
- verbesserte Umweltverträglichkeit und Verringerung der Brandgefahr bei Unfällen durch Entfall der brennbaren Bremsflüssigkeit,
- keine Restbremsmomente,
- besseres Crashverhalten.

Vorteile für den Fahrzeughersteller sind:

- geringster Packaging- und Montageaufwand („plug & play“ anstelle „fill and bleed“),
- geringe Anzahl an Komponenten,
- vakuumunabhängig, daher optimale Eignung für saugverlustoptimierte Verbrennungsmotoren,
- Darstellbarkeit der Schnittstelle zu Assistenzsystemen (z.B. ACC stop & go, Einparkhilfe usw.) mit geringem Aufwand,
- einfache Vernetzbarkeit mit zukünftigen Verkehrsleitsystemen.

**Elektro-Hydraulische Combi Bremse (EHCB)** Als EHCB wird ein System bezeichnet, bei dem die Zugspannkräfte für die Reibungsbremse an der Vorderachse hydraulisch und an der Hinterachse elektromechanisch erzeugt werden [26], ◘ Abb.7.62 und ◘ Abb.7.63.

Dabei ermöglicht die elektromechanische Hinterachsbremse die Betriebs-Brems- und die Feststell-Bremsfunktion in einem kompakten Bauteil (◘ Abb.7.64). Eine integrierte Arretiervorrichtung sichert wie bei der EMB die Feststell-Bremsfunktion auch bei ausgeschalteter Zündung. Je nach Bremskreisaufteilung (▶ Abschn. 7.2.2) wird die Vorderachse über einen Hauptzylinder oder Tandem-Hauptzylinder mit Bremsdruck versorgt. Die Bremskraft der Hinterräder wird abhängig von Brems-Pedal-Weg und/oder -Kraft elektronisch geregelt.

Das System bietet folgende Vorteile:

- kleiner dimensionierte Betätigung (Bremskraftverstärker und Tandemhauptzylinder),
- größen- und komponentenreduzierte elektronisch/hydraulische Regeleinheit,
- reduzierter Erstmontage- und Wartungsaufwand,
- minimierte ABS-Pedalrückmeldung,
- niedriges Geräuschniveau,
- Nutzung von vorhandener, nicht-redundanter 12 V-Bordnetzstruktur.

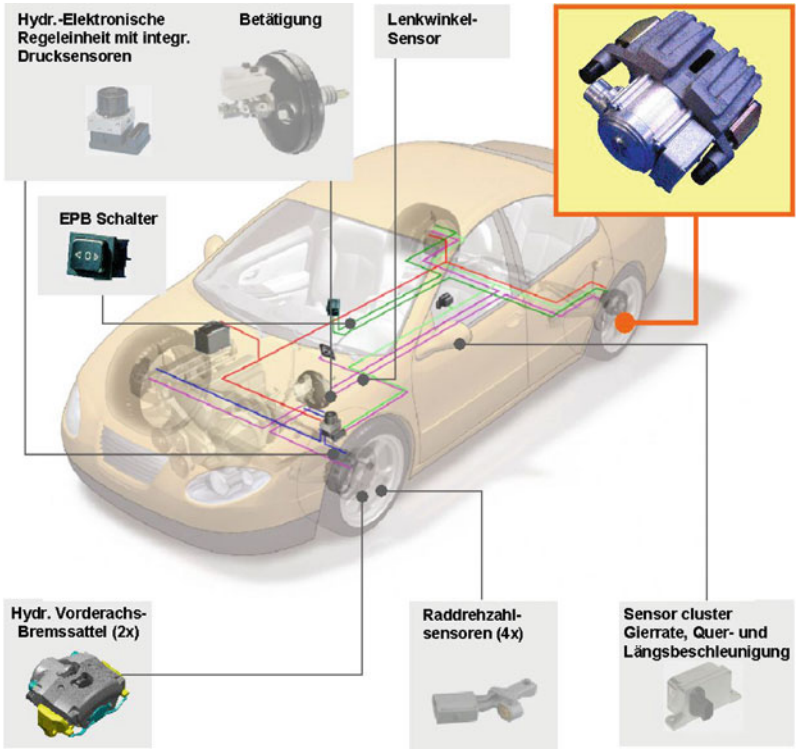



**Abb. 7.63** Elektrisch-Hydraulische Combi Bremse, Komponenten im Fahrzeug

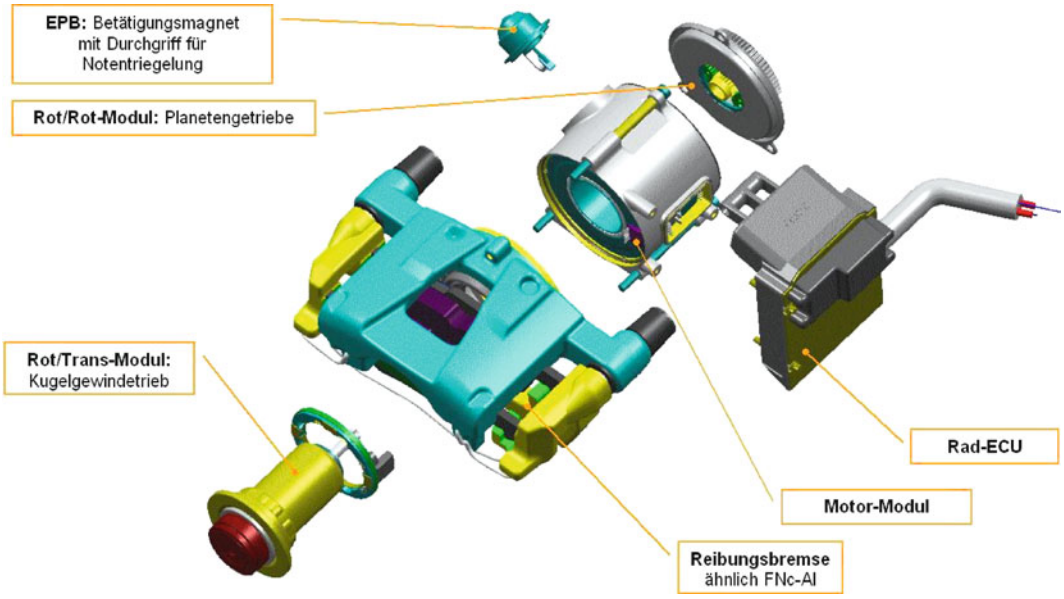



**Abb. 7.64** Schnittbild der EMB (hier: Hinterachsbremse inklusive Feststellbremsfunktion)

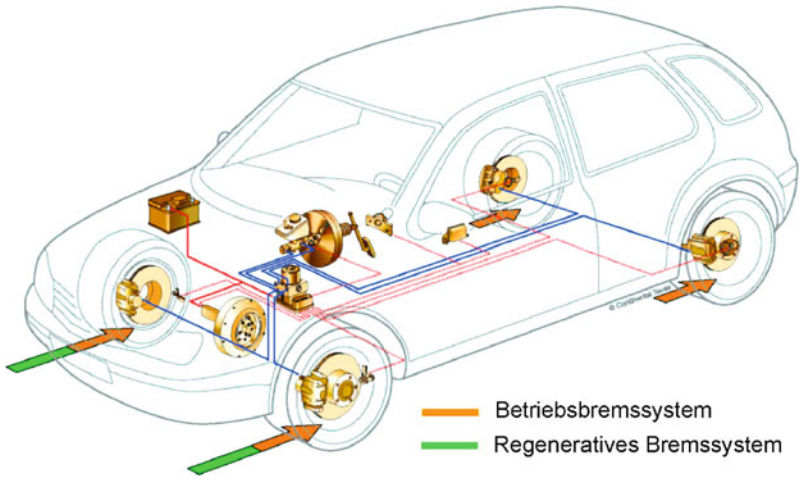



**Abb. 7.65** Regeneratives Bremssystem im Fahrzeug

Assistenz-Funktionen wie elektronische Bremskraftverteilung, Berg-Anfahr-Hilfe (Hill Holder) und elektrische Parkbremse sind durch Software-Erweiterung realisierbar.

### 7.2.6.2 Regeneratives Bremssystem

Die Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation bzw. regeneratives Bremsen) bietet noch Potenzial im Hinblick auf verbrauchsoptimiertes Fahren (siehe Einsatz in Hybridfahrzeugen, ▶ Abschn. 4.3.3). Ziel der Rekuperation ist es, die Bewegungsenergie des Fahrzeuges nicht ausschließlich – wie beim hydraulischen Bremssystem – in thermische Energie umzusetzen und an die Umgebung abzugeben. Vielmehr soll die Bewegungsenergie ganz oder teilweise in eine speicherbare Energieform überführt werden, die anschließend direkt oder indirekt für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden kann, Abb. 7.65. Im Antriebsstrang integriert bietet ein Kurbelwellen- oder ein Getriebe-Starter-Generator (siehe auch ▶ Abschn. 5.7) die Möglichkeit zur Unterstützung der Bremsfunktion.

Zur Rückgewinnung der Bremsenergie ist ein spezielles Bremssystem notwendig (Abb. 7.66). Dieses regelt bei jeder Bremsbetätigung den Grad der Energierückgewinnung und die Notwendigkeit zur Nutzung der konventionellen Reibungsbremse in Abhängigkeit vom Fahrerwunsch. Er-

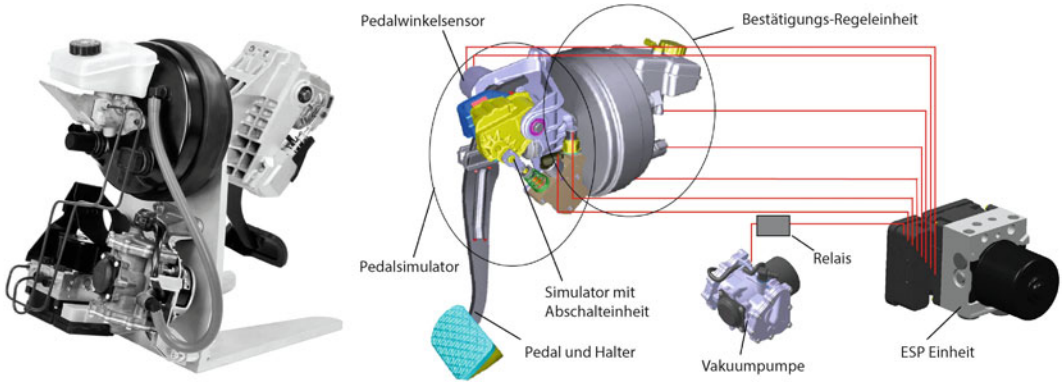



**Abb. 7.66** Regeneratives Bremssystem inklusive Betätigungseinheit, Simulatoreinheit, ESP-Modulator und Vakuumpumpe

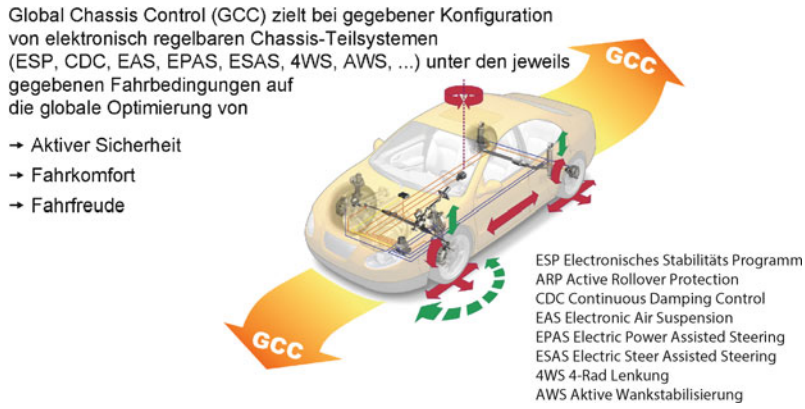



**Abb. 7.67** Beispiel für ein vernetztes Chassis System: Global Chassis Control GCC von Continental

forderlich ist daher der Einsatz einer entsprechenden Betätigungseinheit zur Erfassung und Umsetzung des Fahrerbremswunsches. Außerdem ist für die Synthese (Brake Blending) von klassischem Reibungsbremsmoment und Generatorbremsmoment eine entsprechend komplexe Regelung notwendig. Sollen die Grundkomponenten und Baugruppen der konventionellen Bremse weitgehend beibehalten werden, ist die Verwendung eines „SBA-Systems" (Simulator Brake Actuation) sinnvoll. Dieses Bremsbetätigungssystem basiert auf bewährten Komponenten der hydraulischen Bremse und ermöglicht als By-Wire-System viele Zusatzfunktionen. Der Bremsbefehl wird vom Pedalwinkelsensor erkannt, die Hydraulikeinheit baut dann „by-wire" den zur Verzögerung erforderlichen Bremsdruck auf. Die Betätigungseinheit mit Pedalcharakteristik-Simulator SBA vermittelt dem Fahrer jederzeit ein optimales Pedalgefühl durch einen Pedalgefühlsimulator.

Das Prinzip: Zunächst übernimmt die Generatorfunktion des Hybridantriebs das Bremsen. Dabei wird aus der kinetischen elektrische Energie gewonnen, welche die Batterie lädt. Erst wenn diese Generator-Bremswirkung nicht ausreicht, wird über das Regenerative Bremssystem die konventionelle Bremse aktiviert (Brake Blending). Das System ist in allen Hybrid-Fahrzeugen sowie für Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge einsetzbar.

**Kurbelwellen-Starter-Generator Systeme** Das System (z. B. Integrated Starter Alternator Damper, ISAD) kombiniert in einer leistungsfähigen elektrischen Maschine die Generator- und Anlasserfunktion. Abhängig vom Batterie-Ladezustand wird das im Generatorbetrieb erzeugte Bremsmoment als elektrische Energie der Batterie zugeführt. Reicht das Generatormoment nicht aus, um die vom Fahrer gewünschte und über das Bremspedal eingesteuerte Abbremsung zu erreichen, wird der fehlende Anteil über die hydraulische Reibungsbremse ergänzt. Je größer das bereitgestellte Bremsmoment des Generators ist, desto geringer ist der Anteil der Reibungsbremse. Für die situationsgerechte Verteilung der Bremsenergie auf Generator und Reibungsbremse sorgt eine Elektronik. Beim Beschleunigen ist das ISAD-System darüber hinaus in der Lage über einen von der Batterie-Ladung begrenzten Zeitraum die Antriebsleistung des Verbrennungsmotors mit einem zusätzlichen Antriebsmoment zu unterstützen.

Damit bietet ein regeneratives Bremssystem wertvolles Potenzial zur Erfüllung der Verordnung der europäischen Automobilindustrie zur Senkung der $CO_2$-Emmissionen.

### 7.2.6.3 Vernetztes Chassis

In heutigen Fahrzeugen wirkt der Fahrer mit den Bedienelementen Lenkrad, Gaspedal und Bremspedal direkt auf die jeweiligen Systeme Lenkung, Antrieb und Bremse [27], Abb. 7.67. Eine bedarfsgerechte, den Fahrerwunsch interpretierende Kombinationsregelung existiert bisher nur in Ansätzen, wie z. B. bei dem aus dem Bremsstabilitäts-

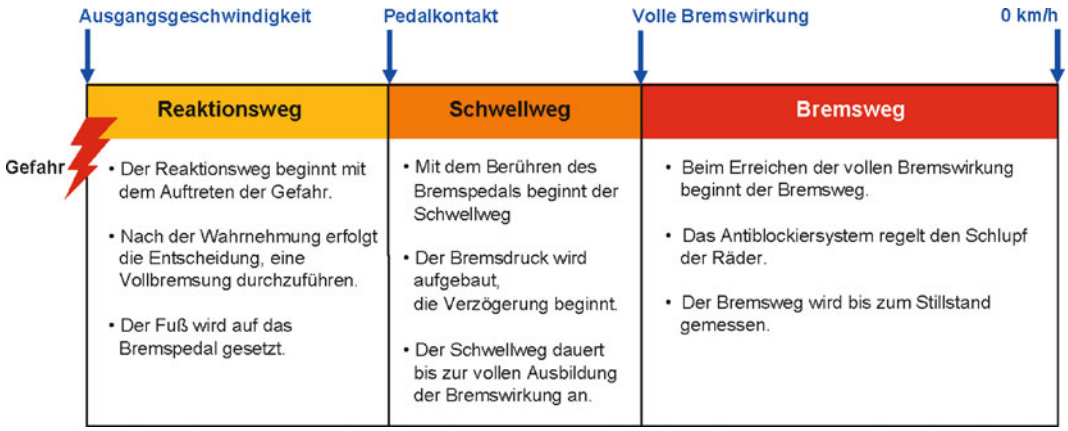



**Abb. 7.68** Phasen des Anhalteweges

system ESP initiierten Motoreingriff während der Traktions- bzw. Gierratenregelung.

Mit der Evolution der Einzelsysteme in Richtung computergesteuerter Fremdkraftsysteme ergeben sich neue Ansätze bei der Chassissystementwicklung. Dies gilt einerseits vor dem Hintergrund zusätzliche, über die Einzelsystemfunktionen hinausgehende Gesamtsystemfunktionen zu erschließen, anderseits aber auch vor dem Hintergrund ungewollte gegenseitige Beeinflussung der auf die gleichen Fahrzustandsgrößen wirkenden Regelkreise auszuschließen [30]. Als Beispiel sei hier das Gierverhalten genannt, das von allen drei Chassissystemen, Lenkung, Bremse und Fahrwerk sowie darüber hinaus auch vom Antrieb (speziell bei regelbaren Zwischengetrieben) beeinflusst werden kann. Die weitere Optimierung des Chassis mit fremdeingriffsfähigen Systemen bedingt folglich eine gesamtheitliche Betrachtung der Wirkkette.

Bei der Entwicklung von Global Chassis Control ist zu beachten, dass eine hohe Abhängigkeit zwischen Funktionalität, Softwarearchitektur und E/E-Architektur besteht [28]. Dabei steht insbesondere eine klare Funktions- und Gerätehierarchie mit definierten, einheitlichen Schnittstellen im Vordergrund. Global Chassis Control erreicht ohne entsprechende Struktur sonst schnell einen Komplexitätsgrad, der einen nicht vertretbaren Entwicklungs- und Applikationsaufwand nach sich zieht. Folgende Szenarien zeigen exemplarisch die Vorteile eines solchen Vernetzungsansatzes.

**Gesamtbetrachtung Anhalteweg** Der Anhalteweg eines Fahrzeugs bei einer Notbremsung setzt sich zusammen aus dem Reaktionsweg, den das Fahrzeug ungebremst während der Zeit zurücklegt, die der Fahrer zum Reagieren benötigt, dem Schwellweg, der in der Übergangsphase vom Zeitpunkt der Pedalberührung bis zur vollen Ausbildung der Bremsung zurückgelegt wird und dem sich daran anschließenden Bremsweg bis zum Stillstand, ◘ Abb.7.68.

Signifikante Anhaltewegverkürzungen kann man nur erreichen, wenn die beteiligten Komponenten und Prozesse in einem ganzheitlichen Ansatz gemeinsam optimiert werden. Durch den sinnvollen Zusammenschluss der technischen Möglichkeiten und des Know-Hows auf der Reifen- (siehe ▶ Abschn.7.3), Bremsen- und Fahrwerkseite (▶ Abschn.7.4) konnte sowohl der Reaktions- als auch der Bremsweg in einer Notbremssituation in der Größenordnung von 10–15 % gegenüber dem heutigen Stand reduziert werden [29].

**Erweitertes Elektronisches Stabilitätsprogramm – ESP mit aktivem Lenkeingriff** Aufbauend auf dem heutigen Fahrdynamikregelsystem ESP lässt sich am Beispiel einer Notbremsung auf Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten ($\mu$-Split) der Vorteil der Vernetzung von Bremssystem und Lenkung eindrucksvoll darstellen.

Steht im vernetzten System zusätzlich die aktive Lenkung zur Verfügung (◘ Abb.7.69), kann das von den unterschiedlichen Bremskräften herrüh-

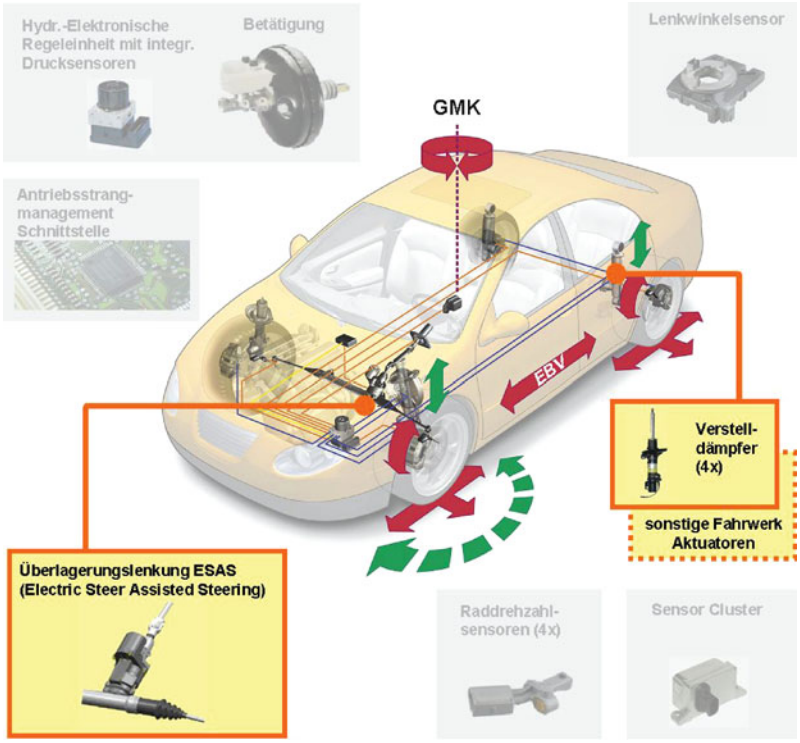



**Abb. 7.69** ESP kombiniert mit aktivem Lenk- und optionalem Fahrwerkseingriff

rende Giermoment durch ein computergesteuertes Gegenlenken kompensiert werden. Der Fahrer kann das Lenkrad weitgehend gerade halten (Geradeausbremsung). Die Lenkradstellung entspricht also dem gewünschten Fahrzeugkurs. Die schnelle Giermomentenkompensation durch die Lenkung lässt gleichzeitig einen nahezu unverzögerten Bremsdruckaufbau an den Rädern und eine modifizierte Hinterachs-Bremsdruckregelung zu. Der Bremsweg auf $\mu$-Split reduziert sich dadurch erheblich.

### 7.2.6.4 Ausblick

Die Bestrebungen nach Verbrauchsoptimierungen der Antriebsaggregate führen dazu, dass die bisherige Hilfsenergiequelle „Motorvakuum" immer weniger zur Verfügung steht. D. h. für die Unterstützung des Fahrers durch Bremskraftverstärkung ist entweder das fehlende Vakuum durch entsprechende mechanisch oder elektrisch angetriebene Pumpen zu erzeugen, oder eine alternative Hilfsenergiequelle bereitzustellen. Beispiele hierzu wären Hydrauliksysteme mit Hochdruckspeicher oder elektromechanische Verstärkerlösungen. Zudem besteht die Notwendigkeit die heute ausschließlich hydraulischen Bremssysteme durch Systeme zu ersetzen, die an die Besonderheiten von Hybrid- bzw. Elektrofahrzeugen angepasst sind.

Außerdem muss das Zusammenwirken von klassischer Reibungsbremse und rekuperativer Generatorbremse mit innovativen mechatronischen Ansätzen (By-Wire-Systeme) realisiert werden, um die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsen zurückzugewinnen und diese später als Antriebsenergie nutzen zu können (siehe ► Abschn. 7.2.6.2). Dabei sollen heute übliche Bremspedalcharakteristiken (Pedalgefühl) erhalten bleiben. Auf dem Weg zur rein elektromechanischen Betriebsbremse mit den damit einhergehenden hohen elektrischen Leistungsanforderungen ist eine Kombination aus hydraulischem Bremssystem an der Vorderachse und elektromechanischen Bremsen an der Hinter-

achse inklusive Feststellbremsfunktion bereits realisiert.

Durch die steigenden Anforderungen hinsichtlich Verkehrssicherheit werden aktive und passive Fahrzeugsicherheitssystemen zunehmend miteinander vernetzt („Integrale Sicherheit"). Dabei spielt das effiziente Zusammenwirken von Sensoren und Algorithmen zur Umfelderkennung und Bremsdynamik eine größer werdende Rolle. Für weitere Informationen sei auf das „Handbuch Fahrerassistenzsysteme" [112] verwiesen.

Das Bremssystem mit den weitgehend standardisiert eingeführten Assistenzsystemen wie das Antiblockiersystem (ABS), der Bremsassistent (BA) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) sorgt schon heute für ein stabiles, schleuderfreies Fahren mit kurzen Bremswegen. Dabei werden die Assistenzfunktionen durch die Vernetzung mit Umfeldsensorik immer umfassender, die Bedienhandlungen durch den Fahrer treten immer mehr zurück. Auf dem Weg zum automatisierten Fahren spielen diese Assistenzsysteme eine wichtige Rolle, da neue Funktionen auf deren Vorhandensein aufbauen. Der Schritt vom assistierten zum automatisierten Fahren – vorerst für ausgewählte Fahraufgaben – wird immer kleiner.

## 7.3 Reifen, Räder, Gleitschutzketten

### 7.3.1 Einführung

Im Jahre 1845 erhielt der Schotte Robert William Thomson das britische Patent 10990 auf einen elastischen luftgefüllten Reifen aus gummiertem Gewebe und Leder. Thomson war seiner Zeit weit voraus, sein Patent, es enthielt bereits Ansätze wie Profilnuten als Gleitschutz oder den Einsatz für Schienenfahrzeuge, geriet in Vergessenheit.

Im Jahre 1888 wird der Luftreifen durch John Boyd Dunlop zum zweiten Mal erfunden, da „vorbekannt", erhält er nur in England ein Patent. Inzwischen machte das Fahrrad eine stürmische Entwicklung durch; ausgehend vom eisenbereiften „Knochenschüttler" Draisine war die Einführung des Luftreifens nach dem zwischenzeitlichen Verwendung von Vollgummi- bzw. Hohlraumreifen ein entscheidender Schritt zu erhöhtem Komfort bei reduziertem Rollwiderstand. Aufbauend auf die Erfahrungen mit den „Pneumatics" für das Fahrrad nahmen die Reifenhersteller die Weiterentwicklung für die deutlichen höheren Ansprüche an Automobilen auf. Die Reifenhersteller mussten die skeptischen Autopioniere von den Vorteilen des Luftreifens durch eigene Versuche überzeugen.

Nicht unerwähnt bleiben sollte jedoch, dass sowohl Dunlop als auch Thomson bei ihren Erfindungen von einer Entdeckung profitierten, die der amerikanische Chemiker Charles Goodyear 1839 gemacht hatte: die Vulkanisation des Kautschuks mit Hilfe des Schwefels.

Die Entwicklung des Luftreifens verlief durchaus nicht geradlinig hin zu unseren heutigen Fahrzeugreifen, vielmehr erfolgte sie auf mehreren, teils parallel verlaufenden, teils sich beeinflussenden Entwicklungsrichtungen der Vulkanisate, Festigkeitsträger, Reifenstrukturen, Querschnittsverhältnisse (◘ Abb. 7.70) usw.

Der entscheidende Schritt auf dem Wege zum Reifen von heute war die Einführung des Radialreifens mit Vorteilen in der Lebenserwartung, im Rollwiderstand, Kraftschluss und im Fahrverhalten. Der Radialreifen ist bei PKW-Reifen weitgehend Standard, bei Nutzfahrzeugreifen schreitet die Radialisierung schnell voran. In den Industrienationen werden kaum noch Diagonalreifen gefahren. Deshalb wird hier auf den Diagonalreifen kein Bezug mehr genommen.

### 7.3.2 Reifenaufbau

Der Reifen ist ein komplexer Verbundkörper aus Materialien unterschiedlichster physikalischer Eigenschaften ◘ Abb. 7.71).

Der Radialreifen besteht aus den Hauptbauelementen

- Reifenwulst,
- Karkasse,
- Gürtel,
- Laufstreifen.

Der Reifenwulst gewährleistet den festen Sitz des Reifens auf der Felge. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, sind in den Reifenwulst ein oder mehrere zugfeste Drahtkerne eingebettet. Beim schlauchlo-

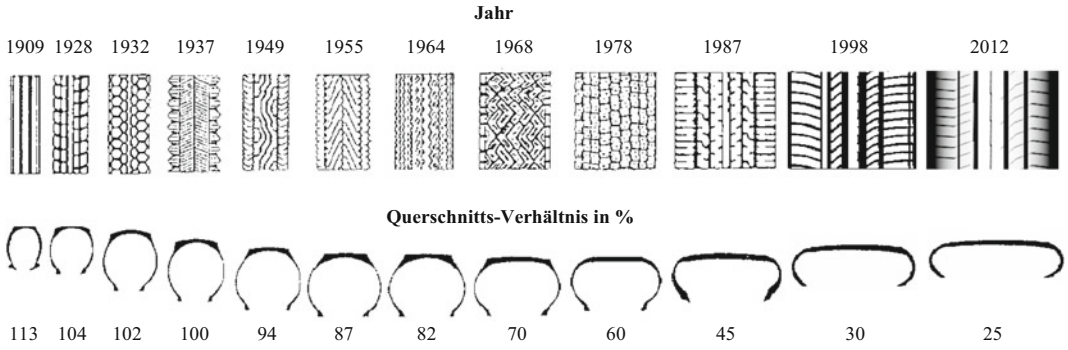



**Abb. 7.70** Entwicklung der Querschnittsverhältnisse in den Jahren 1909 bis 2012




**Abb. 7.71** Reifenaufbau für einen typischen Pkw-Reifen mit den Bauteilen: (1) Laufstreifen, (2) Unterplatte, (3) Bandage, (4) Stahlkord Gürtellagen, (5) Karkasse, (6) Innenschicht, (7) Seitenwand, (8) Kernprofil, (9) Kern

sen Reifen übernimmt der Reifenwulst außerdem die Abdichtung des eingeschlossenen Luftvolumens gegenüber der Umgebung.

Der eigentliche Festigkeitsträger eines Reifens ist der Gewebeunterbau oder die Karkasse. Die Karkasse besteht aus einer oder mehreren Gewebelagen, die am Kern verankert sind.

Beim Radialreifen haben die Kordfäden einen Winkel von etwa 90° zur Laufrichtung. Die für die Funktion dieses Reifens notwendige Steifigkeit wird durch die zusätzliche auf der Karkasse liegende Gürtelkonstruktion erreicht.

Der Laufstreifen umgibt die Karkasse an ihrem äußeren Umfang und muss die zwischen Kraftfahrzeug und Fahrbahn auftretenden Kräfte übertragen. Die Gummimischung und die Profilierung des Laufstreifens werden nach den geforderten Eigenschaften ausgelegt. Die abriebfeste Seitenwand schützt die Gewebelagen vor äußeren Einflüssen.

Das Profil der Lauffläche kann sehr unterschiedlich gestaltet werden und hängt stark vom vorgesehenen Einsatz ab. Für Winterreifen zum Beispiel hat sich in den letzten Jahrzehnten eine deutliche Wandlung vom grobstolligen Klotzprofil hin zum weichen Hochlamellenprofil vollzogen (Abb. 7.72).

### 7.3.3 Anforderungen an Reifen

Im System Fahrzeug–Straße nimmt der Reifen eine hervorragende Rolle ein: Als Bindeglied zwischen Fahrbahn und Fahrzeug überträgt er alle Kräfte und Momente, sein Übertragungsverhalten geht deutlich in Fahrverhalten, Komfort und Sicherheit des Gesamtfahrzeugs ein (▶ Abschn. 7.1).

Die dynamischen Eigenschaften eines Fahrzeuges werden damit maßgeblich durch das Reifenverhalten beeinflusst. Radlast, Federung, Dämpfung, Achskinematik und Fahrwerkselastizitäten, Motorleistung und Geschwindigkeit sowie die Einsatzart haben einen großen Einfluss auf die Auslegung von Reifen. (Abb. 7.73).

Beim pneumatischen Reifen ist das unter Überdruck eingeschlossene Gas oder Gasgemisch das tragende Element; die Hülle bestimmt nach Form, konstruktiver Auslegung und Materialeinsatz weitgehend die Gebrauchseigenschaften des Reifens. An die Gebrauchseigenschaften werden von der Kraftfahrzeugindustrie, dem Endverbraucher und

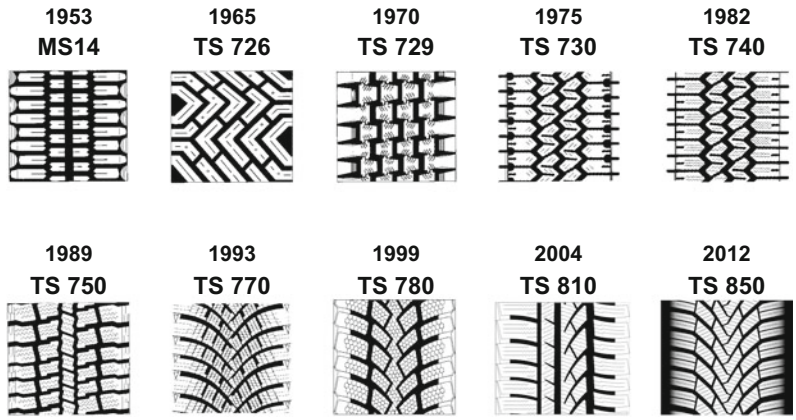



**Abb. 7.72** Entwicklung der Profile von Winterreifen; vom groben Klotz- zum Hochlamellenprofil

in zunehmendem Maße vom Gesetzgeber Anforderungen gestellt, die nicht immer miteinander in idealer Weise vereinbar sind. Widerstreitende Anforderungen führen unabdingbar zu Zielkonflikten, die die Reifenindustrie ständig zu lösen hat.

Reifen werden im harten Wettbewerb nach den Pflichtenheften der Fahrzeugindustrie und eigenen ehrgeizigen Vorgaben stetig weiterentwickelt. So stellen die heutigen im Markt befindlichen Serienreifen einen weitgehend ausgewogenen Kompromiss dar, der allen Belangen der Fahrsicherheit, des Fahrkomforts, des Lenkverhaltens, der Fahrstabilität und der Wirtschaftlichkeit, aber auch den verstärkten Forderungen des Umweltschutzes in einer für den Verbraucher vernünftigen Weise Rechnung trägt.

### 7.3.3.1 Gebrauchseigenschaften

Die Entwicklung von Pkw- und Lkw-Reifen wird entscheidend durch die sich ständig ändernden und darüber hinaus wachsenden Anforderungen der

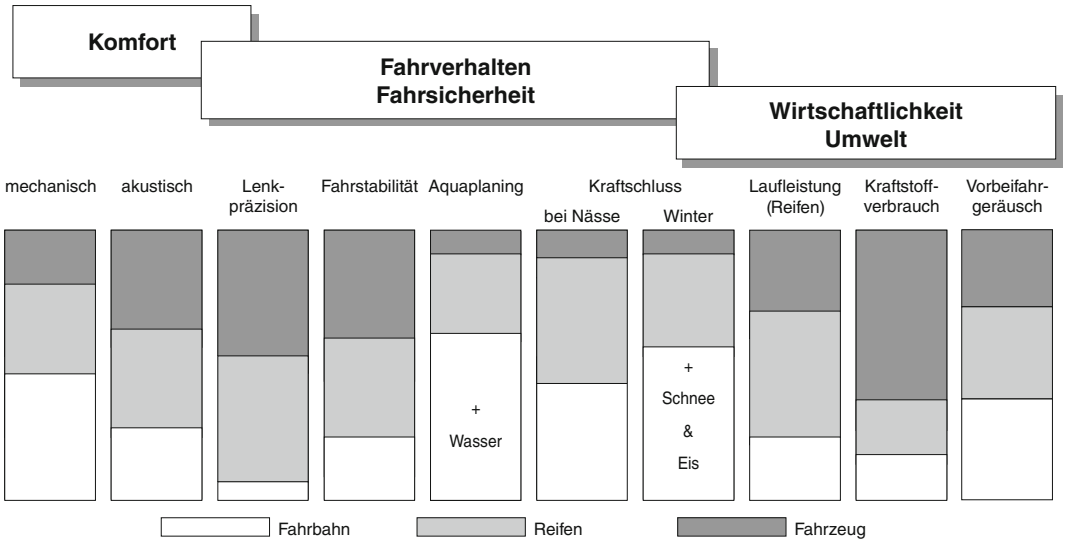



**Abb. 7.73** Einfluss von Fahrbahn, Reifen und Fahrzeug auf Gebrauchseigenschaften

**Tabelle 7.2** Einfluss der Reifenparameter auf die Gebrauchseigenschaften

| Einfluss \ Eigenschaft | Nassgriff | Geräusch | Laufleistung | Rollwiderstand | Aquaplaning | Qualität |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Form, Kontur | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Profil | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Material | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Konstruktion | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Herstellungsprozess | | | | ● | | ● |

Pkw- und Lkw-Hersteller an die Kraftfahrzeuge beeinflusst.

Tab.7.2 zeigt die typischen Abhängigkeiten von Einflussgrößen der Reifenauslegung auf die Gebrauchseigenschaften:

Die Gebrauchseigenschaften beschreiben für den Verbraucher die einzelnen Eigenschaften der Reifen und sind immer in Verbindung mit Fahrzeug, Straße und Fahrer zu sehen. Zur Ermittlung der Gebrauchseigenschaften werden Versuche durchgeführt, die sowohl nach subjektiven als auch nach objektiven Kriterien bewertet werden.

Gebrauchseigenschaften dienen zur Bewertung in Hinblick auf die jeweilige Kundenerwartung. Da sich die Rahmenbedingungen im Laufe der Zeit ändern, unterliegen auch die Anforderungen an die Erfüllung bestimmter Gebrauchseigenschaften einem zeitlichen Wandel.

Die Entwicklung im Automobilbau in den letzten Jahrzehnten hat in Verbindung mit dem Ausbau des Straßennetzes dazu geführt, dass die Anforderungen an Pkw- und Lkw-Reifen gestiegen sind. Dieser Anstieg wird auch deutlich an der Zahl der Gebrauchseigenschaften, die heute im Rahmen technischer Reifenfreigaben geprüft werden müssen.

1960 gab es für Pkw-Reifen im Wesentlichen 10 Kriterien, die am Fahrzeug oder auf dem Prüfstand untersucht und bewertet wurden. Es waren z. T. sehr spezielle Einzelmerkmale, wie z. B. Schienenführigkeit (die Fähigkeit des Reifens, das Fahrzeug ohne plötzlichen Seitenversatz aus den Straßenbahnschienen hinauszuleiten, ein bei den damals gebräuchlichen Diagonalreifen wichtiges Kriterium),

| **Fahrkomfort** | **Lenkverhalten** | **Fahrstabilität** |
|---|---|---|
| Federungskomfort | ... im 0°-Bereich | Geradeausstabilität |
| Geräuschkomfort | ... im Proportionalbereich | Kurvenstabilität |
| Laufruhe | ... im Grenzbereich | Bremsen in Kurven |
| | Lenkpräzision | |
| **Kraftschluss** | **Haltbarkeit** | **Wirtschaftlichkeit/Umwelt** |
| Traktion | Strukturelle Dauerhaltbarkeit | Lebenserwartung |
| Bremsweg | Hochgeschwindigkeitstüchtigkeit | Rollwiderstand |
| Rundenzeiten | Platzdruck | Runderneuerungsfähigkeit |
| Aquaplaning | Durchschlagsfestigkeit | Vorbeifahrgeräusch |

**Abb. 7.74** Übersicht über Bewertungskriterien von Pkw-Reifen

z. T. aber auch sehr pauschale Merkmale wie Kurvenfahrt.

In den Jahren danach erwies sich eine feinere Aufteilung des Beurteilungsgitters als sinnvoll, um von Seiten der Reifenhersteller eine gezielte Optimierung der Reifen, auch im Hinblick auf besondere fahrzeugspezifische Probleme, durchführen zu können. Parallel dazu führte der Übergang vom Diagonal- zum Radialreifen zum Wegfall einiger Beurteilungskriterien, die für Radialreifen nicht relevant waren.

Heute hat sich ein Beurteilungskatalog als sinnvoll herausgestellt, der mehr als 40 einzelne Beurteilungskriterien enthält, die zu einer Reihe grundsätzlicher Zielkonflikten führen. Eine Übersicht liefert Abb.7.74. Die nachfolgend aufgeführten z. T. allgemein bekannten, fahrdynamischen Beurteilungskriterien (► Abschn.7.5) werden dabei unter rein reifenspezifischen Gesichtspunkten betrachtet, d. h. es wird nur der Einfluss des Reifens auf das Verhalten des Gesamtfahrzeugs untersucht.

Die subjektive Bewertung eines Kraftfahrzeugs stellt auch heute immer noch den Maßstab dar, ob ein Reifen für ein bestimmtes Kraftfahrzeug geeignet ist. Trotzdem werden große Anstrengungen unternommen, die Bewertung mehr objektiv vorzunehmen.

Der Vorteil der objektiven Bewertung ist die größere Reproduzierbarkeit und die bessere Erklärbarkeit der Ergebnisse durch eine physikalische Be-

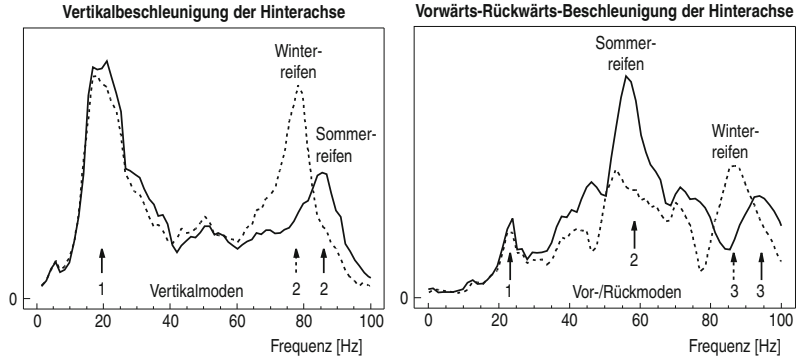



**Abb. 7.75** Vergleich Komfort von Winter- und Sommerreifen bei Überfahrt einer Schlagleiste (Zahlen im Bild = Eigenfrequenzen)

7

schreibung der Phänomene. Kennt man die Physik hinter einer Reifeneigenschaft, kann eine gezielte Optimierung bezüglich der gewünschten Eigenschaft erfolgen.

Für den Bereich Fahrkomfort wurde durch Messung der Vertikalbeschleunigung an der Hinterachse eines Pkw bei der Überfahrt einer Schlagleiste ein Zusammenhang zwischen der subjektiven Beurteilung und den Spitzenwerten der Beschleunigung im Frequenzbereich bis 100 Hz gefunden (Abb. 7.75).

Der Winterreifen regt bei der vertikalen Beschleunigung die Achse mit seiner Vertikalmode (ca. 75 Hz) wesentlich stärker an als der Sommerreifen, dessen Frequenz um ca. 10 Hz höher liegt. Diese fahrzeugspezifische Anregung kann im Fahrzeug als Dröhnen wahrgenommen werden. Beim Sommerreifen ergibt sich eine stärkere Anregung der zweiten Vorwärts-/Rückwärtsmode bei ca. 55 Hz.

Durch Kenntnis der Eigenmoden der Reifen und der gemessenen Beschleunigungsfrequenzspektren am Fahrzeug lassen sich die vorhandenen Frequenzspitzen erklären und die notwendigen konstruktiven Änderungen.

Auch beim Reifenfahrbahngeräusch ist die Wechselwirkung mit der Fahrbahn entscheidend. Abb. 7.76 zeigt, dass die Bandbreite der Geräuschentwicklung infolge unterschiedlicher Fahrbahnoberflächen größer ist als die Bandbreite durch Reifengrößen und Profilausführungen.

Zur Beurteilung des Fahrverhaltens im Proportionalbereich, d. h. bei Querbeschleunigungen bis zu 0,4 g, lassen sich zusätzlich zur subjektiven Beurteilung die Übertragungsfunktionen eines Fahrzeugs heranziehen, wobei die Übertragungsfunktionen durch unterschiedliche Fahrmanöver ermittelt werden können (Abb. 7.77). Günstig ist im Allgemeinen für eine gute subjektive Beurteilung:

- ein großer Frequenzbereich der Querbeschleunigung,
- eine große Gierdämpfung und
- eine kleine Phasenverschiebung.

Auf dem heutigen Entwicklungsstand haben Qualitätsreifen hohe Haltbarkeitsreserven und damit auch eine zunehmende Missbrauchsresistenz. Trotzdem sind Ausfälle durch Verletzungen und Betriebsfehler nicht ganz auszuschließen.

Eine eindeutige Analyse der „Schadensgeschichte“ von zerstörten Reifen ist problematisch. Reifen haben ein integrierendes Gedächtnis für die Folgen von Fehlbehandlungen. Dem Reifenfachmann gelingt ein Nachweis für einen längeren Einsatz mit Minderluftdruck anhand von Kriterien wie Wulstanscheuerungen und Innenseelenverfärbungen.

Die Wirtschaftlichkeit von Reifen betrifft weniger die Herstellung oder die Verwertung als vielmehr den Betrieb am Fahrzeug. Durch den Rollwiderstand der Reifen muss ständig vom Motor Arbeit zur Überwindung aufgebracht werden. Je weniger Rollwiderstand die Reifen besitzen, desto geringer ist der Kraftstoffverbrauch.

In Abb. 7.78 ist dieser Zusammenhang mit der Auswirkung auf die Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland für 1997 dargestellt, die aber

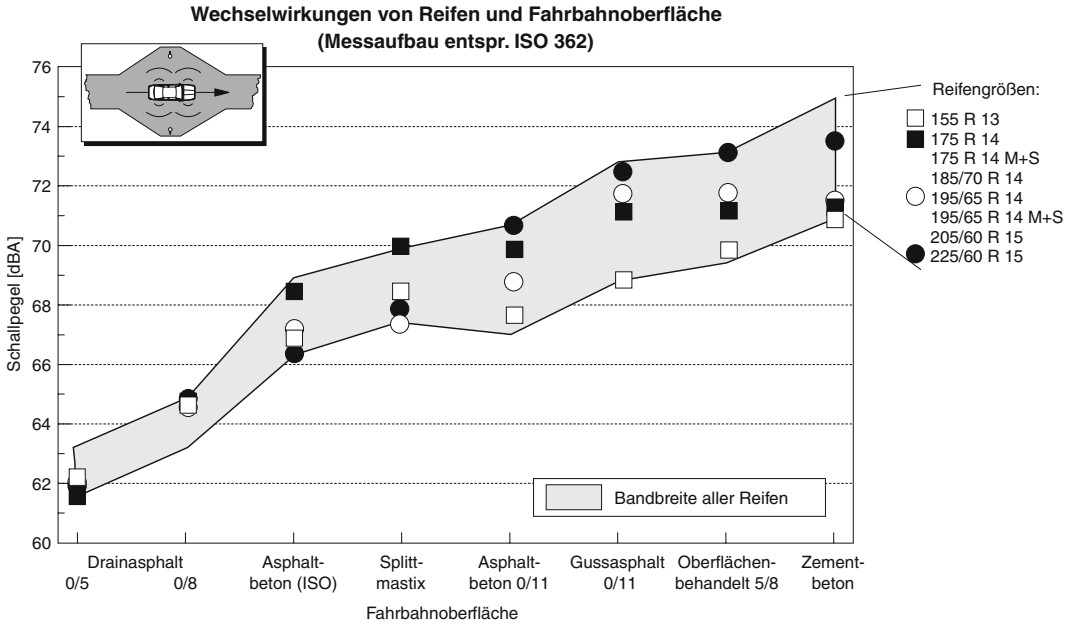



**Abb. 7.76** Schallpegel auf unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen

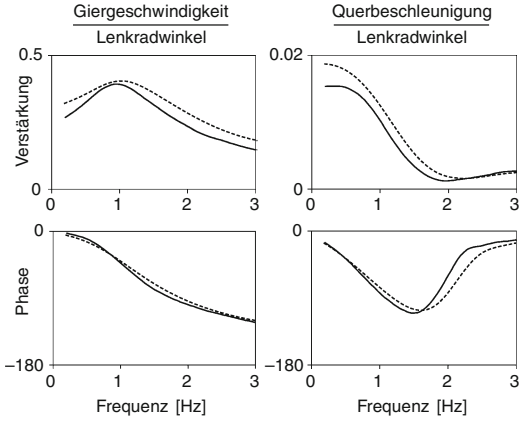



**Abb. 7.77** Übertragungsfunktionen nach Verstärkung und Phase für einen typischen Pkw mit einem subjektiv sehr guten (*gestrichelte Linie*) und mäßig guten (*durchgezogene Linie*) Reifensatz

weitgehend heute immer noch Bestand hat. Durch eine Reduzierung des Reifenrollwiderstandes um 30 % lässt sich der Kraftstoffverbrauch um ca. 4,8 % senken, was einer Einsparung von ca. 60 l pro Reifen während des Reifenlebens entspricht. Volkswirtschaftlich gerechnet ließe sich durch eine Rollwiderstandsreduzierung in dieser Größenordnung eine Kraftstoffmenge von über 2,5 Mrd. Liter Kraftstoff einsparen.

Runderneuerte Reifen haben gegenüber Neureifen meist einen Nachteil im Rollwiderstand bis zu 10 %. Demzufolge ist die Runderneuerung aus Energiebilanzgründen fraglich, da meist eine größere Menge an Kraftstoff im Betrieb verbraucht wird als durch die Wiederverwendung der Karkasse eingespart wird.

Der Reifen-Rollwiderstand wird weiterhin von seinen Einsatzbedingungen am Fahrzeug mitbestimmt. Während die reine Reifenmessung nur bei Geradeausfahrt ohne Sturz durchgeführt wird, kommen beim Einsatz am Fahrzeug Vorspur oder bei Kurvenfahrt Schräglaufwinkel und Sturz hinzu.

Reifenmessungen zeigen, dass ein Sturzwert bis −2° den Rollwiderstand nur gering (0–2 % je nach Schräglaufwinkel), ein Schräglaufwinkel von bereits 1° den Rollwiderstand bis zu 30 % erhöht. Die Erhöhung ist mit zunehmendem Schräglaufwinkel progressiv.

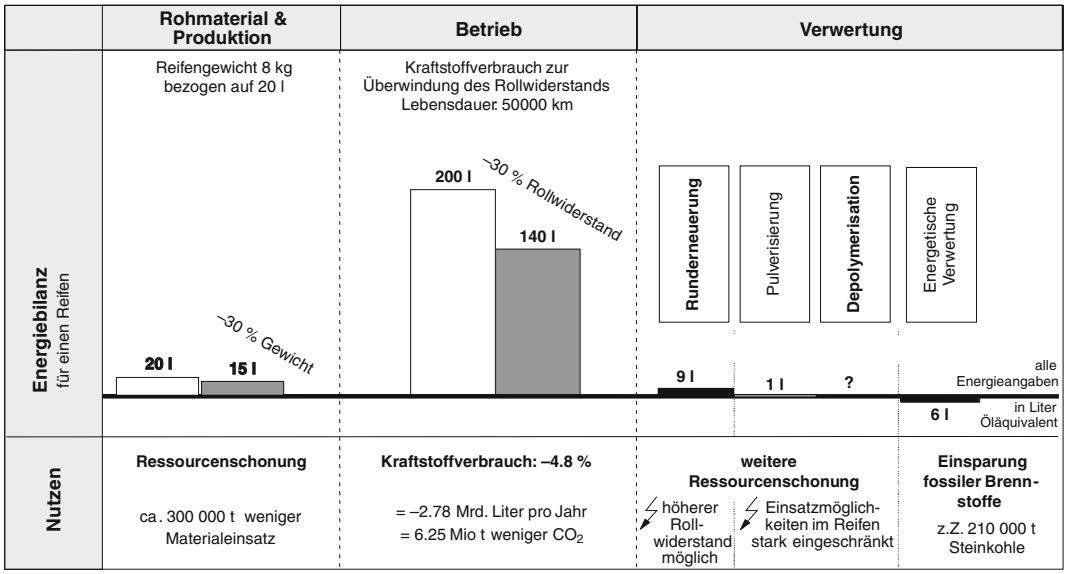



**Abb. 7.78** Energiebilanz von der Produktion über Betrieb bis zur Verwertung von Reifen (BR Deutschland, 1997)

### 7.3.3.2 Gesetzliche Anforderungen

Die gesetzlichen Anforderungen an Reifen beziehen sich auf die Reifenbeschriftung mit den entsprechenden Kennzeichnungen sowie dem Genehmigungszeichen und der Genehmigungsnummer nach ECE-Regelung 30. Die Reifen tragen in einem Kreis ein E und die Nummer des Genehmigungslandes sowie nachgestellt eine mehrstellige Genehmigungsnummer, z. B.:

E12 028355

### 7.3.3.3 Reifen und Räder, Normung

Die Normung von Reifen und Rädern ist in der ETRTO und der DIN festgeschrieben. Als Beispiel die Bezeichnung der Reifengröße für einen Reifen der Größe **195/65 R 15 91 T**:

**195** – Reifennennbreite (mm),

**65** – Nenn-Querschnittsverhältnis (%),

**R** – Symbol für Radialreifen (Gürtelreifen),

**15** – Felgendurchmesser (Zoll-Code),

**91** – Tragfähigkeitskennzahl oder „Load Index" („91" bedeutet, dass der Reifen mit maximal 615 kg belastet werden darf),

**T** – Geschwindigkeitssymbol für zulässige Höchstgeschwindigkeit (T = 190 km/h).

Weitere Kennzeichnungen auf der Seitenwand:

**TUBELESS** – schlauchlos TUBE TYPE Reifen dürfen nur mit Schlauch montiert werden,

**DOT** – Department of Transportation (USA-Verkehrsministerium),

**0302** – verschlüsseltes Produktionsdatum (03 = 3. Woche, 02 = Jahr 2002) (bis zum 31.12.1999 stand nach der dritten Ziffer ein Dreieck),

**TWI** – Kennzeichnung des Profilabnutzungsanzeigers (TWI = Tread Wear Indicator) Über den Umfang gleichmäßig verteilte Querstege in den Längsprofilrillen, die bei 1,6 mm Restprofil auftauchen,

**Reinforced** – bei verstärkten Reifen mit erhöhter Tragfähigkeit

**M+S** – bei Winterreifen.

### 7.3.3.4 Reifenkennzeichnung, EU-Label

Ab November 2012 ist der Verkauf von Reifen mit einem Label in der EU mit der Verordnung Nr. 1222/2009 vorgeschrieben (Abb. 7.79). Das Label dient zur Steigerung der Sicherheit sowie der wirtschaftlichen und ökologischen Effizienz im Straßenverkehr. Klassifiziert werden die Reifeneigenschaften Rollwiderstand, Nassgriff und Geräusch.

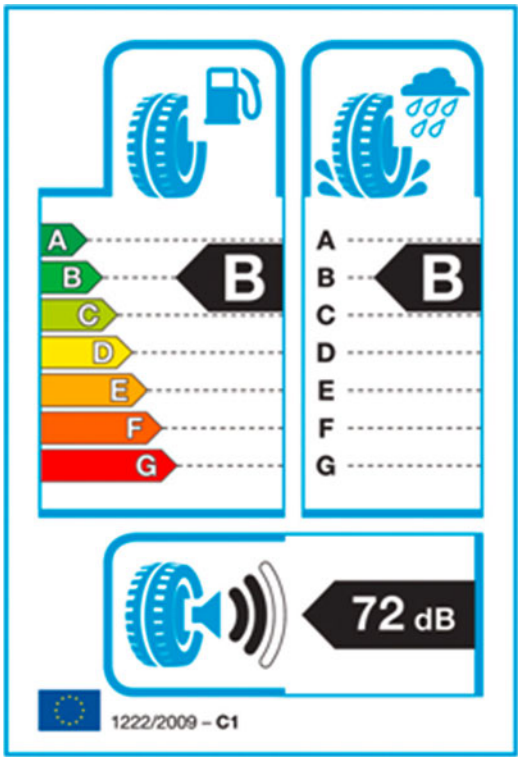



**Abb. 7.79** EU Label für Reifen

Für die ersten beiden Eigenschaften gibt es zur Bewertung die Klassen A–G, für das Geräusch 1–3 gefüllte Schallwellensymbole. Die Messungen der Reifeneigenschaften sind gemäß Regelung Nr. 117 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen (UN/ECE) durchzuführen.

Für normale Pkw-Reifen (Reifenklasse C1) werden die Bewertungen wie folgt festgelegt:

**Rollwiderstand** Die Energieeffizienz eines Reifens wird gemessen über den Rollwiderstand und wird klassifiziert durch den Rollwiderstandsbeiwert (Cr). Er ist definiert als Rollwiderstandskraft dividiert durch die Radlast in kg/t (Tab. 7.3).

**Nassgriff** Die Nasshaftung wird durch den Vergleich mit einem vorgegebenen Referenzreifen auf nasser Straße ermittelt. Gemessen wird der Nasshaftungskennwert G, der die Nasshaftung relativ zum Referenzreifen beschreibt (Tab. 7.4).

**Tabelle 7.3** Energieeffizienzklassen

| Energieeffizienzklasse für Reifenklasse C1 | Cr in kg/t |
|---|---|
| A | $Cr \leq 6{,}5$ |
| B | $6{,}6 \leq Cr \leq 7{,}7$ |
| C | $7{,}8 \leq Cr \leq 9{,}0$ |
| D | leer |
| E | $9{,}1 \leq Cr \leq 10{,}5$ |
| F | $10{,}6 \leq Cr \leq 12{,}0$ |
| G | $Cr \geq 12{,}1$ |

**Tabelle 7.4** Nasshaftungsklassen

| Nasshaftungsklasse für Reifenklasse C1 | G Relativwert zum Referenzreifen |
|---|---|
| A | $1{,}55 \leq G$ |
| B | $1{,}40 \leq G \leq 1{,}54$ |
| C | $1{,}25 \leq G \leq 1{,}39$ |
| D | leer |
| E | $1{,}10 \leq G \leq 1{,}24$ |
| F | $G \leq 1{,}09$ |
| G | leer |

**Tabelle 7.5** Geräuschwertsymbole

| Geräuschsymbol mit | Geräuschwert N in dB(A) |
|---|---|
| 1 gefüllte Schallwelle | $N \leq LV\text{-}3$ |
| 2 gefüllte Schallwellen | $LV\text{-}3 < N < LV$ |
| 3 gefüllte Schallwellen | $N > LV$ |

**Geräusch** Die Geräuschangabe auf dem Label bezieht sich auf das Vorbeifahrgeräusch bei 80 km/h. Das Geräuschsymbol mit 1 bis 3 gefüllten Schallwellensymbolen bezieht sich auf die Geräuschgrenzwerte (LV = Limit Value ab Nov. 2010) (Tab. 7.5).

**Tabelle 7.6** Geräuschgrenzwerte

| Nennbreite in mm | Grenzwert (LV) in dB(A) |
|---|---|
| ≤ 185 | 70 |
| > 185 ≤ 215 | 71 |
| > 215 ≤ 245 | 71 |
| > 245 ≤ 275 | 72 |
| > 275 | 74 |



Bis Nov. 2016 dürfen weiterhin Reifen verkauft werden, die nur die Grenzwerte vor Nov. 2010 einhalten. Diese werden mit 3 gefüllten Schallwellen gekennzeichnet.

Der Geräuschgrenzwert (LV) ist abhängig von der Nennbreite des Reifens. Für normale Pkw-Reifen der Klasse C1 sind die Grenzwerte wie folgt festgelegt (Tab.7.6).

Für M+S Reifen, Extra-Load (XL)-Reifen oder verstärkte Reifen, oder einer Kombination dieser Reifeneigenschaften, erhöhen sich die genannten Grenzwerte um 1 dB(A).

## 7.3.4 Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn

Der Reifen muss nicht nur bei den unterschiedlichsten Fahrbahnbelägen (Asphalt, Beton, Pflaster), sondern auch bei allen Witterungsbedingungen und Geschwindigkeiten des Fahrzeugs die Kraftübertragung zur Straße sicherstellen.

Damit bedeutet das Kraftschlussverhalten einen Schwerpunkt für den Reifenentwickler. Als Einflussgrößen auf das Kraftschlussverhalten werden vor allem Reifenart und Reifenzustand, Fahrbahnart und Fahrbahnzustand, Betriebsbedingungen und Betriebsfehler berücksichtigt.

### 7.3.4.1 Tragverhalten

Das Tragverhalten ($F_z$) einer idealen Membran ist beschrieben durch Innendruck ($p_i$) · Kontaktfläche ($A$) (Abb.7.80). Beim Reifen kommt durch die steife Schalenstruktur des Reifens noch ein zusätzlicher Strukturtraganteil ($k$) von ca. 10–15 % hinzu.

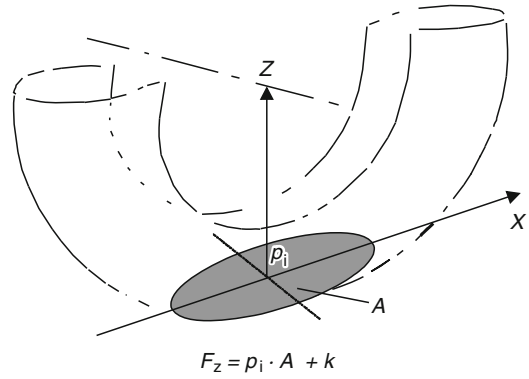



**Abb. 7.80** Tragverhalten eines Luftreifens

Bei Reifen mit Notlaufeigenschaften ist $k$ deutlich größer (siehe ► Abschn.7.3.5.6).

Für die Fahrwerksauslegung ist die vertikale oder radiale Reifensteifigkeit ein wichtiger Parameter.

Abhängig von Reifenbreite und Querschnittsverhältnis nimmt die Steifigkeit mit zunehmender Reifenbreite und abnehmendem Querschnittsverhältnis in der Regel zu (Abb.7.81).

### 7.3.4.2 Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften

Das Kraftschlussverhalten von Reifen wird im Wesentlichen von den Reibpartnern Gummi–Fahrbahnoberfläche bestimmt.

Der Kraftschlussbeiwert ist nicht konstant sondern hängt von der Reibpaarung Laufflächenmischung und Straßenoberfläche, dem Kontaktdruck, der Gleitgeschwindigkeit sowie der Temperatur ab (Abb.7.82).

Im Allgemeinen gilt: Je niedriger der Kontaktdruck gehalten werden kann und je homogener die Druckverteilung innerhalb der Bodenaufstandsfläche ist, desto höher sind die übertragbaren Seiten- und Umfangskräfte. Bei höheren Schlupf- oder Gleitgeschwindigkeiten nehmen die Kraftschlussbeiwerte ab.

Je nach Einsatzgebiet entwickeln Gummimischungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen ihre höchsten Kraftschlusswerte. Bei einem Betrieb außerhalb dieses Temperaturbereichs sind die Werte deutlich kleiner. So werden häufig Win-

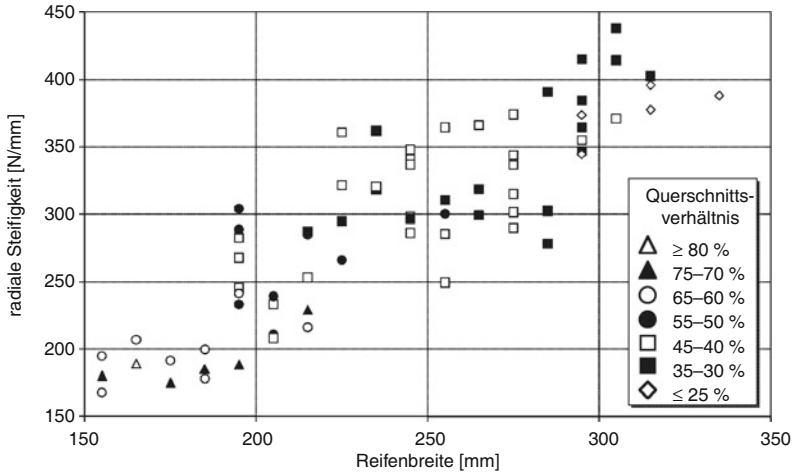



**Abb. 7.81** Radiale Reifensteifigkeit bei vorgeschriebenem Fahrzeugluftdruck gemessen mit unterschiedlichen Reifenausführungen in Abhängigkeit von Reifenbreite und Querschnittsverhältnis

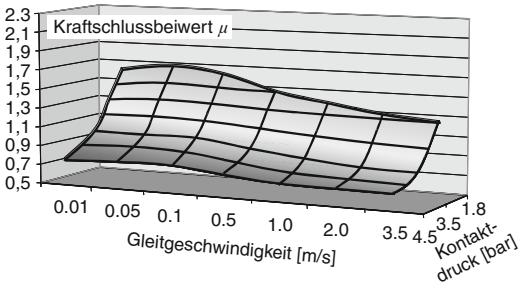



**Abb. 7.82** Labormessung des Kraftschlussbeiwerts $\mu$ abhängig vom Kontaktdruck und der Gleitgeschwindigkeit

terreifen für einen Temperaturbereich von −20 bis 10 °C, Sommerreifen auf Korund-180 für eine typische Laufflächenmischung von 5 bis 40 °C ausgelegt. In diesen Temperaturbereichen haben sie den höchsten Kraftschluss.

Die Adhäsion bestimmt die übertragbaren Kräfte im Bereich kleiner Gleitgeschwindigkeiten (z. B. vorderer Bereich der Reifenaufstandsfläche beim ABS-Bremsen), die Hysterese im Bereich hoher Gleitgeschwindigkeiten (z. B. Blockierbremsen).

Der (Gummi-)Mischungsentwickler hat durchaus Möglichkeiten, seine Schwerpunkte auf den Kraftschluss im „Haft-“ oder „Gleitbereich“ zu legen, d. h. der beste „ABS-Reifen“ ist nicht notwendigerweise der beste „Blockierreifen“.

Das dynamische Verhalten des viskoelastischen Werkstoffs Gummi beschreibt ein komplexer Modul, der aus Speichermodul und Verlustmodul besteht ($E^* = E' + iE''$). Der Verlustbeiwert $\tan\delta$ als Verhältnis Verlustmodul zu Speichermodul ist ein Maß für die Energieverluste bei der Deformation des viskoelastischen Gummis. Als stark verkürzte Erklärung mag hier genügen, dass der Entwickler verschiedenen Temperaturbereichen der $\tan\delta$ Kurve auf Basis eines Temperatur-Frequenz-Äquivalentprinzips (WLF-Transformation) bestimmte typische Reifeneigenschaften zuordnen kann.

Physikalisch unterscheiden sich die in Abb. 7.83 gekennzeichneten Bereiche der $\tan\delta$-Kurve: Bereiche 1 und 2 sind relevant für das Bremsen auf nasser Fahrbahn, Bereich 1 vor allem für den quasi Haftbereich mit sehr kleinen Gleitgeschwindigkeiten im vorderen Bereich der Bodenaufstandsfläche (Vergleiche auch Abb. 7.85), Bereich 2 für die höheren Gleitgeschwindigkeiten im hinteren Teil der Aufstandsfläche oder beim Blockierbremsen. Bereich 3 ist relevant für den Rollwiderstand mit der zyklischen Gummideformation beim Rollen.

Dem Bereich 1 kann physikalisch eine adhäsions-unterstützte nanoskalige Hysteresereibung, Bereich 2 eine mesoskalige Hysteresereibung und Bereich 3 eine impulsförmige Gummideformation zugeordnet werden. Anschaulich: Je kleiner

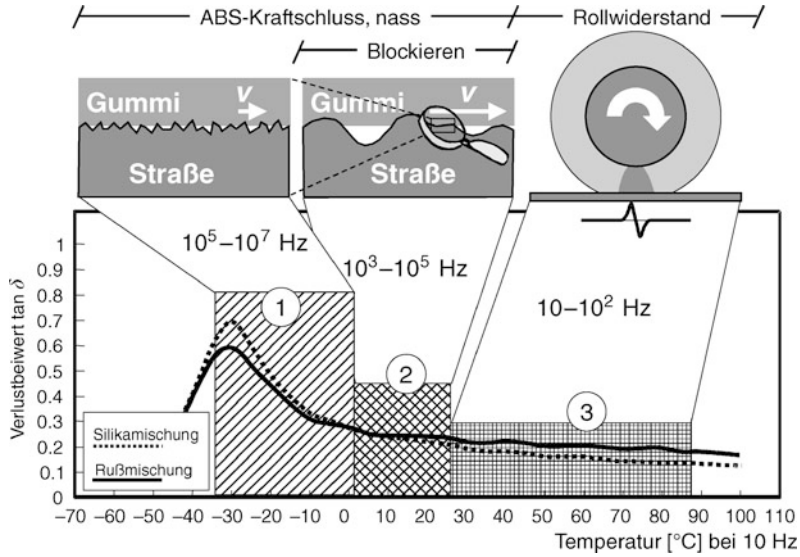



**Abb. 7.83** Typischer Verlauf des Verlustbeiwerts $\tan\delta$ über der Temperatur mit den relevanten Bereichen für Kraftschluss auf nasser Straße und Rollwiderstand für zwei Reifenmischungen (Ruß- und Silikamischung) und Umrechnung nach der WLF-Transformation (Proben aus Reifen, Messung bei 10 Hz mit konstanter Kraft)

die Rauigkeitsskala im Kontakt Reifen–Straße wird, desto höher ist die zugeordnete Frequenz.

Die Kompromisslage niedriger Kraftstoffverbrauch durch niedrigen Rollwiderstand ($\tan\delta$ klein im Bereich 3 bei 60 °C) bei kurzen Bremswegen ($\tan\delta$ groß in den Bereichen 2 und 3, d. h. kleiner ca. 20 °C) soll auf ein möglichst hohes Niveau gebracht werden. Wie aus Abb. 7.83 zu entnehmen, ist dies bei Silikamischungen gelungen.

### 7.3.4.3 Antreiben und Bremsen; Umfangskräfte

Im Abb. 7.84 wird beispielhaft ein Bremsvorgang ohne ABS dargestellt. Hier soll nicht auf Bremssysteme, sondern auf den Beitrag der Reifen eingegangen werden. Dargestellt ist der Kraftschlussbeiwert $\mu$, definiert als Quotient aus Umfangskraft und Normalkraft aufgetragen gegenüber dem Radschlupf beim Bremsen.

Allgemein wird der Schlupf $\lambda$ bei seitenkraftfreirollendem Rad definiert als

$$\lambda = \frac{R_{\mathrm{dyn}} \cdot \omega - v}{v}$$

mit $R_{\mathrm{dyn}}$ = dynamischer Reifenradius, $\omega$ = Raddrehzahl und $v$ = Fahrzeuggeschwindigkeit. Der

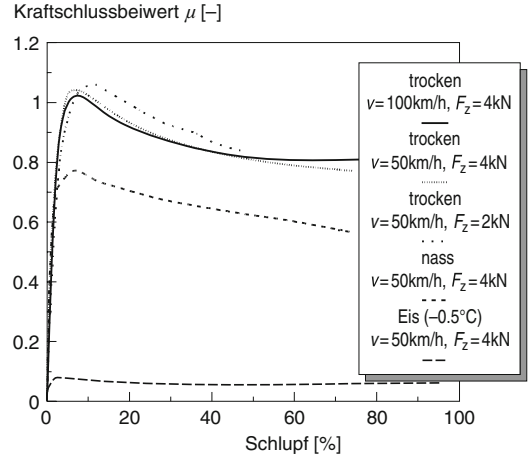



**Abb. 7.84** Kraftschlussbeiwert $\mu$ bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen und Einsatzbedingungen

dynamische Reifenradius ist der wirksame Abrollradius des Rades. Er kann nur indirekt aus der zurückgelegten Strecke und der Anzahl der Radumdrehungen bestimmt werden.

Um beim Antreiben bei durchdrehendem Rad nicht auf Werte über 1 bzw. 100 % zu kommen, wird der Schlupf häufig auch statt auf die Fahrzeugge-

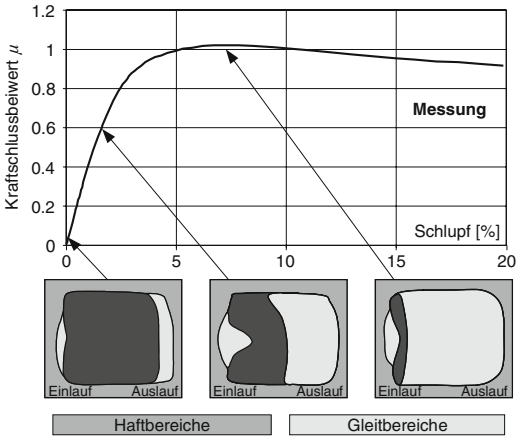



**Abb. 7.85** Haft- und Gleitzonen in der Bodenaufstandsfläche eines Reifens beim Bremsen bei unterschiedlichem Radschlupf aus FEM Berechnungen (*links*: Einlauf, *rechts*: Auslauf)

schwindigkeit auf die Radgeschwindigkeit $R_{dyn} \cdot \omega$ bezogen.

Abb. 7.84 macht deutlich, dass Reifen über den ganzen Bereich bis zum Schlupf 100 % gefordert werden können. Bemerkenswert ist, dass die Reifen beim Bremsen mit blockierten Rädern die gesamte kinetische Energie verzehren müssen, beim ABS-Bremsen wird der größte Anteil von der Bremsanlage „übernommen".

Mit Erhöhen des Bremsschlupfes bilden sich zunehmende Gleitbereiche in der Aufstandsfläche aus (Abb. 7.85). Vom Auslauf, jeweils auf der rechten Seite vergrößert sich die Gleitzone Richtung Einlauf. Kurz vor dem Erreichen des Schlupfmaximums befindet sich fast die gesamte Kontaktzone im Gleitzustand. Der im vorderen Teil der Bodenaufstandsfläche als Haftbereich gekennzeichnete Teil charakterisiert einen Bereich, in dem nur sehr kleine Gleitgeschwindigkeiten auftreten also makroskopisch quasi Haften vorliegt.

Neben der Abhängigkeit von der Fahrzeugauslegung und der Fahrgeschwindigkeit haben Reifenart und Fahrbahnrauigkeit einen bestimmenden Einfluss.

Die Darstellungen in Abb. 7.84 bis Abb. 7.86 stellen den erreichbaren Kraftschluss abhängig von den Einflussfaktoren Fahrbahn, Reifen und Betriebsbedingungen dar und damit Kenngrößen für erreichbare Antriebsbeschleunigungen und Bremswege.

Verschiedene Kombinationen von Reifenprofilen und Laufflächenmischungen können sehr unterschiedliche Traktion auf Schnee erzeugen (Abb. 7.86). Die Kombination zeigt, dass für die Wintereigenschaften vor allem die Laufflächenmischung mit Wintereigenschaften entscheidend ist,

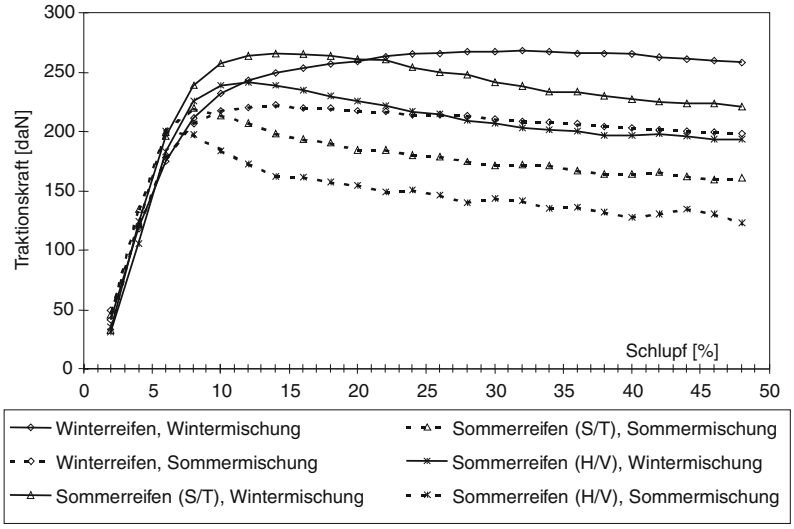



**Abb. 7.86** Beeinflussung des Kraftschlusspotenzials durch Reifen und Laufflächenmischungen bei Traktion auf Schnee

die bei tiefen Temperaturen elastischer bleibt gegenüber typischen Sommermischungen.

### 7.3.4.4 Schräglauf; Kräfte und Momente

Für die Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen sind die Größe und Charakteristik der zu übertragenden Kräfte von entscheidender Wichtigkeit für ein angenehmes und sicheres Fahren. Mit zunehmendem Schräglaufwinkel des Reifens wird die Seitenkraft radlastabhängig bis zu einem Maximalwert im Bereich zwischen 5° und 15° Schräglaufwinkel aufgebaut (◘ Abb.7.87).

Durch die Latschverformung und die beginnenden Gleitvorgänge in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht ein Rückstellmoment. Das Rückstellmoment versucht, das Rad und damit auch das Lenkrad wieder in die Ausgangsstellung zurückzudrehen. Es erreicht ein Maximum, wenn die Schräglaufkennlinie beginnt, den linearen Anstieg deutlich zu verlassen und kann bei weiter zunehmendem Schräglaufwinkel negativ werden.

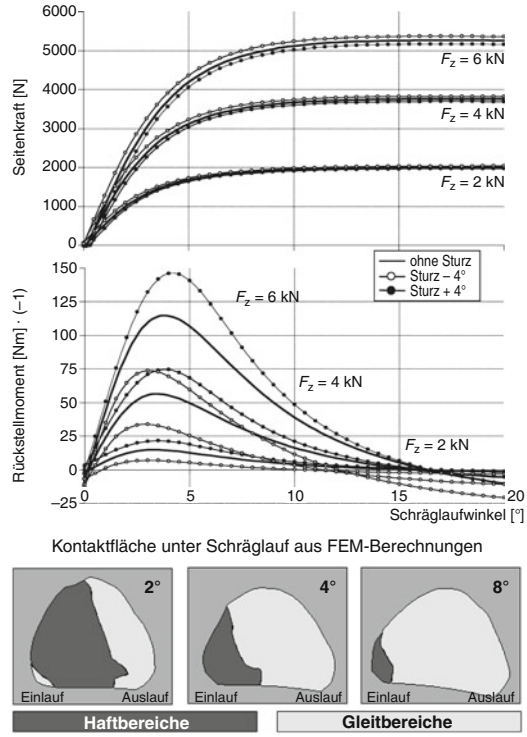
Zusätzlich dargestellt ist der Sturzeinfluss des Rades. So erhöht ein negativer Sturz die Seitenkraft bei Kurvenfahrt, vermindert aber gleichzeitig das Rückstellmoment. Ein positiver Sturz wirkt umgekehrt.

Eine kompakte Darstellung der Reifenkräfte ermöglicht das sog. Gough-Diagramm, (◘ Abb.7.88) für die Parameter Seitenkraft, Rückstellmoment, Reifennachlauf, Radlast und Schräglaufwinkel. Der Nachlauf ist definiert als der Abstand des Angriffspunkts der resultierenden Seitenkraft im Latsch zur Reifenmitte.

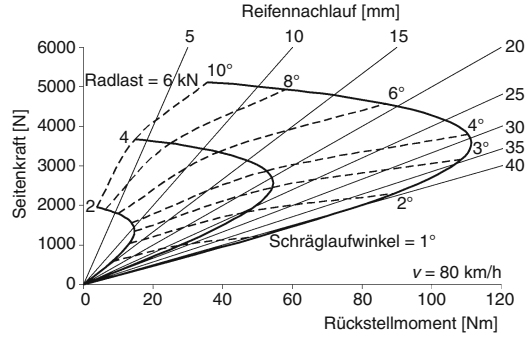
Das Gough-Diagramm ermöglicht die quasistatische Bestimmung der Seitenkräfte und Rückstellmomente an beiden Rädern einer Achse bei Kurvenfahrt.

Alle bisher betrachteten Kräfte und Momente gelten für den stationär rollenden Reifen. Bei einer Änderung der Betriebsbedingung des Reifens wie Schräglaufwinkel, Last, Sturz und Felgenquerverschiebung relativ zum Latsch dauert es eine gewisse Zeit, bis sich der neue stationäre Zustand eingestellt hat. Dies soll an zwei Beispielen für die Seiten- und Umfangskraft verdeutlicht werden:

Die Änderung der Seitenkräfte wird über das Einlaufverhalten des Reifens beschrieben und ist besonders für die Querdynamik des Fahrzeugs von




◘ **Abb. 7.87** Seitenkraft und Rückstellmoment über Schräglaufwinkel für einen typischen Pkw-Reifen bei unterschiedlichen Radlasten mit zugehörigen Kontaktbereichen bei 2°, 4° und 8° Schräglaufwinkel




◘ **Abb. 7.88** Gough-Diagramm für einen typischen Pkw-Reifen

Bedeutung. Der Reifen baut die Reaktionskräfte über eine bestimmte Abrollstrecke auf, deren Länge im Wesentlichen von den Reifenparametern Masse, Dämpfung, Reibung im Latsch und den Betriebszuständen abhängt.

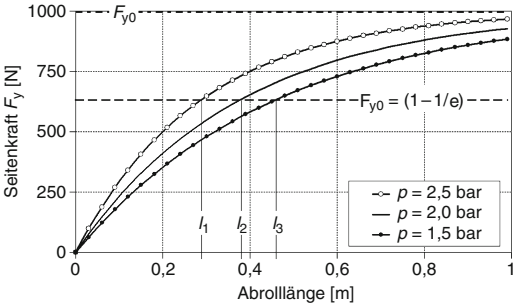



**Abb. 7.89** Aufbau der Seitenkraft mit zugehörigen Einlauflängen $l_x$ in Abhängigkeit vom Luftdruck $p$ bei einer Schräglaufwinkeländerung von 0° auf 1°

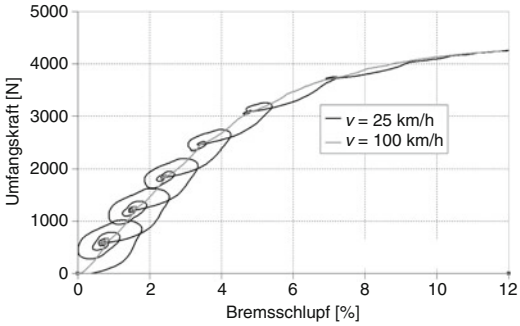



**Abb. 7.90** Dynamische Reifenantwort auf eine stufenweise Erhöhung der Bremskraft

Die entsprechende Kenngröße ist die Relaxations- oder Einlauflänge; sie ist definiert als die Wegstrecke, bei der die Seitenkraft $F_y = F_{y_0} \cdot (1 - 1/\mathrm{e})$ erreicht (Abb.7.89). Für Pkw-Reifen liegen typische Einlauflängen zwischen 0,2 und 0,7 m.

Die Einlauflänge $l$ kann auch über

$$l = C_\alpha / C_y$$

mit der Schräglaufsteife $C_\alpha$ und der Quersteifigkeit $C_y$ abgeschätzt werden.

Wird z. B. an einem freirollenden Rad der Schräglaufwinkel schnell genug verstellt, folgen Seitenkraft und Rückstellmoment wegverzögert. Die eindeutige Zuordnung von Schräglaufwinkel, Seitenkraft und Rückstellmoment geht mit wachsender Lenkfrequenz verloren. Zusätzliche Radlastschwankungen im niederfrequenten Bereich führen zu weiteren dynamischen Einlaufvorgängen. So können bei Kurvenfahrt durch langwellige Straßenunebenheiten über den Reifen Kräfte und Momente in die Lenkung eingeleitet werden, die vom Fahrer kompensiert werden müssen.

Die ganze Komplexität des Reifenverhaltens kann dann nicht mehr mit einfachen Gleichungen sondern nur noch mit dynamischen Reifenmodellen beschrieben werden.

Grundsätzlich gibt es Einlauflängen für alle Kraftrichtungen. Bei periodischen Änderungen der Betriebsbedingungen ergibt sich ein Phasengang. Dazu kommt die dynamische Antwort des schwingungsfähigen Systems im Zeitbereich.

In Abb.7.90 ist die Umfangskraft-Bremsschlupfkennlinie für zwei Geschwindigkeiten dargestellt. Beim Aufbringen eines Bremsimpulses nimmt zunächst der Schlupf zu, bevor die Kraft aufgebaut wird. Es bildet sich eine Reihe von Konvergenzpunkten, die den stationären Kurvenverlauf kennzeichnet. In diesem Falle wird das Antwortverhalten des Reifens auf die Änderung des Bremsmoments bestimmt von der Reifendynamik und der Einlauflänge in Umfangsrichtung.

### 7.3.4.5 Reifen unter Quer- und Längsschlupf

Hier ist neben der Frage des Kraftschlusses insbesondere auch die Reifencharakteristik für die Beherrschbarkeit eines Fahrzeuges im Grenzbereich interessant. Sportlich geübte Fahrer nutzen einen höheren, schmalen Grenzbereich für höhere Kurvengeschwindigkeiten, für den Normalfahrer ist ein breiter Grenzbereich – in den er ungeübt nur selten in Grenzsituationen kommt – eine Chance.

Zunächst soll Abb.7.91 die Geschwindigkeits- und Schlupfverhältnisse am rollenden Rad unter Schräglauf verdeutlichen.

Der Reifen kann sein maximales Kraftschlusspotenzial jeweils nur in einer Richtung anbieten (Abb.7.92).

Da die Kraftschlussmaxima in Umfangsrichtung und Querrichtung bis zu einem bestimmten Grade unterschiedlich sind, wird der verallgemeinernd angesetzte (Kamm'sche) Kraftschlusskreis zu einer Ellipse.

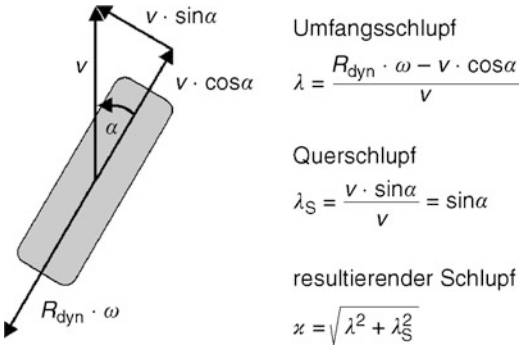



**Abb. 7.91** Geschwindigkeits- und Schlupfverhältnisse am rollenden Rad unter Schräglauf ($R_{dyn}$ = dynamischer Reifenradius, $\omega$ = Raddrehzahl, $\alpha$ = Schräglaufwinkel und $v$ = Fahrzeuggeschwindigkeit)

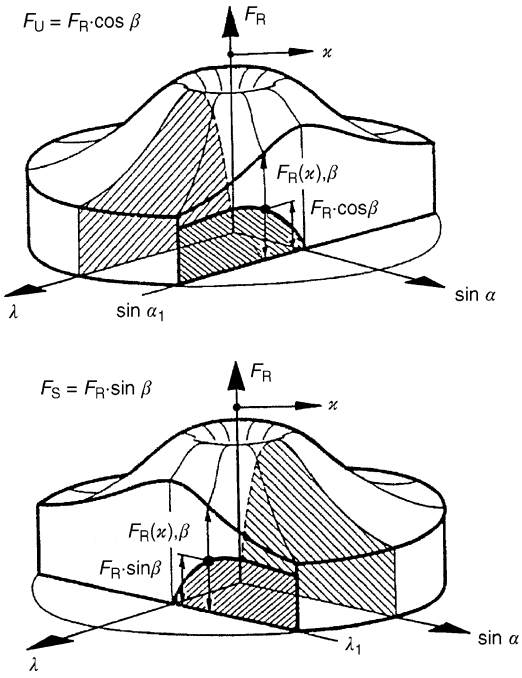



**Abb. 7.92** „Reibungskuchen" nach Prof. Weber als eine allgemeine Darstellung für die resultierenden Führungskräfte am Reifen ($F_U$ = Umfangskraft, $F_S$ = Seitenkraft, $F_R$ = Reibkraft, $\chi$ = resultierender Schlupf, $\alpha$ = Schräglaufwinkel, $\alpha_1$ = beliebiger Schräglaufwinkel $\neq 0$, $\lambda$ = Längsschlupf, $\lambda_1$ = beliebiger Längsschlupf $\neq 0$, $\beta$ = Winkel der Richtung der Reibkraft im Kamm'schen Kreis)

Für verschiedene Schräglaufwinkel ist das Verhältnis zwischen Seiten- und Umfangskraft in Abb. 7.93 dargestellt.

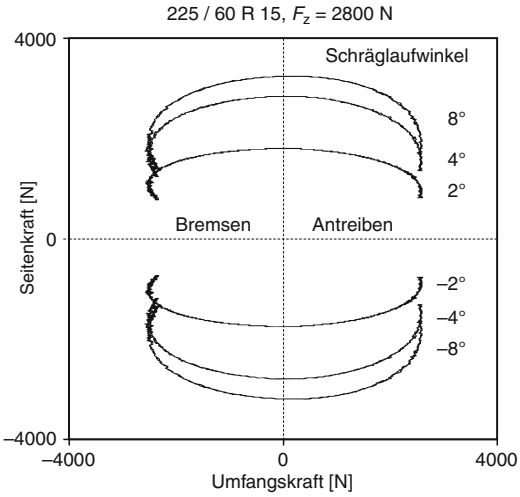



**Abb. 7.93** Kraftschlusspotenzial bei kombinierter Reibkraft durch Seiten- und Umfangskraft

### 7.3.4.6 Reifengleichförmigkeit

**Strukturseitenkraft und Konizität** Reifen laufen ohne Führung durch die Radaufhängung aufgrund ihres Schichtaufbaus der Festigkeitsträger nicht geradeaus. Jeder Reifen besitzt konstante Seitenkräfte, die ein Abweichen von der idealen Gerade bewirken. Diese Kräfte setzen sich zusammen aus der drehrichtungsabhängigen Strukturseitenkraft $F_{SS}$ und der drehrichtungsunabhängigen Konizität $F_K$.

Die Strukturseitenkraft ergibt sich aus der inneren Struktur des Reifens, die Konizitätskraft aus der Reifengeometrie.

Durch Wenden eines oder mehrerer Reifen auf der Felge lassen sich in der Praxis Reklamationen wegen „einseitigen Ziehens" vielfach beseitigen (Abb. 7.94).

***Reifenrundlauf*** Eine Reifenungleichförmigkeit beschreibt die Abweichung des Reifens von einem idealen Rotationskörper. Die geometrischen Abweichungen werden durch Höhen- und Seitenschläge dargestellt. Wichtiger sind die Kraftschwankungen des eingefedert rollenden Rades in radialer, lateraler und tangentialer Richtung. Sie stellen die Summenwirkung aus der Variation von Geometrie und Steifigkeit über dem Umfang dar. Im Allgemeinen werden für diese Größen Grenzwerte festgelegt, die nicht überschritten werden dürfen, damit im Fahrzeug diese Störungen nicht spürbar werden.

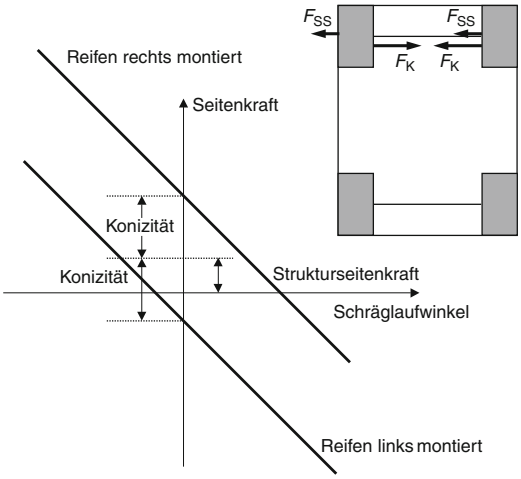



**Abb. 7.94** Einfluss der Drehrichtung auf die resultierenden Kräfte von Strukturseitenkraft $F_{SS}$ und Konizität $F_K$

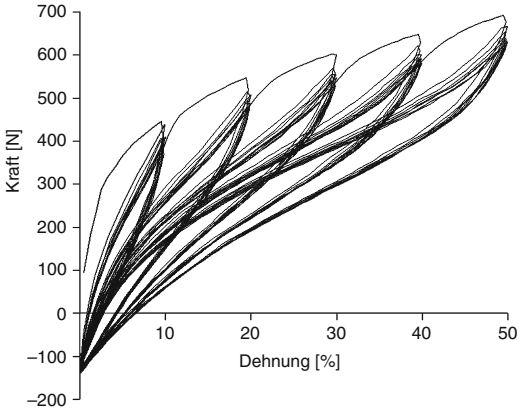



**Abb. 7.95** Experimentelle Untersuchung des Dehnungsverhaltens einer rußgefüllten Gummiprobe bei zyklischer Belastung über 5 Laststufen

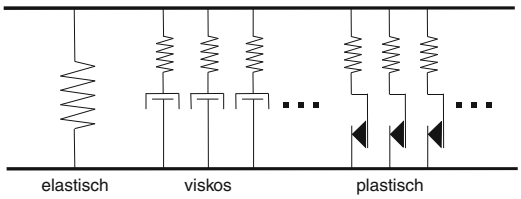



**Abb. 7.96** Ersatzmodell für Gummiverhalten

## 7.3.5 Reifen als integraler Baustein des Gesamtsystems Fahrzeug

Die Reifenentwicklung wird zunehmend innerhalb des Gesamtsystems Fahrzeug bzw. von Subsystemen unter Einsatz von Simulationswerkzeugen durchgeführt. Ziel ist es, den virtuellen Reifen am virtuellen Fahrzeug im Entwicklungsstadium so zu optimieren, dass nur noch Versuchsmuster mit hoher Erfolgswahrscheinlichkeit auf schnellerem Wege zu einem besseren Verhalten des Fahrzeugs führen. In enger Entwicklungspartnerschaft gibt es in zunehmendem Maße gemeinsame Projekte zwischen Reifen- und Fahrzeugindustrie, in denen im Vorfeld Reifen- und Fahrzeugkonzepte abgestimmt werden.

### 7.3.5.1 Reifenmechanik, Materialeigenschaften

Die mathematische Beschreibung des Verhaltens von Gummi ist wegen des stark nichtlinearen und über der Zeit veränderlichen Verhaltens anspruchsvoll. Abb. 7.95 zeigt einen Zugversuch bei dem in 5 Stufen die Dehnung um jeweils 10 % erhöht wurde. In den jeweiligen Stufen wurde die Dehnung 10-mal hoch- und heruntergefahren. Der erste Zyklus einer Laststufe zeigt immer die höchsten Kraftwerte, die dann während der nächsten Zyklen immer weiter abnehmen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist.

Dieses Materialverhalten modellmäßig abzubilden erfordert einen hohen Aufwand für die Simulation. Die Nachbildung kann z. B. durch eine Anordnung von Federn, Dämpfern und Reibelementen erfolgen, die für verschiedene Dehngeschwindigkeiten das elastische, viskose und plastische Gummiverhalten beschreiben (Abb. 7.96).

Die einzelnen Anteile können physikalisch erklärt werden:

Das elastische Verhalten beschreibt allgemein das Gummiverhalten. Es wird durch eine meist nichtlineare Feder beschrieben, die sowohl die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungs-Kurve als auch die Inkompressibilität berücksichtigt.

Der viskose Anteil kommt aus der geschwindigkeits- d. h. damit auch frequenzabhängigen Steifigkeit des Gummimaterials und beschreibt über das Temperatur-Frequenz-Äquivalent auch das Temperaturverhalten. Je höher die Frequenz oder je tiefer

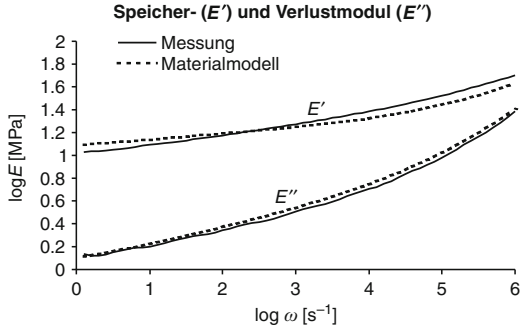



**Abb. 7.97** Anpassung des Materialgesetzes an die Messwerte über einen Frequenzbereich von 5 Dekaden

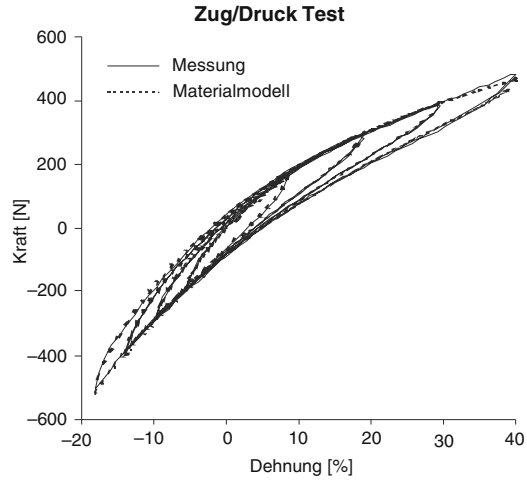



**Abb. 7.98** Anpassung der Materialgesetze an die Materialhysterese im stationären Zustand bei unterschiedlichen Dehnamplituden

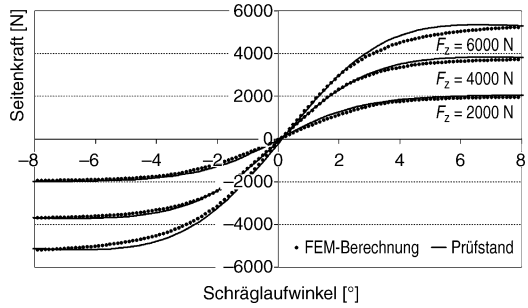



**Abb. 7.99** Reifenberechnung mit der Finiten Elemente Methode (FEM) für einen stationär rollenden Reifen unter Schräglauf/Seitenkraft mit berechnetem Kontaktdruck

die Temperatur desto härter reagiert Gummi auf eine äußere Belastung.

Die Anpassung des Speicher- ($E'$) und Verlustmoduls ($E''$) über einen Frequenzbereich von ca. 5 Dekaden (Abb.7.97) ist mit 10 Maxwell-Elementen bestehend aus je einer Feder und einem Dämpfer möglich.

Mit dem plastischen Anteil kann der inneren Materialstruktur Rechnung getragen werden. Eine Hypothese besagt, dass unter Deformation die Polymerketten auf den Füllstoffoberflächen gleiten, wodurch eine Reibungshysterese hervorgerufen wird. Sichtbar wird dieses Verhalten in Abb.7.98 dadurch, dass die Kraft auch bei niedrigen Dehngeschwindigkeiten bei Dehnungszunahme (Belastung) größer ist als bei Dehnungsabnahme (Entlastung).

Die Anpassung erfolgt über die Prandtl-Elemente (Feder und Reibelemente), die den plastischen Materialanteil beschreiben (Abb.7.96). Sowohl die Kurvenform als auch die typische Gummihysterese für gefüllte Netzwerke werden richtig wiedergegeben.

Das Einbringen der komplexen Gummibeschreibung in Form von Materialgesetzen in die Reifenberechnung ermöglicht eine Vielfalt an Vorhersagen von Reifeneigenschaften. Ein Beispiel ist die Reifenverformung unter Schräglauf im stationär rollenden Zustand mit Informationen über die Kraft- und Reibverhältnisse in der Bodenaufstandsfläche zur Optimierung von Kraftschluss unter Seitenkraft bei Antreiben und Bremsen (Abb.7.99).

Dabei müssen den Reibverhältnissen in dem Kontaktbereich Reifen-Fahrbahn besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Kraftübertragung ist im Wesentlichen abhängig von dem lokalen Anpressdruck, der Gleitgeschwindigkeit der Profilklötze und der Temperatur in der Kontaktzone.

Diese Werte müssen durch separate Tests von Materialproben mit der Fahrbahnoberfläche ermittelt werden. Das kann im Labor oder mit mobilen Prüfeinrichtungen auf der Teststrecke durchgeführt werden. Die in Abb.7.82 gezeigte Abhängigkeit des Reibkoeffizienten $\mu$ vom Kontaktdruck und der Schlupfgeschwindigkeit muss für eine erfolgreiche Berechnung berücksichtigt werden.

Um einen hohen Kraftschluss zu erhalten, sollte bei Optimierungsrechnungen angestrebt werden, den Kontaktdruck möglichst niedrig und die

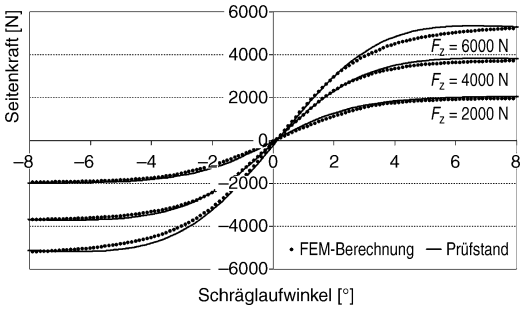



**Abb. 7.100** Vergleich von Prüfstandswerten mit FEM berechneten Seitenkraft-Schräglaufkennlinien für einen Standard-Pkw-Reifen bei drei Radlasten

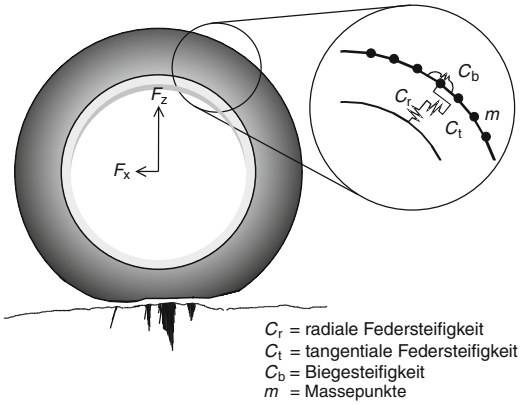



**Abb. 7.101** Einfaches MKS-Reifenmodell (FTire) zur Fahrt über eine raue Straßenoberfläche; Darstellung der Achs- und Kontaktkräfte nach Größe und Richtung

Druckverteilung in der Bodenaufstandsfläche möglichst homogen d. h. ohne Kontaktspitzen zu halten.

Unter Berücksichtigung dieser Kontaktphänomene lassen sich mit FEM-Analysen stationäre Kennlinien für Seitenkraft, Rückstellmoment und Umfangskraft schon recht genau berechnen. Einen Vergleich von gemessenen zu berechneten Seitenkraft-Schräglaufkennlinien zeigt Abb. 7.100.

Weitere Anwendung findet die FEM bei der Vorhersage von Haltbarkeit, Rollwiderstand, Temperaturverteilung, Abrieb, Aquaplaning, usw.

### 7.3.5.2 Reifenmodelle

Reifenmodelle dienen dazu, Reifeneigenschaften qualitativ oder quantitativ darzustellen und vorherzusagen. Sie können je nach Anforderung unterschiedliche Komplexität besitzen, beginnend bei einfachen mathematischen bis hin zu detaillierten dynamischen FEM-Modellen.

Als Beispiel für ein einfaches MKS-Reifenmodell (MKS = Mehrkörpersystem), bestehend aus Federn, Massen und Dämpfern, kann das Modell aus Abb. 7.101 angesehen werden. Sichtbar sind die Felge und das deformierte Gürtelband sowie die Kräfte an der Achse und in der Reifenaufstandsfläche.

Die zur Berechnung notwendigen Reifenparameter können über spezielle Messungen oder Berechnungen aus komplexeren Reifenmodellen (z. B. FEM) bestimmt werden. Das Modell ist damit in der Lage, eine unebene Straße zu überfahren und die entstehenden Kräfte an die Achse und damit ein angekoppeltes Fahrzeugmodell weiterzugeben. Der Bodenkontakt wird über sog. Bürsten (nicht dargestellt) abgetastet und die entstehenden Kontaktkräfte berechnet.

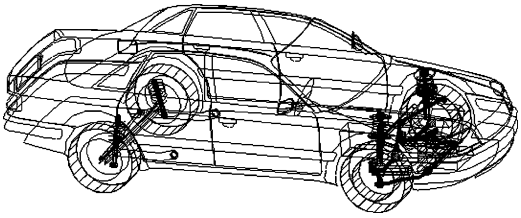


**Abb. 7.102** Komplexes Fahrzeugmodell für die Fahrdynamiksimulation

### 7.3.5.3 Gesamtmodelle

Ein Austausch der Modelle zwischen Reifen-Fahrzeugindustrie am Beispiel Continental verbreitert die Fahrzeugkompetenz durch Ausweiten der automotiven Produktpalette.

Zur Simulation des komplexen Zusammenspiels von Fahrzeugkomponenten und Reifen kommen bevorzugt Mehrkörpersysteme zum Einsatz (Abb. 7.102).

Reifenmodelle für die Horizontaldynamik, die mit den Fahrzeugmodellen gekoppelt werden, geben in der Simulation auf ebenen Fahrbahnen und konstanten Reibwert das Reifenverhalten mit hoher Genauigkeit wieder. Um Aussagen auch zur Längs-

und Vertikaldynamik machen zu können, werden zukünftig auch komplexe Reifenmodelle zum Einsatz kommen, die die Reifenkräfte und -momente auch auf unebenen Fahrbahnen mit wechselnden $\mu$-Werten liefern.

### 7.3.5.4 Beschreibung des Fahrverhaltens

Die „letzte Instanz" bei der Beurteilung von Komfort und Fahrverhalten ist der Fahrer. Das Verstehen der Physik, die das subjektive Fahrerurteil begründet, ist Voraussetzung für eine gezielte Entwicklung vor allem auf der Basis von Simulationsrechnungen. Der Reifenentwickler wird in die Lage versetzt, die Wirkung konstruktiver und materialtechnischer Maßnahmen auf das Verhalten des Systems Fahrzeug objektiv zu bewerten.

### 7.3.5.5 Synergien zwischen Reifen und anderen Systemkomponenten

Die Kenntnis der Wechselwirkung zwischen Reifen und anderen Komponenten führt zu Synergien für Eigenschaften und Kosten sowohl im Hinblick auf das System als auch für die Komponenten wie den Reifen.

Als Beispiel kann die Abstimmung von Reifen auf das ABS/ESP-Bremssystem und umgekehrt zur Erreichung möglichst kurzer Bremswege angeführt werden. Sind am Fahrzeug zusätzlich noch geregelte Dämpfer vorhanden, so lassen sich diese ebenfalls mit in eine Abstimmung einbeziehen.

### 7.3.5.6 Reifensysteme mit Notlaufeigenschaften

Die Forderung nach Reifen mit Notlaufeigenschaften werden in zunehmendem Maße von der Automobilindustrie gefordert. Diese leitet sich ab aus dem Anspruch der Verbraucher nach mehr Sicherheit und Komfort sowie dem Wunsch der Fahrzeughersteller, auf das Reserverad zukünftig zu verzichten. Es gibt mehrere unterschiedliche Systemansätze.

Zu heutigen Rad-Reifensystemen kompatible Systeme sind die selbsttragende Karkasse sowie im Rad integrierte Stützringe.

Bei der selbsttragenden Karkasse (Abb. 7.103) werden die Reifenflanken so verstärkt, dass im Falle eines Luftverlustes die Reifenstruktur die Trageigenschaften übernehmen kann. Die Reifenkonstruktion erfordert dafür spezielle Gummimischungen und Verstärkungen, die trotz der hohen Deformation in der Seitenwand nicht überhitzen und damit unnötig hohen Rollwiderstand erzeugen sowie noch akzeptablen Abrollkomfort liefern.

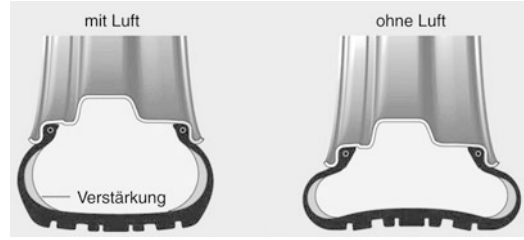



**Abb. 7.103** Reifen mit selbsttragender Karkasse

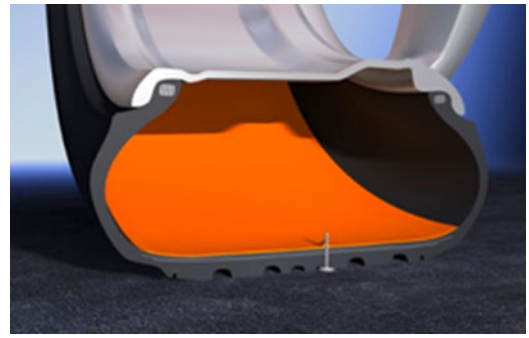


**Abb. 7.104** Prinzipwirkung eines selbstdichtenden Materials gegen Luftverlust bei eingedrungenem Fremdkörper durch die Lauffläche

Bei moderaten Fahrgeschwindigkeiten lassen sich im Pannenlauf durchaus Distanzen bis zu 100 km und mehr zurücklegen. Dem Fahrer wird damit der Reifenwechsel in einer gefahrlosen Umgebung oder einer Werkstatt ermöglicht.

Zur Abdichtung von Leckagen durch eingedrungene Fremdkörper im Laufflächenbereich werden Reifen auch in Europa mittlerweile mit einer gelartigen, hoch klebrigen und zähen Beschichtung auf der Innenseite angeboten. Diese Gelschicht kann kleinere Fremdkörper wie Nägel umschließen und das Leck abdichten (Abb. 7.104). Es entstehen dabei meist nur geringe Luftverluste. Solche Reifen sollten regelmäßig auf eingedrungene Fremdkörper kontrolliert werden.

Im Rad integrierte Stützelemente können auf herkömmlichen Felgen zusammen mit herkömm-

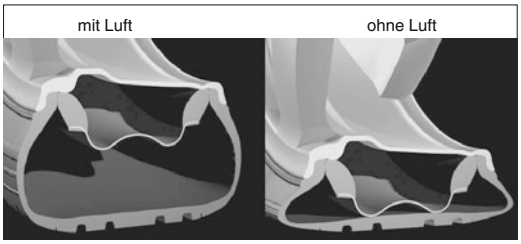



**Abb. 7.105** Metallring mit Gummilagerung im Standardreifen als Stützelement beim Pannenlauf

lichen Reifen montiert werden. Im Pannenfall rollt der Reifen auf dem Stützelement ab. Dieses verhindert auch das Abrutschen der Reifenwülste ins Tiefbett. Eine Ausführungsform zeigt Abb. 7.105: Das Tragelement besteht aus einem profilierten Metallring mit Gummifüßen. Im Pannenfall erfolgt eine Schmierung der Kontaktfläche zum Reifen, da hier große Relativbewegungen auftreten.

Neueste Entwicklungsansätze gehen in Richtung Reifen ohne Innendruck, bei denen die ganze Traglast von der Reifenstruktur getragen wird.

Der im Falle eines Luftverlustes meist noch gute Fahrkomfort und für den Normalfahrer auch häufig nicht wahrgenommene Verlust an Handling, machen die Kopplung mit einem Warnsystem notwendig. Im Falle eines Druckverlustes sollte der Fahrer optisch oder akustisch gewarnt werden.

## 7.3.6 Zukünftige Reifentechnologien

Der etwa 100 Jahre alte Reifen – jünger als das Automobil – hat erhebliches Potenzial für die Zukunft. Der unter ► Abschn. 7.3.5. beschriebene Weg wird zu neuen Technologieansätzen führen.

Bei den klassischen Gebrauchseigenschaften werden besonders der Rollwiderstand, die Fahrsicherheit und der Fahrkomfort im Vordergrund stehen. Für das neue Fahrzeugsegment der Elektrofahrzeuge wird es neue Reifen und Reifengrößen geben, die einen besonders niedrigen Rollwiderstand aufweisen und damit die Reichweite dieser Fahrzeuge erhöhen. Es deutet sich eine Entwicklungsrichtung zu größeren Außen- und Felgendurchmessern an.

Zunehmend gefordert wird eine ausreichende Pannenlauffähigkeit bei Luftverlust.

### 7.3.6.1 Reifenbezogene Zusatzprodukte

Reifenbezogene Zusatzprodukte können z. B. zur Geräuschdämpfung durch Absorber und Resonatoren im Reifen und im Radhaus Eingang finden. Die Auslegung der Reifen erfolgt so, dass die Schallabstrahlung in die Richtung dämpfender Radhausauskleidungen gelenkt wird.

### 7.3.6.2 Reifendruckkontrolle

Ein weiteres Zusatzprodukt ist die Luftdrucküberwachung während der Fahrt. Die Luftdruckkontrolle von Reifen ist in den USA für Neufahrzeuge bereits gesetzlich vorgeschrieben. Anlass waren viele Unfälle, die aufgrund von Minderluftdruck aufgetreten sind.

Auf dem Markt verfügbar sind zwei unterschiedliche Messprinzipien: Die direkt messenden und die indirekt messenden Systeme.

Bei den direkt messenden Geräten wird über ein im Innenraum des Reifens an der Felge oder am Reifen selber angebrachtes Sensormodul der Luftdruck und die Reifeninnenraumtemperatur gemessen. Per Funk werden die Informationen von allen Rädern an einen Empfänger im Fahrzeug übermittelt. Die heutigen Geräte benötigen eine Batterie; in der Entwicklung sind aber bereits Geräte, die die Energie von außen über elektromagnetische Felder einspeisen oder die die Energie aus der Rollbewegung des Reifens generieren.

Die indirekt messenden Systeme nutzen die Tatsache aus, dass Reifen bei unterschiedlichen Luftdrücken einen unterschiedlichen Abrollumfang haben. Die Raddrehzahl kann leicht über die ABS-Sensoren bestimmt werden. Diese Systeme benötigen keine zusätzlichen Sensoren und können zusammen mit einem ABS-System relativ preiswert realisiert werden. In der Weiterentwicklung wird mit der Auswertung luftdruckabhängiger Schwingungen im ABS Signal eine erhöhte Genauigkeit erzielt.

Die Genauigkeit der aufwändigeren, direkt messenden Systeme wird von den indirekt messenden Systemen nicht erreicht. Beide Systeme geben dem Fahrer eine Warnung bei Luftverlust und sind bereits mit stark zunehmender Durchdringung im Markt. Mit der Überwachung des Reifendruckes im Fahrzeug wird die Anzahl von Pannenfällen durch Früherkennung entscheidend reduziert und damit

ein wesentlicher Schritt zu mehr Sicherheit vollzogen.

Bei Fahrzeugen mit Reifendruckregelung wird die Kontrolle vom Regelsystem übernommen.

### 7.3.6.3 Auf Reifen abgestimmte Komponenten im Fahrwerk

Für eine Abstimmung zwischen Reifen und Fahrwerkskomponenten bietet sich z. B. das Federbeinkopflager an, so dass die reifenspezifischen Anregungen im Geräusch- und Vibrationsbereich von der Einleitung in das Chassis abgekoppelt werden. Gleiches gilt auch für andere Fahrwerkslager.

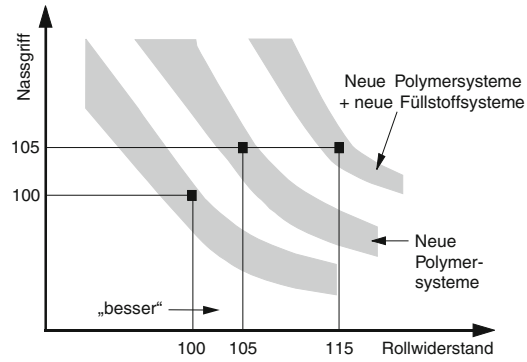
Es zeichnet sich ab, dass zukünftig auch adaptive Fahrwerklager zum Einsatz kommen, die situative Verstellmöglichkeiten bieten und speziell auf die Reifenbedürfnisse angepasst sind.

Als weiterer Trend wird die Optimierung von Reifen und Fahrwerk auf bestimmte Betriebszustände wie zum Beispiel Kurvenfahrt oder Bremsen an Bedeutung zunehmen. Für den Reifen kann das bedeuten, dass die Vergleichmäßigung der Kontaktkraft in der Reifenaufstandsfläche unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen eine bessere Ausnutzung des Kraftschlusspotenzials zur Folge hat. Erste Veröffentlichungen haben das bestehende Optimierungspotenzial bereits aufgezeigt.

### 7.3.6.4 Materialentwicklung

Die Anhebung der Kompromisslage zwischen Kraftschlusserhöhung und Rollwiderstandsreduzierung steht seit jeher im besonderen Blickpunkt der Materialentwicklung. Mit der Einführung der Silikatechnologie ist bereits ein bedeutender Schritt zur Überwindung der Kompromisslage gelungen (◘ Abb. 7.106).

Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass der Gummi selbst noch ein Entwicklungspotenzial in Richtung eines adaptiven Werkstoffes besitzt. Als Beispiel dafür sind sogenannte „partiell thermoreversible Kautschuknetzwerke" zu nennen. Zusätzliche, chemisch maßgeschneiderte, thermoreversible Vernetzungsdomänen auf Basis supramolekularer Strukturen werden in das konventionelle Polymernetzwerk so integriert, dass sich die viskoelastischen Eigenschaften einer Reifenlauffläche den Einsatzbedingungen hinsichtlich Temperatur, Frequenz und Verformung anpassen können.




◘ **Abb. 7.106** Potenzial neuer Mischungskonzepte zur Minderung der Kompromisslage Nassgriff zu Rollwiderstand (Rollwiderstand > 100 % bedeutet geringere Energiedissipation, daher „besser")

Die Entwicklung des Verständnisses bruchmechanischer Vorgänge auf molekularem Niveau und die Erarbeitung darauf aufbauender Konzepte zur Vorhersage der Lebensdauer von Gummiwerkstoffen sind eine weitere Herausforderung an die Materialforschung am Reifen.

### 7.3.6.5 Reifen mit erweiterten Funktionen

In seiner Funktion zuverlässig Kräfte und Momente im Kontakt zur Fahrbahn zu übertragen und somit Fahrstabilität sowie Fahrkomfort zu gewährleisten, ist der Reifen die Systemkomponente, die alles „erfährt", was sich zwischen Fahrzeug und Straße – sozusagen direkt vor Ort – abspielt.

Unter der Überschrift „intelligenter Reifen" werden verschiedene Ansätze verfolgt, die Funktionen von Reifen, insbesondere auch mit geeigneter Sensorik, zu erweitern. Entwicklungsziel ist ein Reifen, der als integrale Komponente des Fahrwerks möglichst viele Informationen an Fahrer und Fahrzeug liefert.

Der Reifen wird über seine derzeitige Funktion hinaus zum Datenträger und Datengeber zur Erfassung und Bereitstellung von Informationen über

- seine *Identität* und seine *Eigenschaften* (z. B. Herstellungsdatum, Sommer- oder Winterreifen),
- seinen *Zustand* (z. B. Reifendruck, Reifentemperatur),

- den *Fahrbahnzustand* (eisig, verschneit, nass, trocken) und
- den *Fahrzustand* (aktuell wirkende Kräfte und Momente).

Diese Daten dienen zur direkten Information des Fahrers und als Eingangsgrößen für elektronische Sicherheits- und Komfortsysteme.

Von Seiten der Automobilindustrie wird heute schon die Einbringung von Elektronik in den Reifen zur eindeutigen Identifizierung von Reifen und zur automatischen Dokumentation der Zuordnung zum Fahrzeug gefordert.

Dies soll über RFID-Transponder (RF = Radio Frequency) geschehen, die zum Lesen und Schreiben mit einer externen Antenne angefunkt werden. Jeder Transponder besitzt eine Identifikationsnummer und kann mit zusätzlichem Speicherplatz für eine Speicherung von Daten ausgestattet sein. Die vom Reifenhersteller abgelegten Daten wie DOT-Nummer, Reifengröße, Seriennummer, Profilvariante, Lastindex aber auch Messdaten können bei Bedarf ausgelesen und um weitere Informationen ergänzt werden.

Reifen werden zukünftig mit geeigneten Sensorsystemen Luftdruck, Temperatur, Kräfte, Geschwindigkeit und Beschleunigungen detektieren, die, ins Fahrzeug übertragen, als Kontrollsignale für Fahrdynamik-Regelsysteme zur Verfügung stehen. Darüber hinaus werden Ansätze verfolgt, das aktuelle maximale Kraftschlusspotenzial zwischen Reifen und Fahrbahn abzuschätzen.

Ein Wunsch für die Zukunft ist, dass der Reifen nicht nur seinen oder den Zustand der Umgebung detektiert, sondern sich aktiv an die jeweilige Fahrsituation anpasst.

Das kann z. B. heißen: wenn in einer Fahrsituation keine besonderen Anforderungen gestellt werden, rollt der Reifen leise, komfortabel und mit wenig Rollwiderstand. Wenn Seiten- oder Bremskraft gefordert sind, wird der Kraftschluss mit der Straße erhöht und das Profil versteift sich, um ein Kippen der Profilklötze zu verhindern. Bei Aquaplaning vergrößern sich die Profilrillen, um mehr Wasser abführen zu können.

Es gibt die Vision, durch Ein- und Ausschalten von elektromagnetischen Feldern chemische „Schalter" in den Reifenmischungen zu aktivieren oder über magneto- oder elektrorheologische Effekte die Verbindungsstellen im Gummi nach Bedarf knüpfen und lösen zu können, um so die Steifigkeit und den Rollwiderstand gezielt zu verändern.

Auf diesem Gebiet ist noch viel Grundlagenarbeit zu leisten. Daher wird der Reifen als Aktuator wohl noch einige Zeit auf sich warten lassen.

## 7.3.7 Räder

### 7.3.7.1 Einführung/Historie

Das Rad zählt zu den bedeutendsten Erfindungen der Menschheit. In der Natur gibt es keine Vorbilder. Es ist aus Rollen oder Walzen entstanden, die zum Transport schwerer Lasten beim Bau der Pyramiden verwendet wurden. Um 4000 v. Chr. kam man auf die Idee, hölzerne Kreisscheiben mit einer Achse zu verbinden. Die Sumerer hatten um 3000 v. Chr. Fahrzeuge, auch mit 4 Rädern, in Gebrauch. Von der Kreisscheibe bis zum Holzspeichenrad mit „Reifen" aus Metall zur Verschleißreduzierung, wie etwa 1000 v. Chr. von den Assyrern erstmalig verwendet, vergingen 3000 Jahre. Nahezu weitere 3000 Jahre dauerte es, bis mit der industriellen Revolution weitere Bauweisen aufkamen, die teilweise bis heute Bestand haben (Stahlspeichenrad, 1888 Luftreifen, Vollscheibenstahlrad).

Es folgte 1926 das erste Aluminium Gussrad auf einem Bugatti. Heute werden Räder hauptsächlich aus Stahl oder Aluminium gefertigt. Welche Bauweisen letztendlich zum Einsatz kommen, wird vom Belastungsprofil, den fahrdynamischen Anforderungen, der Ästhetik und den Kosten bestimmt. Der Zwang zum Energiesparen und damit auch zur Reduzierung der Luftverschmutzung erfordert konsequenten Leichtbau.

### 7.3.7.2 Normung/Terminologie

Räder sind durch die Europäische ETRTO – Norm in Bezug auf Größen und Felgenprofile festgelegt. Je nach verwendeten Reifen kommen unterschiedliche Profile zur Anwendung.

Die Schnittstelle zum Fahrzeug (Bremsenfreigängigkeit, Einpresstiefe, Lochkreis, Nabenbohrung) ist sehr individuell und wird vom Fahrzeughersteller vorgegeben. Alle anderen Bereiche (Radschüssel, Felgenaußenseite, teilweise auch Fel-

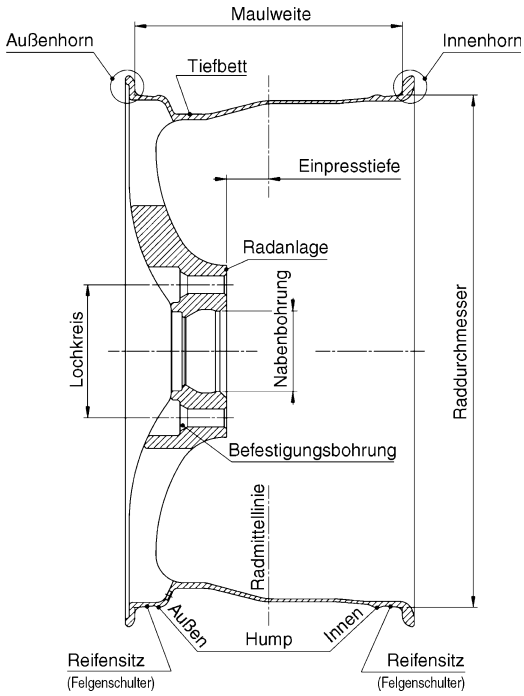



**Abb. 7.107** Rad Terminologie

genkontur) folgen stilistischen Vorgaben und den Belastungsanforderungen (Abb. 7.107).

### 7.3.7.3 Wesentliche Herstellverfahren

- Gießen
  - Aluminium und -MagnesiumRad
    - Niederdruck Kokillenguss
    - Schwerkraft Kokillenguss
- Gesenkschmieden (Pressen)
  - Aluminium – und Magnesiumrad
- Blechumformung/Stanzen/Walzen
  - Stahlrad, Aluminium-Bandrad

### 7.3.7.4 Serieneinsatz (Marktanteile heute und in Zukunft)

Weltweit wurden 2005 für Pkw- und Leicht-Lkw Neufahrzeuge weit mehr als 300 Mio. Räder benötigt. In Deutschland und USA ist dabei der Aluminium-Rad-Anteil bereits über 50 % mit weiter steigender Tendenz. Sonderkonstruktionen, wie mehrteilige Räder und Räder aus exotischen Werk-



**Abb. 7.108** 3D Modell

stoffen (Magnesium, Kunststoffe, Verbundwerkstoffe), spielen hierbei eine vernachlässigbare Rolle.

### 7.3.7.5 Entwicklungs-Methodik

#### 7.3.7.5.1 CAD Konstruktion

3D Geometrie (Abb. 7.108), 2D Zeichnungsableitung, Surface, Solids. Diese Daten werden für die Festigkeitsanalyse, Gieß-/Umformsimulation, Herstellung der Kokille, Schmiedeform, Spannmittel, Prüfpläne und zur Programmierung der Bearbeitungsmaschinen benötigt.

#### 7.3.7.5.2 Finite Elemente Analyse

Mit Hilfe der Finite Elemente Analyse können vielfältige, mehrachsige Lastfälle im Rad simuliert werden. Die FE-Lastmodelle der üblichen Prüfstände (Umlaufbiegung – Abb. 7.109 und Abrollen – Abb. 7.110) ermöglichen relativ genaue Vorhersagen zur Versagenswahrscheinlichkeit, vorausgesetzt der Hersteller verfügt über eine umfangreiche Ergebnisdatenbank und daraus abgeleitete Bauteilermüdungskurven zum jeweils verwendeten Material und Herstellverfahren. Daraus lassen sich die maximal zulässigen Vergleichs-Spannungen ermitteln. Die Zwarp-Prüfung (zweiaxiale Abrollprüfung) und auch die Impact-Prüfungen werden noch mit empirischen Methoden mit Hilfe von statischen Ersatzmodellen simuliert, da nicht-lineare Berech-

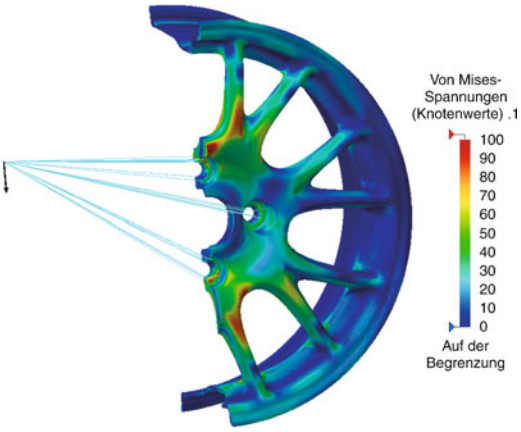



**Abb. 7.109** FE-Analyse (Umlaufbiegemodell)

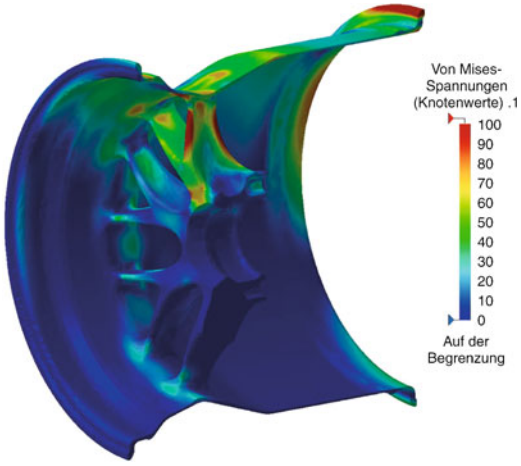



**Abb. 7.110** FE-Analyse (Steifigkeitsmodell, Hoch- und Seitenkraft)

nungsmethoden bisher wegen des hohen Aufwands nicht gerechtfertigt waren.

#### 7.3.7.5.3 Prüfstandserprobung

Die Prüflasten und Anforderungen ergeben sich aus:

- Fahrzeuggewicht,
- Reifen (dynamischer Abrolldurchmesser, laterale Haftreibungszahl $\mu$),
- Prüfkriterien (Fahrzeughersteller, TÜV),
- Oberflächenanforderung,
- thermische Belastung.

**Tabelle 7.7** Entwicklungsziele

| Entwicklungsziele | Einfluss auf |
|---|---|
| Geringes Gewicht, geringes Massenträgheitsmoment | Fahrdynamik, Kraftstoffverbrauch |
| Stabilität, Steifigkeit | Fahrdynamik, Lebensdauer, Deformationen |
| Dauerfestigkeit, Duktilität | Sicherheit, Lebensdauer |
| Korrosionsschutz | Werterhalt, Optik, Sicherheit |
| Ästhetik | Marketing, Verkaufsargument |
| Gute Bremsenkühlung | Sicherheit |

Daraus ergeben sich für die FE Analyse die entsprechenden Randbedingungen wie:

- Radlast,
- Seitenkraft,
- Stoßfaktoren → Bodenwellen, Schlaglöcher, Schwellen, Bordsteine,
- Antriebs- und Bremsmomente,
- Materialeigenschaften.

Verschiedene, standardisierte Prüfungen helfen die Dauerfestigkeit und Crashsicherheit nachzuweisen.

- Umlaufbiegeprüfung
  Bei Kurvenfahrt wird das kurvenäußere Rad durch Seitenkraft und erhöhte Radiallast belastet. Diese Kräfte erzeugen im Rad zwei Biegemomente deren Werte durch den dynamischen Halbmesser ($r_{dyn}$) und die Einpresstiefe ($e$ od. $ET$) als Hebelarme bestimmt werden. Für die Umlaufbiegeprüfung wird als Prüflast die zweifache max. Radlast angesetzt (Abheben kurveninneres Rad, Abb. 7.111).
  Das so ermittelte Biegemoment wird dann zum Nachweis der Dauerfestigkeit bei der Umlaufbiegeprüfung (Abb. 7.112) erzeugt, wobei unterschiedliche Anforderungen über die prozentuale Höhe geregelt werden.
- Radiallastprüfung
  Diese dynamische Prüfung dient ebenfalls, wie die Umlaufbiegeprüfung, zum Absichern

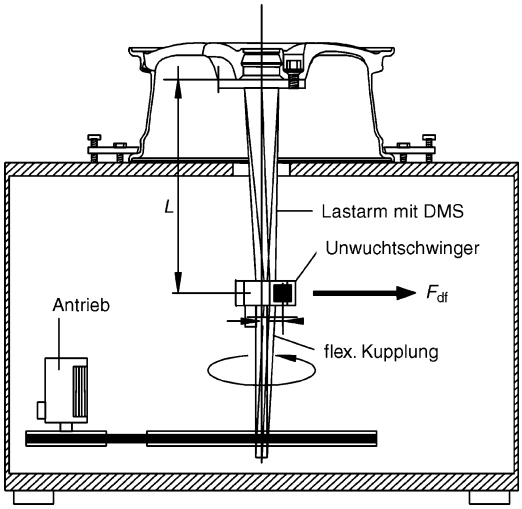



**Abb. 7.111** Kräfte am Rad (TÜV Vereinfachung)

der Ermüdungsfestigkeit, normalerweise unter konstanter Radiallast (bei Pkw 2,5-fache maximale Radlast). Einige Automobilhersteller fordern jedoch eine zusätzliche Seitenkraftkomponente, die durch Schrägstellung (Lenkwinkel) erzeugt wird (Abb. 7.113).

- Zweiaxiale Räderprüfung (ZWARP)
  Umlaufbiege- und Abrollprüfung können die Realität nicht in allen Bereichen des Bauteils genau abbilden. 100 %ige Sicherheit ist deshalb nicht gewährleistet, wie Räder mit Anrissen nach längerem Fahrbetrieb in der Vergangenheit immer wieder zeigten.
  Aus diesem Grund wurde vom Fraunhofer-Institut (LBF in Darmstadt) vor einigen Jahren die ZWARP Prüfung entwickelt (Abb. 7.114). Das bereifte Rad wird dabei einer ständig wechselnden dynamischen Belastung in radialer und lateraler Richtung ausgesetzt. Die Steuerungssoftware ermöglicht dabei das Nachfahren verschiedener, realitätsnaher Lastkollektive wie Hockenheimring, Nürburgring und den sog. Europazyklus.
- Impact Test (SAE J175)
  Mit dieser Prüfung wird ein seitlicher Aufprall auf einen Bordstein simuliert. Dabei wird das bereifte Rad (Felgenhorn außen und die Radschüssel) einer hohen dynamischen Belastung ausgesetzt, welche durch ein Fallgewicht erzeugt wird. Der Impact darf nicht zum schlagartigen Luftverlust oder Bruch führen.
- Cass Test 240 h/Salzsprühtest 1000 h SS DIN 50021
  Die Prüfungen dienen zum Nachweis der Korrosionsbeständigkeit. Die Lackoberfläche wird vor Testbeginn teilweise bis auf das Grundmaterial vorgeschädigt (Ritzspur, Steinschlag) und danach mit einer Salzlösung besprüht.
- Radialschlagtest
  Hierbei fällt ein Gewicht mit einer Schlagfinne auf das stehende bereifte Rad. Diese Prüfung

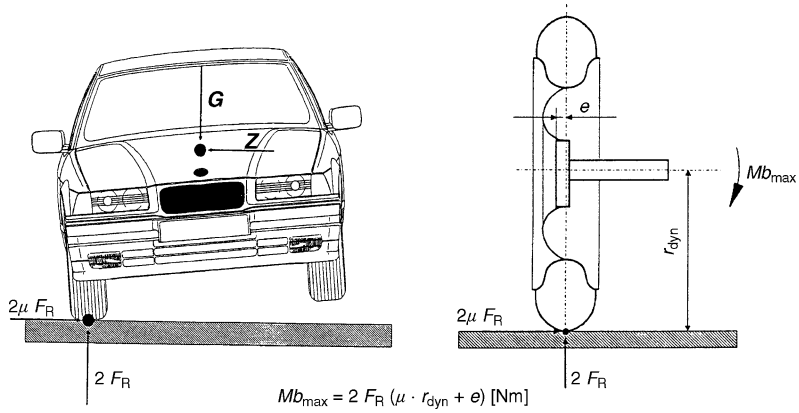



**Abb. 7.112** Umlaufbiegeprüfung (schematisch)

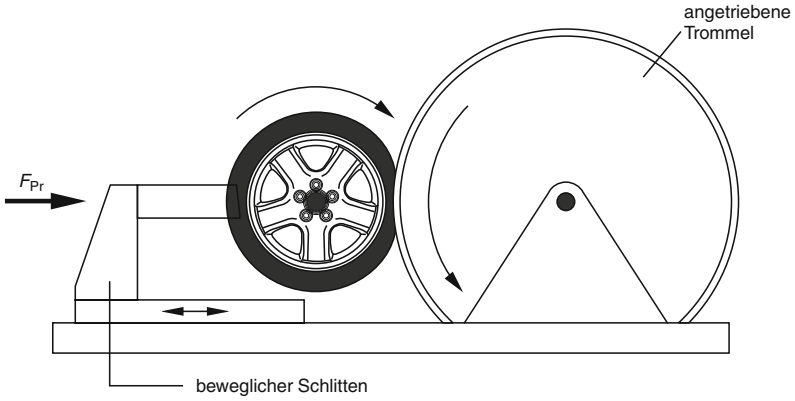



**Abb. 7.113** Radiallastprüfstand (schematisch)

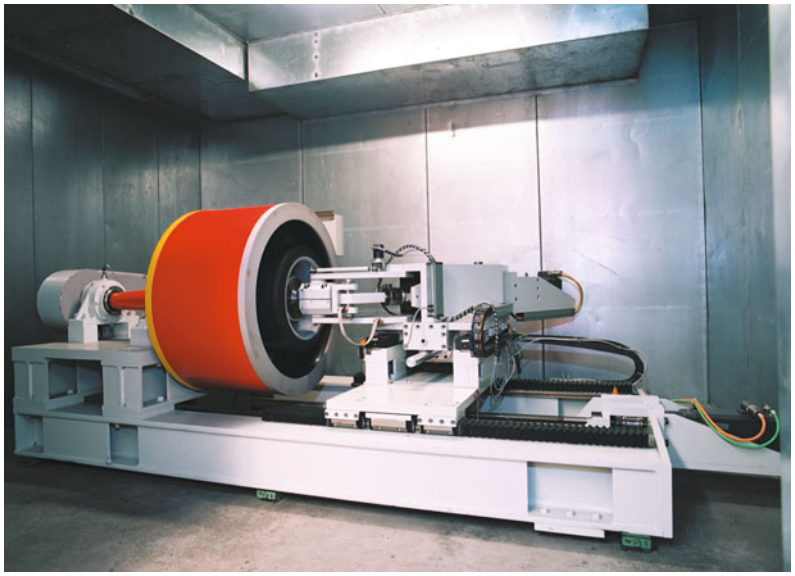


**Abb. 7.114** Zweiaxiale Räderprüfung (ZWARP)

simuliert das Überfahren eines Hindernisses. Die Aufprallgeschwindigkeit beträgt bis zu 5,2 m/s. Die Fallenergie wird abhängig von der Radlast in bis zu 3 Laststufen eingestellt.

- Wechseltorsionsprüfung
  Hierbei wird das Rad einem wechselnden Torsionsmoment zur Simulation der Brems- und Antriebskräfte ausgesetzt. Dieser Test ist für Kraftrad-Räder zwingend vorgeschrieben, bei Pkw-Rädern nur, falls hinsichtlich der Anzahl und Querschnitte der Speichen Bedenken bestehen.
- Werkstoffprüfung
  Diese wird zur Absicherung an den geprüften Rädern – um bei späteren Ausfällen im Fahrbetrieb Werkstofffehler ausschließen zu können – und während der Serie durchgeführt. Mindestwerte für Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung sind vorgegeben (Fahrzeughersteller, TÜV).

#### 7.3.7.5.4 Fahrerprobung im Rahmen der Fahrzeugentwicklung (Dauerläufer)

Im Rahmen der Fahrerprobung bei neuen Fahrzeugmodellen wird das Serienrad beim Automobilhersteller „freigefahren", das heißt alle Aspekte hinsichtlich Fahrdynamik, Struktur- und Korrosionsfestigkeit werden geprüft.

Es gibt zahlreiche weitere Prüfungen, die jedoch meist Fahrzeughersteller-spezifisch angewandt werden.



#### 7.3.7.5.5 Entwicklungstendenzen zur Methodik

- automatisierte Strukturoptimierung, Bionik für Radspeichen, Evolutionsstrategien
- Lastwechselvorhersagen zur ZWARP-Prüfung (Software, welche die Ergebnisse dieser Prüfung prognostiziert)
- Gießsimulation
- Umformsimulation

### 7.3.7.6 Fertigungsverfahren – Weiterentwicklung

#### 7.3.7.6.1 Stahlrad

Das Stahlscheibenrad (◘ Abb. 7.115), immer noch Basisausstattung bei vielen Pkw im unteren Median und bei Nkw fast ausschließlich verwendet, hat Kostenvorteile. Allerdings gilt dies nur für die Großserie, wegen der hohen Anfangsinvestition in Anlagen und Werkzeuge. Es wird aktuell aus höherfesten Stählen gefertigt und besteht aus zwei verschweißten Teilen, der Felge und der Radschüssel. Neuere Entwicklungen ermöglichen durch eine beanspruchungsgerechte, variable Materialverteilung in der Felge Gewicht zusätzlich einzusparen. Dabei werden die weniger belasteten Bereiche der Felgenschultern ausgedünnt. Dieses wird in heutigen Serienproduktionen mittels Drückwalzen des gerundeten zylindrischen Felgenbandes oder in einer Kombination Drückwalzen und Felgenprofilierung ausgeführt.

**Felgenherstellung**: Coil → Zuschneiden → Rundwalzen, → Verschweißen → Entgraten → Rund drücken → Voraufweiten → Profilieren (3 Operationen) → Kalibrieren → Ventilloch Stanzen und Entgraten



◘ **Abb. 7.115** Stahlscheibenrad

**Radschüssel**: Coil → Zuschneiden → Tiefziehen/Formpressen (3–5 Operationen) → Stanzen Lüftungs- und Bolzenlöcher → Entgraten Lüftungslöcher

**Komplettrad**: Verschweißen → Oberflächenbehandlung (Reinigen, Entfetten, Tauchlackieren).

Mit Full/Semi-Full-Face Scheibenrädern, bei denen die Anbindung der Felge an die Radschüssel am Felgenhorn oder unter dem äußeren Reifensitz statt im Tiefbett erfolgt, wird das Aussehen wegen der größeren Schüssel verbessert. Ebenfalls zur Aufwertung der Optik aber auch zur Verbesserung der Bremsenkühlung, wurde neuerdings die klassische Speichenradoptik (5 oder mehr Speichen) umgesetzt. Die Herstellung der Radschüssel dieses so genannten Stahlstrukturrades (◘ Abb. 7.116) ist aufwändiger durch notwendige größere Materialdicken, komplexere Formgebung und erheblich größere Lüftungslöcher. Nach wie vor verwendete Kunststoff-Radabdeckungen können mit höherem gestalterischem Freiheitsgrad dargestellt werden.

#### 7.3.7.6.2 Leichtmetallrad

Alu-„Bandrad", Alu-Gussrad, Alu-Schmiederad, Mg-Gussrad, Mg-Schmiederad.

Das **Aluminium-Bandrad** aus einer Knetlegierung, wird ähnlich einem Stahlrad gefertigt und



**Abb. 7.116** Stahlstrukturrad




**Abb. 7.117** Aluminium-Rad



**Abb. 7.118** Aluminium Hohlkammer-Gussrad

erreicht spezifische Tragfähigkeiten deutlich über dem Stahlrad, dem Aluminium – Gussrad und Schmiederad. Wie beim Stahlrad ist die stilistische Freiheit eingeschränkt und es sind hohe Investitionen in Werkzeuge erforderlich. Aus diesem Grund wird es nur als Basisausstattung für höherwertige Pkw verbaut mit dem Ziel, Gewicht einzusparen.

Das **Aluminium-Gussrad** (Abb. 7.117) wird für Groß- und Kleinserie hauptsächlich im Kokillenguss hergestellt. Die Gestaltungsfreiheit ist hier am höchsten. Als Lifestyle-Produkt tritt häufig die Funktionalität eher in den Hintergrund. Obwohl aus Leichtmetall gefertigt sind die Radgewichte nicht zwingend optimal niedrig. Als Legierungen kommen die veredelte untereutektische $AlSi_7Mg$ bzw. naheutektische $AlSi_{11}Mg$ zum Einsatz (teilweise ohne T6 Warmbehandlung).

**Standardherstellung**: Schmelzen → Gießen → (Warmbehandlung) → mechanische Bearbeitung (Vorbohren oder Stanzen, Drehen, Bohren, Entgraten, Schleifen) → Oberflächenbehandlung (Entfetten, Passivieren, Pulvergrundieren, Lackieren).

Zur Verbesserung der Festigkeit als Gewichtsoptimierungs-Maßnahme wird bei höherwertigen Rädern zusätzlich ein *Flow-Forming* (Drückwalzen unter erhöhter Temperatur) des Felgenbetts durchgeführt.

Mit aufwändigen Technologien kann bei großen Durchmessern dem damit verbundenen Gewichtszuwachs entgegen gewirkt werden (Abb. 7.118):

- Speichen hohl gegossen,
- umlaufende Hohlräume in der Felgenschulter außen (Stylingfreiheit ohne höheres Gewicht),
- umlaufender Hohlraum in der Felgenschulter innen (hohe Steifigkeit um Stöße besser abzufangen).

Das **Aluminium-Schmiederad** ist nochmals teurer als alle vorgenannten Bauarten, hat aber eine höhere spezifische Tragfähigkeit als das Alu-Gussrad bei etwas reduzierter Gestaltungsfreiheit. Dieses Rad wird, ausgehend von einem Stutzen (meist $AlMgSi_1$), durch mehrstufiges Pressen (Radspeiche, Felgenansatz) und Drückwalzen hergestellt. Presskräfte bis zu 8000 t sind dazu erforderlich. Eine preisgünstige Variante stellt das Leichtschmiederad mit vereinfachtem Styling und weniger Pressstufen dar (Kostenvorteil).

**Herstellung**: Rundstange (gegossen oder extrudiert) → Stutzen → mehrstufiges Pressen → Drückwalzen Felge → Warmbehandlung → danach wie Alu-Gussrad.

Das **Magnesium-Gussrad** und **Magnesium-Schmiederad** wird wie das entsprechende Alu-Rad hergestellt.

Die deutlich höheren Kosten sind durch den Materialpreis, größeren Aufwand beim Schmieden- und Drückwalzen sowie höheren Aufwand beim Korrosionsschutz bedingt. Gussräder sind vom Markt nahezu verschwunden. Schmiederäder finden im Rennsport und teilweise im high-end Segment Verwendung. Dort wird die hohe spezifische Festigkeit einiger Magnesiumlegierungen genutzt um sehr leichte Räder zu bauen.

#### 7.3.7.6.3 Kunststoff-Rad (Composite-Rad)

Seit den 70ger Jahren und sporadisch bis heute wird versucht Räder aus faserverstärkten Kunststoffen herzustellen. Diese bestanden aus Glasfaser eingebettet in eine Duromer-Matrix. Aspekte, wie das Problem der thermischen Belastung, das spröde Bruchverhalten und die Verwendung zufällig orientierter Glasfasern, die eine geringe oder überhaupt keine Gewichtsersparnis ergab, wurden vernachlässigt.

Konstruktionen, die z. B. endlose, ausgerichtete Kohlestofffasern verwenden, sind extrem teuer. Außerdem ist bei tatsächlich sehr viel leichterem Rad ein hohes Sicherheitsrisiko vorhanden, da jeder Stoß die innere Struktur schädigen kann (Delamination). Die geringe Bruchzähigkeit der verwendeten duromeren Harze ist dafür verantwortlich. Solch ein Rad bedarf also einer ständigen Überwachung, es sei denn man geht den Weg einer extremen Überdimensionierung. Dann aber ist der Gewichtsvorteil nicht mehr gegeben. Bis heute finden Composite Räder fast nur im Rennsport Verwendung, wo ständige Überprüfung geleistet werden kann.

### 7.3.7.7 Gewichtsrelationen

Ungefederte Massen, Massenträgheitsmoment und Steifigkeit beeinflussen maßgeblich das fahrdynamische Verhalten des Fahrzeugs in Bezug auf Lenkkräfte, Lenkpräzision, Radlastschwankungen sowie Beschleunigungs- und Bremsdynamik. Da das Rad sowohl translatorisch als auch rotatorisch beschleunigt bzw. verzögert werden muss und außerdem zu 100 % den ungefederten Massen zuzurechnen ist, wirkt sich Gewichtsreduzierung durch Leichtbau im Vergleich zu anderen Bauteilen am Fahrzeug mehrfach aus (◘ Tab. 7.8).

Bei der Gewichtsreduzierung hat das Stahlrad durch höherwertige Stähle in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht.

### 7.3.7.8 Größenrelationen

Die Entwicklung von ursprünglich sehr großen und schmalen Rädern zu breiteren, kleineren Rädern war bestimmt durch verbesserte Straßenoberflächen und immer höheren Kurvengeschwindigkeiten. Seit den 70er Jahren setzt allerdings beim Pkw wieder ein Trend zu größeren Rädern ein, der verschiedene Ursachen hat (Ästhetik, Fahrdynamik, größere Bremsen). Räder mit 13″ Durchmesser sind in einigen Anwendungsfällen solchen mit 18″ und mehr gewichen.

### 7.3.7.9 Rad/Reifen – Besondere Aspekte

- **Verdrehen des Reifens auf der Felge**
  Probleme können bei der Übertragung der Brems-/ Antriebsmomente auftreten, insbesondere bei sportlichen und leistungsstarken Fahrzeugen und Reifen mit höheren $\mu$-Werten (heutige Sportreifen bringen es auf bis zu 1,2, üblich ist 0,9), kann es zum Verdrehen des Reifens auf der Felge kommen. Durch Anpassen der Oberflächenbeschaffenheit im Reifensitz, zum Beispiel durch spezielle Anti-Rutsch-Lacke, wird versucht dem entgegen zuwirken.
- **Horndeformationen/Beschädigung durch Bordsteine**
  Niedrige Reifenquerschnitte führen zu hoher Belastung der Felge beim Überfahren von

**Tabelle 7.8** Rädergewichte

| Ausführung | Gewicht [%] | Pkw Rad 8 × 18″ Radlast 700 kg |
|---|---|---|
| Stahlrad (Standard-/Strukturrad) | 100 | 12.500–13.500 g |
| Alu gegossen | 80–110 | 10.500*)–14.000 g |
| Alu geschmiedet | ≈ 73 | 9500 g*) |
| Mg gegossen | ≈ 73 | 9600 g*) |
| Mg geschmiedet | ≈ 63 | 7900 g*) |
| Composite (mit duromerem Harz) | < 45 bis > 75 | 6000–10.000 g**) |

*) Gewichtsoptimiert bzw. leichtes Styling
**) je nach Sicherheit

Schlaglöchern, Bodenwellen, Schwellen und Bordsteinen und dadurch zu Horndeformationen und Beschädigungen. Anfahrschutz aus Edelstahl oder Composite-Material kann helfen Folgekosten bei Beschädigung des Außenhorns zu reduzieren.

- **Hochfrequente Schwingungen**
  Fahrbahn- und Reifen- initiierte Schwingungen im hochfrequenten Bereich führen zu erhöhtem Verschleiß der Felgenhörner im Bereich der Kontaktflächen. Auch hier kann ein Anti-Rutsch-Lack verschleißhemmend wirken.
- **Unwucht**
  Sensitive Radaufhängungen erfordern geringe Toleranzen für Rundlauf- und Planlauf am Rad. Unwuchten, verursacht durch ungleiche Massenverteilung in radialer Richtung (statische Unwucht) und in axialer Richtung (dynamische Unwucht), werden bei Aluminium-Rädern meist durch Spannfehler beim Bearbeiten, Verzug der Rohlinge, Dichteschwankungen (beim Gussrad) hervorgerufen. Mit zunehmendem Raddurchmesser und Radgewicht sind diese Unwuchten schwerer zu beherrschen.

### 7.3.7.10 Energiebetrachtung bei Herstellung/Recycling

Der weitaus größte Teil der Räder wird aus Stahl und Aluminium gefertigt. Eine Energiebetrachtung für diese Materialien ist von Bedeutung, zumal gerade beim Aluminium von weiter steigendem Bedarf auszugehen ist und bereits heute der Anteil am weltweiten Stromverbrauch zur Herstellung von Primäraluminium bei mehr als 2,5 % liegt.

Zur Herstellung von einer Tonne Primäraluminium werden 4 t Bauxit benötigt und es sind dazu heute ca. 13 bis 18 MWh Strom über die gesamte Prozesskette (Bauxit → Tonerde $Al_2O_3$ → Elektrolyse) erforderlich. Diese Energie ist im Werkstoff gespeichert und könnte zum großen Teil wieder zurück gewonnen werden, was allerdings auf Grund der hervorragenden Recyclingfähigkeit von Aluminium und ständig steigendem Bedarf eine rein hypothetische Betrachtung ist. Beim Recyclingprozess (Sekundäraluminium-Gewinnung) werden nämlich lediglich ca. 5 % der ursprünglichen Energie (auf Grund des niedrigen Schmelzpunktes von 660 °C) benötigt und es gibt keine Qualitätseinbuße. Diese Recyclingfähigkeit kann, über mehrere Bauteilzyklen gesehen, die Energiebilanz deutlich verbessern, wenn nicht sogar positiv werden lassen, da die Energieeinsparung (siehe ► Abschn. 7.3.7.11) durch Leichtbau und die Schonung von Ressourcen durch Langlebigkeit nicht vernachlässigt werden darf.

Für die Stahlerzeugung wird in etwa 6–8 MWh Strom pro Tonne verbraucht. Stahl erfordert jedoch einen höheren Energieaufwand beim Recycling und zwar nicht nur beim Einschmelzen (ca. 1500 °C) sondern bereits im Vorfeld beim Einsammeln, Transport, Sortierung, da höhere Gewichte bewegt werden müssen. Wenn man den zusätzli-

chen Kraftstoffverbrauch einrechnet, den schwerere Bauteile verursachen aber auch den höheren Energieverbrauch im Laufe von Recyclingzyklen, wird die Energiebilanz im Vergleich zum Aluminium immer irgendwann negativ. Bauteile aus Aluminium sind damit auch eine Investition in die Zukunft.

#### 7.3.7.11 Umweltschonung

Gewichtsoptimierte Leichtbau-Räder helfen Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu reduzieren. Wie oben erwähnt, wirkt sich Gewichtsreduzierung am Rad im Vergleich zu anderen Bauteilen am Fahrzeug mehrfach positiv aus.



## 7.3.8 Gleitschutzketten

### 7.3.8.1 Einleitung

Gleitschutzketten sind Vorrichtungen zur Erhöhung der Kraftübertragung zwischen Reifen von Kraftfahrzeugen bzw. deren Anhängern, und schneebedeckten, vereisten Fahrbahnen oder schmierigem, schlammigem Gelände. Gemäß ihrem häufigsten Einsatzgebiet werden sie auch als Schneeketten bezeichnet. Schneeketten müssen den Bedingungen des Verkehrszeichens „Schneeketten vorgeschrieben" entsprechen [102]. Gemäß StVO ist die Höchstgeschwindigkeit bei Verwendung von Schneeketten auf 50 km/h begrenzt [103].

### 7.3.8.2 Wirkungsprinzip von Gleitschutzketten

Gleitschutzketten sollen auf dem Reifen locker montiert werden, um durch eine Relativbewegung zwischen Reifen und Kette – als „Wandern" bezeichnet – sich selbst und das Reifenprofil zu reinigen und so stets neue Greifkanten in die Aufstandsfläche einzubringen. Bei zu stramm montierten Gleitschutzketten kann dieser Effekt nicht eintreten. Darüber hinaus können bei längerer Fahrt auf trockener Fahrbahn lokal erhöhte Temperaturen auftreten mit negativer Einwirkung auf die Reifen.

Durch das Aufschlagen der Kette auf die Fahrbahn und den erhöhten örtlichen Druck der Kettenglieder in der Aufstandsfläche des Reifens drücken sich Kettenteile in die Fahrbahn ein und führen zu einem Verzahnungseffekt. Da sich auf Eis oder Schnee im Bereich zwischen 0 und −8 °C – insbesondere unter Druck – ein Wasserfilm oder Kompressionseis bildet, ist die Wirksamkeit von Gleitschutzketten in diesem Temperaturbereich besonders groß. Bei tiefen Temperaturen ändern sich die Eigenschaften von Schnee und werden tendenziell denen von Sand ähnlich, wodurch die Reifeneigenschaften dominieren.

### 7.3.8.3 Aufbau von Gleitschutzketten

Gleitschutzketten bestehen aus einem Laufnetzteil, das sind diejenigen Kettenteile, die unmittelbar mit der Lauffläche des Reifens und der Fahrbahn in Kontakt stehen, sowie seitlich angeordneten Befestigungseinrichtungen. Durch geeignete Konstruktionsmerkmale sind Gleitschutzketten der Form und der Dimension des Reifens anzupassen [104–107].

#### 7.3.8.3.1 Laufnetzformen

Gemäß der Anordnung von Kettenteilen auf der Lauffläche unterscheidet man gemäß ◘ Abb. 7.119 Leiter-, Spur- und Netzketten. Wichtig für die Abstimmung zwischen Reifen und Kette ist, dass stets ein Wechsel zwischen freien Reifenflächen und Kettenteilen stattfindet. Gleitschutzketten sollen aus dem Reifen kein „Eisenrad" machen. Die Scherflächen zwischen den Kettenteilen sind wesentlich für die Kraftübertragung auf weichem Untergrund. Durch die quer gerichteten Kettenstränge wird Vortriebskraft erzielt, durch die längs gerichteten Kettenstücke Seitenführungskraft. Netzketten sind für breite Reifen geeignet, wie sie insbesondere bei Fahrzeugen für die Schneeräumung eingesetzt werden.

Das Laufnetz der Gleitschutzkette muss annähernd gleichmäßig über den Reifenumfang verteilt sein, so dass sich in jeder Radstellung Kettenteile in der Aufstandsfläche des Reifens befinden. Die gleichmäßige Aufteilung des Laufnetzes, wie beispielsweise bei der Netzkette, führt zu einem ruhigen Lauf.

#### 7.3.8.3.2 Greifelemente

Das Laufnetz der Gleitschutzkette kann aus unterschiedlichen Greifelementen bestehen, die die Griffigkeit wesentlich beeinflussen. Die älteste Ausführungsform ist die gedrehte Kette. Ketten mit zusätzlich aufgeschweißten Elementen, wie Stachel zur

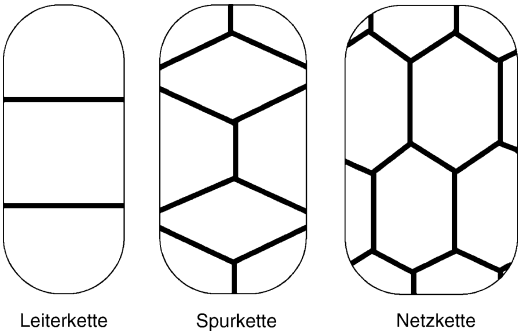



**Abb. 7.119** Laufnetzformen



**Abb. 7.120** Beweglicher Greifsteg, insbesondere für Gleitschutzketten für Arbeitsmaschinen

Erhöhung der Griffigkeit und Verschleißfestigkeit, sind in Mitteleuropa nicht zulässig, da sie zu einer Beschädigung der Straße führen können. Im Forsteinsatz sind diese Ketten jedoch gängig. Moderne Gleitschutzketten bestehen aus kurzen Kettengliedern, die bruchunempfindlicher sind als lange Kettenglieder. Um die Griffigkeit zu erhöhen können die Kettenglieder durch Zusatzelemente, wie Greifstege, ergänzt werden (Abb. 7.120). Diese Greifelemente wirken wie Spaten auf Schnee oder weichem Untergrund und führen zu einer hohen Punktbelastung, so dass sich diese Elemente besonders gut in den Untergrund eindrücken können und somit maximale Vortriebskraft ergeben. Dies ist besonders beim Schneeräumeinsatz wichtig.

Moderne Winterreifen haben Profilstollen mit einer Vielzahl von Lamellen, die alle als Greifkanten wirken. Ansätze, einen ähnlichen Effekt mit textilen Materialien zu erreichen, sind sehr alt. In den letzten Jahren wurden Textilien auf Grund ihrer angenehmen Haptik bei kaltem Wetter erneut aufgegriffen. Diese Produkte werden über den Reifen gestülpt und durch seitliche Gummihalterungen fixiert. Ihre Wirkung ist jedoch begrenzt, abgesehen von einer sehr geringen Haltbarkeit auf schneefreien Straßen. Gummi- oder Kunststoff-Gleitschutzmittel können die Traktion moderner Winterreifen kaum steigern [111].

#### 7.3.8.3.3 Dimensionierung

Die Dimensionierung von Gleitschutzketten wird im Wesentlichen durch das Fahrzeuggewicht, die Antriebsleistung und die Reifendimension bestimmt. Gleitschutzkettenglieder müssen eine hohe Oberflächenhärte und einen zähen Materialkern aufweisen. Dies wird durch die Verwendung von einsatzgehärteten Stählen erreicht. Gleitschutzketten für Pkw bestehen üblicherweise aus Kettengliedern mit einem Materialdurchmesser von 3–4 mm, die für Lkw liegen im Bereich von 7–9 mm.

Gleitschutzketten benötigen einen zusätzlichen Freiraum zwischen Reifen und Fahrzeugteilen. Gemäß Ö-Norm V 5117 darf bei Pkw-Reifen der Überstand der montierten Kette auf der Reifeninnenseite höchstens 20 mm und auf der Reifenaußenseite 25 mm betragen. Im Betrieb heben sich die Laufnetzteile der Gleitschutzkette von der Lauffläche ab. Die auftragende Höhe ist vom Reifenquerschnittsverhältnis, der Geschwindigkeit und der Kettenspannung abhängig [108]. Die sich vom Reifen abhebenden Kettenteile schlagen auf die Fahrbahn auf. Dies führt einerseits auf glatter Fahrbahn zur Erhöhung der Griffigkeit durch das Eindringen der Stahlteile in die Fahrbahnoberfläche, andererseits aber auch zum Verschleiß der Kette. Der Verschleiß wird durch die Schlagenergie verursacht, welche mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigt. Auf eisiger Fahrbahn, z. B. Blitzeis, sind Ketten aus groben Gliedern ungeeignet. Hier wirken kleine kurzgliedrige Ketten aus kantigen Profilen.

### 7.3.8.4 Kraftübertragung Kette–Fahrbahn

Die Hauptaufgabe der Gleitschutzkette ist, das Kraftschlussverhalten zu verbessern, das entscheidend vom Reifen, dem Fahrbahnzustand und den Betriebsbedingungen abhängt [109, 110].

Der Kraftschlussbeiwert, aufgetragen über dem Schlupf für eine Schneefahrbahn (Abb. 7.121) zeigt beispielhaft, dass sich zunächst der Kraftschluss mit

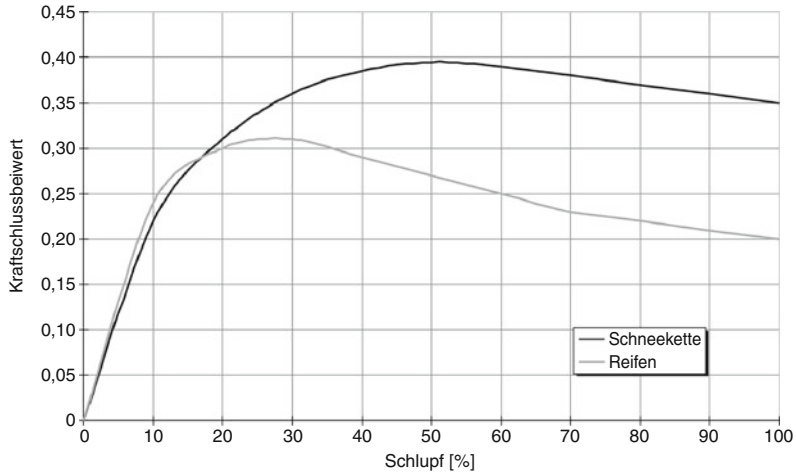



**Abb. 7.121** Kraftschluss-Schlupf-Diagramm auf Schnee (−1 °C)

steigendem Schlupf erhöht, ähnlich wie beim Reifen. Im Unterschied zum Reifen wird jedoch der Höchstwert des Kraftschlusses mit Ketten bei höherem Schlupf erreicht, d. h. dass unter bestimmten Schneebedingungen auch bei 100 % Schlupf noch ein guter Kraftschluss gegeben ist. Im Unterschied dazu verliert der Reifen unter diesen Bedingungen deutlich an Kraftschluss. In der Praxis zeigt sich, dass beim Anfahren am Berg stets etwas unterschiedliche Bedingungen zwischen dem rechten und linken Rad eines Fahrzeuges herrschen. Dies führt, zumindest bei Fahrzeugen ohne weitere Regelsysteme dazu, dass ein Rad durchdreht (100 % Schlupf) und kein Anfahren möglich ist. Im Unterschied dazu ist beim beketteten Reifen Kraftschluss gegeben. Dieser Effekt ist besonders deutlich erkennbar bei Temperaturen im 0 °C-Bereich, da die Schnee- oder Eisoberfläche mit einem dünnen Wasserfilm überzogen ist. Unter dem Druck des Reifens in der Aufstandsfläche wird der Wasserfilm verstärkt. Viele Autofirmen haben dieser Erkenntnis Rechnung getragen, indem das ESP-System bei Schneekettenbetrieb ausgeschaltet werden kann.

Fahrzeuge mit Gleitschutzketten erreichen auf schneebedeckter Fahrbahn den kürzesten Bremsweg bei blockierten Rädern. Das Fahrzeug ist in diesem Zustand jedoch nicht mehr lenkbar. Deshalb ist es wichtig, dass Gleitschutzketten im normalen Regelbereich des ABS, d. h. bei Schlupfwerten unter ca. 30 %, den Kraftschluss erhöhen. Hierzu sind feingliedrige Netzketten mit kantigen Gliedern oder zusätzlichen Greifelementen geeignet.

### 7.3.8.5 Montagesysteme

Eine Gleitschutzkette wird bestimmungsgemäß unter schlechten Witterungsbedingungen benötigt. Deshalb ist eine einfache Montage, insbesondere auch unter widrigen Umgebungsbedingungen, ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz einer Kette. Die verschiedenen Montagesysteme lassen sich wie folgt gliedern:

- Geteilte Ketten stellen das älteste Kettensystem dar. Es wird heute nur noch bei einfachsten Ketten und im Lkw-Bereich verwendet. Die Kette wird bei diesem System vor oder hinter dem Reifen ausgebreitet und bandartig auf den Reifen aufgezogen.
- Bei Seilketten besteht die innere Seitenkette aus einem Drahtseilring, der im offenen Zustand hinter dem Reifen durchgeführt werden muss, um ihn dann im oberen Reifenbereich zu schließen, so dass ein Seilring auf der Innenseite des Reifens entsteht. Auf der Außenseite gibt es verschiedene Verschlussmechanismen, die teilweise ein automatisches Nachspannen ermöglichen (Abb. 7.122).



**Abb. 7.122** Automatikratsche



**Abb. 7.123** RUD Centrax

- Bei Bügelketten besteht die innere Seitenkette aus einem Federstahlbügel, an dem die Laufnetzteile befestigt sind. Mit Hilfe des Bügels kann die Kette problemlos über den Reifen geschoben werden, was insbesondere bei engen Radkästen, wie beispielsweise Heckfahrzeugen oder winterlich vereisten Radkästen, besonders wichtig ist. Die Schließung erfolgt nach einer kurzen Radbewegung durch eine von außen zu betätigende Spannkette.
- Gleitschutzketten, die im Wesentlichen aus einem Kettengürtel bestehen, können auf eine innere Halterung verzichten, um engsten Durchgangsverhältnissen zwischen Reifen und Fahrzeugteilen Rechnung zu tragen, sofern sie auf der Radaußenseite durch Haltearme am Rad fixiert sind. Diese Kettentypen sind mit Abstand am leichtesten zu montieren, da keine Handgriffe auf der dem Fahrzeug zugewandten, nicht einsehbaren hinteren Radflanke nötig sind (Abb. 7.123).
- Rotationsketten wurden für Nutzfahrzeuge entwickelt, da mit größer werdendem Reifendurchmesser die Gleitschutzketten schwerer werden, was natürlich die Montage behindert. Bei diesem System wird über einen angetriebenen Schwenkarm ein Reibrad gegen die Innenseite des Reifens gedrückt, an welchem Kettenstränge befestigt sind, die gleichsam wie Streusplitt vor den Reifen geworfen werden und nach Überfahren durch den Reifen wieder eingesammelt werden (Abb. 7.124). Die Funktion dieses Systems erreicht jedoch noch nicht den Stand einer vollwertigen Gleitschutzkette. Es ist daher für den Kurzstreckenverkehr oder als Anfahrhilfe geeignet. Rotationsketten können auf Knopfdruck vom Fahrzeug aus eingeschaltet werden.

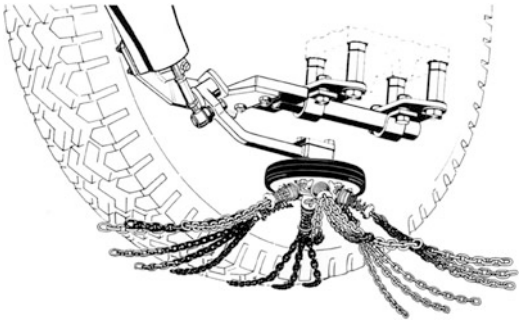


**Abb. 7.124** Rotogrip-System

## 7.4 Fahrwerkauslegung

### 7.4.1 Kinematik der Radaufhängung

Die Kinematik der Radaufhängung bestimmt die räumliche Bewegung des Rades bei Federungs- und Lenkbewegungen. Wegen der entscheidenden Bedeutung der Stellung des Rades und damit des Reifens zur Straße spielt die kinematische Analyse der Radaufhängung eine wichtige Rolle. Sie steht am Anfang des Entwicklungsprozesses, wenn das Achskonzept festgelegt wird und findet später im CAD-System zur Freigangsuntersuchung der Bauteile ihre Fortsetzung. Im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium wird der Einfluss der Achskinematik auf das Fahrverhalten in Simulationsrechnungen mit Vollfahrzeugmodellen beurteilt und im realen Fahrversuch optimiert.

Einige kinematische Kenngrößen sind genormt (ISO 8855/DIN 70000); vollständige Beschreibungen finden sich in [113, 114].

#### 7.4.1.1 Radhubkinematik

Der Sturzwinkel $\gamma$, der auf ebener Fahrbahn die Neigung des Rades zur Vertikalen beschreibt, beeinflusst die Übertragbarkeit von Seitenkräften zwischen Reifen und Straße. Beim üblicherweise negativen Sturz zeigt die Oberseite des Rades in Richtung Fahrzeugmitte, und das Rad möchte wie ein umgelegter Kegel auf einer Kreisbahn abrollen. Wird es von der Radaufhängung daran gehindert, entsteht eine Seitenkraft nach fahrzeuginnen. Außerdem wird durch negativen Sturz die innere Reifenschulter höher belastet und damit die Verformung des Latsches durch Seitenkraft von außen, die zur Entlastung des inneren Latschbereichs führt, zum Teil kompensiert. Daher ist das Seitenkraftübertragungspotenzial von Reifen unter negativem Sturz (innerhalb des verfügbaren Kraftschlusses) höher als bei positiven Werten. Für extreme Niederquerschnittsreifen ist zur Straße Sturz 0° anzustreben, um Kantenlauf zu vermeiden [115]. Bei Einzelradaufhängungen sollte also die Sturzänderung beim Einfedern den Wankwinkel des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt zumindest teilweise kompensieren, um positiven Sturz am kurvenäußeren Rad zu vermeiden. Starrachsen bieten hier den Vorteil, dass der Sturz zur Fahrbahn bei Kurvenfahrt konstant bleibt.

Der Vorspurwinkel ist positiv, wenn die Räder in der Draufsicht nach vorne innen zeigen, andernfalls spricht man von Nachspur. Durch einen kleinen stationären Vorspurwinkel im Minutenbereich werden im Reifenlatsch bei Geradeausfahrt geringe seitliche Schubspannungen erzeugt. Daraus resultieren links und rechts gegengleiche Seitenkräfte, die die Elastizitäten in der Radaufhängung vorspannen und an Vorderachsen das eventuell vorhandene Spiel in Spurstangengelenken und Lenkgetriebe eliminieren. Das Fahrzeug kann dadurch schneller auf Lenkwinkeleingaben reagieren und läuft stabiler geradeaus, da durch die Vorspannung ein Nulldurchgang der Gelenkkräfte im Lenkungsstrang vermieden wird.

Bei Federungsbewegungen kann sich der Vorspurwinkel mit dem Radhub ändern und das Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs beeinflussen; man spricht dann von Rollsteuern oder Wanklenken. Der für das Fahrverhalten maßgebliche Einfluss ist hier die Vorspuränderung beim Einfedern, also am kurvenäußeren Rad mit der höheren Radlast. Da die Hinterachse i.a. nicht direkt vom Fahrer beeinflusst werden kann, sind die Lenkwinkel, die sich über dem Federweg oder unter äußeren Kräften (s. ► Abschn. 7.4.2 Elastokinematik) einstellen, für das Fahrverhalten des Gesamtfahrzeugs entscheidend, obwohl sie klein sind. So kann beispielsweise mit einer Vorspurtendenz beim Einfedern an der Hinterachse ein untersteuernder Effekt erzeugt werden. Große Vorspuränderungen über dem Federweg führen auf unebener Fahrbahn aber zu niederfrequenten Lenkmomentschwankungen, die die Fahrspurhaltung beeinträchtigen, und sollten deshalb vermieden werden.

Die räumliche Bewegung der Radaufhängung, insbesondere des Radaufstandspunkts und des Radmittelpunkts, kann projiziert werden in die Radmittellängsebene (Seitenansicht) und in die Radquerebene (Ansicht von hinten).

Der Punkt in der jeweiligen Ebene, der das momentane Zentrum der Drehbewegung darstellt, ist der Momentanpol. Die beiden Pole, Längs- und Querpol, ◘ Abb. 7.125 und ◘ Abb. 7.126, können ersatzweise als Verbindungsstellen der Radaufhängung zum Aufbau betrachtet werden. Von ihnen

tedrive
Steering




# TEDRIVE iHSA®
# AKTIVIERT LENKSYSTEME

tedrive Steering hat speziell für den Nutzfahrzeugsektor die preisgekrönte und patentierte iHSA® Technologie (intelligent Hydraulic Steering Assist) weiterentwickelt. Mit dem innovativen iHSA® System lässt sich eine Vielzahl von Fahrerassistenzfunktionen wie aktive Spurhaltung, Seitenwindkompensation, City Mode, Anhängerstabilisierung, Radunwuchtenausgleich und Rangierhilfe via Joystick zuschalten. In tedrive Zahnstangen- und tedrive Kugelumlauflenkungen modular integrierbar, bietet die iHSA® Technologie Nutzfahrzeug- und Busherstellern bei allen hydraulischen Lenksystemen eine hohe Design- und Funktionsflexibilität.

## iHSA® – DAS INTELLIGENTE PLUS AN SICHERHEIT FÜR ALLE FAHRZEUGKLASSEN

tedrive Steering I Henry-Ford II-Straße 15 I 42489 Wülfrath, Deutschland
Fon: +49 (0) 2058 905-0 I sales@td-steering.com

www.td-steering.com

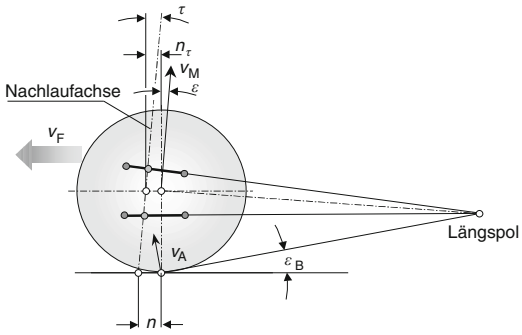



**Abb. 7.125** Schematische Seitenansicht (Vorderachse)

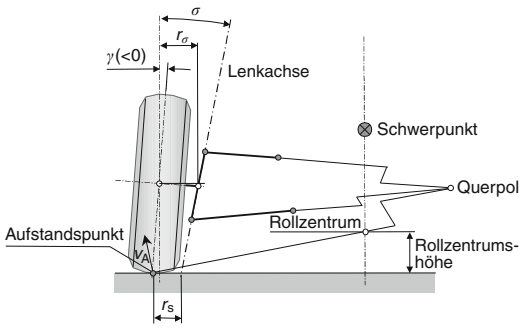



**Abb. 7.126** Schematische Heckansicht (Vorderachse)

gehen die Polstrahlen aus, die senkrecht auf den Geschwindigkeiten der betrachteten Punkte der Radaufhängung stehen. Stellt man sich als Ersatz für die Radaufhängung eine Geradführung des Radaufstandspunkt senkrecht zum Polstrahl vor, so hat eine Kraft senkrecht auf die Geradführung keine Bewegung des Radaufstandspunkts zur Folge. Diejenigen Komponenten von Längs- und Seitenkräften, die durch die Pole gehen, werden also direkt von den Lenkern der Radaufhängung aufgenommen, der Rest erzeugt Federungs- und damit Aufbaubewegungen. Der Winkel der Polstrahlen zur Horizontalen bestimmt den Anteil der Kräfte, der in den Lenkern abgestützt wird, und heißt deshalb Stützwinkel.

Beim Bremsen entsteht am Radaufstandspunkt eine Resultierende aus Bremskraft und dynamischer Achslastverlagerung. Zeigt diese Resultierende durch den Längspol, spricht man von 100 % Bremsnickausgleich, da keine Federungsbewegung auftritt. Der Bremsnickausgleich hängt von Radstand, Schwerpunktshöhe und Bremskraftverteilung ab; der Bremsstützwinkel $\varepsilon_B$ ist dagegen achsspezifisch und beschreibt die Neigung des Polstrahls vom Längspol zum Radaufstandspunkt. Da das Bremsmoment sich üblicherweise an der Radaufhängung abstützt, kann man sich Rad und Radträger fest verblockt vorstellen. Die ganze Einheit und so auch der Radaufstandspunkt drehen sich damit um den Längspol der Radaufhängung, für den Bremsstützwinkel ist also die Bewegung des Radaufstandspunkts als Angriffspunkt der Bremskraft maßgeblich.

Der Polstrahl vom Längspol zum Radmittelpunkt legt dessen momentane Geschwindigkeit fest; wenn diese eine Komponente nach hinten hat, spricht man von positivem Schrägfederungswinkel. Im Gegensatz zur Längsfederung aus den Gummilagern der Radaufhängung hat der Schrägfederungswinkel für den Fahrkomfort keine große Bedeutung mehr; er stellt aber den Antriebs-Stützwinkel $\varepsilon$ für den Antrieb über Gelenkwellen dar. In diesem Fall bleibt nämlich die Radaufhängung momentenfrei, die Antriebskraft greift für die Radaufhängung in Radmitte an. Das Versatzmoment von Radmitte zum Radaufstandspunkt ist das Antriebsmoment und wird am Achsgetriebe abgestützt. Damit bleibt das Rad gegenüber der Radaufhängung drehbar und der Radaufstandspunkt dreht sich nicht mehr um den Längspol der Aufhängung, sondern bewegt sich parallel zum Radmittelpunkt. Für den Antriebsstützwinkel ist also die Bewegung der Radmitte als Angriffspunkt der Antriebskraft maßgeblich. Ein Anfahrnickausgleich ergibt sich bei negativen Schrägfederungswinkeln an Vorderachsen und bei positiven an Hinterachsen. Bei Starrachsen dagegen stützt sich das Antriebsmoment am Achskörper ab; man kann sich Rad und Aufhängung fest verblockt vorstellen und der Antriebsstützwinkel ist gleich dem Bremsstützwinkel. Radträgerfeste Vorgelege-Untersetzungsgetriebe mit Drehrichtungsumkehr erhöhen den Antriebs-Stützwinkel; gleichsinnig drehende reduzieren ihn.

Der Querpol beschreibt die Bewegung des Radaufstandspunktes relativ zum Aufbau in der Radquerebene. Aus Symmetriegründen schneiden sich die Polstrahlen der beiden Achshälften in Fahrzeugmitte und legen das Rollzentrum fest. Die Verbindung der Rollzentren von Vorder- und Hinterachse

heißt Rollachse, um sie beginnt das Fahrzeug bei Kurvenfahrt im Moment des Anlenkens zu wanken. Der Abstand der Rollachse zum Schwerpunkt ist der Hebelarm der Trägheitskraft und bestimmt das Wankmoment, das über die Federung abgestützt wird. Ein Rollzentrum auf der Fahrbahn führt zu großen Federbewegungen und hohen Wankwinkeln. Liegen die Rollzentren in Schwerpunktshöhe, so nimmt die Federung keine Kraftkomponenten mehr auf und damit entsteht auch kein Wankwinkel. Hohe Rollzentren sind bei Einzelradaufhängungen aber mit deutlichen Spurweitenänderungen beim Durchfedern und damit mit Querschlupf am Radaufstandspunkt verbunden. Mit Rücksicht auf Traktion und Seitenführung sind deshalb Rollzentrumshöhen über 150 mm heute selten. (Starrachsen mit ihrer konstanten Spurweite können höhere Rollzentren aufweisen.) Durch die Neigung der Rollachse lässt sich die Verteilung der Wankfederrate auf Vorder- und Hinterachse beeinflussen. Ein z. B. an der Hinterachse höherliegendes Rollzentrum entspricht einer höheren Wankabstützung hinten, die zu größeren Radlastdifferenzen hinten führt, das Seitenführungspotenzial hinten reduziert und damit einen übersteuernden Einfluss darstellt. Die Summe der Radlastdifferenzen hängt nur von Schwerpunktshöhe und Spurweite ab und ist für alle Rollzentrumshöhen konstant, nur die Verteilung vorn zu hinten ist mit der Lage der Rollachse beeinflussbar.

Wenn sich die Rollzentren über dem Einfederweg ändern, verschiebt sich auch die Lage der Rollachse bei Beladung. Damit das Fahrverhalten bei voller Zuladung nicht unerwünscht beeinträchtigt wird, muss also die Rollzentrums-Höhenänderung von Vorder- und Hinterachse aufeinander mit dem Ziel abgestimmt werden, die Neigung der Rollachse und damit die Wankratenverteilung vorn zu hinten mit zunehmender Beladung nicht zu stark zu ändern.

Die Rollzentren und damit die Rollachse sind für den symmetrischen Federungszustand in der Fahrzeug-Symmetrieebene definiert. Beim einseitigen Federn lässt sich zwar zeichnerisch ein Schnittpunkt der beiden Polstrahlen vom Querpol zum Radaufstandspunkt bestimmen, der dann i.a. nicht mehr in der Mittellängsebene liegt, sondern seitlich versetzt; physikalisch deuten aber kann man die entstehende seitlich verlagerte Rollachse anschaulich nicht mehr. Entscheidend für die Aufbaubewegung unter Querbeschleunigung sind die Ein- und Ausfederwege.

Bei Kurvenfahrt und ausgeprägtem Wankwinkel ergibt sich durch die antimetrische Federungsbewegung eine links und rechts unterschiedliche Krafteinleitung in die Radaufhängung. Welchen Anteil der Resultierenden dabei die Lenker und welchen die Federung aufnimmt, hängt von der Höhe des Querpols ab, bzw. von dessen Höhenänderung über dem Federweg. Ist diese Höhenänderung klein oder Null (z. B. bei Längslenkerachsen), sind die in die Federung eingeleiteten Kraftkomponenten kurvenaußen kleiner als kurveninnen, das Fahrzeug federt also außen weniger ein als es innen ausfedert. Daraus resultiert eine Schwerpunktsanhebung, die das abzustützende Wankmoment vergrößert. Diesen unerwünschten Effekt nennt man Aufstützen. Er lässt sich durch ausreichende Rollzentrumshöhenänderung (abhängig von der Rollzentrumshöhe) verringern oder ganz vermeiden, weil dadurch die Asymmetrie der Federkraftänderung kurvenaußen und -innen reduziert wird.

### 7.4.1.2 Lenkkinematik

Die Lenkung soll sowohl die Führung des Fahrzeugs ermöglichen als auch eine Rückmeldung über Fahrzustand und Fahrbahnbeschaffenheit an den Fahrer geben. Diese Eigenschaften lassen sich im Wesentlichen mit einer gezielten Auslegung der Lenkdrehachse erreichen, um die das Rad bei Lenkbewegungen schwenkt.

Dabei sind in ◘ Abb. 7.126 der Spreizungswinkel $\sigma$ als Neigung der Lenkdrehachse zur Vertikalen gezeigt und der Lenkrollhalbmesser oder -radius $r_S$ als horizontaler Abstand des Radaufstandspunktes vom Durchstoßpunkt der Lenkdrehachse durch die Radaufstandsebene. In der Seitenansicht, ◘ Abb. 7.125, ergibt sich der Nachlaufwinkel $\tau$ ebenfalls als Neigung der Lenkdrehachse zur Vertikalen und die Nachlaufstrecke $n$ als horizontaler Abstand des Radaufstandspunkts vom Durchstoßpunkt. Nachlaufwinkel und -strecke können unabhängig voneinander gewählt werden, wenn man einen Nachlaufversatz $n_\tau$ einführt, der den horizontalen Abstand der Lenkdrehachse von der Radmitte in der Seitenansicht beschreibt.

Der Nachlaufwinkel erzeugt am kurvenäußeren eingeschlagenen Rad negativen Sturz, der sich günstig auf das Seitenkraftübertragungspotenzial der Reifen auswirkt. Kurveninnen ergibt sich positiver Sturz, der den Platzbedarf des voll eingeschlagenen Rades im Radhaus reduziert. Zusammen mit Nachlaufstrecke und Lenkrollradius ergibt sich ein Hebelarm der Radlast um die Lenkdrehachse, der Radlasthebelarm. Die entstehenden Momente bewirken eine Rückstellung der Lenkung, wenn sich die Größen kurveninnen und kurvenaußen unsymmetrisch ändern, was wegen der Ackermannbedingung i. A. der Fall ist (s. ► Abschn. 7.4.5, Gewichtsrückstellung). Bei schnellerer Kurvenfahrt überwiegt der Einfluss der Seitenkraft, die um die Nachlaufstrecke (und den Reifennachlauf) versetzt an der Lenkdrehachse angreift und ebenfalls rückstellend wirkt [116].

Beim Durchfedern dreht sich der Radträger in der Seitenansicht um seinen Längspol, und Nachlaufwinkel und -strecke ändern sich. Um diese Änderung zu begrenzen, und damit das Rückstellverhalten nicht zu sehr zu beeinflussen, muss der Längspol genügend weit entfernt sein, was die Größe der Stützwinkel einschränkt. Der Lenkrollradius stellt den Hebelarm der Bremskraft dar; bei negativen Werten (Radaufstandspunkt innerhalb des Durchstoßpunkts) ergibt sich ein Lenkwinkel, der dem bei unsymmetrischen Bremskräften entstehenden Giermoment entgegengesetzt ist. Allerdings ist auch die Rückmeldung am Lenkrad entgegengesetzt zur Störung.

Der Spreizungsversatz $r_\sigma$ als horizontaler Abstand des Radmittelpunkts vom Schnittpunkt Lenkdrehachse/Radachse in der Ansicht von hinten ist der Hebelarm einer Stoßkraft, die auf das ungebremste Rad einwirkt. Der Spreizungsversatz wird deshalb auch Störkrafthebelarm genannt. Das Versatzmoment zwischen Radaufstandspunkt und Radmittelpunkt geht dabei als Beschleunigungsmoment in die Raddrehzahl ein; die Radaufhängung bleibt momentenfrei.

Beim Antrieb über Gelenkwellen muss der Beugewinkel zwischen radseitigem und getriebeseitigem Wellenteil berücksichtigt werden. Der Hebelarm der Antriebskraft oder Triebkrafthebelarm [113] ist bei Beugewinkel 0° gleich dem Störkrafthebel. Für nach innen oben geknickte Abtriebswellen wird der Triebkrafthebel größer, für nach innen unten geknickte kleiner als der Störkrafthebel.

## 7.4.2 Elastokinematik

Die Elastokinematik beschreibt die Bewegung der Räder gegenüber der Karosserie unter Berücksichtigung der aus den Radkräften resultierenden elastischen Verformungen der Achskomponenten (ISO 8855).

Mit Hilfe von Elastomerlagern (meist als Gummilager ausgeführt) werden Elastizitäten der Radaufhängung gezielt in Achsen eingebaut. Um den heute bei einem PKW geforderten Abrollkomfort realisieren zu können, muss die Radaufhängung eine Längsfederung zulassen, die üblicherweise durch Gummilager realisiert wird. Auch um Geräusche von den Insassen fern zu halten, sind Gummilager zwischen den Metallbauteilen unverzichtbar. Zusätzlich sind Elastizitäten unvermeidbar, denn neben den Gummilagern weisen auch die Stahl- und Aluminiumbauteile nennenswerte Elastizitäten auf. Diese bewirken unter Lasten Änderungen von Vorspur und Sturz. Achsgeometrie und -elastizitäten müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass das durch elastische Verformungen bedingte Lenkverhalten die Fahreigenschaften optimiert. Da die Lenkwinkel aus den Elastizitäten verhältnismäßig klein sind, kann durch sie vor allem das Fahrverhalten bei kleinen Schräglaufwinkeln und bei höherer Geschwindigkeit verbessert werden.

Nachstehend werden einige prinzipielle Zusammenhänge dazu erläutert. Eine genaue Achsauslegung ist nur durch Simulation möglich, weil viele Einzeleinflüsse und die räumliche Anordnung der gesamten Radaufhängung zu berücksichtigen sind. Als Simulationsmodelle werden heute meist MKS-Modelle, wo erforderlich (z. B. Verbundlenkerachsen) auch nichtlineare FEM-Modelle verwendet (► Abschn. 11.3).

### 7.4.2.1 Wirkung von Bauteilelastizitäten

Unter Bauteilelastizitäten werden die unvermeidlichen Elastizitäten der benötigten Metallbauteile verstanden. Die Verformungen der Achsbauteile und der Gummilager wirken sich prinzipiell glei-

chermaßen auf das Fahrverhalten aus und können deshalb beide gezielt genutzt werden [117]. Zu beachten ist jedoch, dass sich Gummi während der Fahrzeuglebensdauer setzt und verhärtet, während Metalle ihre Elastizitäten beibehalten. Für die Schwingungsisolation ist es günstig, die Elastizitäten in Gummilagern zu realisieren, vgl. ▶ Abschn. 7.4.2.2, weil die Materialdämpfung von Gummi erheblich größer ist als jene von Stahl oder Aluminium.

Zu beachten ist, dass die Verschiebungen an den Kinematikpunkten der Achsträger bei hohen Lasten bis zu einigen Millimetern betragen können und deshalb gegenüber den Gummilager-Verformungen nicht zu vernachlässigen sind.

Dreieckslenker tragen in Doppelquerlenker- und Federbeinachsen erheblich zur Gesamtelastizität bei.

So kann der Querlenker einer Federbeinachse durchaus eine zusätzliche Längsfederung von mehreren Millimetern bewirken. Der Beitrag des Radträgers zur Elastokinematik hängt stark vom Achsprinzip ab. In Federbeinachsen wirkt der Dämpfer als radführendes Element und ist folglich auf Biegung belastet. Die Durchbiegung des Dämpfers bewirkt nicht nur Verkantungswinkel am Kolben und an der Stangenführung, sondern liefert auch unter Seitenkraft einen Beitrag zum Sturz, ggf. auch zum Lenkwinkel. Die Elastizität der Karosserie kann zu Klapper- und Knarzgeräuschen sowie zu Zitterbewegungen führen, siehe auch ▶ Abschn. 3.4. Durch ihre globale Torsion und Biegung beeinflusst die Karosserie zwar nicht die Elastokinematik der Radaufhängung, wohl aber das Fahrverhalten. Den größeren Einfluss haben jedoch lokale Elastizitäten. Sie dürfen meist nicht einzeln betrachtet werden, weil sich eine Belastung an einem Karosserielager auch an anderen Lagern als Verformung auswirkt [118, 119]. Entscheidend ist, ob durch die Gesamtverformung ein Lenkwinkel hervorgerufen wird. Während gerade Stablenker in der Regel als starr betrachtet werden können, muss die Elastizität der wegen der Freigängigkeit gekröpften Lenker berücksichtigt werden. Auch Kugelgelenke weisen meist eine relevante Elastizität auf, die sich zusätzlich über der Laufzeit eines Fahrzeuges erhöhen kann.

Da Fahrzeuge auch kosten- und gewichtsmäßig zu optimieren sind, kann nicht gefordert werden, dass alle Bauteile beliebig steif sein sollen. Vielmehr müssen durch geschickte Konstruktion die Bauteile und die gesamte Radaufhängung so ausgelegt werden, dass die Elastizitäten keine schädliche Wirkung haben oder besser sogar nützlich sind [120].

In der Fahrzeugentwicklung wird zunächst durch Simulation untersucht, welche Elastizitäten zulässig sind. Diese werden auf Gummilager, Kugelgelenke und Achsbauteile aufgeteilt. Dann werden die Bauteile konstruiert. Mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) wird die Festigkeit überprüft und die erreichte Steifigkeit ermittelt. In der Achs- und Gesamtfahrzeugsimulation wird das Verhalten unter Berücksichtigung aller relevanten Elastizitäten beurteilt. Wenn die Bauteile gefertigt sind, werden auf Prüfständen die Steifigkeiten der Achsbauteile und Gummilager überprüft, aber auch das elastische Verhalten einer Achse oder des Gesamtfahrzeuges nachgemessen. Bei dem in ◘ Abb. 7.127 gezeigten MTS System-Prüfstand wird die Karosserie gefesselt. Während über Plattformen die vier Räder weg- oder kraftgesteuert belastet werden, nehmen Sensoren die Winkel- und Positionsänderungen an den Rädern auf. Die Messergebnisse werden mit den vorher durchgeführten Berechnungen verglichen, um ggf. genauere Erkenntnisse über die eingesetzten Simulationsverfahren zu gewinnen. Im Fahrversuch zeigt sich schließlich, ob das Zusammenwirken aller Einflüsse, d. h. insbesondere der Kinematik und Elastokinematik, unter allen denkbaren Fahrzuständen tatsächlich das gewünschte Fahrverhalten ergibt.

### 7.4.2.2 Elastomerlager

Elastomerlager haben eine Reihe von Aufgaben im Fahrwerk zu erfüllen. So sollen sie

- Winkelbewegungen z. B. als Alternative zu Kugelgelenken ermöglichen,
- Federwege in den Fahrwerkanbindungspunkten zur Verfügung stellen sowie über Bedämpfung und Isolierung von Schwingungen des Rad-/Reifensystems und der Aggregate den Komfort für die Insassen verbessern,
- als Gestaltungselement der elastokinematischen Fahrwerksauslegung das Vorspurver-

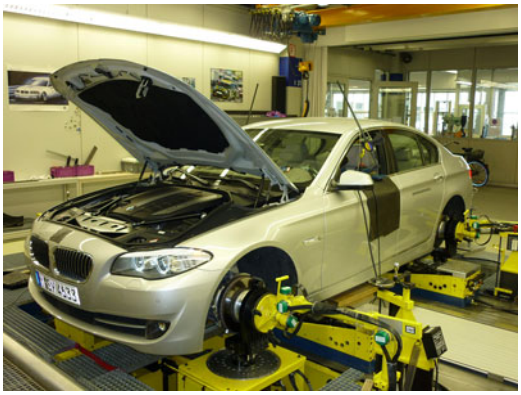


**Abb. 7.127** Prüfstand zur Messung der Kinematik und Elastokinematik

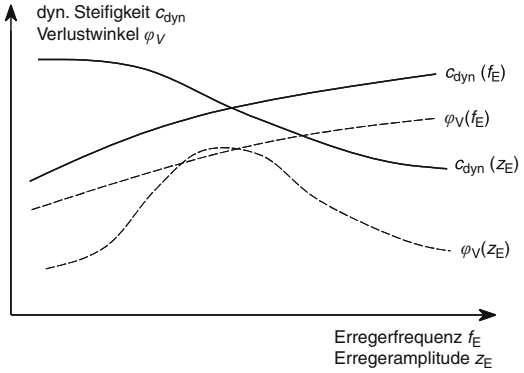



**Abb. 7.128** Frequenz- und Amplitudenabhängigkeit von Elastomerlagereigenschaften

halten der Räder in Abhängigkeit von äußeren Längs-, Quer- und Hochkräften gezielt beeinflussen.

Diese funktionalen Anforderungen stehen häufig im Widerspruch zueinander.

**Gelenkfunktion** Im Vergleich zum Kugelgelenk stellt ein entsprechend ausgelegtes Elastomerlager die Gelenkfunktion kostengünstiger dar. Gleichzeitig wird bei der Übertragung der Kräfte eine oft erwünschte Elastizität und Dämpfung erreicht. Ein weiterer Vorteil von elastischen Gelenken ist das Fehlen von Losbrechmomenten, insbesondere unter Vorlast (z. B. Radlast). Dieser Vorteil kann bei großen Auslenkungen und gleichzeitig erforderlicher hoher radialer Steifigkeit des Lagers jedoch zum Nachteil werden. Das resultierende elastische Rückstellmoment kann dann z. B. die gewünschte Gelenkfunktion beeinträchtigen oder die hohe Torsionsbelastung einen Kompromiss bei der radialen Steifigkeitsauslegung erfordern.

**Schwingungsisolation und -dämpfung** Bei stoßförmiger Störungseinleitung ermöglicht eine elastische Lagerung sowohl einen allmählichen Anstieg der weitergeleiteten Kraft als auch eine kurzzeitige Speicherung der eingeleiteten Stoßenergie mit anschließender teilweiser Absorption durch die Dämpfung des Elastomers. Hieraus ist erkennbar, dass neben den elastischen Eigenschaften des Elastomerlagers auch die Dämpfung eine wesentliche Rolle spielt.

Die dynamische Federsteifigkeit hat auf das Schwingungsisolationsverhalten einer elastischen Lagerung einen großen Einfluss und ist damit eine wichtige Beurteilungs- und Auslegungsgröße.

Federsteifigkeit und Dämpfung bei dynamischer Beanspruchung sind durch die viskoelastische Natur der Elastomere im Wesentlichen von der Frequenz, der Erregeramplitude und der Temperatur abhängig, Abb. 7.128. Mit steigender Frequenz vergrößern sich u. a. dynamische Federsteifigkeit, Verlustwinkel und Dämpfung. Mit abnehmender Erregeramplitude ist ebenfalls eine Erhöhung der Steifigkeit verbunden, bei gleichzeitiger Ausbildung eines Maximums des Verlustwinkels. Schließlich beeinflusst auch die Temperatur des Elastomer-Federkörpers sowohl Federrate als auch Dämpfung des Lagers und wirkt sich auf die Lebensdauer aus.

Voraussetzung für gute Isolationswirkung ist ein genügend großes Verhältnis von Erregerfrequenz zu Systemeigenfrequenz [121]. Liegt die Erregerfrequenz unterhalb des Wurzel 2-fachen der Systemeigenfrequenz, ist keine Isolation mehr möglich, Abb. 7.129. In der Praxis hat sich ein Verhältnis zwischen Lagersteifigkeit und lokaler Karosseriesteifigkeit von mindestens 1 : 10 bewährt.

**Isolierung von schwingenden Bauteilen** Die Isolierung von Erregungen aus Rad-/Reifensystem, Mo-

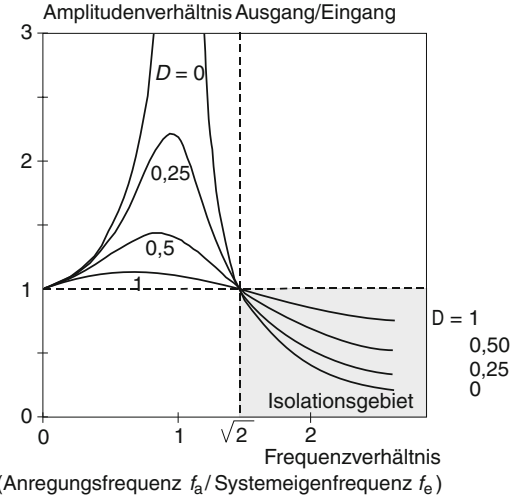



**Abb. 7.129** Einfluss von Dämpfung und Frequenzverhältnis beim Ein-Massen-Schwinger mit Fußpunkterregung

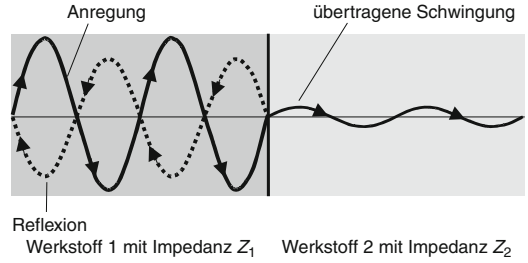



**Abb. 7.130** Schallisolierung durch Reflexion am Werkstoffübergang

tor/Getriebe, Hinterachsgetriebe, Achsträger usw. von der Karosserie bzw. den Insassen stellt einen der wichtigsten Beiträge der Elastomerlager dar. Hierbei wird versucht, durch weiche Lagerung des schwingenden Körpers die im Lagerelement als Funktion der Auslenkung entstehende Kraft niedrig zu halten bzw. nur stark gemindert in die Karosserie einzuleiten. Unter diesem Abbau von Erregerkräften versteht man im schwingungstechnischen Sinne Isolation bzw. Dämmung oder Entstörung. Bei dieser Funktion der Elastomerlager ist Dämpfung nicht erwünscht, da sie zu einer Erhöhung der übertragenen Kraft führt. Da sich Körperschall in festen und flüssigen Medien wellenförmig ausbreitet, wird die Schallisolierung in elastischen Lagerungen mittels Reflexion bewirkt, ◘ Abb. 7.130. Stößt die Welle dabei auf eine Übertragungsstelle zweier unterschiedlicher Werkstoffe mit den Schwingwiderständen (Impedanzen) $Z_1$ und $Z_2$, so wird sie teilweise reflektiert, d. h. in ihrer Ausbreitung gehindert. Dabei ist die Reflexion umso größer, je größer der Impedanzsprung $p$ als Verhältnis $Z_1/Z_2$ ist.

Elastomerwerkstoffe besitzen einen niedrigen Elastizitätsmodul und geringe Dichte, daraus resultieren die sehr wirkungsvollen körperschalldämmenden Eigenschaften. Da es sich oft nicht vermeiden lässt, im Betrieb Resonanzstellen des Systems zu durchfahren, ist es von hoher Wichtigkeit, die elastische Lagerung mit ausreichender Dämpfung zu versehen, um dem schwingenden System kinetische Energie durch Umwandlung in Wärme zu entziehen. Dadurch werden Schwingungsausschläge beim Durchfahren einer Resonanzstelle in Grenzen gehalten. Verlustwinkel und Dämpfungsmaß beschreiben den Parameter Dämpfung in einem schwingungsfähigen System. Der Verlustwinkel sagt aus, um wieviel Grad die aus elastischem und dämpfendem Anteil zusammengesetzte Kraft der elastischen Verformung vorauseilt; das Dämpfungsmaß ist das dimensionslose Verhältnis der gegebenen Dämpfung zur kritischen Dämpfung [122].

Die Dämpfung entsteht durch die innere Reibung der Elastomere. Damit verbunden ist aber auch eine dynamische Verhärtung, die mit zunehmender Frequenz ansteigt, sodass die Isolierwirkung bei höheren Frequenzen abnimmt. Es überlagert sich die schon erwähnte Zunahme der Steifigkeit mit abnehmender Amplitude, sodass hier auch die Grenzen der reinen Elastomerlager deutlich werden. Mit zunehmender Shore-Härte nimmt die Werkstoffdämpfung im Allgemeinen zu. Steifigkeit, Dämpfung und Festigkeit werden wesentlich von den dem Grundpolymer beigefügten Füllstoffen beeinflusst, wobei (klar spezifizierte) technische Ruße eine besondere Rolle spielen [123].

**Bauarten** (◘ Abb. 7.131): Grundsätzlich kann Gummi in Elastomerlagern auf Schub (Scherung) oder Druck/Zug beansprucht werden. Aufgrund der Volumenkonstanz des Werkstoffs lässt sich bei

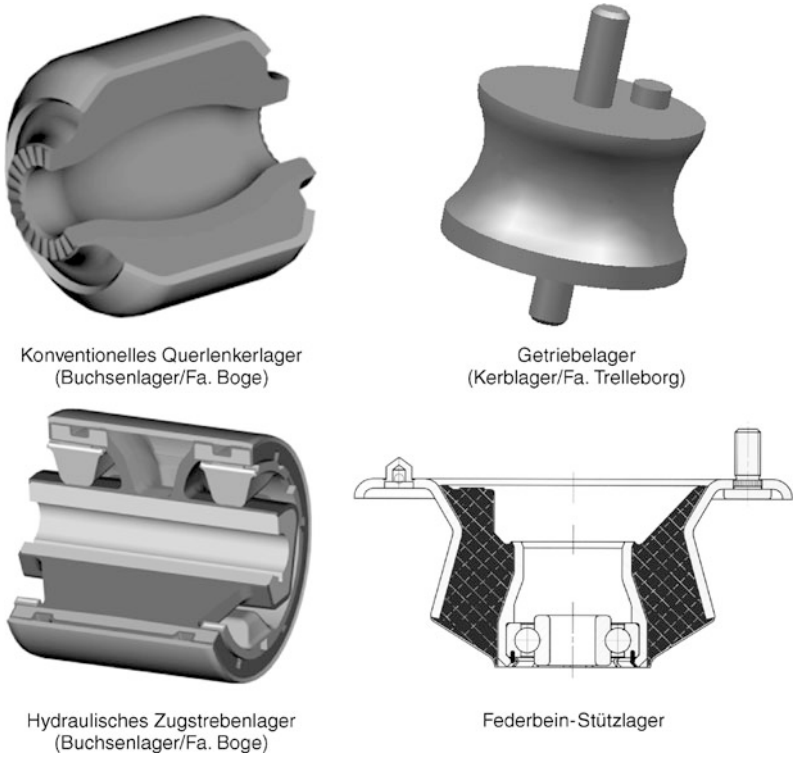



**Abb. 7.131** Beispiele für Lagerausführungen

der Druck/Zug-Beanspruchung eine größere Steifigkeit realisieren als bei Schubbeanspruchung. Mit diesen zwei Beanspruchungsarten können konstruktiv richtungsabhängige Lager ausgelegt werden. Eine positive Beeinflussung hinsichtlich Funktion (z. B. Vergrößerung der möglichen Torsionswinkel bei Lenkerbuchsen) und Lebensdauer kann durch Einbringung von Druckvorspannungen in den Elastomerkörper erzielt werden. U. a. werden hierdurch die Schrumpfspannungen kompensiert, die durch das Abkühlen nach dem Vulkanisieren entstehen [124].

**Konventionelle Gummilager** Für viele Anwendungsfälle wie z. B. die Anbindung von Lenkern, Streben oder Stoßdämpfern gehören rotationssymmetrische Buchsenlager nach wie vor zu den kostengünstigsten Lösungen. In Abhängigkeit von den auftretenden Belastungen ist hierbei der Gummi am Innen- und Außenteil anvulkanisiert, eingepresst oder auch eingeknöpft. Zur Erzielung richtungsabhängiger und funktionsoptimierter Kraft-/Weg-Kennlinien werden Buchsenlager häufig mit Nieren versehen. Darüber hinaus kann durch entsprechend angeordnete Stege und Anschlagpuffer sowie das Einvulkanisieren von Zwischenblechen die Variabilität der Kennlinien weiter erhöht werden. Insbesondere für die Motor-/Getriebelagerung wird neben den Buchsenlagern eine Vielzahl weiterer Bauformen eingesetzt, um entsprechend Aggregatanordnung, Lagerungskonzept und verfügbarem Bauraum bestmögliche Lagereigenschaften zu erzielen. Häufig verwendete Ausführungsformen sind z. B. Keillager, Dachlager und sog. Kerblager [121–123].

**Hydrolager** Über die reine Elastomerdämpfung hinaus kann durch Kombination des Gummilagers mit einer entsprechenden Hydraulikvorrichtung das Dämpfungsangebot erheblich erhöht und innerhalb gewisser Grenzen in Abhängigkeit von Schwingfrequenz und -amplitude bedarfsgerecht

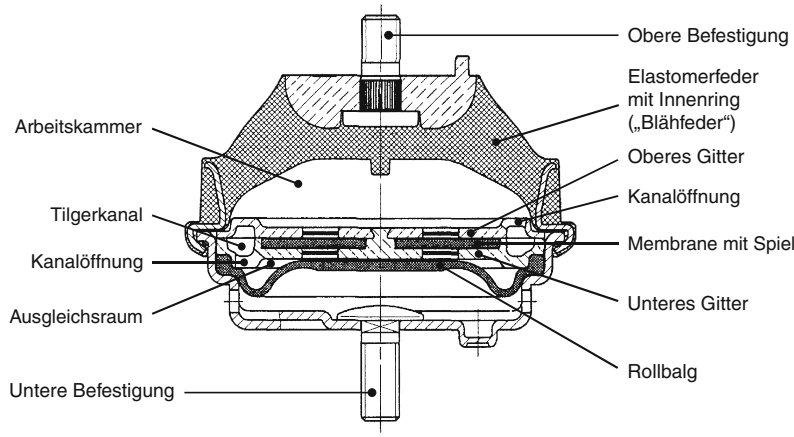



**Abb. 7.132** Einkammer-Hydrolager mit Entkopplung

angepasst werden. Hierbei stehen zwei grundsätzliche Effekte zur Verfügung: 1. Dämpfung durch viskose Reibung, 2. Schwingungstilgung durch Beschleunigung von Fluidmasse. Abb. 7.132 zeigt exemplarisch die Ausführung eines hydraulischen Motorlagers: Die Arbeitskammer wird durch die äußere Schwingungsanregung in ihrem Volumen verändert und dadurch Über- oder Unterdruck erzeugt. Die Flüssigkeitsmasse im Kanal und die Blähwandsteifigkeit der Elastomerfeder bilden ein schwingfähiges System, das durch die Anregung in einem abgestimmten Frequenzbereich in Resonanz gerät und durch die Trägheit sowie Dissipation der Strömung ein hohes Dämpfungsmaß erzeugt. Die beiden Gitter mit zwischenliegender, oftmals spielbehafteter Membran sorgen dafür, dass für kleine Anregungen die hydraulische Dämpfung abgeschaltet wird; dies verbessert die Akustik. Im Automobilbau hat sich die Anwendung hydraulisch gedämpfter Lager für die Längsschwingbewegung der Räder und bei der Aggregatelagerung bewährt [125]. Als gewisser Trend bei den hydraulischen Motorlagern ist die Integration der Anschlagfunktion zur Begrenzung der Aggregatebewegung (insbesondere im Fahrbetrieb und bei Unfallsituationen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich) in das Lager erkennbar [136, 137].

**Schaltbare Lager** Nicht nur zur Lagerung von Dieselmotoren werden heute vielfach Hydrolager eingesetzt, bei denen die Hydraulik entweder je nach Betriebszustand zu- bzw. abgeschaltet, oder aber bedarfsgerecht verändert werden kann. Ziel ist hierbei meistens, im hinsichtlich Akustik und Vibrationen kritischen Leerlauf ein Maximum an Isolation zu erhalten und dagegen im Fahrbetrieb durch Zuschalten oder entsprechendes Verstellen der Hydraulik die raderregte Aggregatbewegung (Stuckern) unter Inkaufnahme eines reduzierten Isolationsgrades in gewünschtem Maße zu bedämpfen. Die Verstellung kann hierbei elektrisch [126] oder mittels Unterdruck erfolgen. Abb. 7.133 zeigt ein Schaltlager, bei dem durch Anlegen von Unterdruck ein Bypasskanal geöffnet wird, der dann den auf die Stuckerfrequenz abgestimmten Ringkanal überbrückt. Hierdurch wird der hydraulisch bedingte Dämpfungsanstieg in einen höheren, im Leerlauf nicht relevanten Frequenzbereich verschoben. Zusätzlich kann der vor diesem Anstieg auftretende Abfall der dynamischen Steifigkeit dazu genutzt werden, in einer dominanten Anregungsfrequenz die Isolation lokal zu erhöhen.

Nachteil der bisher beschriebenen „dämpfungssteuerbaren Hydrolager" ist einerseits, dass die Hydraulik und damit die Verstellung der dynamischen Steifigkeit nur in einer Richtung wirkt und andererseits, dass nur die dynamische, nicht aber die statische Federrate verändert werden kann. Dieser Nachteil wird durch „steifigkeitssteuerbare Hydro-

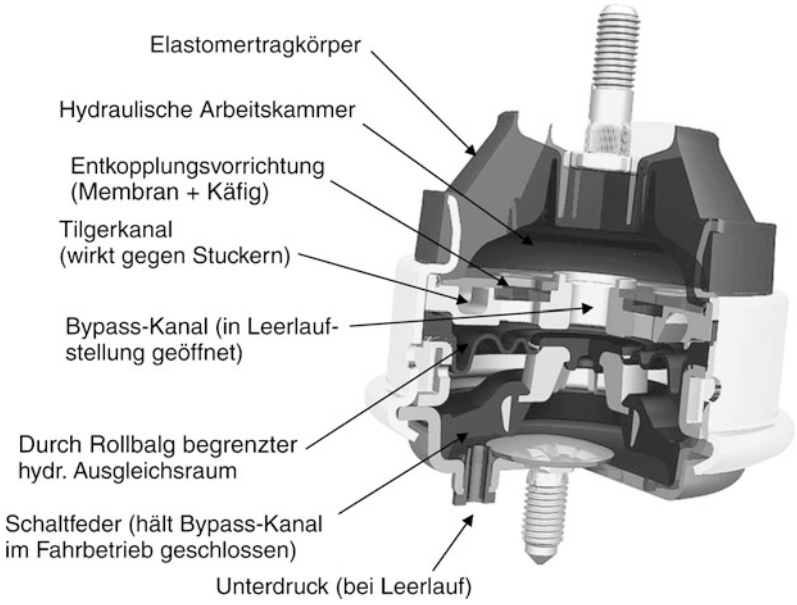



**Abb. 7.133** Dämpfungssteuerbares Hydrolager (Vibracoustic)

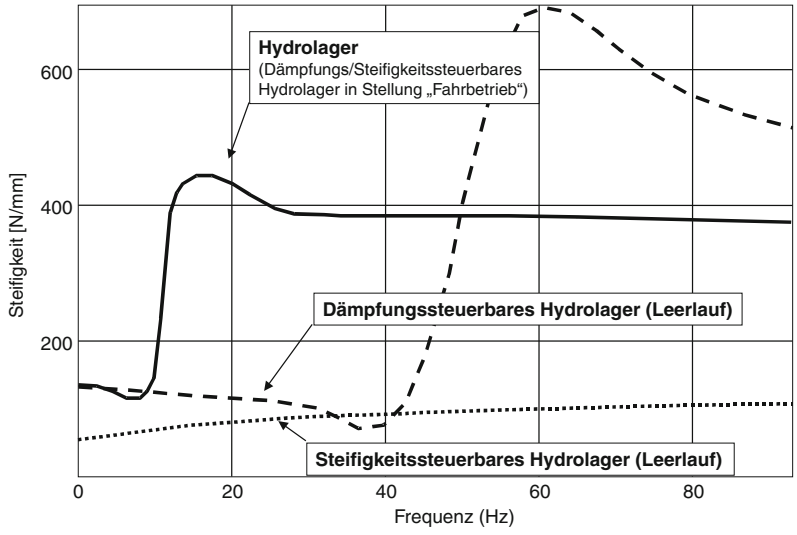



**Abb. 7.134** Vergleich der dynamischen Steifigkeitskennlinien schaltbarer Hydrolager

lager" behoben, Abb. 7.134. Hierzu sind 2 konzeptionelle Ansätze bekannt, die beide auf der Parallelschaltung eines auf den Leerlauf abgestimmten Basisgummilagers mit einem zuschaltbaren, für den Fahrbetrieb optimierten Hydrolager beruhen. Während bei der von der Fa. Trelleborg entwickelten Ausführung die An- bzw. Abkopplung der beiden Lagerelemente durch einen elektrisch angetriebenen, kardanischen Klemmmechanismus erfolgt (Abb. 7.135), dient bei dem Konzept von der Fa. ContiTech ein wahlweise aufzubauendes Luftpolster als Entkopplungselement.

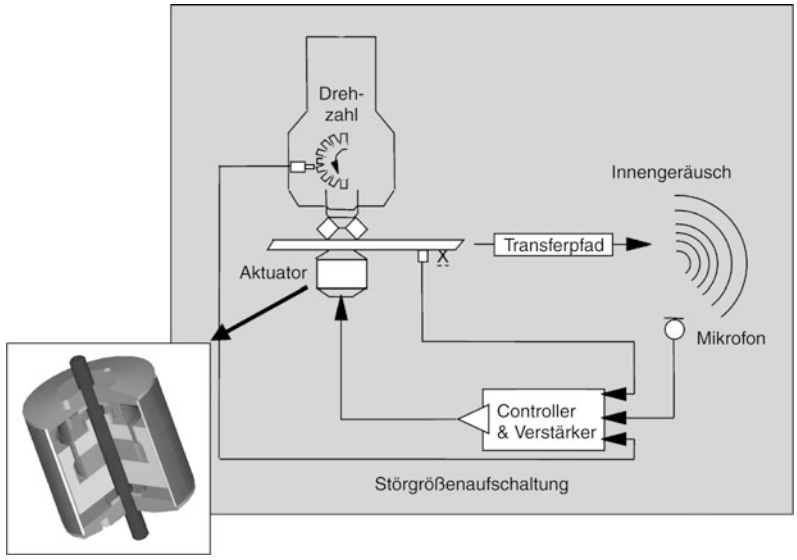



**Abb. 7.135** Beispiel für ein aktives Lagerungssystem mit elektromagnetischem Aktuator (Fa. Trelleborg)

**Aktive Lager** Unter diesen Begriff fällt eine ganze Reihe neuer, größtenteils noch nicht abgeschlossener Entwicklungen. Im erweiterten Sinn werden darunter Lager verstanden, bei denen die Eigenschaften durch Änderung der Parameter Dämpfung, Steifigkeit oder Masse dem jeweiligen Betriebszustand optimal und deutlich schneller als bei den vorgenannten Schaltlagern angepasst werden können. Ansätze zur technischen Umsetzung bieten hierbei u. a. elektro- sowie magnetorheologische Flüssigkeiten, deren Viskosität durch Anlegen eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes erhöht werden kann. Die Ansteuerung solcher Lager kann dabei als einfache „Open-Loop"-Steuerung in Abhängigkeit eines oder mehrerer Betriebsparameter wie z. B. der Motordrehzahl oder aber auch als komplexes, selbst optimierendes Regelungssystem ausgeführt sein [127]. Selbstverständlich fallen aber auch diejenigen Lagerausführungen unter diese Rubrik, die selbst Aktionskräfte erzeugen und dem System zur Schwingungskompensation ge-genphasig zur störenden Anregung aufprägen. Dies kann direkt, z. B. durch Unterdruck oder über einen Elektromagneten geschehen, oder aber auch in Form einer schwingenden, sogenannten seismischen Masse. Zur Krafterzeugung sind neben den klassischen hydraulischen, pneumatischen und elektromagnetischen Lösungen auch piezoelektrische und magnetostriktive Aktoren interessante Alternativen [128]. Bis auf wenige spezielle Einzelanwendungen im Bereich der Aggregatlagerung konnten sich aktive Lager bisher nicht als technische Serienlösungen durchsetzen. Hauptgrund hierfür ist wohl der im Verhältnis zum erzielbaren Nutzen heute noch beträchtliche Kostenaufwand.

**Kombination von Elastomerlagern mit anderen Bauelementen** Ein nicht zu unterschätzender Vorteil von Elastomerlagern ist, dass sie sich zur Erzielung einer kompakten, gewichtsoptimierten Bauweise leicht zusammen mit anderen Komponenten in komplexere Bauteile integrieren lassen. Beispiele hierfür sind das in Abb. 7.131 dargestellte Federbeinstützlager oder die elastische Anbindung eines Kugelgelenkes mittels anvulkanisierter Gummihülse an einen Querlenker zur Erzielung positiver elastokinematischer Effekte [129]. Um den durch die Elastomereigenschaften begrenzten Spielraum (z. B. hinsichtlich der Dämpfungsuntergrenze oder des Verhältnisses Axial- zu Radialsteifigkeit) zu vergrö-

ßern, können die Elastomerfedern auch mit anderen Federelementen wie z. B. Schraubenfedern aus Stahl kombiniert werden [130].

**Tilger** Einen Sonderfall für den Einsatz von Elastomerlagern stellen Schwingungstilger dar, bei denen eine elastisch aufgehängte Masse zur Tilgung störender Vibrationen verwendet wird. Die Tilgerwirkung beschränkt sich hierbei allerdings auf eine bestimmte Frequenz. Durch Erhöhung der Dämpfung, ggf. auch mittels Hydraulik, kann die „Breitbandigkeit" erhöht werden. Auch hier besteht die Möglichkeit, durch den Einsatz von Aktuatorik den wirksamen Frequenzbereich bedarfsgerecht auszuweiten. So kann eine aktive Lagerung auch als Kombination eines konventionellen Lagerelements mit einem aktiven Tilger dargestellt werden.

**Lagerauslegung** In Anbetracht der sehr speziellen und komplexen Eigenschaften der einsetzbaren Werkstoffe ist es bei der Entwicklung von Elastomerlagern besonders wichtig, von Anfang an sämtliche Anforderungen sowie Rahmenbedingungen zu kennen und zu berücksichtigen. Gegebenenfalls muss nach Vorliegen einer ersten Lagerauslegung auch noch einmal der umliegende Bauraum verändert werden. Die konstruktive Auslegung der Lager erfolgt heute standardmäßig mit Hilfe entsprechender Simulations- und FEM-Programme [119, 121, 125]. In diese Untersuchungen müssen auch verstärkt Toleranz- bzw. Grenzmusterbetrachtungen mit einfließen, um später in der Serienfertigung eine gleich bleibende Qualität der Fahrzeuge bezüglich Fahrverhalten und Komfort sicherzustellen [138].

Neben den positiven funktionalen Eigenschaften weisen Elastomere noch eine Reihe einschränkender Merkmale auf, die bei der konstruktiven Auslegung der Lager sowie deren Umfeld berücksichtigt werden müssen. So verändern Elastomerwerkstoffe in Abhängigkeit von den einwirkenden Lasten, Temperaturen und Medien ihre Eigenschaften wie Steifigkeit, Dämpfung und Festigkeit über der Zeit [132]. Hinzu kommt ein mit höherer Temperatur stärker werdendes Fließverhalten, das bei statisch vorbelasteten Lagern zu vermehrten Setzungserscheinungen führen kann. Diese treten hauptsächlich während der ersten Kilometer eines Fahrzeugs auf und müssen unter Umständen konstruktiv vorgehalten werden. Bei der Auslegung hinsichtlich der statischen und dynamischen Lagereigenschaften muss angesichts der unterschiedlichen Einsatzbedingungen oft ein Kompromiss gefunden werden, der alle Extrembedingungen abdeckt und auch die zeitlichen Veränderungen des Elastomers mit berücksichtigt. Neben hohen und sehr niedrigen Temperaturen wirken sich UV-Licht und Ozon negativ auf Lebensdauer und Bruchlast aus. Insbesondere im Hinblick auf das Haftsystem ist auch auf mögliche korrosive Medien wie Salzwasser ein besonderes Augenmerk zu richten. Bezüglich der Temperaturbelastung ist nicht nur die auftretende Umgebungstemperatur, sondern auch die infolge Dämpfungsarbeit im Lager selbst entstehende Wärme zu berücksichtigen.

Wegen seiner insgesamt ausgeglichensten Eigenschaften ist Naturkautschuk (NR) der am häufigsten für Lager eingesetzte Elastomerwerkstoff. Sein größter Nachteil ist seine eingeschränkte Temperaturbeständigkeit. Während für NR-Mischungen von den Lagerherstellern im Allgemeinen eine maximale Dauertemperatur von ca. 80 °C genannt wird, liegen die kurzzeitig im Fahrzeug von den Bauteilen zu ertragenden Temperaturen oft deutlich höher. Da sich aber bei höheren Temperaturen die Lebensdauer reduziert, ist in solchen Fällen neben den Betriebslasten die genaue Kenntnis des im Fahrzeugleben auftretenden „Temperaturkollektivs" wichtig. Häufig müssen in der Lagerumgebung temperatursenkende Maßnahmen ergriffen werden. Dazu gehören Wärmeschutzbleche, aber auch die gezielte Zuführung von Kühlluft. Grundsätzlich stehen zwar mit synthetischen Kautschuksorten wie z. B. EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk), FKM (Fluor-Kautschuk), oder VMQ (Silikon-Kautschuk) auch Elastomerwerkstoffe für Temperaturen bis über 150 °C zur Verfügung, doch weisen diese deutliche Nachteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften auf [119, 121]. Erste Anwendungen von Motorlagern mit Silikontragfeder zeigen jedoch für die Zukunft ein Potenzial auf.

### 7.4.2.3 Wirkung äußerer Kräfte

Die am Rad angreifenden Vertikal-, Längs- und Querkräfte verändern die durch Vorspur und Sturz

beschriebene Radstellung. Welche Änderungen unter verschiedenen Fahrsituationen günstig sind, wird im Folgenden kurz erläutert. Eine ausführliche Darstellung findet sich z. B. in [133]. Wie die Radstellungsänderung konstruktiv beeinflusst wird, hängt vom Achsprinzip, der Anordnung der Lenker und den Elastizitäten ab und wird exemplarisch veranschaulicht. Zur Vertiefung empfiehlt sich [134].

Die Änderung von Vorspur und Sturz über dem Radhub ist zunächst eine Eigenschaft der Kinematik. Die Bedeutung für das Fahrverhalten wurde in ▶ Abschn. 7.4.1.1 beschrieben. Durch die Elastizitäten in der Radaufhängung werden beide Kenngrößen verändert. Bei der kinematischen Auslegung einer Achse ist deshalb die elastische Änderung vorzuhalten.

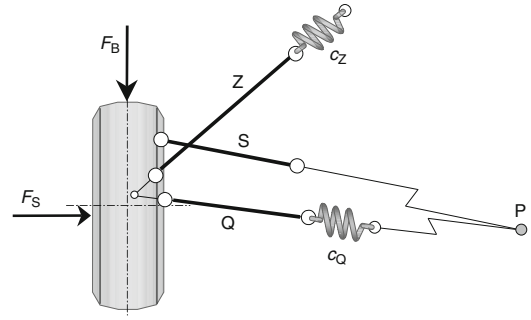


◘ Abb. 7.136 zeigt den Querlenkerverband einer Doppelgelenk-Federbeinachse, die konstruktive Ausführung der gesamten Achse ist in ◘ Abb. 7.145 zu sehen. Die Führung des Radträgers in Längs- und Querrichtung erfolgt durch den Querlenker $Q$ und die Zugstrebe $Z$; gelenkt wird mit der Spurstange $S$. Da das Federbein nach innen geneigt sein muss, bewirkt die Radaufstandskraft eine Zugbelastung im Querlenker $Q$ und verschiebt wegen der Elastizität $c_Q$ den radträgerseitigen Querlenkerpunkt nach außen. Das Stützlager wandert nach innen. Dadurch nimmt der negative Sturz zu. Wie sich die Vorspur ändert, hängt davon ab, ob die Lenkung vor oder hinter Radmitte angeordnet ist.

Liegt sie wie im Bild vorne, geht die Achse durch die oben beschriebene Verlagerung des Querlenker-Anlenkpunktes unter Radaufstandskraft in Vorspur.

Bezüglich der Längskraft-Elastokinematik gibt es verschiedene Anforderungen. Sowohl beim Bremsen als auch beim Beschleunigen geradeaus ist es erfahrungsgemäß für die Fahrstabilität günstig, wenn beide Achsen leicht in Vorspur gehen. Die übertragbaren Kräfte beim Beschleunigen sind jedoch größer, wenn der Schräglaufwinkel der Reifen möglichst klein ist.

Beim Bremsen auf unterschiedlichen Reibwerten ($\mu$-split) bewirken links und rechts ungleiche Bremskräfte ein Giermoment, welches das Fahrzeug zur Hochreibwertseite drehen möchte. Wenn nun die Vorderachse durch die Bremskraft in Vorspur geht, entsteht durch die Lenkwinkeländerung




◘ **Abb. 7.136** Schematische Draufsicht des Querlenkerverbandes einer Doppelgelenk-Federbeinachse

ein entgegengerichtetes Giermoment, welches das Fahrzeug stabilisiert. Entsprechendes gilt, wenn die Hinterachse auf Nachspur geht.

Anders sind die Verhältnisse, wenn bei Kurvenfahrt das Gas weggenommen wird (Lastwechsel) oder beim Anbremsen in der Kurve. Bei beiden Manövern ändern sich zunächst die Radlasten: die Vorderachse wird mehr, die Hinterachse weniger belastet. Bei höherer Radlast und zunächst gleichem Schräglaufwinkel bauen die Reifen vorne eine größere Seitenkraft, hinten wegen der Entlastung eine kleinere Seitenkraft auf, sodass in der Summe ein Giermoment entsteht, welches das Fahrzeug nach kurveninnen lenken möchte. Dieses Giermoment wird reduziert, wenn die Vorderachse so ausgelegt ist, dass sie durch eine Bremskraft in Nachspur geht, und die Hinterachse so, dass sie in Vorspur geht. Zwar ändern die Räder links und rechts ihren Lenkwinkel gleichermaßen, da aber die Radlast der Kurvenaußenräder höher ist, kommt die Lenkwinkeländerung dieser Räder stärker zum Tragen und bewirkt ein nach kurvenaußen gerichtetes Giermoment.

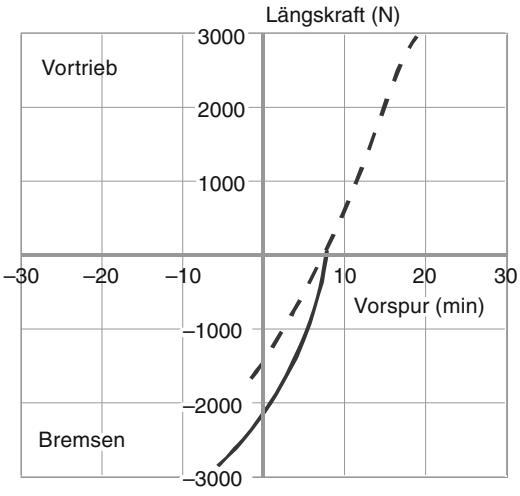
Generell ist für das Fahrverhalten die Elastokinematik beider Achsen wichtig. Beim Bremsen ist die elastokinematische Lenkwinkeländerung an der Vorderachse größer als an der Hinterachse, weil die Bremskraft vorne im Allgemeinen deutlich größer ist als hinten. Ferner wirkt sich die Lenkwinkeländerung vorne stärker aus, weil dort die Radlast zunimmt. Beim Anfahren kann die Längskraft-Elastokinematik nur an der angetriebenen Achse genutzt werden.

Die Ausführungen zeigen auch, dass es eine einzige optimale elastokinematische Abstimmung nicht geben kann. Vielmehr ist eine Abstimmung immer eine achsbezogene Synthese aus den Anforderungen verschiedenster Fahrzustände. Die Abstimmung muss ferner die Ziele der Gesamtfahrzeugauslegung berücksichtigen und ist immer im Zusammenhang mit anderen Parametern wie Reifenverhalten, Federung, Stabilisatoren etc. zu sehen. In der Realität sind die Fahrzeuge meist so ausgelegt, dass die Vorderachse unter Bremskraft leicht in Nachspur geht und die Hinterachse leicht in Vorspur. Wenn es das Achskonzept zulässt, werden angetriebene Hinterachsen zusätzlich so ausgelegt, dass sie auch bei Vortriebskraft in Vorspur gehen.

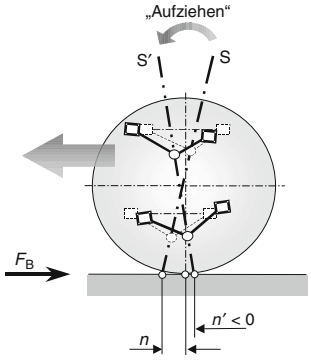
Bei der in ◘ Abb. 7.136 gezeigten Doppelgelenk-Federbeinachse wird die Längsfederung durch das Zugstrebenlager mit der Steifigkeit $c_Z$ realisiert. Für das freirollende Rad ist $c_Z$ klein. Beim Auftreten einer Bremskraft $F_B$ dreht sich der Radträger zunächst um den Pol $P$, d. h. die Achse geht bei der dargestellten Anordnung leicht in Nachspur. Bei großer Bremskraft geht das Zugstrebenlager auf Anschlag ($c_Z$ wird groß). Dann kommt auch das Querlenkerlager mit seiner erheblich höheren Steifigkeit $c_0$ zur Wirkung. Da der Querlenker beim Bremsen auf Druck belastet ist und die Spurstangenkraft verhältnismäßig klein bleibt, stellt sich die vorliegenden Achse weiter in Nachspur, ◘ Abb. 7.137.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Elastokinematik ist die Änderung von kinematischen Kenngrößen durch elastische Verformungen. ◘ Abb. 7.138 zeigt schematisch eine Doppelquerlenkerachse in Seitenansicht. Die Spreizachse $S$ ergibt sich als Verbindungslinie der beiden radträgerseitigen Querlenkerpunkte für Längskraft 0 (gestrichelte Lenkerlage), die zugehörige Nachlaufstrecke $n$ ist eingetragen.

Die Radlängsfederung sei durch die karosserieseitigen Gummilager realisiert. Da ein Bremsmoment als Kräftepaar von den Querlenkern aufgenommen werden muss, bewegt sich der untere nach hinten und der obere nach vorne. Dadurch „zieht sich der Radträger auf", d. h. er verdreht sich um die Fahrzeugquerachse. Die Spreizachse $S$ dreht damit nach $S'$, aus der Nachlaufstrecke $n$ wird die negative Nachlaufstrecke $n'$ (auch Vorlauf genannt).




◘ **Abb. 7.137** Typischer Verlauf der Vorspur einer Federbeinachse unter Brems- und Vortriebskraft




◘ **Abb. 7.138** Prinzipbild einer Doppelquerlenkerachse unter Bremskraft in Seitenansicht

Ein weiterer Effekt beim Aufziehen des Radträgers ist, dass sich die Neigung der Spurstange ändert, welche den Verlauf der Vorspur über dem Radhub steuert. Das bedeutet, dass der Verlauf der Vorspur über dem Radhub unter Bremskraft gegenüber dem Verlauf ohne Bremskraft geneigt wird, ◘ Abb. 7.139.

Um das Aufziehen des Radträgers zu begrenzen, ist es wichtig, eine große Abstützbasis zwischen den Lenkern zu realisieren. Es ist deshalb günstig, bei einer Doppelquerlenkerachse den oberen Querlenker über dem Rad anzuordnen, ◘ Abb. 7.138. Muss der obere Querlenker in die Radschüssel

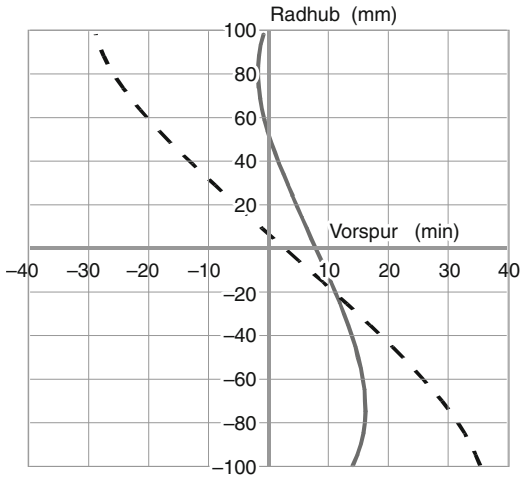



**Abb. 7.139** Typischer Verlauf der Vorspur einer Doppelquerlenkerachse über dem Radhub

gelegt werden, so kann die für den Komfort wichtige Längsfederung mittels eines elastisch gelagerten Achsträgers realisiert werden, die Querlenker können dann härter ausgeführt sein. Günstig ist es auch, wenn das Bremsmoment mittels eines Integrallenkers über den unteren Querlenker aufgenommen wird, weil sich dann im oberen Querlenkerverband keine Längskräfte ergeben. Dies ist bei der Integrallenker-Hinterachse realisiert, Abb. 7.148.

Auch die Seitenkraft verändert durch die in einer Achse vorhandenen Elastizitäten Vorspur und Sturz. Wie in ▶ Abschn. 7.4.1.1 gezeigt, entsteht bei Einzelradaufhängungen aus dem Wankwinkel am Kurvenaußenrad ein Sturzverlust, der nur teilweise durch die Kinematik ausgeglichen werden kann. Eine nach innen weisende Kraft kann bei allen gängigen Achsen den Sturzverlust nur vergrößern. Unter diesem Aspekt ist bei der Achse in Abb. 7.136 ein steifes Querlenkerlager erforderlich.

Durch die Lenkwinkeländerung aus der Seitenkraft wird das Lenkverhalten des Fahrzeugs beeinflusst. In der Regel soll auch durch die Seitenkraft-Elastokinematik ein leicht untersteuerndes Verhalten (siehe ▶ Abschn. 7.1) erreicht werden. Dazu ist es erforderlich, dass bei einer nach fahrzeuginnen wirkenden Seitenkraft die Vorderachse in Nachspur geht und die Hinterachse in Vorspur. So wird mit den aus der Querbeschleunigung resultierenden Radkräften ein Lenkwinkel erzeugt, der die Querbeschleunigung abbaut. Durch den Lenkwinkel an der Hinterachse wird zugleich der Schwimmwinkel reduziert.

Andere Anforderungen ergeben sich aus Bedingungen wie Seitenwind und Fahrbahnquerneigung, denn diesen äußeren Kräften soll das Fahrzeug nicht unerwünscht nachgeben. Vor allem für die Unempfindlichkeit gegen Seitenwind ist es aus elastokinematischer Sicht günstig, wenn eine nach fahrzeuginnen weisende Kraft an der Vorderachse Vorspur bewirkt.

In der Regel werden – sofern möglich – beide Achsen so ausgelegt, dass sie auch durch die Seitenkraft untersteuern. Entscheidend für das Fahrverhalten ist das Zusammenspiel beider Achsen. Die konkrete Abstimmung ergibt sich aus den Fahreigenschaftszielen und ist im Zusammenhang mit vielen anderen Abstimmparametern wie der Federung, Stabilisierung, Aerodynamik u. s. w., aber auch mit kinematischen und elastokinematischen Einflüssen aus Radhub und Längskraft zu sehen.

Bei der in Abb. 7.136 dargestellten Achse geht der Querlenker $Q$ unter einer nach innen weisenden Seitenkraft $F_S$ auf Druck. Liegt nun die Lenkung vorne, so geht die Achse wegen der Elastizität $c_Q$ in Nachspur, Abb. 7.140. Ist die Lenkung hinten angeordnet, so geht sie in Vorspur. In diesem Fall ist eine sehr hohe Querlenkersteifigkeit erforderlich.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich, wenn bei einer Federbeinachse die Lenkung hinten und deutlich oberhalb des Querlenkers angeordnet ist. Durch die nach innen weisende Seitenkraft entsteht im Dämpfer ein Biegemoment. Die Durchbiegung des Dämpfers vergrößert den (positiven) Sturz des Kurvenaußenrades, was zur Folge hat, dass der Radträger oberhalb des Querlenkers nach außen gedrückt wird. Da er am Spurstangengelenk festgehalten wird, ergibt sich ein Einfluss in Richtung Nachspur.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für das Seitenkraft-Lenkverhalten ist die Torsionselastizität der Lenksäule als Teil der Gesamt-Lenkelastizität. Bei den für die elastokinematische Auslegung relevanten Fahrzuständen (kleine bis mittlere Lenkwinkel und Schräglaufwinkel) ist die Summe aus geometrischem Nachlauf und Reifennachlauf stets positiv. So ergibt sich das für das Lenkgefühl wichtige rückstel-

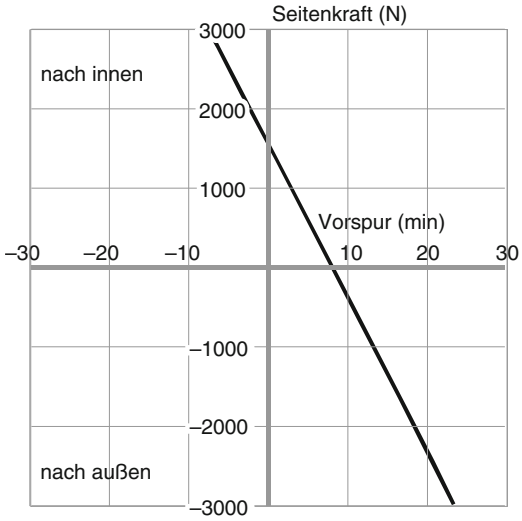



**Abb. 7.140** Typischer Vorspurverlauf einer Federbein-Vorderachse mit vornliegender Lenkung unter Seitenkraft bei festgehaltenem Radhub

lende Moment am Lenkrad. Das Moment bewirkt eine Verdrehung der Lenksäule, welche ihrerseits bei festgehaltenem Lenkrad einen untersteuernden Lenkwinkel an den Rädern verursacht.

An der Hinterachse ist es günstig, wenn die Räder unter einer nach fahrzeuginnen weisenden Seitenkraft in Vorspur gehen. Bei den gewichts- und kostengünstigen Längslenke-, Schräglenker- und Verbundlenkerachsen wirken die Elastizitäten der Achsbauteile dieser Forderung entgegen. Durch schräggestellte Gummilager zwischen der Karosserie und dem Hinterachsträger bzw. dem Verbundlenker kann das Lenkverhalten der Bauteile teilweise kompensiert werden. Bei den aufwändigeren Doppelquerlenker-, Raumlenker- und Integrallenker-Achsen dagegen lässt sich das Seitenkraftsteuerverhalten beliebig einstellen, siehe ▶ Abschn. 7.4.3 sowie [120, 134, 135].

Die Betrachtungen in diesem Abschnitt zeigen, wie mittels Elastizitäten das Fahrverhalten beeinflusst werden kann. Dabei werden stets durch Radkräfte Lenkwinkel und Sturzänderungen bewirkt. Die Kräfte selbst sind unvermeidbar, sie resultieren aus dem Betrieb des Fahrzeugs. Für konventionelle Fahrwerke muss bei der Auslegung das gesamte Spektrum möglicher Kräfte berücksichtigt werden, was immer zu Kompromissen bei der Synthese zwingt. Wenn es gelingt, durch Regelungssysteme ein Fahrzeug zusätzlich vorteilhaft zu beeinflussen, kann sich die Gewichtung bei der Abstimmung der Elastokinematik verschieben.

## 7.4.3 Radaufhängungen

Die Radaufhängung übernimmt mit den Bauteilen Radträger, Radlager, Lenker (mit Gelenken und Gummilagern), Feder und Dämpfer die Führung des Rades und die Abstützung äußerer Kräfte. Dabei unterscheidet man je nach Freiheitsgrad der Aufhängung Starrachsen, Einzelradaufhängungen und Verbundachsen [142, 143]. Starrachsen können einseitig oder parallel einfedern, weisen also zwei Freiheitsgrade auf. Bei Einzelradaufhängungen ist der symmetrische und antimetrische Federungsvorgang identisch und entspricht nur einem Freiheitsgrad. Verbundachsen können je nach Ausführung unterschiedliche Grade der Kopplung von linkem und rechtem Rad aufweisen und liegen in den Eigenschaften daher zwischen Starrachsen und Einzelradaufhängungen. Bei gelenkten Achsen kommt jeweils ein Freiheitsgrad dazu, nämlich die Drehbarkeit des Rades um die in der Nähe der Hochachse liegende Spreizachse.

Die Auswahl des Achskonzepts wird von vielen Randbedingungen beeinflusst, z. B. Einsatzspektrum (Geschwindigkeitsbereich, Achslast …), Bauraum, Antriebsart, Kosten, Gewicht usw., Tab. 7.9. Allgemein gilt, dass die Möglichkeit, die kinematischen Auslegungsparameter zu optimieren, mit der Zahl der Lenker und Gelenke zunimmt. So kann beispielsweise die Lenkdrehachse von Vorderachsen durch die radseitigen Kugelgelenke von zwei Dreieckslenkern festgelegt werden. Die Lage der Gelenke ist allerdings durch den notwendigen Bauraum für die Bremse und den erforderlichen Freigang zur Felge beim Lenken nicht frei wählbar. So müssen Kompromisse z. B. hinsichtlich Spreizungswinkel, Spreizungsversatz und Lenkrollradius eingegangen werden. Werden die beiden realen Gelenke durch die virtuellen Pole von je zwei Stablenkern ersetzt, lässt sich die Spreizachse unabhängig von Bauraumzwängen festlegen. Die virtuelle Spreizachse kann sich über dem Federweg und

**Tabelle 7.9** Einige Auswahlkriterien für Achskonzepte

| | Starr-achsen | Einzelradaufhängungen | | | Verbund-achsen |
|---|---|---|---|---|---|
| | | eben | sphärisch | räumlich | |
| Kinematisches Auslegungspotenzial | – | 0 | + | ++ | 0 |
| Längsfederung | – | 0 | + | ++ | – |
| Kosten | + | 0 | – | –– | + |
| Bauraum | –– | 0 | 0 | + | – |
| Gewicht | – | 0 | + | + | 0 |
| Unempfindlichkeit (Achslast, Geländetauglichkeit, Toleranzen, …) | ++ | 0 | – | – | 0 |



dem Lenkeinschlag auch gezielt ändern, was weitere Freiheitsgrade der Auslegung eröffnet.

Bauraumüberlegungen spielen auch bei der Festlegung von Reifen- und Felgendimension eine Rolle. Im Hinblick auf Leichtbau sowie niedrige ungefederte und rotierende Massen wären möglichst leichte, also kleine und schmale Rad-/Reifenkombinationen wünschenswert, zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch niedrigen Rollwiderstand schmale Reifen mit großem Durchmesser. Aus optischen und fahrdynamischen Gründen werden allerdings gerne große Felgen mit breiter Bereifung gewählt, die u. a. auch Einbauraum für großdimensionierte Bremsscheiben und -sättel bieten. Diesem Vorteil stehen der erhöhte Platzbedarf im Radhaus mit Auswirkung auf das Gesamtfahrzeugpackage (Lenkeinschlag, Wendekreis, Kofferraumvolumen, …) und das in der Regel höhere Gewicht gegenüber. Der Gewichtsproblematik begegnet man mit dem Einsatz innovativer Materialien und Verfahren, z. B. Aluminium-Bandräder als Substitution des Stahlrades, Leichtbauschmiederäder zunehmend auch als Serienausstattung, Leichtmetallgussräder mit Aluschaumkernen, Magnesium, faserverstärkte Kunststoffe.

Im Missbrauchs- oder Crashfall muss die Radaufhängung spezielle Anforderungen erfüllen: im Falle der Überlastung eines Bauteils soll sich vor dem endgültigen Versagen eine deutliche Verformung einstellen. Zum einen, um (vor dem Bruch) auf die Schädigung durch die Überlastung erkennbar hinzuweisen und eine Weiterfahrt auszuschließen, zum anderen aus Produkthaftungsgründen: die Verformung beweist, dass dem Bruch des Bauteils eine missbräuchliche Überlastung vorhergegangen ist, die in einer unfallartigen Situation entstand. Damit ist die Kausalität von Unfall und Bauteilversagen festgelegt: erst Crash, dann Bruch und nicht umgekehrt. Die verwendeten Materialien für radführende Bauteile müssen deshalb Bruchdehnungen von mindestens 6 % aufweisen.

### 7.4.3.1 Starrachsen

Wegen ihrer robusten Bauart sind Starrachsen als Vorder- und Hinterachsen von Gelände- und Nutzkraftfahrzeugen häufig zu finden, Abb. 7.141. Die Achsbrücke verbindet linkes und rechtes Rad starr und enthält bei angetriebenen Achsen das Achsgetriebe. Antriebs- wie Bremsmomente stützen sich also am Achskörper ab, damit sind Brems- und Anfahrstützwinkel (ohne Vorgelege-Getriebe) identisch. Die Führung erfolgt im einfachsten Fall über Blattfedern, sonst über Längs- oder Dreieckslenker. Die Seitenführung übernimmt meist ein sogenannter Panhard-Stab, der möglichst lang ausgeführt wird, um Querschütteln zu minimieren.

Vorteilhaft bei Starrachsen ist vor allem die Spur- und Sturzkonstanz beim Wank- und Parallelfedern, was die Reifentragfähigkeit günstig beeinflusst. Außerdem sind guter Anfahr- und Bremsnickausgleich sowie ein hochliegendes Rollzentrum ohne Spurweitenänderung möglich, wodurch

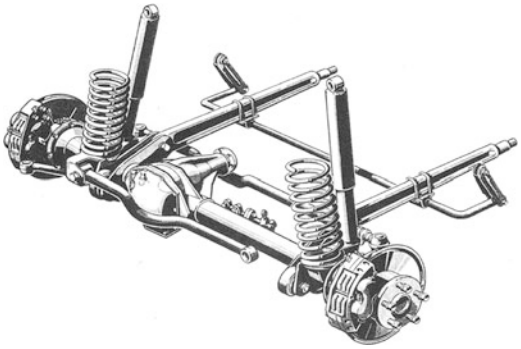


**Abb. 7.141** Angetriebene, lenkbare Starrachse (Mercedes G-Modell)

Wank- und Nickbewegungen des Aufbaus reduziert werden können. Angetriebene Starrachsen kommen ohne Gleichlaufgelenke für die Abtriebswellen aus; nicht angetriebene Achsen sind relativ kostengünstig auszuführen. Ein für Geländefahrzeuge wichtiger Pluspunkt ist die gleich bleibende Bodenfreiheit des Achskörpers beim Einfedern.

Nachteilig sind die hohen ungefederten Massen der Starrachse und der große Raumbedarf der Achsbrücke beim Durchfedern. Wegen störender elastokinematischer Lenkwinkel bei einseitiger Längskraft ist nur geringe Längsfederung in den Lenker-Gummilagern möglich. Durch die Beeinflussung des anderen Rades beim einseitigen Einfedern entstehen dort Radlast- und Sturzänderungen; außerdem ergibt sich wegen der endlichen Länge des Panhard-Stabes ein Querversatz. Schließlich ist die übertragbare Leistung bei gegebener Achslast begrenzt, da die Abstützung des Antriebsmoments bei längsliegender Gelenkwelle zu Radlastunterschieden führt, die am entlasteten Rad erhöhten Schlupf verursachen. Dieser Effekt lässt sich durch ein Sperrdifferenzial vermeiden. Bei angetriebenen Starrachsen mit separat an der Karosserie aufgehängtem Achsgetriebe (DeDion-Achsen) bleibt der Achskörper selbst frei von Antriebsmomenten und es treten beim Anfahren keine Radlastunterschiede auf.

### 7.4.3.2 Einzelradaufhängungen

Die Einzelradaufhängungen lassen sich nach der Bewegungsgeometrie klassifizieren: Rad und Radträger können um eine feste Drehachse schwenken und führen damit eine Bewegung in einer Ebene aus, die senkrecht auf der Drehachse steht (ebene Radaufhängung). Schwenkt die Momentanachse beim Federn um einen festen Punkt, bewegen sich die Radträgerpunkte auf Kugelschalen um diesen Zentralpunkt. Man spricht deshalb von sphärischen Radaufhängungen. Im allgemeinen Fall der räumlichen Bewegung ist der Drehung um die Momentanachse eine Vorschubbewegung in Achsrichtung überlagert, die Momentanachse wird damit zur Momentanschraubachse. Das kinematische Potenzial der Aufhängung steigt hierbei mit der Zahl der unabhängig voneinander wählbaren Parameter. Eine Gerade im Raum ist durch 4 Parameter festgelegt (Punkt und Richtung), damit können die 5 Auslegungsparameter (Vorspur- und Sturzänderung, Anfahr- und Bremsnickausgleich sowie Rollzentrumshöhe) nicht alle frei gewählt werden. Bei einer räumlichen Radaufhängung mit Momentanschraubachse kommt als unabhängiger 5. Parameter die Schraubensteigung hinzu. (Für nicht angetriebene Achsen ist der Antriebsstützwinkel natürlich ohne Bedeutung, damit reichen 4 frei wählbare Parameter aus.)

Die Sturzänderung über dem Federweg soll den Sturzverlust zur Straße bei Kurvenfahrt mit Karosserie-Wankwinkel kompensieren. Wegen der beidseitigen Einfederung über der Zuladung ist das mit Rücksicht auf die Reifentragfähigkeit bei hohen Sturzwerten nur teilweise möglich.

**Ebene Einzelradaufhängungen** Hierzu gehören alle Aufhängungen mit fester Drehachse wie Längslenker-, Schräglenker- oder Doppelquerlenkerachsen mit parallelen Lenker-Drehachsen. Als Beispiel sei eine Schräglenker-Hinterachse näher beschrieben, Abb. 7.142.

Die Sturzänderung über dem Federweg lässt sich so wählen, dass der Sturzverlust zur Straße durch den Wankwinkel bei Kurvenfahrt zumindest teilweise kompensiert wird. Durch den hochliegenden Längspol ist der Bremsnickausgleich gut. Angetriebene Schräglenkerachsen besitzen üblicherweise einen Hinterachsträger, der das Achsgetriebe mit aufnimmt. Mit großvolumigen Gummilagern ist dann gute Längsfederung und akustische Entkopplung erreichbar.

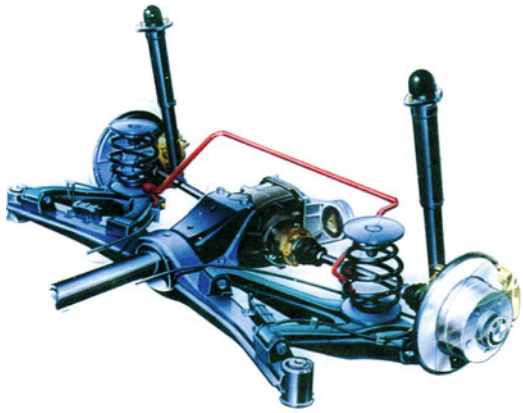


**Abb. 7.142** Schräglenkerachse (Hinterachse BMW Z3)

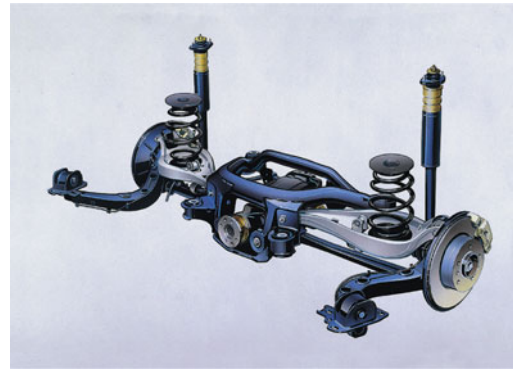


**Abb. 7.143** Zentrallenker-Hinterachse

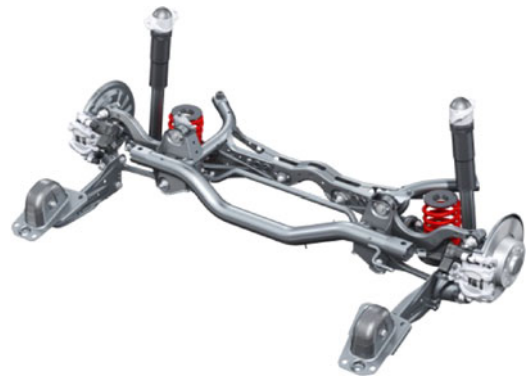


**Abb. 7.144** Hinterachse VW Golf VII/Audi A3

Wegen der eingeschränkten Auslegungsfreiheit ist eine Vorspuränderung beim Durchfedern ebenso wenig vermeidbar wie die geringe Rollzentrumshöhenänderung, die einen Aufstützeffekt bei Kurvenfahrt hervorruft. Bei Seiten- und Längskraft stellen sich durch die Lenkerlager- und Bauteilelastizitäten unerwünschte übersteuernde Lenkwinkel ein, die nur durch erhöhten Aufwand bei der Hinterachsträgerlagerung kompensiert werden können. Dabei werden Lager mit unterschiedlichen Federraten längs und quer verbaut und so angestellt, dass sie einen Federschwerpunkt hinter dem Seitenkraftangriff bilden, sodass die ganze Achse um den Federschwerpunkt schwenkt und das kurvenäußere Rad in Richtung Vorspur mitnimmt.

**Sphärische Einzelradaufhängungen** Der Zentralpunkt, um den die Momentanachse und alle Radträgerpunkte schwenken, ist oft als karosserieseitiger Längslenker-Lagerpunkt ausgeführt. Sind Radträger und Längslenker ein integrales Bauteil, so sind zur kinematischen Bestimmtheit noch 2 Querlenker notwendig (aus Gründen der Vorspurkonstanz relativ lang, Zentrallenkerachse BMW Z4, Abb. 7.143) oder 3 kürzere Lenker mit einer Querbeweglichkeit des Längslenkers. Diese 4-Lenker-Achsen werden zunehmend als hochwertige Hinterachsen von Frontantriebsfahrzeugen eingesetzt (Schwertlenkerachse Ford Focus, Mehrlenker-Hinterachsen VW Golf VII/Audi, Abb. 7.144, Mazda 6). Ihre Vorteile liegen im hohen fahrdynamischen Potenzial und in der Möglichkeit, durch kompakte und tiefliegende Anordnung von Federn und Dämpfern ein großes Kofferraumvolumen mit guter Durchladebreite zu realisieren. Sphärische Aufhängungen sind aber auch Achsen mit Trapezlenker und Sturzlenker, wenn die radträgerseitige und karosserieseitige Drehachse des Trapezlenkers einen gemeinsamen Schnittpunkt haben (Audi [141], Jaguar [140], Porsche Weissach-Achse [139]).

Bei der Zentrallenkerachse kann der Sturzverlauf ähnlich wie beim Schräglenker gewählt werden, durch die zusätzliche Auslegungsfreiheit bei bewegter Momentanachse lässt sich über dem Einfederweg auch noch Vorspurkonstanz erreichen. Anfahr- und Bremsnickausgleich sind gut; das großvolumige Längslenkerlager ermöglicht ausreichende Längsfederung. Durch sorgfältige Abstimmung der

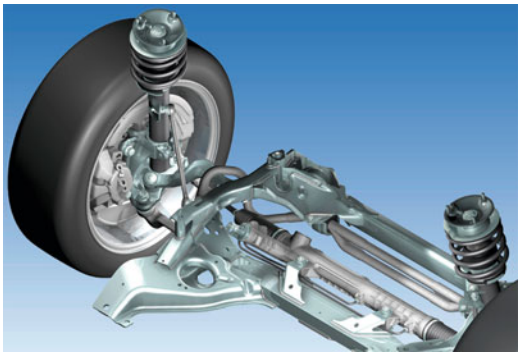


**Abb. 7.145** Doppelgelenk-Federbein-Vorderachse (BMW 3er-Reihe)

axialen und radialen Federraten und die Anstellung des Lagers in der Draufsicht können stabilisierende Vorspuränderungen bei Längs- und Seitenkräften eingestellt werden.

Nicht frei wählbar ist dagegen die Rollzentrumshöhenänderung, die einen ähnlichen Aufstützeffekt erzeugt wie die Schräglenkerachse. Die zwei langen Querlenker benötigen außerdem relativ viel Bauraum; bei der Ausführung mit drei kurzen Lenkern steigt der Aufwand an Bauteilen.

**Räumliche Einzelradaufhängungen** Vorderachsen sind wegen der Lenkbarkeit im Allgemeinen räumliche Mechanismen. Sehr verbreitet ist die Federbeinachse, Abb. 7.145, bei der der Dämpfer fest mit dem Radträger verbunden ist und radführende Aufgaben übernimmt. Feder und Dämpfer sind im Prinzip konzentrisch angeordnet und bilden als Federbein eine Einheit. Mittels einer Schräganordnung der Feder zur Dämpfermittelachse kann die durch Querkräfte erhöhte Dämpferreibung reduziert werden; man spricht vom Querkraftausgleich.

Wegen ihres günstigen Bauraumbedarfs und der geringen Zahl an Bauteilen hat die Federbein- (auch McPherson-)Achse sich als häufigste Frontantriebs-Vorderachse etabliert. Kinematisch entspricht das Federbein einer Geradführung, die man sich ersetzt denken kann durch einen unendlich langen Dreieckslenker senkrecht zum Federbein durch das Stützlager. Quer- und Längspol lassen sich dann wie bei Doppelquerlenkerachsen konstruieren. Wenn der untere Dreieckslenker (oder Sichellenker) aufgelöst wird in zwei Stablenker, ergibt sich ein Pol, der die Spreizachse festlegt. Damit können Bauraumzwänge (z. B. wegen der Bremsscheibe) umgangen werden.

Wird auch der obere Dreickslenker in zwei Einzellenker aufgelöst, entsteht eine 5-Lenker-Achse als allgemeine Form der räumlichen Radführung. Die Spreizachse ist jetzt durch zwei Pole festgelegt und zur virtuellen Spreizachse geworden. Dieser Aufwand wird aber zur Zeit nur bei angetriebenen Achsen betrieben.

Eine bauraumneutrale Alternative zur konventionellen Federbein-Achse ist die Revo-Knuckle-Vorderachse (Abb. 7.146), die im Ford Focus RS 500 für eine Antriebsleistung von 257 kW/350 PS ausgelegt ist. Durch einen geteilten Radträger wird die Lenkdrehachse so nahe an die Radmittelebene verschoben, dass die Antriebseinflüsse auf die Lenkung trotz der hohen Leistung gering bleiben [145].

Angetriebene räumliche Hinterachsen sind in unterschiedlichen Ausführungen auf dem Markt: 5 einzelne Stablenker (Raumlenkerachse Daimler, Abb. 7.147), 3 Stablenker und 1 Dreieckslenker (Porsche 911), Trapezlenker mit 2 Querlenkern und Pendelstütze (Audi, Integralachse BMW 5er-/7er-Reihe [144], Abb. 7.148).

Durch die unabhängig wählbaren Parameter ist bei räumlichen Achsen ein Optimum an kinematischen Eigenschaften erreichbar: günstiger Vorspur- und Sturzverlauf, gute Anfahr- und Bremsabstützung, Vermeidung des Aufstützeffekts durch geeignete Rollzentrumshöhenänderung. Die elastokinematische Auslegung bietet durch die vielen Gummilager die Möglichkeit, unter allen äußeren Lasten stabilisierende Lenkwinkel zu erzeugen und gleichzeitig gute Längsfederung zur Verfügung zu stellen. Da der Hinterachsträger, an dem die Lenker angebunden sind, üblicherweise gummigelagert mit der Karosserie verbunden ist, können auch die Hinterachsgetriebegeräusche vom Innenraum fern gehalten werden. Je nach Auslegung kann die gesamte Längsfederung der Achse entweder nur durch die Hinterachsträgerlager realisiert werden oder auch teilweise in den Lenkerlagern. Den funktionellen Vorteilen steht der hohe Bauaufwand gegenüber,

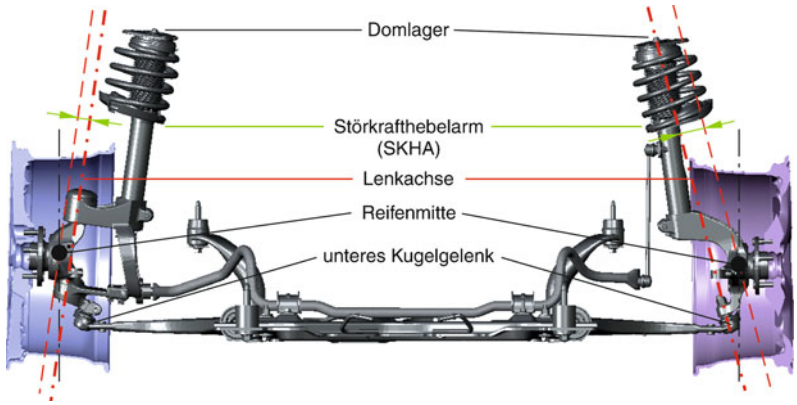



**Abb. 7.146** Vorderachse Ford Focus, *links* Revo-Knuckle (Ford Focus RS 500), *rechts* Standard-Federbein [145]

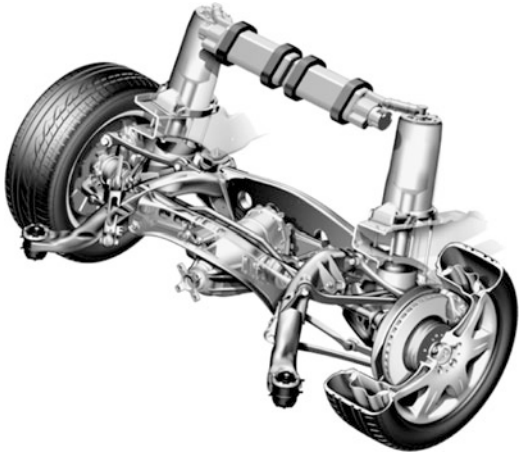


**Abb. 7.147** Raumlenker-Hinterachse (Maybach)



**Abb. 7.148** Integral-Hinterachse (lenkbar, BMW 5er Reihe)

den die vielen Lenker, Gelenke (mit störenden Losbrechmomenten), Gummilager und der komplizierte Hinterachsträger mit sich bringen.

### 7.4.3.3 Verbundachsen

Allgemein zeigen Achsen dann Verbundwirkung, wenn beim einseitigen Federn das andere Rad nicht unbeeinflusst bleibt bzw. wenn sich der parallele und der wechselseitige Federungszustand unterscheiden. Das ist z. B. auch bei den heute nicht mehr gebräuchlichen Eingelenk-Pendelachsen der Fall. Die Verbundlenkerachse im engeren Sinne, die heute noch die übliche Hinterachse für Frontantriebs-Pkw darstellt, Abb. 7.149, besteht meistens aus zwei biege- und torsionssteifen Längsarmen, die die Räder tragen, und einem torsionsweichen Querprofil, das die beiden Längsarme verbindet. Je nach Positionierung des Querprofils (näher an den Längsarmlagern oder näher an den Radmitten) entsprechen die kinematischen Eigenschaften eher denen einer Längslenkerachse oder einer Starrachse. Für den Fall, dass das Profil etwa in der Mitte der Längsarme liegt, ergibt sich beim einseitigen Einfedern eine Momentanachse durch das Längsarmlager und den Schubmittelpunkt des Querprofils, der aus Symmetriegründen in Ruhe bleibt. Diese

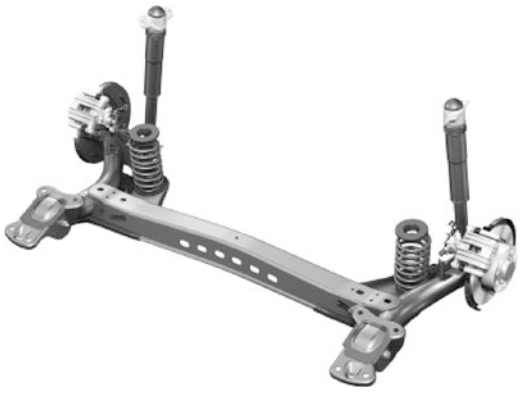


**Abb. 7.149** Verbundlenker-Hinterachse (Audi A3)

Momentanachse liegt im Raum ähnlich wie eine Schräglenker-Drehachse und erzeugt Vorspurzunahme und mehr negativen Sturz am einfedernden Rade. Beim gleichsinnigen Einfedern dagegen wird das Querprofil nicht tordiert, Vorspur und Sturz bleiben an beiden Rädern annähernd konstant.

Diese Vorspur- und Sturzkonstanz ist neben der kostengünstigen Bauart mit nur zwei Lagerstellen der Hauptvorteil der Verbundlenkerachse. Nachteilig sind der Bauraumbedarf des Querprofils beim Durchfedern sowie die elastokinematische Übersteuerneigung bei Längs- und Seitenkräften. Durch angestellte Gummilager mit axial und radial unterschiedlichen Federraten können allerdings korrigierende Vorspurwinkel erzeugt werden. Wie bei Starrachsen ist die Längsfederung wegen der Lenkeffekte bei einseitiger Längskraft begrenzt. Einer Verwendung als angetriebene Achse steht die Kollision des Querprofils mit der Gelenkwelle im Weg.

Eine Weiterentwicklung der klassischen Verbundlenkerachse in Verbindung mit einem Watt-Gestänge findet sich im Opel Astra [146]. Durch die optimierte Seitenkraftabstützung ergibt sich die Möglichkeit einer weicheren Abstimmung der Gummilager, was sich auf den Abrollkomfort günstig auswirkt.

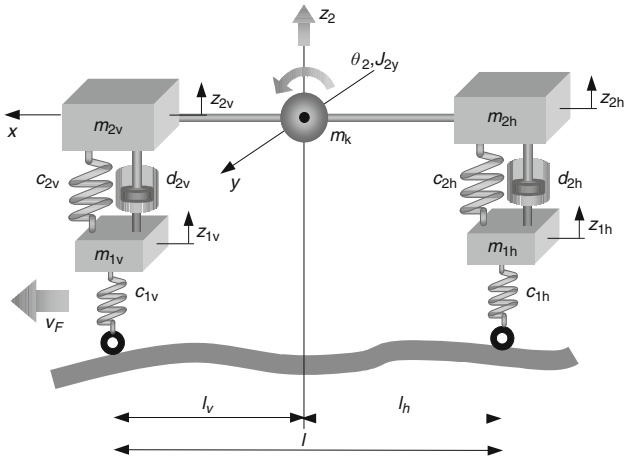
### 7.4.4 Federung, Dämpfung, Stabilisatoren

Die Federung als Oberbegriff für das Zusammenwirken von Tragfedern, Stabilisatoren und Schwingungsdämpfern hat eine Reihe für das Gesamtverhalten des Fahrwerks höchst bedeutsame Aufgaben zu erfüllen. So soll sie

- den Fahrzeugaufbau und damit vor allem auch die Insassen vor unangenehmen Hub-, Nick- und Wankschwingungen sowie vor Stößen schützen und damit zum mechanischen Schwingungskomfort beitragen.
- für eine möglichst gleichmäßige Bodenhaftung der Räder sorgen, als Voraussetzung für die zur Kurshaltung, zum Antreiben und Bremsen erforderliche Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. Dies ist ein wesentlicher Aspekt der Fahrsicherheit.
- durch eine ausgewogene Kräfte- und Momentenverteilung zwischen den Rädern einer Achse einerseits und den beiden Achsen andererseits das Fahrverhalten positiv mitgestalten. Dies tangiert sowohl Aspekte des Fahrkomforts als auch der Fahrsicherheit.

Für die Auslegung der einzelnen Komponente ist die Aufgabe nicht schwer; die eigentliche Kunst liegt in der ausgewogenen und auf die Fahrverhaltens- und Komfortziele abgestellten Abstimmung aller Funktionen zueinander. Der Prozess wird im Folgenden am Beispiel eines komfortorientierten Fahrzeugs näher erläutert. Hinweise für abweichende Vorgehensweisen beim Sportfahrzeug finden sich am Ende.

Die verwendeten Formelzeichen leiten sich aus dem Modell nach Abb. 7.150 ab. Mit der Reifenwahl (► Abschn. 7.3) ist $c_1$ festgelegt. Nachdem inzwischen auch ein Achskonzept vorliegt, ist $m_1$ bekannt und der verfügbare Bauraum für die Federung beschrieben. Die Koppelmasse $m_K$ kann erfahrungsgemäß für die meisten Pkw näherungswei-




| | |
|---|---|
| $m_{2v}, m_{2h}$ | anteilige Aufbaumassen |
| $m_K$ | Koppelmasse (≈ 0) |
| $m_{1v}, m_{1h}$ | ungefederte Massen |
| $c_{2v}, c_{2h}$ | Aufbaufederkonstanten |
| $d_{2v}, d_{2h}$ | Aufbaudämpferkonstanten |
| $c_{1v}, c_{1h}$ | Reifenfederkonstanten |
| $l_v, l_h$ | Schwerpunktabstände VA, HA |
| l | Radstand |
| $v_F$ | Fahrgeschwindigkeit |

$$m_2\ddot{z}_2 + (d_{2v} + d_{2h})\dot{z}_2 + (c_{2v} + c_{2h})z_2 - (d_{2v}l_v - d_{2h}l_h)\dot{\theta}_2 - (c_{2v}l_v - c_{2h}l_h)\theta_2 - d_{2v}\dot{z}_{1v} - d_{2h}\dot{z}_{1h} - c_{2v}z_{1v} - c_{2h}z_{1h} = 0 \quad (1)$$

$$J_{2y}\ddot{\theta}_2 + (d_{2v}l_v^2 + d_{2h}l_h^2)\dot{\theta}_2 + (c_{2v}l_v^2 + c_{2h}l_h^2)\theta_2 - (d_{2v}l_v - d_{2h}l_h)\dot{z}_2 - (c_{2v}l_v - c_{2h}l_h)z_2 + d_{2v}l_v\dot{z}_{1v} - d_{2h}l_h\dot{z}_{1h} + c_{2v}l_v z_{1v} - c_{2h}l_h z_{1h} = 0 \quad (2)$$

**Abb. 7.150** Halbfahrzeugmodell für Hub- und Nickschwingungen sowie zugehörige Schwingungsgleichungen (nach [153])

se zu 0 gesetzt werden, gleichbedeutend mit einer Entkoppelung von Hub- und Nickschwingungen.

### 7.4.4.1 Tragfeder

Wie der Name nahe legt, haben die Federn $c_2$ vorrangig eine Tragfunktion, nämlich das Tragen der anteiligen Aufbaumasse $m_2$. Da ein Fahrzeug gegenüber der Konstruktionslage auch be- und entladen wird, ändert sich $m_2$ von $m_{2,\text{leer}}$ bis zur vollen Zuladung $m_{2,\text{voll}}$ im Einzelfall erheblich.

Für alle Beladungen wird ein möglichst gleich bleibender Schwingungskomfort gewünscht, was zunächst einmal die Forderung nach stets ausreichendem Federweg bedeutet; mit Rücksicht auf die Schwingungsempfindung des Menschen aber auch niedrige (0,7–2 Hz) und möglichst konstante Eigenfrequenz der Freiheitsgrade $m_{2v}$ und $m_{2h}$ [150, 153, 155].

Abb. 7.151 zeigt, dass die Aufbaubeschleunigungen von der Feder $c_2$ nur in der Umgebung der Aufbaueigenfrequenz (um 1 Hz) maßgeblich beeinflusst werden. Die Überhöhungen nehmen mit weicher werdender Feder deutlich ab und verlagern sich entsprechend der abnehmenden Eigenfrequenz.

Dies gilt im unteren Frequenzbereich auch für die Radlastschwankungen; bei höheren Anregungsfrequenzen werden Letztere durch die weiche Feder allerdings vergrößert.

Für ein Rad aus dem Halbfahrzeugmodell nach Abb. 7.150, lassen sich einige vereinfachte Zusammenhänge ableiten:

Die Aufbaueigenfrequenz in Hz

$$f_2 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c_2}{m_2}}\,, \quad (7.1)$$

bzw. die bei Konstrukteuren beliebtere Schwingzahl in $\text{min}^{-1}$

$$n_2 = 60 f_2 \quad (7.2)$$

die statische Einfederung unter $m_2$ in m

$$z_{21,0} = z_{2,0} - z_{1,0} = \frac{m_2 g}{c_2} \quad (7.3)$$

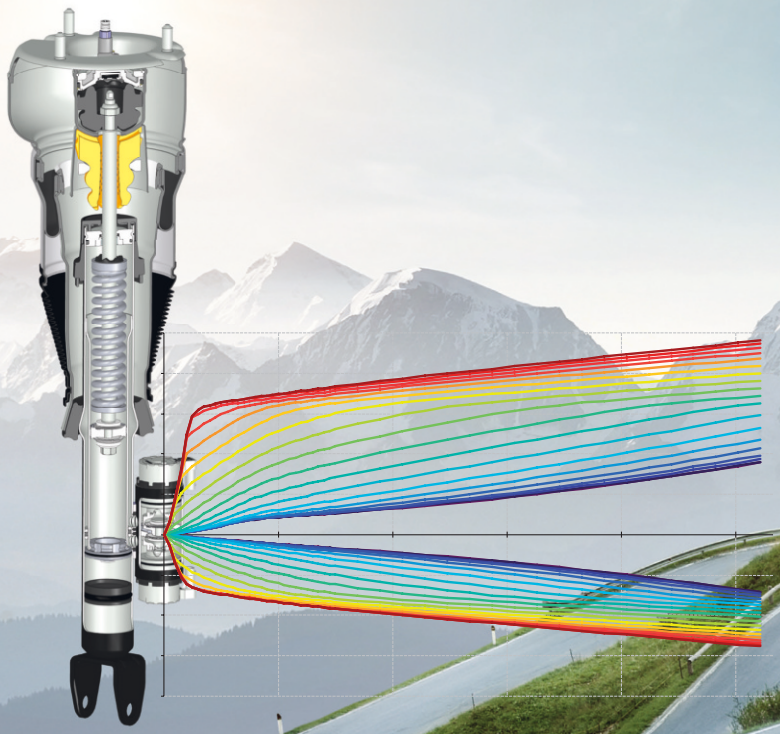
und über Vergleich mit Gl. (7.1)

$$z_{21,0} = \frac{g}{4\pi^2 f_2^2}\,. \quad (7.4)$$

Gleichung (7.4) quantifiziert den unmittelbaren Zusammenhang von Eigenfrequenz und statischer Einfederung. So lässt sich leicht nachrechnen, dass für den oben angegebenen Bereich günstigen Schwingungsempfindens statische Federwege

# Maßgeschneiderte Technologien für jede Herausforderung.

BILSTEIN®



DampTronic®sky

Erste Wahl, wenn es um individuelle Höchstleistung geht.

Als Technologieführer elektronisch geregelter Schwingungsdämpfer sind wir fest etablierter Partner der Automobilindustrie. Jede Entwicklung ist hochindividuell und wird perfekt auf die jeweilige Herausforderung abgestimmt. Zum Beispiel definiert unser DampTronic® sky Dämpfer mit seiner stufenlos und unabhängig voneinander verstellbaren Zug- und Druckstufendämpfung bei höchstem Fahrkomfort und exzellenter Agilität die Fahrdynamik von heute.

Mit Ihrer Hilfe vielleicht auch die von morgen. **karriere.thyssenkrupp-bilstein.de**

engineering.tomorrow.together.

thyssenkrupp

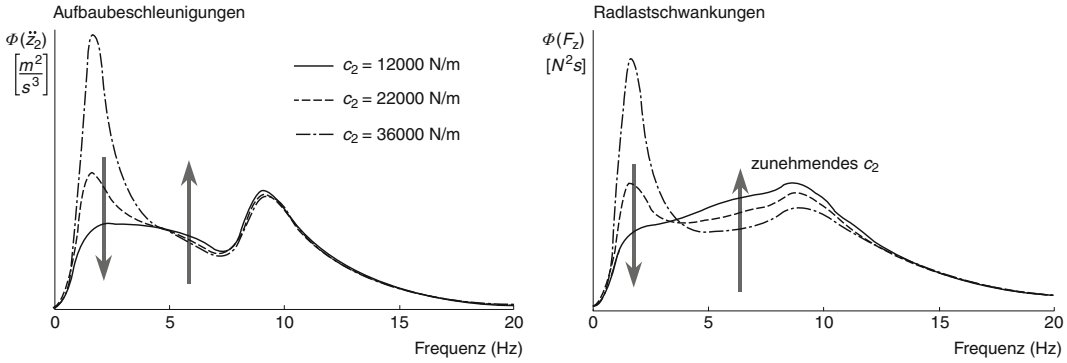



**Abb. 7.151** Einfluss der Federsteifigkeit $c_2$ auf die Leistungsspektren von Aufbaubeschleunigung und Radlastschwankungen

bis 500 mm benötigt würden. Da üblicherweise im Pkw aber aus Packagegründen nur ca. 200 mm Gesamtfederweg verfügbar sind, muss für Werte $f_2 < 1$ Hz schon an den zusätzlichen Einbau einer Niveauregulierung (► Abschn.7.4.4.4) zur Kompensation der statischen Einfederung gedacht werden. Als weitere Synthese-Randbedingung verdeutlicht Gl. (7.1), dass für eine angestrebte Konstanz der Eigenfrequenz über der Zuladung progressive Federn benötigt werden. Während die Gasfeder, siehe ► Abschn.7.4.4.4 und [149], diesem geforderten Verhalten prinzipbedingt nahe-kommt, sind Stahlfedern in der verbreitetsten Form als gerade zylindrische Schraubenfedern erst einmal linear. Um Stöße abzumildern, wie sie beim Durchfahren von Bodenwellen mit entsprechender Fahrgeschwindigkeit auftreten können, werden deshalb Zusatzfedern (meist PU-Schaum-Teile) verbaut, so dass durch Kennlinienüberlagerung ohnehin eine Progressivität der Gesamtfederkennlinie entsteht, Abb.7.152. Zur Reduktion des Bauraumbedarfs, insbesondere bei Unterflur-Hinterachsen werden Schraubenfedern mit inkonstantem Draht- und Wickel-Durchmesser verwendet (Miniblockfeder). Durch das Aufliegen, sprich „Abschalten" von Windungen wird hierbei eine progressive Kennlinie erzielt. Ferner sind bei der Auslegung der annähernd lineare Federanteil aus den Gummilagern der Achslenker und die Gasfederrate des Gasdruck-Stoßdämpfers als „Nebenfederraten" einzubeziehen. Weiteres Feintuning der Kennlinie ist durch geeignete hubabhängige Federübersetzungen oder z. B. den Einsatz „gewundener" Schraubenfedern möglich [148]. Die Progression hilft im Übrigen auch bei wechselseitigen Federungsvorgängen, weil sie die Wankwinkelzunahme über der Last degressiv gestaltet; gleichzeitig erzeugt sie aber einen Aufstützeffekt.

Damit ist eine erste Federvariante für die im vorliegenden Fall stärker zuladungsabhängige Hinterachse festgelegt.

Bei der Auslegung der Vorderachse muss nun das erwünschte Zusammenwirken von Vorder- und Hinterachse umgesetzt werden. Für den Komforteindruck der Insassen, der meist durch die Effektivwerte von Aufbaubeschleunigungen – besser unter Einbeziehung des menschlichen Empfindens mit dem K-Wert [155] auf dem Sitz – beschrieben wird, zeigt [153] sehr anschaulich, dass es unter Einbeziehung von Nickschwingungen auf die Lage der Sitze ankommt, wie die Abstimmrelation vorn/hinten zu wählen ist (hier werden nur Nickschwingungen aus Fahrbahnunebenheiten behandelt; Anfahr- und Bremsnicken s. ► Abschn. 7.4.1).

Da zum Zeitpunkt der Federungsauslegung die Lage der Sitze i. A. festgelegt ist, muss sich der Konstrukteur am Auslegungsziel orientieren: vom Komfort her fahrerorientiert oder bevorzugt für Mitreisende auf den hinteren Sitzen ausgelegt. Während im ersten Fall die Federung vorn weicher als hinten auszulegen wäre, lässt sich mit dem umgekehrten Auslegungsansatz hinten ein deutlich höherer Komfort darstellen. Dass im Fall der Fondorientierung hinten generell bessere K-Werte erreichbar sind, ist durch die Phasenlage der Auf-

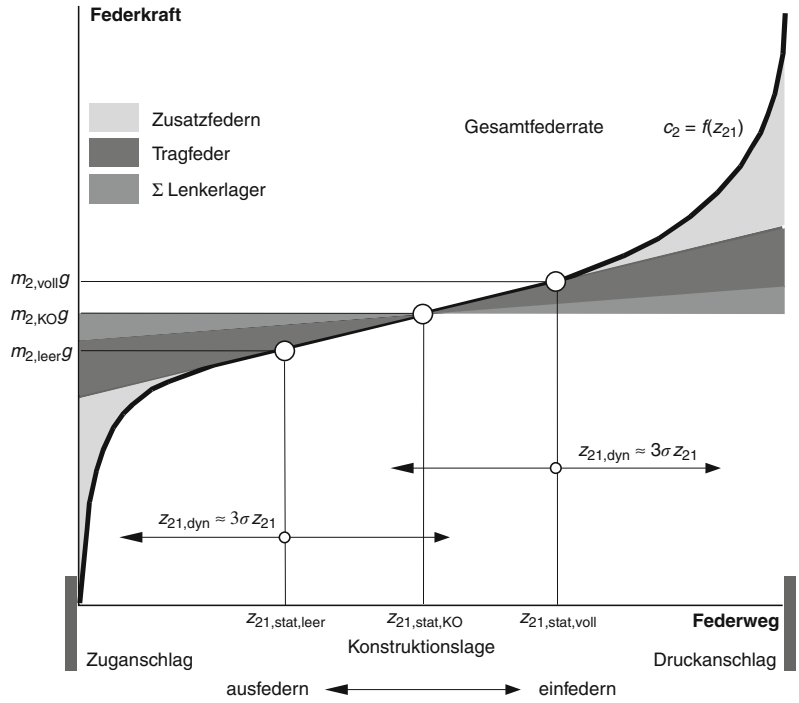



**Abb. 7.152** Zusammensetzung der Gesamtfederkennlinie für die Tragfederung

baubeschleunigungen vorn/hinten bei Vorwärtsfahrt begründet. Weil die Phasenlagen aber wiederum fahrgeschwindigkeitsabhängig sind, hängt natürlich auch dieser Zugewinn davon ab. Weil bei Fahrzeugen mit Front- bzw. Standardantrieb aber die Hinterachse nahezu die ganze Zuladung erfährt, ist der Fondkomfort-Ansatz praktisch nur in Verbindung mit Niveauregelung umsetzbar, oder die Vorderachse müsste unnötig hart gefedert werden, was dem Hubkomfort wieder schaden würde. In jedem Fall ist es sinnvoll, nicht zuletzt auch mit Rücksicht auf das Verhalten beim Überfahren von Einzelhindernissen, die Eigenfrequenzen von Vorder- und Hinterachse auseinander zulegen, weil dadurch Nickschwingungen in jedem Fall schneller beruhigt werden. Daher wird in der Praxis meist $f_{2,v}/f_{2,h} = 0{,}8–0{,}95$ angewendet.

Als konventionelle Tragfedern kommen Schrauben-Druckfedern, Drehstabfedern oder Blattfedern zum Einsatz. Die früher sehr verbreiteten geschichteten Blattfedern mit Führungsfunktion an Starrachsen sind heute fast nur noch im Nutzfahrzeugbereich zu finden [175]. Auch Drehstabfedern werden aus Kosten- und Bauraumgründen eher selten verwendet. Durchsetzen konnte sich die aus Draht gewickelte Schraubenfeder, vor allem in der zylindrischen Ausführungsform.

Für die zylindrische Druckfeder gilt:

stat. Federkraft

$$F = \frac{\pi d^3}{8D}\,\tau_t$$

Federweg

$$s = \frac{8D^3 n}{Gd^4}\,F$$

Federrate

$$c = \frac{Gd^4}{8D^3 n}$$

Federarbeit

$$W = \frac{\pi^2 d^2 D n}{16G}\,\tau_t^2$$

mit
$d$ Drahtdurchmesser,
$D$ Windungsdurchmesser,
$n$ Windungszahl,
$\tau_t$ Torsions-Schubspannung,
$G$ Schubmodul.

Für eine hohe Federarbeit bei wenig Materialeinsatz ist also eine möglichst hohe zulässige Schubspannung anzustreben. Aus diesem Grund kommen als Federwerkstoffe hochfest legierte Stähle wie z. B. 54SiCr6 zum Einsatz, die nach dem Umformen zur weiteren Festigkeitssteigerung noch kugelgestrahlt werden. Damit lassen sich bei Zugfestigkeiten von 2000 MPa zulässige Torsionsspannungen bis zu 1300 MPa erreichen.

Um Geräusche zu vermeiden, werden zwischen Feder und Federteller in der Regel Federunterlagen aus Gummi eingesetzt, die auch der Federpositionierung dienen.

### 7.4.4.2 Stabilisierung

Nachdem beide Achsen bezüglich der Tragfedern definiert sind, richtet sich das Augenmerk auf das Wankverhalten. Da, wie z. B. in [153] gezeigt, Wankschwingungen und Hub-/Nickschwingungen als entkoppelt betrachtet werden können, sieht das Schwingungsmodell nach ◘ Abb. 7.153 für eine Achse dem ◘ Abb. 7.150 sehr ähnlich, nur dass jetzt beide Achsen betrachtet werden, die durch eine ausreichend torsionssteife Aufbaumasse $m_2$ miteinander verbunden sind und zusätzlich Stabilisatorfedern $c_{S,v}$ und $c_{S,h}$ enthalten.

Bei Kurvenfahrt mit der Querbeschleunigung $a_y$ greift im Schwerpunkt $S$ eine Beschleunigungskraft (Fliehkraft) $F$ an, die mit dem Hebelarm $h_{RZ}$ zum Kippmoment des Aufbaus

$$M_K = m_2 \cdot a_y \cdot h_{RZ} \tag{7.5}$$

führt, welches sich nach Einstellen eines Wankwinkels $\phi$ noch um die Komponente $m_2 \cdot g \cdot h_{RZ} \cdot \phi$ vergrößert. $h_{RZ}$ ist der Wankhebelarm und ergibt sich aus dem Abstand Schwerpunkt–Rollachse, ▶ Abschn. 7.4.1. Das etwas vereinfacht dargestellte Kippmoment $M_K$ muss mit dem Wankfederungsmoment $M_W$ im Gleichgewicht stehen:

$$\begin{aligned} M_K &= m_2 h_{RZ} \left(a_y + g\varphi\right) \\ &= \left(c_{\varphi v} + c_{\varphi h}\right) \varphi = M_W \,, \end{aligned} \tag{7.6}$$

wobei $c_{\phi v}$, $c_{\phi h}$ die resultierenden Achs-Wankraten sind, in deren Verhältnis sich auch das Moment $M_W$ auf die Achsen verteilt (torsionssteifer Aufbau vorausgesetzt). Eine detailliertere Betrachtung findet sich in [152].

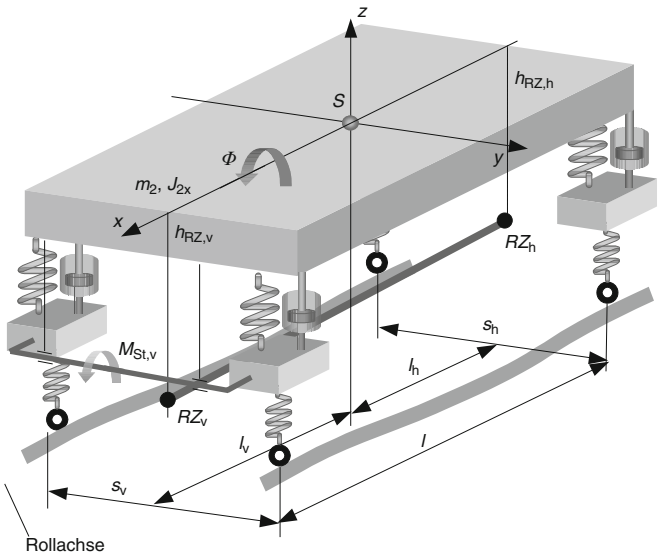
Die Wankneigung lässt sich nun leider nicht einfach durch Anheben der Rollzentrumshöhen auf Höhe des Schwerpunktes ($h_{RZ} = 0$) abstellen. Das würde (außer bei Starrachsen) zu sehr ungünstigen Raderhebungskurven mit großen Spurweitenänderungen führen und damit zu Traktionsproblemen und hohem Reifenverschleiß. Eine völlige Eliminierung des Wankwinkels ist zumindest im fahrdynamischen Grenzbereich aus Gründen der Fahrerinformation auch gar nicht gewünscht.

Bei normalen Wankhebelarmen um 500 mm und einer aus Komfortgründen weichen Tragfederung muss daher, um den Wankwinkel gering zu halten, ein zusätzlicher Stabilisator verbaut werden, der eine parallel geschaltete, aber nur bei wechselseitigen Radhüben wirksame Feder darstellt. Die Wankfederrate ergibt sich dann, bei Vernachlässigung der Nebenfederraten, aus der Addition der beiden Federn unter Einführung der Spurweite $s_{v,h}$ an den Achsen zu

$$c_{\varphi v,h} = \left(c_{2v,h} + c_{Sv,h}\right) \frac{s_{v,h}^2}{2} \,. \tag{7.7}$$

Wenn an der, in der Regel vertikal weicher ausgelegten Vorderachse die Stabilisatorrate so ausgelegt ist, dass der angestrebte Maximal-Wankwinkel nicht überschritten wird, müssen Aufstütz- und Eigenlenkverhalten überprüft werden. Solange die Vorderachse allein stabilisiert ist (aus Kostengründen häufig bei Fahrzeugen der unteren Klasse der Fall), übernimmt sie wegen der deutlich höheren Wanksteifigkeit auch einen entsprechend größeren Teil der Wankmomentabstützung.

Die radbezogenen Stabilisatorkräfte führen zu einer stärkeren Radlastverlagerung zwischen




| | |
|---|---|
| $m_2$ | Aufbaumasse gesamt |
| $J_{2x}$ | Wankträgheitsmoment |
| $h_{RZ,v,h}$ | Wankhebelarme vorn, hinten |
| $s_v, s_h$ | Spurweiten |
| $M_{St,v,h}$ | Stabilisatormoment VA, HA |
| $RZ_{v,h}$ | Rollzentrum VA, HA |

Vereinfachungen: gleiche Spurweiten $s_v = s_h = s$
gleiche Reifenfedern $c_{1v} = c_{1h} = c_1$ und damit $\dot{\Phi}_{1v} = \dot{\Phi}_{1h} = \Phi$...

$$\frac{2J_{2x}}{s^2}\ddot{\Phi}_2 + (d_{2c} + d_{2h})(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_1) + (c_{2v} + c_{2h})(\Phi_2 - \Phi_1) = 0 \quad (1)$$

$$(m_{1v} + m_{1h})\ddot{\Phi}_1 - (d_{2v} + d_{2h})(\dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_1) - (c_{2v} + c_{2h})(\Phi_2 - \Phi_1) + 2c_1\Phi_1 = 4c_1\Delta h \quad (2)$$

**Abb. 7.153** Fahrzeugmodell für Wankschwingungen und die wichtigsten Schwingungsgleichungen nach [153]. Weitere Bezeichnungen siehe Abb. 7.150

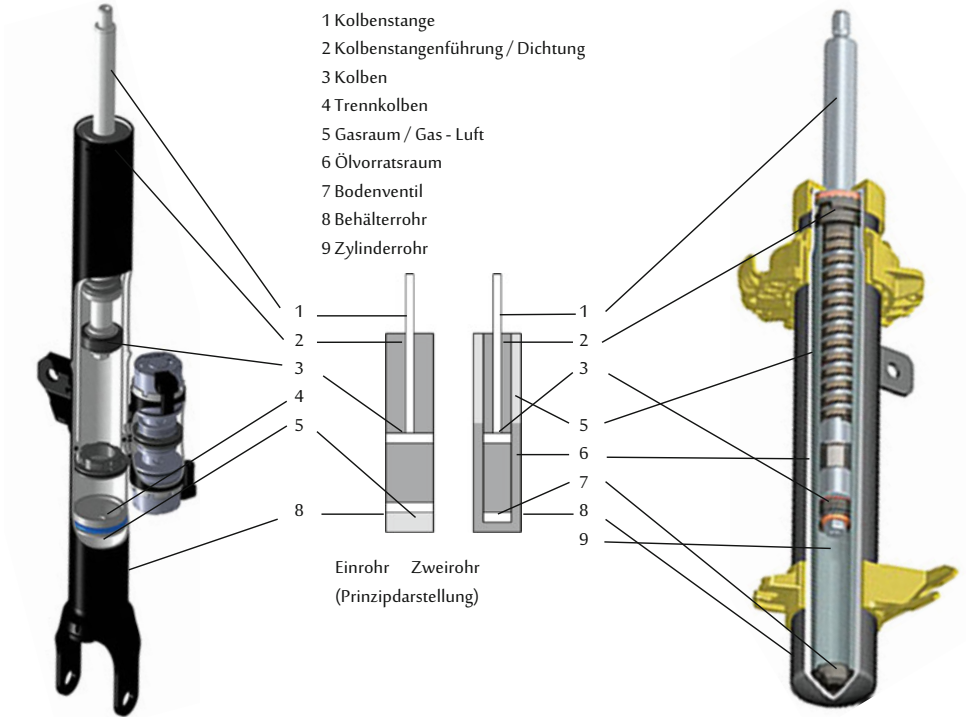
kurveninnerem und -äußerem Rad und ab Querbeschleunigungen von ca. 0,4 g wegen der Nichtlinearität der Reifen-Seitenkraftkennlinien (▶ Abschn. 7.3) zu einem progressiv höheren Schräglaufwinkelbedarf der Achse. Weil der Fahrer jetzt nachlenken muss, um den Kurvenradius beizubehalten, spricht man von Untersteuern. Dieser Effekt ist aus Fahrstabilitätsgründen in bestimmtem Maß erwünscht, da Untersteuern für Normalfahrer wesentlich einfacher zu beherrschen ist als Übersteuerndes Fahrverhalten. Ist der Untersteuergrad allerdings zu hoch, kann es erforderlich sein, die Hinterachse stärker zur Abstützung des Wankmoments heranzuziehen. Wenn aus Komfortgründen dort nicht die Aufbaufeder steifer ausgelegt werden kann, wird auch an dieser Achse ein Stabilisator vorzusehen sein.

Zur Lagerung des Stabilisators werden Elastomerlager verbaut, die als zusätzliche Federelemente wirksam sind und dem Toleranzausgleich zur Verbaubarkeit dienen. Bei ungebundenen Stabilisatorlagern kann es durch Umwelteinwirkungen (Nässe, Schmutz) zu Relativbewegungen zwischen Stabilisator und Gummilager kommen. Die Folge können Geräusche und Verschleiß sein. Dies wird durch auf den Stabilisator gehaftete Gummilager vermieden. Aktuell sind zwei wesentliche Verfahren auf dem Markt verbreitet, das Postvulkanisationsverfahren [154] und das Klebeverfahren [156].

Stabilisatorlager aus Elastomerwerkstoffen weisen die bekannten Harshness-Effekte über Amplitude und Frequenz auf, die zu einer, bei hohen Frequenzen und Amplituden, abnehmenden Isolationswirkung führen. Bei den Rolls Royce Modellen z. B. wird der Stabilisator zur Maximierung des Fahrkomforts in Wälzlagern aufgenommen.

### 7.4.4.3 Schwingungsdämpfung

Wenn über die Trag- und Stabilisatorfederung gute Voraussetzungen für den gewünschten Hub-/Nick- und Wank-Komfort geschaffen sind, müssen noch Maßnahmen zur Beruhigung der durch




Einrohrdämpfer (mit Verstelldämpfung)
Quelle: Bilstein

Zweirohrdämpfer (konventionelles Federbein)
Quelle: BWI

**Abb. 7.154** Bauarten Stoßdämpfer: Einrohr- und Zweirohrdämpfer

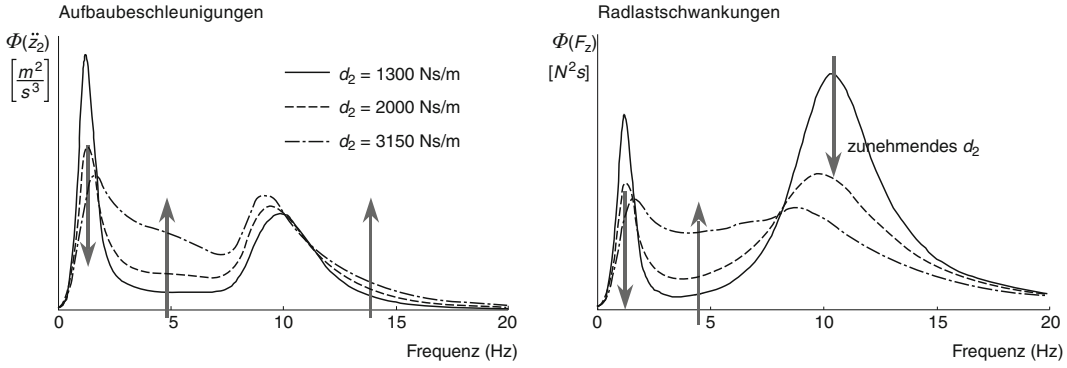
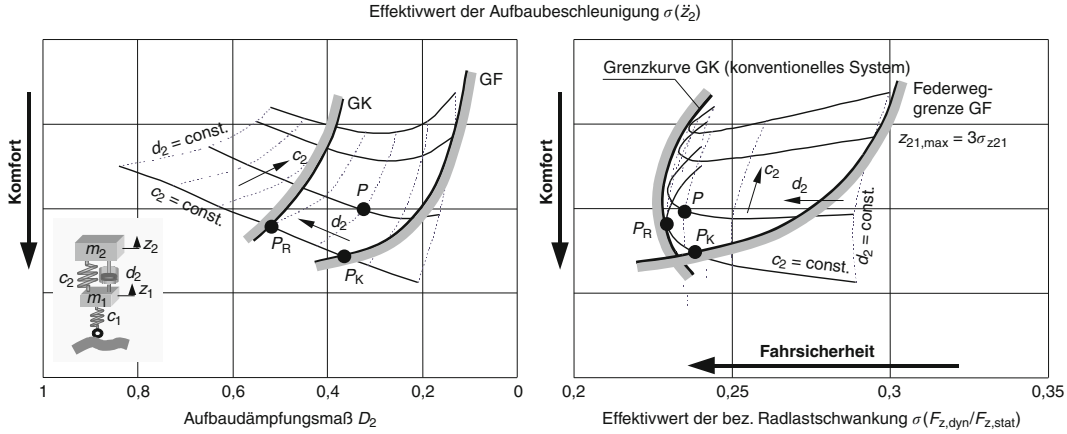



**Abb. 7.155** Einfluss der Dämpfer $d_2$ auf die Leistungsspektren von Aufbaubeschleunigung und Radlastschwankungen

äußere Kräfte eingeleiteten Schwingungen ergriffen werden. Diese Aufgabe kommt den Schwingungsdämpfern zu. Die Dämpfung wirkt dabei nicht nur auf die Aufbaumasse, sondern trägt auch ganz maßgeblich zur Fahrsicherheit bei, Abb. 7.155, während die Tragfederraten einen geringeren Einfluss auf die Radlastschwankungen hatten, Abb. 7.151. So gilt für die Dämpfungsmaße an Aufbau $D_{2v,h}$




$P_R$= Auslegung auf minimale Radlastschwankung
$P_K$ = Auslegung auf maximalen Komfort
$P$ = Auslegungspunkt (Beispiel mit notwendiger Federweg-Reserve für Einzelhindernisse)

**Abb. 7.156** Auslegungsgrenzen im Konfliktschaubild Komfort-Fahrsicherheit als Funktion von Federung und Dämpfung sowie zugehörige Dämpfungsmaße

und Rad $D_{1v,h}$:

$$D_{2v,h} = \frac{d_{2v,h}}{2\sqrt{(c_{2v,h} m_{2v,h})}} \tag{7.8}$$

$$D_{1v,h} = \frac{d_{2v,h}}{2\sqrt{(c_{1v,h} + c_{2v,h})\ m_{1v,h}}} \approx \frac{d_{2v,h}}{2\sqrt{c_{1v,h} m_{1v,h}}}\ . \tag{7.9}$$

In der Praxis liegen Werte für $D_{2v,h}$ bei 0,2–0,25 und für $D_{1v,h}$ etwas darüber, zumindest, wenn die ungefederten Massen klein sind. Abb. 7.155 und Abb. 7.156 zeigen für stochastische Fahrbahnanregung sehr anschaulich, dass entlang der Linie für eine gegebene Aufbaufederkonstante $c_2$ durch die Wahl der Dämpferkonstanten $d_2$ eine wesentliche Entscheidung für die Synthesequalität Komfort–Fahrsicherheit getroffen wird. Wegen der stets kombinierten Hub- und Nickschwingungen sowie der Abhängigkeit des gesamten Diagramms von Fahrgeschwindigkeit, Zuladung und vor allem auch dem Unebenheitstyp der angesetzten spektralen Fahrbahnunebenheiten empfiehlt sich eine parallele Optimierung der Dämpferkonstanten $d_{2v,h}$ an Vorder- und Hinterachse unter Variation der wesentlichen Einflussparameter in der Simulation.

Wie in Abb. 7.155 ersichtlich, verändern unterschiedliche Dämpfungswerte die im Fahrbetrieb wirksamen gedämpften Eigenfrequenzen und Resonanzüberhöhungen von Aufbau und Rädern. Um weiterführend zur Auslegung der ungedämpften Eigenfrequenzen der Achsen, wie in ▶ Abschn. 7.4.4.1 beschrieben, ein optimales Zusammenspiel der gedämpften Eigenfrequenzen von Vorderachse und Hinterachse zu erreichen, müssen in einer simulativen Grundauslegung auch die Eigenschaften der Dämpfer aufeinander abgestimmt werden. Im Allgemeinen ist die Hinterachse dabei stärker bedämpft als die Vorderachse. Die erarbeitete Auslegung stellt hierbei immer einen Kompromiss zwischen Fahrkomforteigenschaften (z. B. Parallelität, Aufbauschwingverhalten) und Fahrstabilität (z. B. dynamische Verteilung des Wankmomentes aus Feder- und Dämpfungselementen bei hochdynamischen Fahrmanövern) dar.

Als ausgeführte Schwingungsdämpfer werden heute fast ausschließlich zwei Bauarten – hydraulische Teleskopdämpfer in Einrohr- und Zweirohrausführung – eingesetzt, welche in vielen Konstruktionsvarianten und Ventilsystemen angeboten werden (Abb. 7.154). Hierbei bieten Zweirohr-Dämpfer wegen des zusätzlichen Bodenventils mehr Abstimmspielraum; Einrohr-Dämpfer können dagegen auch in liegender Position verbaut werden.

Bisher konnte durchaus mit linearer Dämpferkennung, Abb. 7.157, gerechnet werden. Wird nun aber, wie schon oben bei der Federauslegung, we-

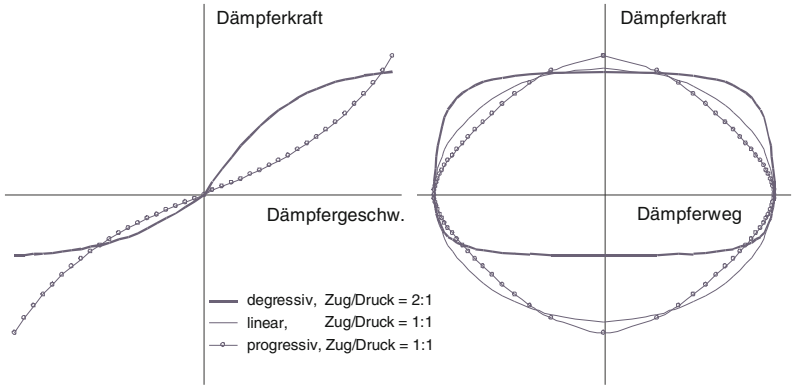



**Abb. 7.157** Beispiele für Kennlinien von Dämpferkräften über Dämpfergeschwindigkeit und Auswirkung auf Arbeitsdiagramme

gen des signifikanten Komforteinflusses [151] auch das Verhalten bei Einzelhindernissen (z. B. Bodenwellen, Kanaldeckel) oder Fahreraktionen (z. B. Anlenken) in die Betrachtung einbezogen, dann muss der konkrete Verlauf der Dämpferkraft $F_d$ über der Dämpferkolbengeschwindigkeit $\upsilon_D$ weiter angepasst werden: die Dämpferkennlinie wird nichtlinear.

Eine gebräuchliche Form der Nichtlinearität ist die Degression im Zugstufenast der Dämpferkennung. Sie resultiert aus dem Bestreben, für kräftige Ausweichmanöver einen zeitlich harmonischen Wankwinkelaufbau zu erreichen, der für das subjektive Sicherheitsgefühl in einer solchen, in der Regel eher ungewohnten Fahrsituation sehr wesentlich ist. Dafür sind schon bei niedrigem $\upsilon_D$ hohe Dämpfkräfte an den kurveninneren Rädern erforderlich. Dies bedeutet ein stärkeres Anstellen der Zugkennung als aus der linearen Rechnung bestimmt ($d_{2Z} > d_{2\,lin}$) und würde bei hohen $\upsilon_D$ neben zunehmendem Unkomfort zu einer Überdämpfung der Räder und damit auch zu größeren Radlastschwankungen führen.

Deshalb wird ab $\upsilon_D \approx 0{,}15\,m/s$ die Kennung etwas unter $d_{2\,lin}$ abgesenkt. Die Kurven im Arbeitsdiagramm werden fülliger, die Dämpferarbeit ist damit bei niedrigen $\upsilon_D$ größer geworden.

Verbreitet werden auch geknickte Dämpferkennungen mit unterschiedlichen Dämpferkonstanten für Einfedern (Druckstufe $d_{2D}$) und Ausfedern (Zugstufe $d_{2Z}$) verwendet, wobei die Druckstufe vor allem an Vorderachsen bis auf Verhältnisse von $d_{2D} : d_{2Z} = 1 : 3$ abgesenkt wird. Damit soll beim Auffahren auf rampenförmige Einzelhindernisse das „Anfedergefühl" verbessert werden. Dies kann in Grenzen auch erreicht werden; weil aber mit zunehmender Unsymmetrie der Dämpferkennlinie der statistische Komfort ab- und die Radlastschwankung zunimmt, sollte das Druck-/Zug-Verhältnis nicht unnötig abgesenkt und die positive Wirkung einer ausreichenden Längsfederung der Achsen ausgeschöpft werden.

In den vorausgehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass die Erarbeitung einer bezüglich der Fahrzeugziele erfolgreichen Gesamtabstimmung einen komplexen Syntheseprozess darstellt, der vom Konstrukteur entweder empirisch mit viel Erfahrung, besser unter Nutzung moderner Simulationstools umgesetzt werden muss.

Dies reicht von stark vereinfachten Implementationen analytischer Gleichungen in der Konzeptionsphase über Mehrkörpersimulationsumgebungen bis hin zum Einsatz von Simulatoren, in welchen virtuelle Fahrzeuge von den Entwicklern bereits vor dem Vorliegen echter Komponenten erlebt und erfahren werden können.

Wird die Simulation derart eingesetzt, können u. a. auch bessere, dafür aufwendigere Komfortbewertungskriterien eingesetzt werden. War eingangs nur der K-Wert für die Vertikalbeschleunigung erwähnt worden, lässt sich [162] durch vektorielle Addition aller an der jeweiligen Betrachtung beteiligten Teilschwingungen der aussagefähigere Gesamtwert der bewerteten Schwingstärke $K_{ges}$ be-

rechnen:

$$K_{\text{ges}} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + \ldots + K_n^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} K_i^2}\,. \tag{7.10}$$

Auf den Komfort kann nicht so viel Rücksicht genommen werden, wenn das Fahrwerk für ein Sportfahrzeug ausgelegt werden soll. In diesem Fall wird neben besonders guter Bodenhaftung (Kurvengrenzgeschwindigkeit) Wert auf kleine Wankwinkel und geringe Radlastschwankungen gelegt, was zu deutlich härteren Federn, geringerem Federweg und entsprechend strafferer Schwingungsdämpfung sowie höheren Stabilisatorraten führt.

Durch einen diagonalen Dämpfungsverbund (Audi RS6, Audi RS4 zeitweise), also eine ungeregelte Verbindung der Dämpfer vorn links mit hinten rechts und umgekehrt, lässt sich die Bedämpfung der reinen Hub-Bewegung von der Wank- oder Nickbewegung entkoppeln. Dabei wird das gegensinnige Federn der diagonal gegenüberliegenden Räder beim Wanken oder Nicken durch Drosselverluste in der Verbindungsleitung stärker bedämpft als das Parallelfedern.

Die hochmotorisierten Modelle des Peugeot 3008 weisen zur Kompensation des hohen Schwerpunkts eine Querverbindung der Hinterachs-Stoßdämpfer mit einer zusätzlichen Dämpfungsventil- und Gasvorspanneinheit auf. Die Dämpfung der Wankbewegung wird hiermit gezielt beeinflusst und als Nebenfunktion eine zusätzlicher, wenn auch nicht vollständiger, Beladungsausgleich geschaffen.

### 7.4.4.4 Vertikaldynamiksysteme

Ein großes Verbesserungspotenzial im Vergleich zu den passiven Komponenten bieten Vertikaldynamiksysteme, also Regelsysteme, welche die Vertikalkräfte zeitlich bedarfsgerecht optimieren. Bei der Abstimmung von passiven Federn, Schwingungsdämpfern und Stabilisatoren lässt sich immer nur ein Kompromiss zwischen Fahrverhalten (Handling, Agilität) und Fahrkomfort realisieren, d. h. die Fahrwerke lassen sich sportlich oder komfortabel, aber nicht im zeitlichen Sinne zugleich beliebig sportlich und komfortabel abstimmen. Aufbaubewegungen ergeben sich bei passiven Fahrwerken immer als Reaktion auf äußere Einflüsse, bei geregelten Systemen können Kräfte semiaktiv (nur Stellenergie zur Beeinflussung von Kennlinien erforderlich) oder aktiv (unabhängig von der aktuellen Bewegungsrichtung, aktive Energieeinbringung erforderlich) beeinflusst werden.

Vertikaldynamiksysteme stellen bedarfsgerechte, fahrzustandsabhängige Vertikalkräfte zwischen Rad und Karosserie ein, um den Zielkonflikt zwischen Fahrverhalten und Fahrkomfort in weiten Bereichen aufzulösen, ▶ Abschn. 7.4.4.3. Bezogen auf ◘ Abb. 7.156 bedeutet dies ein Durchbrechen der Grenzkurve GK in Richtung mehr Komfort und Fahrsicherheit. Hierfür benötigen diese Systeme Sensoren, ein Steuergerät, Aktuatoren sowie eine Energieversorgung und eine geeignete Regelstrategie und Sicherheitslogik. Die Vertikaldynamiksysteme prägen den Normalfahrbereich und sind somit im Gegensatz zu den Sicherheits- bzw. Schlupfregelsystemen nicht nur im Grenzbereich, sondern permanent erfahrbar und „erlebbar".

Nachstehend folgt eine Kurzbeschreibung in drei Kategorien:

- Niveauregulierung (heute vorzugsweise mit Luftfederung),
- Verstelldämpfersysteme und
- Aktiv-Federn/Aktiv-Stabilisatoren.

Die Niveauregulierung führt bei Beladungsänderungen ein Betriebsmedium den Federbeinen zu oder ab, sodass der Fahrzeughöhenstand konstant bleibt und damit immer eine optimale Federwegreserve zur Verfügung steht. Diese Kennlinie lässt sich ohne Rücksicht auf Niveauänderungen durch Beladung auslegen. Beide Punkte führen zu einem verbesserten Schwingkomfort, der nicht nur bei Zuladung erfahrbar ist. Aufgrund von Gewichts- und Kostenvorteilen setzt sich die Luftfederung als Niveauregulierung zunehmend durch und löst die hydropneumatische Federung ab. Zudem besitzt die Luftfederung den Vorteil einer weitgehend konstanten Aufbaueigenfrequenz über der Beladung, ◘ Abb. 7.158. Bei Fahrzeugen mit hohem Komfortanspruch im oberen Marktsegment ist inzwischen eine starke Durchdringung von 2 Achs-Luftfedern [158] feststellbar.

Bei den Luftfedern der Fahrzeug-Niveauregulierung handelt es sich um Niederdruckgasfedern

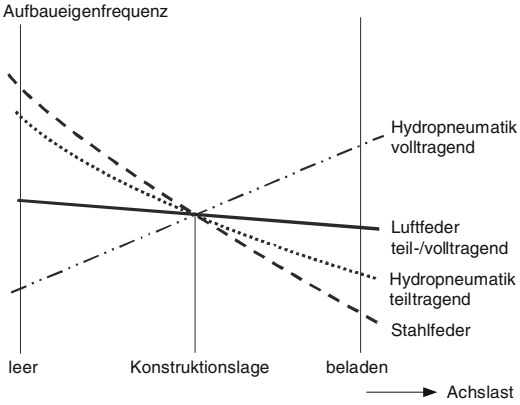



**Abb. 7.158** Beladungseinfluss auf die Aufbaueigenfrequenz bei verschiedenen Niveauregelsystemen

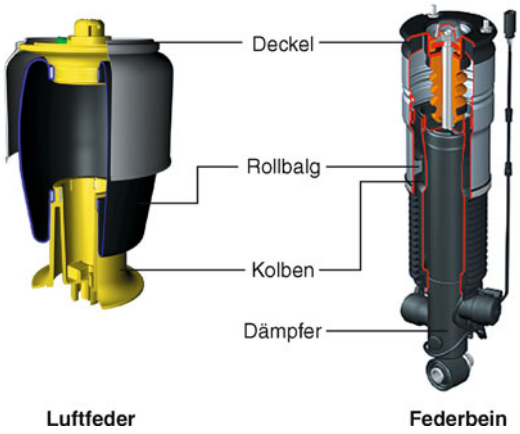



**Abb. 7.159** Bauform einer Luftfeder und Beispiel für eine Federbein-Realisierung

mit konstantem Gasvolumen. Die Energie zur Regulierung des statischen Fahrzeughöhenstandes bei Beladungsänderung oder eines anderen vorgegebenen Sollhöhenstandes wird im Allgemeinen von einer Kompressoreinheit bereitgestellt. Von den zwei Luftfederarten Faltenbalg- und Rollbalgfeder hat sich für die Anwendung im Pkw nur die Rollbalgfeder durchgesetzt. Wesentliche Bestandteile des Luftfederelementes sind Deckel, Abrollkolben und Rollbalg mit Spannelementen, Abb. 7.159. Der Rollbalg ist ein Elastomerschlauch mit einvulkanisiertem Festigkeitsträger. Letzterer besteht aus zwei oder mehreren gekreuzten Fadenlagen, kann aber für Sonderausführungen auch aus nur einer axial verlaufenden Fadenlage bestehen. Dann ist zwingend eine Außenführung des Rollbalges als Stützelement erforderlich. Die Luftfeder kann sowohl als einzelstehende Feder, als auch als Federbein ausgeführt werden.

Die (federwegabhängige) Gasfederrate einer Luftfeder setzt sich im allgemeinen Fall aus zwei Anteilen zusammen:

$$c_G = c_V + c_A \tag{7.11}$$

mit der Volumensteifigkeit

$$c_V = (P_a + p_ü) \cdot n \cdot \frac{A_w \cdot A_g}{V_0} \tag{7.12}$$

und der Flächenfedersteifigkeit

$$c_A = p_ü \cdot \frac{\partial A_W}{\partial z_{21}} \,. \tag{7.13}$$

Hierin sind:

| | |
|---|---|
| $A_W$ | wirksame Querschnittsfläche als von der Berührlinie der Tangentialebene an die Rollbalgfalte eingeschlossene Fläche, B links, |
| $A_g$ | geometrische Querschnittsfläche (theoretische Größe), |
| $\partial A_W / \partial z_{21}$ | Änderung der wirksamen Fläche über dem Federhub, |
| $n$ | Isotropenexponent (abhängig von der Federungsgeschwindigkeit 1,00 bis 1,38), |
| $p_ü$ | Überdruck in der Luftfeder, |
| $p_a$ | Umgebungsdruck, |
| $V_0$ | Innenvolumen in Konstruktionslage. |

Ist der Verlauf der wirksamen Federfläche über dem Federhub konstant, z. B. bei zylindrischem Rollbalg auf zylindrischem Abrollkolben, so wird die Flächenfedersteifigkeit zu Null und die Gasfederrate allein durch die Volumensteifigkeit bestimmt.

Je nach Geschwindigkeit der thermodynamischen Zustandsänderung der Luft beim Federn

wird zwischen dynamischen (adiabaten) Federvorgängen ($n = 1{,}38$) und quasi-statischen (isothermen) Federvorgängen ($n = 1{,}0$) unterschieden, z. B. [159].

Neben den rein thermodynamischen Federungseigenschaften machen sich bei sehr kleinen Anregungen zusätzlich die Eigenschaften der Rollbalgwand als Steifigkeitsanteil $c_{RB}$ bemerkbar [160]. Dies äußert sich in einer mit abnehmendem Federhub exponentiell zunehmenden Verhärtung der Feder, die je nach Balgaufbau die Größe der Gasfederrate leicht überschreiten kann und deshalb zwingend in die Gesamtfederrate $c_{LF,ges}$ einbezogen werden muss:

$$c_{LF,ges} = c_G + c_{RB} \ . \tag{7.14}$$

Da kleinamplitudige Federwege auch auf guten Straßen bis zu hohen Geschwindigkeiten vorkommen, wird der Komfortverlust (Harshness) aus der Rollbalgverhärtung besonders deutlich und unangenehm empfunden. Durch den Einsatz eines Einlagen-Axialbalgs oder eines axialnahen Kreuzlagenbalgs mit Außenführung und sehr dünner Balgwandstärke kann dieser negative Effekt deutlich verringert werden.

Die elektronischen Verstelldämpfersysteme verändern die Vertikalkräfte über den Dämpfkräften abhängig vom sensierten Fahrzustand. Einen guten Einblick in das Verbesserungspotenzial des Schwingkomforts durch Verstelldämpfersysteme sowie deren grundsätzliche Funktion gibt nochmals ◘ Abb. 7.155.

Das Bild zeigt links die Leistungsspektren der vertikalen Aufbaubeschleunigung des Fahrzeugs für unterschiedliche Dämpferkennlinien, die jeweils fest beim Befahren einer mittleren Landstraße eingestellt waren. Das Leistungsspektrum der Aufbaubeschleunigung des Fahrzeugs ist, wie oben schon erwähnt, ein gebräuchliches, wenn auch vereinfachtes objektives Bewertungsmaß für den Schwingkomfort. Je kleiner die Amplituden des Spektrums sind, umso weniger störende Schwingungen erfahren die Insassen beim Befahren der Straße, d. h. kleine Flächeninhalte der Spektren bedeuten statistisch mehr Schwingkomfort. Es ist erkennbar, dass im Frequenzbereich von ca. 2 bis 30 Hz die weiche Kennlinie des Dämpfers einen besseren Komfort liefert; von 0,3 bis ca. 1,5 Hz reduziert die harte Kennlinie die Beschleunigungsamplituden und verbessert so den Schwingkomfort.

Da neben dem Komfort weiterhin die Fahrdynamik und die dynamischen Radlastschwankungen zu berücksichtigen sind, ◘ Abb. 7.155 rechts, ergibt sich folgende prinzipielle Systemfunktion für Verstelldämpfersysteme: Bei primär aufbaufrequenten Vertikalschwingungen – um 1,2 Hz – sowie dominanten längs- und querdynamischen Fahrzeugbewegungen werden härtere Dämpfkräfte über vier Verstelldämpfer gestellt, die die Aufbaubewegung beruhigen bzw. reduzieren. Bei primär radfrequenten Vertikalschwingungen – ca. 12 Hz – sind eher mittlere Dämpfkräfte vorteilhaft, die noch eine befriedigende Radbedämpfung liefern. Bei Anregungen zwischen diesen beiden Fahrzeugeigenfrequenzen sind sehr weiche Dämpfkräfte für einen guten Fahrkomfort einzustellen. Für die Erkennung des Fahrzustandes verwenden die Verstelldämpfersysteme als Informationsquelle z. B. Sensoren für die Aufbau- und Radbeschleunigungen, das Lenkwinkelsensorsignal sowie die Vorderradsignale des ABS-Systems. Die Verstelldämpfersysteme verwenden als Regelstrategie das sogenannte „Sky-Hook-Prinzip“ [162], welches Funktionsvorteile bei aufbaufrequenten Straßenanregungen bietet.

1987 wurde erstmalig ein Verstelldämpfersystem unter dem Namen EDC (Electronic Damping Control) eingeführt (BMW 7er 2. Generation E32 [161]). Basis dieser ersten EDC-Generation waren Verstelldämpfer mit 3 automatisch geschalteten Dämpferkennlinien. Seit 2001 werden kontinuierlich verstellbare Dämpfersysteme [162] in Großserienfertigung eingesetzt (u. a. BMW 7er 4. Generation E65 [162] und X5, RR Phantom, VW Phaeton [173] und Touareg, Audi A8 [174] und Q7, Porsche Panamera und Cayenne, Bentley). Es wird hierbei zwischen Dämpfern mit einem innenliegenden und einem extern angebrachten Verstellventil unterschieden. Diese Verstelldämpfer spreizen ein zug-/druckabhängiges Dämpferkennfeld auf und bieten damit ein Zugewinn an Fahrkomfort (Aufbauruhe, Isolation) und Fahrdynamik. Die internen Systeme setzen den Schwerpunkt der Fahrwerksabstimmung im Bereich Fahrkomfort, die externen Systeme mehr auf die Fahrdynamik.

Seit 2008 wird ein neues Verstelldämpfersystem mit einer erstmals getrennten kontinuierlichen Zug-/Druckstufenverstellung angeboten (BMW 7er 5. Generation F01 [157]). Mit diesen jeweils zwei außenliegenden, kontinuierlich verstellbaren Ventilen kann eine weitere Verbesserung des Aufbauschwing- sowie Abrollkomforts erzielt werden. Zusätzlich ermöglichen diese Verstelldämpfer durch eine große Spreizung zwischen Hart und Weich eine Verbesserung der Agilität und Zielgenauigkeit.

Während oben genannte Verstelldämpfersysteme den Strömungswiderstand des Dämpferöls beeinflussen, gibt es auch Anwendungen von magnetorheologischen Flüssigkeiten (u. a. Cadillac Seville, Chevrolet Corvette, Audi TT und R8 [177]), die die physikalischen Eigenschaften des Dämpferöls ändern. Bei diesem System wird durch Variation eines Magnetfeldes die Viskosität der Dämpferflüssigkeit derart verändert, dass je nach Bedarf weiche bzw. harte Dämpfkräfte erzeugt werden können.

Aktive Federn werden seit 1990 auf dem japanischen Markt [163, 164] angeboten, aktive Pendelstützen bzw. Stabilisatorstangen in Europa seit 1995 [165]. Aktive Stabilisatoren sind erstmals 1999 im Land Rover Discovery II in Serienproduktion gegangen, 2001 als Schwenkmotorlösung in Mehrlenkerachsen im BMW Dynamic Drive.

Aktive Federn können nahezu beliebige Vertikalkräfte im Bereich der Aufbau-Eigenfrequenz stellen und aktive Stabilisatoren entsprechende Vertikalmomente. Die kundenwertigen Funktionsvorteile sind je nach Systemausprägung unterschiedlich. Generell stehen die hohen technischen Aufwendungen dieser Systeme einer breiten Marktdurchdringung entgegen.

Die Lösungen der japanischen Produzenten zur Aktiven Federung basieren auf einer hydropneumatischen Aktivfeder (ersetzt konventionelle Feder und Dämpfer), einer Hydraulikversorgung, einem Steuergerät und mehreren Sensoren. Die Versorgung beinhaltet eine Axial- oder Radialkolbenpumpe, Versorgungs- und Pulsationsspeicher, einen Ölbehälter, einen Kühler, einen Hochdruckfilter sowie Verbindungsleitungen. Die Versorgung realisiert ein Konstantdrucknetz, d. h. der Versorgungsdruck wird möglichst konstant auf dem Maximaldruck von z. B. 160 bar gehalten.

Derartige Konstantdrucknetze machen erhebliche technische Aufwendungen erforderlich, um einen geringen akustischen Geräuschpegel zu realisieren. Die hydropneumatische Aktivfeder basiert auf der hydropneumatischen Federung, die aus einem Differentialzylinder, einem Gasdruckspeicher (Wirkung als Federelement) und einer Drossel (Wirkung als Dämpferelement) besteht sowie einem Regelventil, welches in den Differentialzylinder Hochdrucköl zu- bzw. abführen kann. Der aktive Eingriff erfolgt über das Regelventil und ist als Zusatzmaßnahme realisiert. Im Gegensatz zur vollaktiven Feder [167] federt die aktive hydropneumatische Feder auch ohne Zu- und Abfuhr von Drucköl. Dies führt zu Vorteilen im Schwingkomfort und in der Energiebilanz, wenn man die vollaktive Feder als Vergleichspartner betrachtet. Der notwendige Sensoraufwand ist erheblich. Nissan verwendet für die Erfassung des Fahrzustands 2 Quer-, 1 Längs- und drei Vertikalbeschleunigungssensoren sowie 4 Höhenstandssensoren. Toyota verbaut zusätzlich 5 Drucksensoren. Das Steuergerät wertet diese Informationen aus und steuert die 4 hydropneumatischen Aktivfedern bedarfsgerecht. Der reale Kundennutzen ist im Vergleich zum Aufwand und insbesondere zum Energiemehrverbrauch kritisch zu betrachten. So haben die aufwendigen Aktivfedern auf dem japanischen Markt auch keine wirkliche Verbreitung gefunden.

Eine alternative Form der aktiven Feder, die vom technischen Aufwand durchaus vergleichbar ist zu den Systemen der japanischen Anbieter, wird von Mercedes-Benz unter dem Namen ABC – Active Body Control angeboten [168]. Der grundsätzliche Unterschied zu den zuvor behandelten aktiven Federn ist der Aufbau der vier Federbeine. In ◘ Abb. 7.160 ist ein Schnittbild des oberen Teils eines ABC-Federbeins dargestellt. Die Hülse eines Plungerzylinders stützt sich auf der Schraubenfeder ab, die den Fahrzeugaufbau trägt. Durch Zu- und Abfuhr von Drucköl über ein Regelventil führt die Hülse des Plungerzylinders Bewegungen aus, spannt so die Schraubenfeder entsprechend dem Hülsenweg vor und erzeugt damit die gewünschten Zusatzkräfte. Letztere sollen ebenso wie bei den zuvor dargestellten aktiven Federn die Bewegungen der Karosserie in den Freiheitsgraden Nicken, Wanken und Huben im Aufbaufrequenzbereich weit-

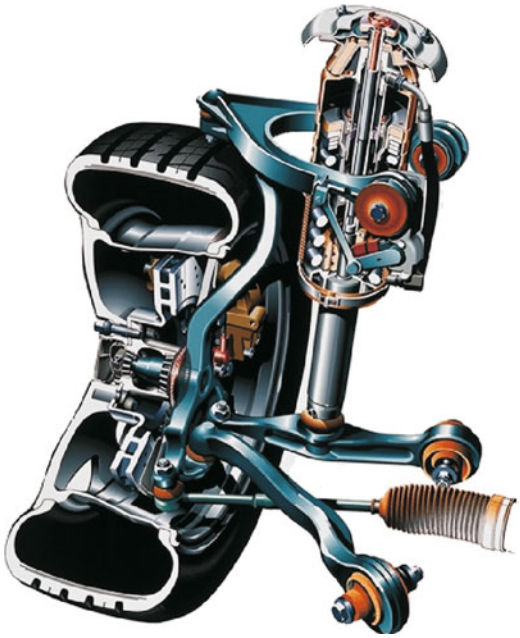


**Abb. 7.160** **A**ctive **B**ody **C**ontrol-Federbein der Daimler AG

gehend reduzieren sowie eine Niveauregulierung ermöglichen. Neben der Schraubenfeder ist ein passiver Gasdruck-Schwingungsdämpfer im Federbein integriert, der eine weiche Kennlinie hat, welche die Radbewegung noch ausreichend bedämpft. Ebenso wie bei den hydropneumatischen Aktivfedern ist ein Konstantdrucknetz realisiert, es sind eine Vielzahl von Regelventilen notwendig und es werden ähnliche Sensoren wie in [163] verwendet. Dazu kommen noch die Lagesensoren zur Reglung der Plungerzylinder. Gegenüber den hydropneumatischen Aktivfedern besitzt die ABC-Lösung also prinzipielle Vorteile: geringere Reibungskräfte, die im Kraftfluss Rad zur Karosserie wirken sowie mehr Freiheitsgrade in der Gestaltung der Federkennlinie. Da der Aufwand der ABC-Technologie erheblich ist, wird der Markt wohl auch bei diesem System auf ein sehr kleines Fahrzeugsegment beschränkt bleiben.

Als Lösung zur Reduktion der Wankbewegungen bei einem Geländefahrzeug mit hoher Schwerpunktslage wurde im Land Rover Discovery II mit ACE (Active Cornering Enhancement) ein Wankstabilisierungssystem angeboten, das bei Kurvenfahrt durch aktive Stabilisatoren Vertikalmomente aufbaute, die dem Wankmoment des Fahrzeugaufbaus entgegenwirken [166]. Am aktiven Stabilisator war ein hydraulischer Differentialzylinder mit Hebelarm anstelle eines Stabilisatorschenkels verbaut. Als einkanaliges System, wurden beide Aktuatoren an Vorder- und Hinterachse mit dem gleichen Druck angesteuert, so dass lediglich eine Wankstabilisierung mit konstanter Wankmomentverteilung möglich war.

BMW Dynamic Drive realisiert eine aktive Wankstabilisierung und als zweikanaliges System gleichzeitig ein optimales Eigenlenkverhalten durch eine fahrzustandsabhängige Verteilung der Stabilisierungsmomente zwischen Vorder- und Hinterachse [172]. Das Handling und die Agilität werden hierdurch deutlich verbessert, verbunden mit einem Gewinn an Fahrsicherheit und Aufbauschwingkomfort, letzteres in besonderem Maße bei Geradeausfahrt bzw. sehr geringen Querbeschleunigungen.

Dynamic Drive besteht aus zwei aktiven Stabilisatoren, einem Ventilblock mit integrierten Sensoren, Hydraulikversorgung, sowie einem Steuergerät. An Vorder- und Hinterachse sind in den mechanischen Stabilisatoren drehende hydraulische Aktuatoren integriert (siehe Abb. 7.161). Die aktiven Stabilisatoren wandeln Druck in ein Torsions- sowie über die Anbindung in ein Stabilisierungsmoment um, so dass die Wankbewegung des Fahrzeugaufbaus bei Kurvenfahrt minimiert bzw. gänzlich beseitigt wird. Durch die entsprechende Verteilung der Momente zwischen Vorder- und Hinterachse wird eine hohe Agilität und Zielgenauigkeit über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich und ein optimales Eigenlenk- sowie ein gutmütiges Lastwechselverhalten erzeugt. Andererseits sind die Aktuatoren bei Geradeausfahrt bzw. sehr geringen Querbeschleunigungen drucklos, so dass die Drehfederrate des Stabilisators die Grundfederung nicht verhärtet und die Kopierbewegung des Fahrzeugaufbaus reduziert wird.

Eine neue Anwendung des Dynamic Drive in enger Systemvernetzung mit einem modernen Verstelldämpfersystem wird seit 2006 im BMW X5 unter der Systembezeichnung Adaptive Drive eingesetzt [176]. Porsche brachte im Cayenne und Panamera ebenfalls die vernetzte Kombination aus

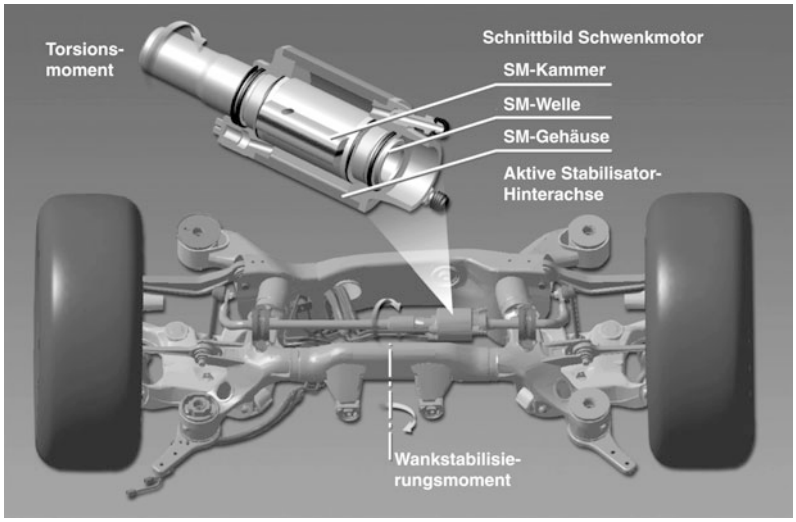



**Abb. 7.161** Aktive, hydraulische Stabilisator-Hinterachse des Dynamic Drive im BMW 7er

Aktiver Wankstabilisierung und Verstelldämpfung zur Marktreife [181].

Zur Reduktion des Systemaufwands und Optimierung des Energiebedarfs und damit der $CO_2$ Emission ist ein Trend weg von hydromechanischen hin zu elektromechanischen Lösungen bei den aktiven Federungselementen erkennbar. Bei hybridem und rein elektrischem Fahrzeugantrieb steht der klassische Riemenantrieb der Nebenaggregate vom Verbrennungsmotor nicht mehr zur Verfügung, d. h. entweder muss die Hydroversorgung über Pumpenaggregate dargestellt werden oder auf rein elektromechanische Aktuatorik gewechselt werden.

Elektromechanische Federfußpunktverstellungen als Alternative zum hydraulischen Mercedes Benz ABC System sind aus der Literatur und Patentveröffentlichungen bekannt [178].

Toyota hat als erster Hersteller ein Wankstabilisierungssystem mit einem elektromechanischen Aktuator im Lexus RX450h sowie in den US Versionen des LS 600h und GS460 in Serie realisiert [180]. Ab 2015 wird auch der neue BMW 7er mit einem elektromechanischen Wankstabilisierungssystem angeboten.

### 7.4.4.5 Ausblick

Durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrwerkselemente, durch immer besseres und tieferes Verständnis der Fahrzeug- und Zulieferindustrie für das komplexe Zusammenwirken sowie durch immer leistungsfähigere Entwicklungsinstrumente, Materialien und Herstellverfahren konnten gerade in den letzten 2 Jahrzehnten wieder erstaunliche Fortschritte in der Qualität von Fahrwerken erzielt werden. Obwohl aus Kostengründen auch heute noch die meisten Fahrwerke konventioneller Natur, d. h. aus passiven Komponenten aufgebaut sind, darf also zu Recht von einem hohen erreichten Niveau „mechanischer Intelligenz“ gesprochen werden.

Zukünftige Herausforderung auf dem Gebiet der konventionellen Fahrwerkstechnologie werden ein noch intensiverer Leichtbau zur $CO_2$ Reduktion bzw. Reichweitensteigerung bei Elektromobilität sein. Die Spreizung der Eigenschaften der Bauteile zur Darstellung unterschiedlicher Charaktere der breiter werdenden Derivatlandschaft wirft neue Zielkonflikte auf.

Bei dem Versuch, die Frage zu beantworten, was noch erwartet werden kann, hilft zunächst

möglicherweise ein wenig Selbstkritik: Bis heute ist aufgrund der Komplexität der Aufgabe streng genommen kaum jemand in der Lage zu sagen, ob ein neu entwickeltes, hervorragendes Fahrwerk das wirkliche, unter den gegebenen Randbedingungen erreichbare Maximum darstellt, oder eben „nur" die aktuelle Bestleistung des beteiligten Entwicklerteams. Deshalb sollte die Chance genutzt werden, im Zuge fortschreitender Virtualisierung des Entwicklungsprozesses den heute vorliegenden, systemübergreifender gewordenen Kenntnisstand über kausale Zusammenhänge, zusammen mit leistungsfähigen Rechnern und Programmen sowie der intensiveren Einbeziehung anderer Wissenschaftszweige als wichtige Hilfen auf der Suche nach dem jeweils möglichen globalen Optimum einer neuen Fahrwerksynthese zu nutzen. Erste Ansätze und Fortschritte gibt es dazu bereits. Der gezielte Einsatz von Berechnungstools ermöglicht es, eine große Bandbreite und vom Umbauaufwand im Versuch her sehr aufwendige Fahrzeugkonfigurationen zu erstellen und zu untersuchen. Mit Hilfe von Simulatoren können diese innerhalb von Sekunden erlebt und verglichen werden. Dies trägt zu einem immer tiefer greifenden Verständnis der im Fahrwerk existierenden Wirkzusammenhänge bei und ermöglicht so eine viel größere und umfassendere Variation der Fahrwerksparameter auf der Suche nach dem globalen Maximum, als dies im realen Fahrversuch jemals wirtschaftlich möglich wäre. Die Folge ist ein besserer Ausgangspunkt für die Endabstimmung der Fahrzeuge im Fahrversuch, eine Reduktion der notwendigen Iterationsschleifen und damit ein deutliches Kostensenkungspotenzial in der Entwicklung des Fahrwerkes.

Die nächsten technischen Evolutionen auf dem Sektor der geregelten Fahrwerksysteme werden einerseits noch leistungsfähigere, intensiver vernetzte Fahrwerkregelsysteme mit zukunftsorientierter Systemkonfiguration, einschließlich „Previewing" (zeitliche und räumliche Vorausschau für Fahrspurführung und Fahrbahnunebenheiten) sein.

Previewing Systeme wurden seit Jahrzehnten in der Theorie aufbereitet, z. B. [169–171], und teilweise auch prototypenhaft erprobt. Mercedes-Benz bietet diese Technologie, basierend auf dem Active Body Control, unter der Systembezeichnung Magic Body Control in der S-Klasse an [179, 182]. Bei BMW ist ein System mit Previewing im neuen 7er (ab 2015) verfügbar.

Andererseits werden Komfortsysteme wie Verstelldämpfung und Fahrerassistenz eine größere Marktdurchdringung erhalten.

Darüber hinaus geht auch bei den konventionellen Systemen – aufgrund der ständig steigenden Anforderungen (z. B. bzgl. reduzierter $CO_2$-Emission) – der Trend zu optimierter Funktion bei zugleich kleinerem Bauraumbedarf und geringerem Gewicht [183].

### 7.4.5 Lenkung

Die Fahrzeugführung erfolgt bei Straßenfahrzeugen durch den Fahrer (fast ausschließlich) über das Lenkungssystem. Für die Verkehrssicherheit ist es von erheblicher Bedeutung, mit welcher Genauigkeit einerseits der Fahrzeugführer einen persönlich gewünschten oder von Straßenverlauf und Verkehrsgeschehen vorgegeben Kurs einhalten kann, und andererseits das Fahrzeug eine solche Vorgabe selbstständig beibehält. Der Fahrer muss stets das sichere Gefühl haben, dass das Fahrzeug zuverlässig auf seinen Wunsch reagiert. Die Genauigkeit der Kurshaltung ist umso besser, je schneller der Fahrer gewollte und auch ungewollte Kursänderungen erkennen kann und je rascher und je genauer den Erwartungen entsprechend das Fahrzeug auf Lenkeinschläge des Fahrers reagiert.

Für den Lenksystementwickler ergeben sich daraus eine Anzahl von Anforderungen und Hinweisen zur kundennahen Auslegung:

- kleiner Wendekreis, niedrige Parkierkräfte, kleine Lenkwinkel am Lenkrad,
- Leichtgängigkeit, Feinfühligkeit, Zielgenauigkeit, guter Geradeauslauf, ausreichende Direktheit, spontanes Ansprechen,
- ausgeprägter Straßenkontakt, Rückmeldung des Kraftschlusses Reifen/Fahrbahn,
- selbstständiges Rückstellen in Mittellage, stabilisierendes Verhalten bei allen Fahrmanövern,
- Störgrößenunterdrückung aus Fahrbahnunebenheiten, Seitenwind, Antrieb, Bremsen, Reifenbauarten …, keine ausgeprägte Neigung zu Eigenschwingungen,


BOSCH
Technik fürs Leben
Unsere Lenkungstechnik können Sie zwar nicht sehen, aber fühlen.
Kurvenzählerin
Wir sorgen dafür, dass Sie beim Autofahren eins mit der Straße werden – Kilometer für Kilometer, Fahrt für Fahrt, Kurve für Kurve.
www.bosch-automotive-steering.com

- Erfüllung der Crashvorschriften zum Insassenschutz,
- Verschleiß- und Wartungsarmut sowie kein negativer Einfluss auf das Verschleißverhalten der Bereifung.

### 7.4.5.1 Lenkungskinematik

**Kenngrößen zur Lenkkinematik** Die grundlegenden Eigenschaften einer Lenkungsanlage sind durch vier geometrische Größen zur Beschreibung von Lage und Ausrichtung der Lenkdrehachse des Rades (Spreizachse) im Fahrzeug bestimmt:

- Lenkrollradius und Nachlaufstrecke,
- Spreizungswinkel und Nachlaufwinkel.

Darüberhinaus gibt es auf Radmitte bezogene Kennwerte wie Spreizungs- und Nachlaufversatz. Letztere sind redundant und ergeben sich nach Festlegung der Spreizachse zwangsweise. Alle Größen sind bereits in ▶ Abschn. 7.4.1 erläutert (◘ Abb. 7.125, ◘ Abb. 7.126).

Die Größen Lenkrollradius, Nachlaufstrecke, Spreizungsversatz etc. stellen wirksame Hebelarme für äußere Kräfte auf die Lenkung dar. Für die seitens der Normung sehr einfache, für die Berechnung aber nicht ausreichend exakte Definition dieser Kennwerte wird auf [184] verwiesen. Die Bedeutung dieser Kenngrößen zur Lenkungskinematik bei der Fahrwerkauslegung und bevorzugte Größenordnungen bei modernen Straßenfahrzeugen werden nachstehend anhand der wichtigsten Betriebszustände und der dort auftretenden äußeren Kräfte diskutiert.

**Lenkrollradius – Bremskraft** Der Begriff Lenkrollradius lässt vermuten, dass der Radaufstandspunkt des gelenkten Rades auf einer Bahn mit diesem Krümmungsradius abrollt. Dies gilt aber nur für den Sonderfall einer völlig senkrechten Spreizachse. Bei vorhandenem Spreizungs- und Nachlaufwinkel vergrößert sich der Krümmungsradius, die Bahnkurve wird spiralförmig [184]. Der Lenkrollradius bezeichnet daher keinen Halbmesser einer Kreisbahn, sondern kann nur als wirksamer Hebelarm von Längskräften um die Spreizachse gesehen werden, die in der Fahrbahnebene wirken und am Radaufstandspunkt angreifen, wenn sich Antriebs- oder Bremsmomente auf dem Radträger abstützen und so Rad und Radträger als momentan fest verbunden gedacht werden können. Dies gilt z. B. für heute übliche außen, d. h. in der Radschüssel liegende Radbremssysteme, und entsprechend für in der Radschüssel liegende Antriebsmotoren (z. B. Elektrofahrzeug mit Radnabenmotor).

Überlegungen zur optimalen Größe des Lenkrollradius wurden früher wegen fehlender Servounterstützung bezüglich des Lenkmoments im Stand angestellt und führten deshalb zu relativ großen Lenkrollradien. Dies hatte bei unsymmetrischen Bremsmomenten (Bremsenverzug, besonders bei Trommelbremsen) oder Fahrbahnreibwerten Probleme bei der Kurshaltung zur Folge und führte zum negativen Lenkrollradius, z. B. [185, 188]. Vor allem in Abhängigkeit vom Antriebskonzept propagieren die verschiedenen Fahrzeughersteller bis heute unterschiedliche Konzepte bezüglich Betrag und Vorzeichen des Lenkrollradius, ◘ Tab. 7.10.

Der negative Lenkrollradius wurde durch seine stabilisierende Wirkung beim Bremsen auf unterschiedlichen Reibwerten ($\mu$-split) bekannt. Für den stationären Fall erzeugt ein Bremsvorgang bei ($\mu$-split durch die höheren Bremskräfte auf der Hochreibwertseite ein Giermoment hin zu dieser Fahrzeugseite mit Folge einer entsprechender Kursänderung. Bei einer Fahrwerksauslegung mit negativem Lenkrollradius wird auf der Hochreibwertseite ein zum niedrigen Reibwert hindrehendes Lenkmoment erzeugt, welches dem Giermoment aus den Bremskräften entgegenwirkt, ◘ Abb. 7.162. Für den hier beschriebenen Fall lässt sich für einen stationären Arbeitspunkt eine Abstimmung finden, welche ohne Eingriff des Fahrers am Lenkrad zu einem Gleichgewicht im Lenkungssystem und somit zur weitgehend ungestörten Geradeausfahrt führt.

Für Fahrzeugkonzepte mit Frontantrieb (auch Allradantrieb) und Federbeinachsen ist der negative Lenkrollradius eine willkommene Möglicheit, den Spreizungsversatz und somit den für die Antriebseinflüsse wichtigen Störkrafthebelarm zu reduzieren.

Zu beachten ist, dass beim negativen Lenkrollradius das Lenkrad zur Fahrzeugseite mit dem niedrigen Reibwert (d. h. üblicherweise zur Fahrbahn-

**Tabelle 7.10** Kinematische Kennwerte aktueller Fahrzeuge in Konstruktionslage (Daten aus [197–210])

| | | Frontantrieb | | | | | | | Allrad | | | Heckantrieb | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Audi A1 | Audi A4 | MB A-Klasse | VW Polo | MINI Cooper | Ford Mondeo | MB GLK-Klasse | Porsche Cayenne | VW Phaeton | BMW 3er | BMW 5er | MB E-Klasse | BMW 7er | MB S-Klasse | Porsche Boxster | MB SL |
| Achsprinzip* | – | FB | ML | FB | FB | FB | FB | DFB | ML | ML | DFB | ML | ML | ML | ML | FB | ML |
| Lenkrollradius | mm | –9,5 | –7,8 | –20,7 | –17 | 2 | –16 | –24,6 | 3,5 | –0,5 | –0,1 | 2,1 | –0,6 | 7 | 2,1 | –7 | 4,5 |
| Nachlaufstrecke | mm | 33,2 | 21,9 | 13,8 | 32 | 15 | – | 31,8 | 47,7 | 26,1 | 18 | 25,8 | 31,7 | 25,6 | 32,7 | 41 | 36 |
| Spreizungsversatz | mm | 57,7 | 11,2 | 44,1 | 49 | 54,7 | – | 51,9 | 67 | 22,2 | 73,6 | 57,2 | 26,4 | 58,7 | 27,2 | 83 | 31 |
| Nachlaufwinkel | ° | 5,2 | 3,1 | 2,8 | 5,27 | 4,3 | 2,5 | 9,6 | 8,5 | 3,7 | 7,1 | 7,2 | 9,2 | 7 | 9,1 | 8 | 11,8 |
| Spreizungswinkel | ° | – | 4,1 | 14,1 | – | 11,1 | 14,7 | 13,9 | – | 5,2 | 13,9 | 10 | 6 | 9 | 5,2 | – | 6,1 |

* FB: Eingelenk-Federbeinachse, DFB: Doppelgelenk-Federbeinachse, ML: Mehrlenkerachse

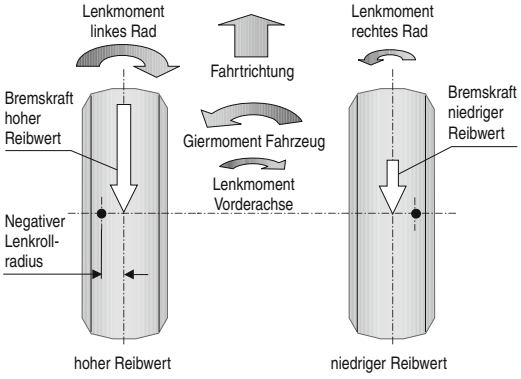



**Abb. 7.162** Kräfte und Momente an der Vorderachse bei negativem Lenkrollradius und $\mu$-Split-Bremsvorgang

außenseite) zieht und dadurch den Fahrzeugführer zur Gegenreaktion veranlassen kann. Diese Reaktion verstärkt aber die beginnende Gierbewegung des Fahrzeugs. Bei der Argumentation für den positiven Lenkrollradius wird dieses „Fehlverhalten" des Fahrers als Teilnehmer im Regelkreis Lenkung und die damit verbundenen (unbewussten) Lenkkorrekturen einbezogen.

Der Lenkrollradius sollte also so wenig von Null abweichen, dass der Einfluss instationärer Bremskräfte unterdrückt wird und die Information des Fahrzeugführers über den Betriebszustand des Fahrzeuges eindeutig ist.

**Nachlaufstrecke – Seitenkraft – Reifennachlauf** Nachlauf liegt vor, wenn der Radaufstandspunkt hinter dem Durchstoßpunkt der Lenkachse durch die Fahrbahnebene liegt, Abb. 7.125. Die Nachlaufstrecke ist Teil des wirksamen Hebelarms einer in der Fahrbahnebene angreifenden Seitenkraft senkrecht zur Projektionsebene des eingeschlagenen Rades. Dabei ist zu beachten, dass die Reifenseitenkraft um den Betrag des Reifennachlaufs (► Abschn. 7.3) versetzt wirkt und sich deshalb der wirksame Hebelarm aus Nachlaufstrecke und Reifennachlauf zusammensetzt. Seitenkräfte führen bei wirksamen Hebelarmen $> 0$ zu einem rückdrehenden Moment und tragen somit zu einem stabilen Geradeauslauf bei.

**Spreizungsversatz (Störkrafthebel) – Rollwiderstandskräfte, Antriebskräfte** Alle äußeren Kräfte und Kraftkomponenten können beim frei rollenden Rad nur über die Radlagerung und den Radträger auf die Lenkachse übertragen werden. Dies sind bei nicht angetriebenem Rad Rollwiderstandskräfte, Stoßkräfte und mit dem Rad/Reifen umlaufende Unwuchtkräfte. Diese Kräfte wirken über den Spreizungsversatz (Störkrafthebelarm) als Störkräfte auf die Achsaufhängung. Im Allgemeinen gilt der Spreizungsversatz auch als wirksamer Hebelarm einer über Antriebswellen erzeugten Antriebs-, Schlepp- oder Bremskraft. Diese Aussage gilt aber nur für den Sonderfall Beugewinkel Null in den Antriebsgelenken.

**Nachlaufversatz** Der Nachlaufversatz ist der waagrechte Abstand der Radmitte zur Spreizachse in der Seitenansicht eines Fahrzeuges. Da an der Radmitte keine Seitenkräfte angreifen, hat dieser Kennwert als Krafthebelarm keine Bedeutung. Bezüglich der Kräfte ist es somit für den Entwickler unbedeutend, ob durch die Wahl von Nachlaufstrecke und Nachlaufwinkel ein Nachlauf- oder ein Vorlaufversatz entsteht. Dies gilt aber nicht für die räumliche Bewegung des Rades und der damit verbundenen Bauteile. Ein Nachlaufversatz führt z. B. bei angetriebenen Achsen zu einer erhöhten Längenänderung der Antriebswelle während des Lenkvorgangs. Deshalb sind dem Versatz von Radmitte und Lenkdrehachse bei Frontantrieb Grenzen gesetzt. Positiv für den Raumbedarf des gelenkten Rades ist ein Vorlaufversatz: Die hinter der Radmitte liegende Schwenkachse (Spreizachse) lässt den Reifen beim kurveninneren Lenkeinschlag im kritischen Bereich der Stirnwand weniger weit zur Fahrzeuginnenseite schwenken. Selbstverständlich wird der Raumbedarf für kurvenäußere Radeinschlagwinkel dafür größer. Da aber der kurveninnere Radlenkwinkel größer als der kurvenäußere ist, wird mit dieser Maßnahme eine Ausmittelung des seitlichen Raumbedarfs und somit mehr Raum für Motor und Karosseriestruktur erreicht.

Die nun folgenden Kennwerte haben keinen direkt sichtbaren Konstruktionsparameter zur Folge,

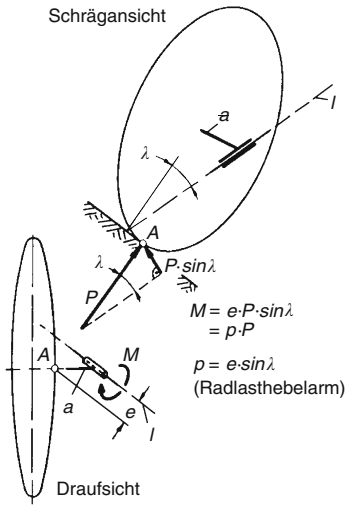



**Abb. 7.163** Zeichnerische Darstellung des Radlasthebelarms (nach [193])

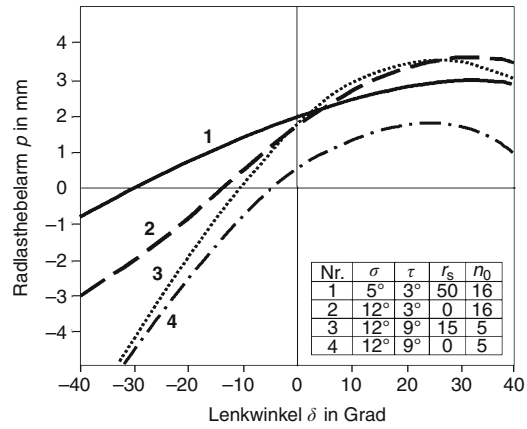



**Abb. 7.164** Radlasthebelarm $p$ über Lenkwinkel $\delta$, für verschiedene Lenkgeometrien (nach [184]). (Spreizungswinkel $\sigma$, Nachlaufwinkel $\tau$, Lenkrollradius $r_S$, Nachlaufstrecke $n_0$ bei $\delta = 0$)

sind aber für die Beurteilung verschiedener Konzepte sehr hilfreich bzw. für die optimale Funktion einer Fahrzeuglenkung von entscheidender Bedeutung.

**Radlasthebelarm – Hochkraft – Gewichtsrückstellung**
Sind Spreizungswinkel und Nachlaufwinkel gleich Null, d. h. die Spreizachse steht senkrecht, so erfährt das Rad bzw. der Aufbau bei Lenkbewegung keine Höhenstandsänderung, der Radlasthebelarm, Abb. 7.163, ist gleich Null. Ist die Spreizachse geneigt, hebt oder senkt sich das Rad gegenüber dem Fahrzeugaufbau bei Lenkeinschlag; die Radlast stützt sich offensichtlich auf einem Hebelarm größer Null ab. Durch diese Hubbewegung wird Energie dem Aufbau (und der Federung) zugeführt oder freigesetzt. Diese Energie wirkt sich über das Lenkgestänge am Lenkrad aus.

Mathematisch ausgedrückt, ist der Radlasthebelarm die Ableitung der Hubbewegung des Rades nach dem Lenkwinkel:

$$p = -\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}\delta} \,. \tag{7.15}$$

Der Radlasthebelarm, Abb. 7.164, sollte in der Geradeausstellung der Lenkung nahe Null sein, um Lenkmomente aus Vertikalkraftschwankungen (einseitigen Straßenanregungen) zu vermeiden. Ferner sollte er bei Lenkeinschlag am kurvenäußeren Rade kleiner werden, um eine „Gewichtsrückstellung" der Lenkung zu bewirken. Beim (größeren) kurveninneren Radeinschlag ergibt sich nämlich bei positivem Radlasthebelarm eine Anhebung des Aufbaus, beim kurvenäußeren eine Absenkung und nur durch links und rechts unterschiedliche Hub- bzw. Senkbewegung kann in der Summe eine Anhebung des Schwerpunkts erzeugt werden, die rückstellend wirkt. Die Ableitung des Radlasthebelarms nach dem Lenkwinkel, das bedeutet die zweite Ableitung des Radhubs nach dem Lenkwinkel in der Geradeausstellung, Gl. (7.16), ist der „Hebelarm der Gewichtsrückstellung" [184, 189]. Ersatzweise kann dieser Hebel als Pendel gedacht werden, dessen Pendelmasse das Gewicht des Vorderwagens hat und das bei Auslenkung um den Radlenkwinkel ein entsprechendes Rückstellmoment ergibt.

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\delta} = r_\sigma \, \tan\sigma - n \cdot \tan r \tag{7.16}$$

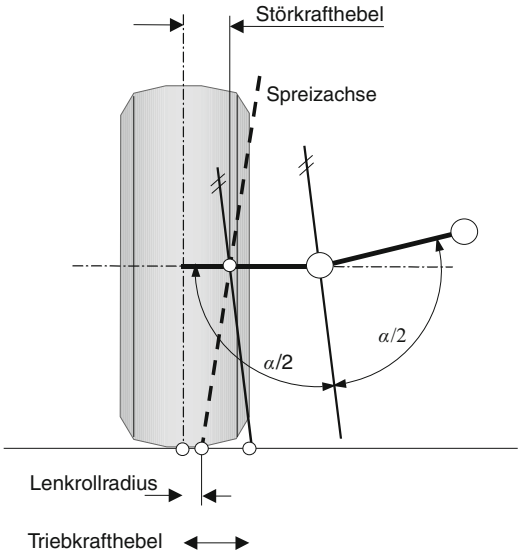
(feste Spreizachse) .

Die Gewichtsrückstellung ist bei Geradeausfahrt die einzige Größe (bei Vorspur- und Sturzwinkel gleich Null), welche die Lenkung in der Mittelstellung zentriert!

Bei Radaufhängungen mit virtueller Spreizachse kann die Gewichtsrückstellung durch die

Schwenkbewegung der Spreizachse über dem Lenkwinkel [189] oder durch Erzeugen einer Schraubbewegung entlang der Spreizachse zusätzlich verstärkt bzw. auch verringert werden. Unabhängig von der Lenkungskinematik lassen sich die Rückstellmomente in der Lenkung durch die Anlenkung von Federelementen (Stabilisator, Federung, Kurvenscheiben usw.) direkt am Radträger beeinflussen. Zu beachten ist, dass sich damit bei unsymmetrischen Radlaständerungen Rückwirkungen in die Lenkung ergeben.

**Triebkrafthebelarm – Antriebsmoment, Schleppmoment** Bei Radaufhängungen mit fester Spreizachse (z. B. übliche Doppelquerlenkerachsen) ist der Spreizungsversatz oder Störkrafthebelarm unveränderlich über Lenkeinschlag und Radhub und demnach am kurvenäußeren und kurveninneren Rad immer gleich groß. Bei gleichem Antriebsmoment an beiden Rädern sollte sich somit unter Vernachlässigung der Wirkung von Lenkdifferenzwinkeln auch bei Störkrafthebeln größer Null ein Momentengleichgewicht der vortreibenden Kräfte ergeben und die Lenkung unbeeinflusst bleiben. Trotzdem kann man bei Frontantriebsfahrzeugen den Antriebseinfluss in der Lenkung beobachten. In [187] führten diese Beobachtungen zur Definition eines Hebelarms der Triebkräfte. Analog dem Lenkrollradius muss dieser Hebelarm als diejenige Größe betrachtet werden, welche bezüglich der Lenkachse wirksam wird, wenn bei blockiertem Antrieb Längskräfte im Radaufstandspunkt auf das Rad wirken. Dieser Triebkrafthebelarm ist an einem sehr einfachen Beispiel mit fester Spreizachse und ebener Kinematik ohne Herleitung in ◘ Abb. 7.165 dargestellt. Eine Parallele zur Winkelhalbierenden zwischen Radachse und Antriebswelle im Schnittpunkt von Radachse und Spreizachse durchstößt die Fahrbahnebene im Abstand des Triebkrafthebelarmes vom Radaufstandspunkt. Aus dem Bild lässt sich leicht ableiten, dass nur bei Gelenkwellenbeugewinkel Null der Spreizungsversatz dem Triebkrafthebelarm entspricht und weiter, dass sich der Triebkrafthebelarm am eingefederten Rad verringert und am ausgefederten Rad vergrößert. Bei ungleich langen Antriebswellen führt dies nicht nur bei Kurvenfahrt, sondern auch beim parallelen Ein-/Ausfedern zu Differenzen zwischen linkem und rechtem Rad und somit zu Antriebseinflüssen in der Lenkung.




◘ **Abb. 7.165** Triebkrafthebelarm einer angetriebenen Achse bei fester Spreizachse

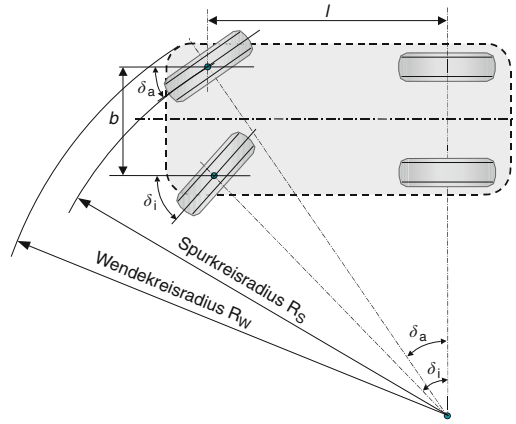
**Wirkung von Störgrößen** Störanregungen, hervorgerufen durch Unwucht des Rades, Radialkraftschwankungen des Reifens (elastische Ungleichförmigkeit) oder Bremsmomentschwankungen führen an der Radaufhängung und somit im Lenksystem zu drehfrequenz- und damit fahrgeschwindigkeitsabhängigen Schwingungserscheinungen in verschiedenen Richtungsebenen: Lenkradvertikalschwingung, Lenkraddrehschwingung usw. Über die richtige Wahl der oben beschriebenen kinematisch wirksamen Hebelarme können die Wirkungen der immer vorhandenen Störanregungen/Eigenfrequenzen vermindert bzw. so weit unterdrückt werden, dass der Fahrer sie nicht mehr wahrnimmt. Weitere wichtige Parameter sind die Steifigkeiten der Radführungselemente und die Lage der elastokinematischen Lenkdrehachse zum Schwerpunkt der ungefederten Massen. Auch richtungsabhängige Wirkungsgrade von Lenkgetrieben können hier helfen, indem ein hoher Wirkungsgrad von oben nach unten die Feinfühligkeit der Lenkung unterstützt, während ein niedriger Wirkungsgrad von

unten nach oben bei der Unterdrückung von Störgrößen hilft. Zahlreiche Beiträge wie z. B. [192] zeigen, dass die vom Fahrer als Lenkunruhe reklamierten Erscheinungen ein häufiges und ernst zu nehmendes Problem darstellen.

**Bestimmung der idealen Lenkeinschlagwinkel am Rad** Bisher wurde die Lenkungskinematik diskutiert, ohne zu behandeln, wie beide Räder idealerweise gelenkt werden müssen, um die primäre Aufgabe der Lenkung zu erfüllen, das Fahrzeug auf einen vom Fahrer bestimmten Kurs sicher zu führen. Kinematisch einwandfrei gelenkt ist ein Fahrzeug dann, wenn sich die Normalen auf die Geschwindigkeitsvektoren aller Räder in einem Punkt treffen. Für eine Kurvenfahrt bei geringer Querbeschleunigung und kleinen Seitenkräften und somit sehr kleinen Schräglaufwinkeln (siehe ▶ Abschn. 7.3) können vereinfachend die Verlängerungen der Radmittelachsen zur Bestimmung des für jeden Kurvenradius optimalen Lenkeinschlagwinkels verwendet werden, ◘ Abb. 7.166. Ein derartiges Gesetz wurde erstmalig von Lankensperger und Ackermann beschrieben. Für Zweispurfahrzeuge mit zwei Achsen (Vorderachse gelenkt), ergibt sich nach Ackermann folgende Vorschrift für die Lenkwinkelbeziehung der beiden gelenkten Räder:

$$\cot \delta_a = \cot \delta_i + \frac{b}{l} \,. \tag{7.17}$$

Das Lenkgestänge sollte nun nach Ackermann derart gestaltet sein, dass jede beliebige Krümmung bis zum konstruktiv festgelegten minimalen Wendekreisdurchmesser mit zwangsfrei abrollenden Rädern befahren werden kann. Lenkfehler, d. h. Abweichungen von der idealen Lenkwinkelbeziehung (Ackermannfunktion) nach Gl. (7.17) führen dagegen zum zwangsweisen Schräglauf der Reifen. Ist der Lenkfehler z. B. derart gestaltet, dass der kurveninnere Lenkeinschlagwinkel kleiner ist als der Solllenkwinkel, spricht man von einer Abweichung hin zum Paralleleinschlag. Von Bedeutung ist dieser Lenkwinkelfehler für den Lenkungsrücklauf bei großen Lenkeinschlagwinkeln und langsamer Kurvenfahrt: hier fehlt das rückstellende Moment aus der Seitenkraft. Der erzwungene Schräglaufwinkel wirkt wie eine viel zu große Vorspur und hat an beiden Rädern eine nach innen weisende Seitenkraft zur Folge, ◘ Abb. 7.167. Die Seitenkraft des kurveninneren Rades greift bei Radaufhängungen mit großen Spreizungs- und Nachlaufwinkeln (Federbeinachsen) aufgrund des Lenkeinschlagwinkels an einer vergrößerten Nachlaufstrecke, die kurvenäußere Seitenkraft an einer verkleinerten Nachlaufstrecke an und kann somit das eindrehende Lenkmoment nicht kompensieren. Ist das kurvenäußere Rad schon in Vorlauf, wird das eindrehende Moment des kurveninneren Rades durch das kurvenäußere sogar verstärkt; die Lenkung dreht ein.




◘ **Abb. 7.166** Ackermannbedingung für Lenkeinschlagwinkel kurvenaußen/kurveninnen sowie Definition Spur- und Wendekreis

Die realisierte Lenkfunktion darf also bei Federbeinachsen nur geringfügig von der Sollfunktion nach Ackermann abweichen ($< 3°$). Dies ist bei vorne liegender Zahnstangenlenkung leichter zu erreichen als bei Lenkungslage hinter Radmitte. Für den leicht parallelen Lenkungseinschlag spricht der kleinere Lenkwinkel des kurveninnen eingeschlagenen Rades und der damit verbundene geringere Raumbedarf im Radhaus. Bei gleicher mittlerer Lenkungsübersetzung (siehe unten) führt eine Auslegung in Richtung Parallellenkung zu einem schnelleren Ansprechen, da das verstärkt fahrzeugführende kurvenäußere Rad durch den überlagerten Vorspurwinkel schneller Seitenkraft aufbaut.

**Einfluss der Lenkgetriebebauart auf das Lenkgestänge** Die Übertragung der vom Fahrer eingeleiteten Lenkbewegung erfolgt über Lenkgetriebe und

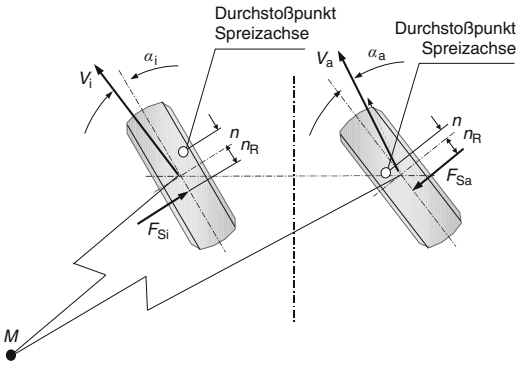



**Abb. 7.167** Wirksame Kräfte und Hebel bei eingeschlagenen Rädern und falschem Spurdifferenzwinkel

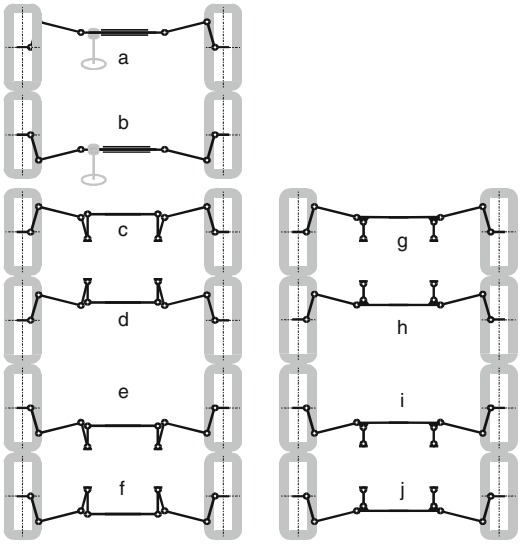



**Abb. 7.168** Lenkgestängebauarten. **a**, **b** Zahnstangenlenkung, **c**–**f** Hebellenkung, Spurstangen am Lenkstockhebel, **g**–**j** Hebellenkung, Spurstangen an mittlerer Spurstange

Lenkgestänge auf die Räder. In der Regel muss das Lenkgestänge zusätzlich die Radhubbewegung nachvollziehen. Dies führt bei Einzelradaufhängungen zu geteilten Spurstangen, deren Position und Länge so zu wählen sind, dass bei der Federbewegung das gewünschte Eigenlenkverhalten und bei der Lenkbewegung die angestrebte Lenkfunktion erreicht wird.

Bei einer Zahnstangenlenkung wird die Drehbewegung des Lenkrades direkt auf die Zahnstange übertragen und dabei in eine lineare Bewegung übersetzt. Die Spurstange fungiert als Koppelglied zwischen dem aufbaufesten Lenkgetriebe und dem mit dem Radträger fest verbundenen Spurhebel. Die lineare Bewegung der Spurstange wird in der Lenkdrehachse wieder in eine Schwenkbewegung (Lenkeinschlag) des Rades umgesetzt.

Da die Spurstangen aufgrund der Aufgabenstellung im Wesentlichen quer zur Fahrzeuglängsachse verlaufen sollen, sind bei Zahnstangenlenkungen grundsätzlich zwei Positionen für den radseitigen Spurhebel wählbar: eine nach hinten oder eine nach vorne weisende Position, Abb.7.168. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass zur Einleitung einer korrekten Drehbewegung das Ritzel der Zahnstangenlenkung bei vorneliegendem Spurhebel hinter der Zahnstange und bei hintenliegendem Spurhebel vor bzw. auf der Zahnstange liegen muss.

Bei einer Hebellenkung wird die Drehbewegung des Lenkrades mittels eines Getriebes auf einen Hebel untersetzt (Lenkstockhebel) und über die Spurstange und den radseitigen Spurhebel auf das Rad übertragen. Aus dieser Tatsache ergeben sich in Kombination mit den bereits oben diskutierten Spurhebellagen zwei weitere Möglichkeiten, ein Lenkgestänge aufzubauen: Lenkstockhebel (der Hebel am Lenkgetriebe) nach vorne und nach hinten weisend, Abb.7.168c–f. Zur Verbindung der gegenüberliegenden Fahrzeugseite dient eine quer angeordnete mittlere Spurstange. Diese überträgt den Lenkbefehl auf einen symmetrisch zum Lenkstockhebel und zur Fahrzeuglängsachse gelagerten Schlepphebel, den Lenkführungshebel. Eine weitere Verdoppelung der konstruktiven Möglichkeiten ergibt sich bei Hebellenkungen aus der Art der Anlenkung der inneren Spurstangengelenke: direkt am Lenkstockhebel oder an der mittleren Spurstange, Abb.7.168g–j. Zu beachten ist, dass bei der Anlenkung der äußeren Spurstangen an der mittleren Spurstange alle vier Gelenke auf einer Wirkungslinie liegen, andernfalls muss die mittlere Spurstange verdrehsteif und achsparallel zum Lenkstockhebel gelagert sein.

Entscheidend für die Wahl einer dieser Varianten sind die räumlichen Möglichkeiten im Fahrzeug und die angestrebte Funktion. Abb.7.169 zeigt die charakteristischen Lenkfunktionen für die im

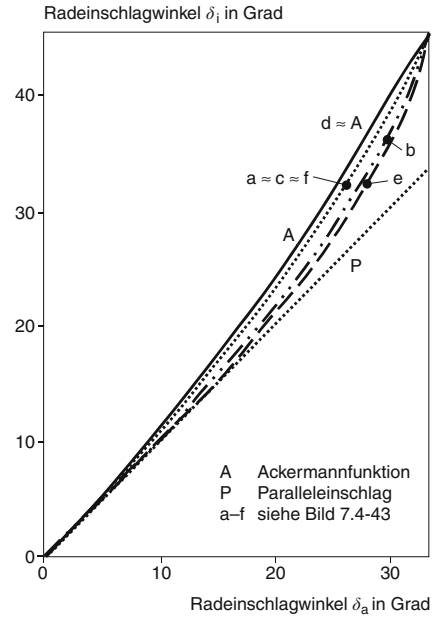



**Abb. 7.169** Lenkfunktionen der Lenkgestängebauarten aus Abb. 7.168 (nach [184])

Pkw übliche Lenkgestängeanordnungen bei fester Spreizachse.

Die besten Ergebnisse sind erfahrungsgemäß mit vorne liegenden radseitigen Spurhebeln erreichbar. In Kombination mit einem gegenläufigen Lenkstockhebel lässt sich darüber hinaus die beste Annäherung an die ideale Lenkfunktion darstellen. Leider ist gerade diese Anordnung im Pkw kaum realisierbar, da das weit vorne liegende Lenkgetriebe und die Lenkstockhebel erhebliche Bauraumprobleme verursachen.

**Einfluss des Gesamtfahrzeug- und Achskonzepts auf die Lenkung** Ungewollte Lenkeinschläge durch Federbewegungen der Räder während der Fahrt müssen vermieden werden, bzw. nach Betrag und Richtung derart erfolgen, dass die Fahrzeugführung und Fahrzeugstabilisierung unter allen Umständen gewährleistet ist. Diese Funktion übernimmt das Lenkgestänge. Anhand des bei modernen Straßenfahrzeugen weit verbreiteten Achstyps Federbeinachse sollen hier die Ausprägungen von Lenkgestängen in Verbindung mit Lenkgetriebebauarten gezeigt werden. Der Trend geht aufgrund der optimalen Synthese von Funktion, Kosten und Gewicht in allen Fahrzeugklassen zur Zahnstangenlenkung, weshalb diese Bauart nachstehend angesprochen werden soll.

Alle bisher diskutierten Lenkgestängekonfigurationen wurden nur bezüglich ihrer Lage in der Ebene diskutiert. Für eine optimale Entkoppelung der Lenkung von der Federbewegung ist darüber hinaus die richtige Spurstangenlänge zur jeweiligen Höhenposition zu finden. Für Fahrzeuge mit Frontantrieb, quer eingebautem Antriebsaggregat, Federbeinachse und Zahnstangenlenkgetriebe gibt es z. B. nur zwei realisierbare Positionen: unter der Karosseriestruktur auf Höhe der Radmittelachse oder über Karosseriestruktur und Reifen; jeweils hinter der Vorderachse. Da bei der Federbeinachse der obere Querlenker durch die Schubführung des Dämpfers ersetzt ist, liegt der Krümmungsmittelpunkt des Ersatzlenkers auf einer Normalen zur Federbeinachse durch den Stützlagerpunkt und im Unendlichen. In Abb. 7.170 ist die Bestimmung der Spurstangenlänge für diesen Fall nach einem vereinfachten (ebenen) Verfahren von Bobillier dargestellt. Wird eine Spurstangenlage in Höhe des unteren Querlenkers gewählt, nähert sich auch die Spurstangenlänge LU der des unteren Querlenkers. Je höher die Spurstange angeordnet wird, umso länger muss diese für eine optimale Spurwinkelführung des Rades ausgeführt werden (LO). Aus diesem Grund können bei Federbeinachsen außen am Zahnstangenlenkgetriebe angelenkte Spurstangen nur bei Tieflage realisiert werden. Hoch liegende Spurstangen erfordern mittig angelenkte Lenkgetriebebauarten, siehe Abb. 7.176 unten.

**Grenzen des Lenkeinschlagwinkels** Schon bei der Bestimmung der optimalen Lenkfunktion und des daraus resultierenden Gelenkvierecks bzw. -dreiecks ist es vorteilhaft, die Begrenzung des Lenkeinschlagwinkels durch die Übertragungsglieder zu ermitteln. Für die Funktionssicherheit eines Lenkgestänges ist der Übertragungswinkel der Spurstange an der Lenkgetriebeseite und an der Radseite wichtig.

Wird er zu klein, bedeutet dies, dass das Gestänge unter Einwirkung äußerer Kräfte in Strecklage geraten und somit die exakte Führung des Rades nicht mehr erfüllen, im Extremfall sogar über-

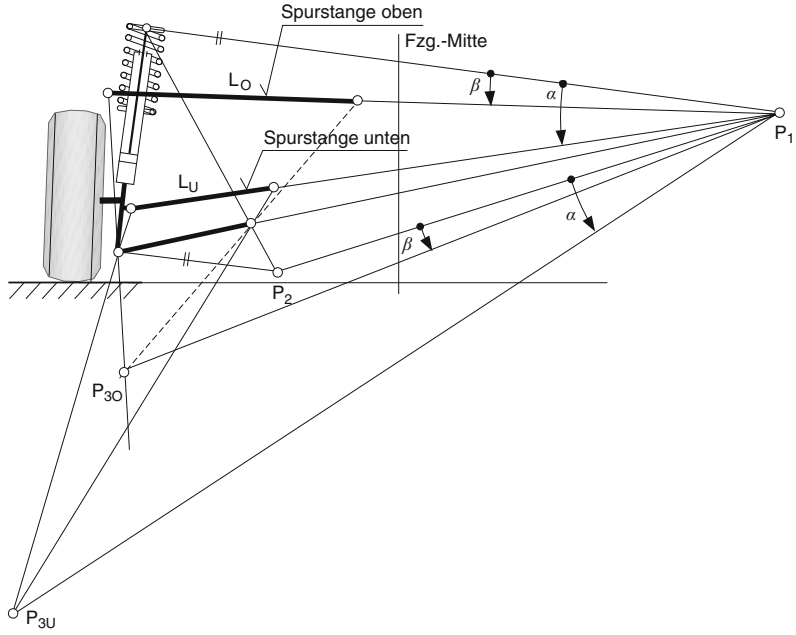



**Abb. 7.170** Bestimmung der Spurstangenlänge bei Federbeinachsen und unten bzw. oben liegender Spurstange

drückt werden kann. Zur Beurteilung des Übertragungswinkels müssen bei räumlichen Achsen die wirksamen Hebelarme senkrecht zur Drehachse in allen möglichen Radstellungen herangezogen werden. Ohne mechanische Lenkeinschlagbegrenzung sollte beim Pkw der Übertragungswinkel nicht kleiner als 25° sein.

Bei Fahrzeugen mit Frontantrieb ist zusätzlich die Begrenzung des Lenkeinschlags durch die Antriebswellen zu untersuchen. Die Fortschritte der Gelenkwellenindustrie ermöglichen heute Antriebswellenbeugewinkel in Extremlagen von nahezu 50°. Bei optimierten Frontantriebskonzepten ergeben sich damit gegenüber dem Standardantrieb keine nennenswerten Nachteile.

**Lenkgesamtübersetzung** Die Lenkgesamtübersetzung als Verhältnis von Lenkraddrehwinkel zu Radwinkel wird nach unten begrenzt von der Direktheit des Lenkungsansprechens bei hohen Fahrgeschwindigkeiten; hier sind Werte unterhalb von 14 selten. Die obere Grenze folgt aus der Höhe des zumutbaren Lenkaufwands im Parkierbereich, dies hängt somit unmittelbar mit dem Vorhandensein einer Servounterstützung zusammen und überschreitet eine Übersetzung von 20 kaum. Die Festlegung eines konkreten Wertes wird durch die gewünschte Positionierung des Zielfahrzeugs (sportlich agil oder komfortbetont) mitbestimmt [193]. Konstruktiv entspricht die Lenkgesamtübersetzung dem Produkt aus Lenkgestänge- und Lenkgetriebeübersetzung. Für die Lenkgestängeübersetzung muss dabei der Mittelwert aus kurvenäußerem und kurveninnerem Lenkeinschlagwinkel berücksichtigt werden. Bei bekannten wirksamen Spurhebeln, Abb. 7.171, lässt sie sich aus dem Verhältnis Spurhebel zu Lenkstockhebel bestimmen.

**Lenkspindel** Nur in den wenigsten Anwendungsfällen ist die Verbindung zwischen Lenkrad und Lenkgetriebe durch eine einfache und gerade Verbindungswelle (Lenkspindel) zu realisieren. Üblich sind Lenksäulen mit einem oder zwei Winkelgelenken. Bei geringen Beugewinkeln (bis ca. 5°) lassen sich die Kreuzgelenke durch Gelenkscheiben ersetzen. Lenksäulen mit einem Kreuzgelenk erzeugen bei Beugewinkeln > 15° einen für den Fahrer spür-

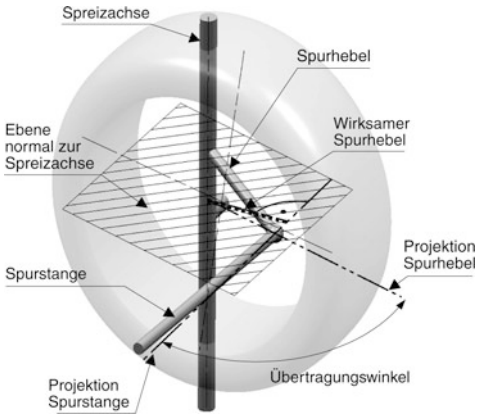



**Abb. 7.171** Übertragungswinkel zwischen Spurhebel und Spurstange

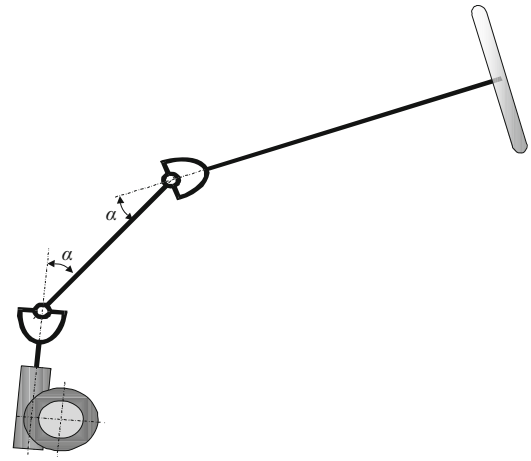



**Abb. 7.172** Beispiel einer „ebenen" Lenksäule mit zwei Kreuzgelenken in W-Anordnung und ausgeglichenen Beugewinkeln

baren Ungleichfömigkeitsgrad $U$:

$$U = \frac{\omega_{2\max} - \omega_{2\min}}{\omega_1} = \tan\beta \cdot \sin\beta \ . \tag{7.18}$$

In derartigen Fällen ist eine Zwischenwelle und ein zweites Kreuzgelenk einzuführen, Abb. 7.172.

Die Drehungleichförmigkeit nach dem ersten Kreuzgelenk kann durch das zweite Gelenk wieder aufgehoben werden. Dabei müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- die Beugewinkel der Gelenke müssen gleich sein und
- die Gabeln der mittleren Welle müssen gleichzeitig in ihren aus An- und Abtriebswellen gebildeten Ebenen A und B liegen, Abb. 7.173, [190, 191].

Bei einem in der Ebene liegenden Lenkstrang bedeutet dies, dass die Gabeln der mittleren Welle in einer Ebene liegen. Bei „windschief" zueinander stehenden Lenkspindeln müssen die Gabeln um den Winkel $\phi$ der Beugungsebenen beider Gelenke zueinander verdreht sein. Die beiden Kreuzgelenke können dabei gleichsinnig (W-Anordnung) oder gegensinnig (Z-Anordnung) gebeugt sein.

Die Umlenkung des Lenkmoments im Gelenk bewirkt an der Gabel ein Zusatzmoment MZ, Abb. 7.174. Dieses Zusatzmoment bewirkt Kräfte

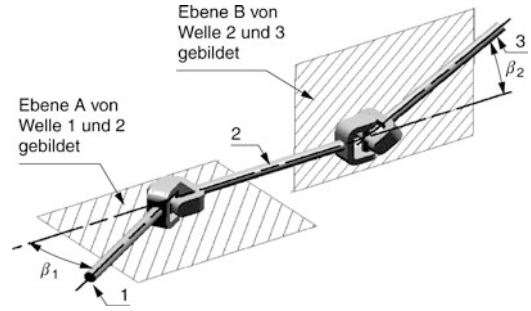



**Abb. 7.173** Beispiel einer „windschief" angeordneten Lenkspindel mit zwei Kreuzgelenken in Z-Anordnung und vollständigem Ausgleich

auf die Lager, welche die Wellen biegend beanspruchen. In der praktischen Anwendung bedeutet dies, dass Gelenkbeugewinkel über 30° generell vermieden werden sollten, da die hieraus resultierenden hohen Querkräfte in Verbindung mit der vorhandenen Lagerreibung und der endlichen Lagersteifigkeit auch bei bezüglich der Beugewinkel ausgeglichenen Lenkspindelanordnungen zu spürbaren Lenkmomentschwankungen führen.

### 7.4.5.2 Lenkgetriebe und -gestänge

Lenkgetriebe und -gestänge haben die Aufgabe, den vom Fahrer vorgegebenen Lenkraddrehwinkel in einen definierten Radeinschlagwinkel am kur-

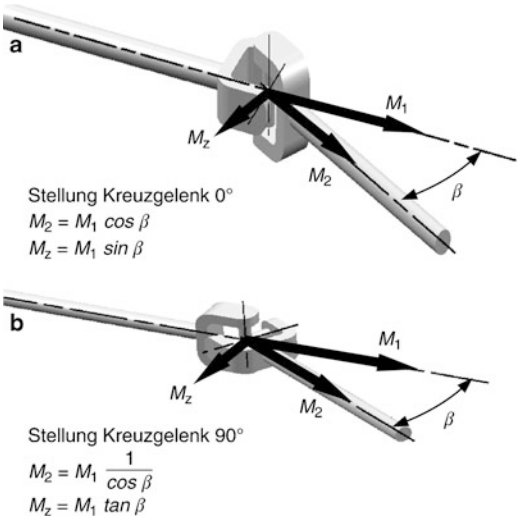



**Abb. 7.174** Spezielle Kreuzgelenkstellungen 0° (**a**) und 90° (**b**)

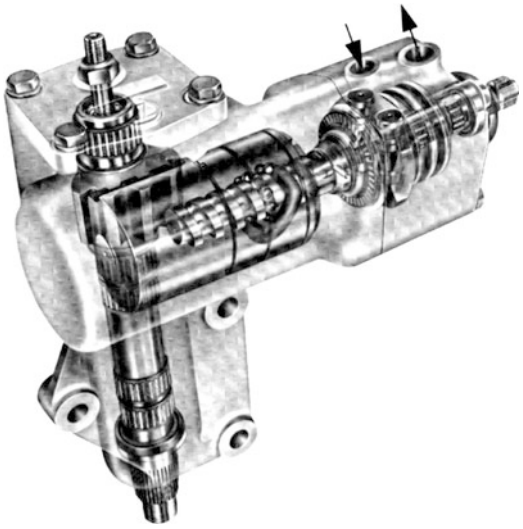


**Abb. 7.175** Kugelmutter-Hydrolenkgetriebe mit Drehkolbenventil (Quelle: ZF)

veninneren und kurvenäußeren Rad (bei Pkw's: Vorderrad) umzusetzen. Nachstehend werden die gebräuchlichsten Lenkgetriebe-Bauarten beschrieben.

**Kugelmutterumlauf-Lenkgetriebe** Über Jahrzehnte war vor allem im oberen Pkw-Segment und bei leichten Nutzfahrzeugen das Kugelmutterumlauf-Lenkgetriebe – vorzugsweise mit hydraulischer Unterstützung – weit verbreitet (Abb. 7.175). Aufgrund deutlicher Gewichts- und Kostennachteile gegenüber der Zahnstangenlenkung ist diese Lösung allerdings bei den Personenkraftfahrzeugen inzwischen so gut wie verschwunden.

Die am Lenkrad ausgeführte Drehbewegung wird über die Lenksäule der Eingangswelle des Lenkgetriebes zugeführt. Diese Welle ist an ihrem unteren Ende als Schnecke ausgebildet, deren Drehbewegung über eine endlose Kugelkette den Lenkgetriebekolben axial hin- und herbewegt. Bei der Hydraulikausführung wird je nach Drehrichtung eine Seite des Kolbens mit Drucköl beaufschlagt und so die mechanisch eingeleitete Axialbewegung des Kolbens hydraulisch unterstützt.

Die rechtwinklig dazu angeordnete Segmentwelle wird über den Zahneingriff des Kolbens in Drehung versetzt.

An der Segmentwelle ist der Lenkstockhebel montiert, der über ein Kugelgelenk ein Lenkgestänge bewegt, das aus einer mittleren Spurstange und – daran rechts und links ebenfalls über Kugelgelenke fixierten – seitlichen Spurstangen besteht. Spiegelbildlich zum Lenkstockhebel befindet sich auf der rechten Fahrzeugseite zur Führung des Lenkgestänges ein Lenkführungshebel. Die seitlichen Spurstangen sind außen an den radseitigen Achsschenkeln befestigt. Zur Vorspurwinkel-Einstellung der Vorderräder können die seitlichen Spurstangen über ein Verstellgewinde in ihrer Länge verändert werden. Über eine Höhenverstellung des Lenkstockhebels am Lenkgetriebe lassen sich ggf. vorhandene Toleranzen der Höhenlage der inneren Spurstangengelenke ausgleichen. Dadurch können für das linke und rechte Vorderrad identische Vorspurkurven über dem Federweg erreicht werden, was für einen stabilen Geradeauslauf beim beidseitigen Einfedern des Fahrzeugs erforderlich ist. Auslegungskriterien für das Lenkgestänge sind im Wesentlichen die gewünschte Achskinematik, Freigängigkeitserfordernisse und die zu übertragenden Kräfte (Knicksteifigkeit).

Die Vorteile einer Kugelmutterlenkung liegen in einem hohen Lenkkomfort mit geringer Stoßempfindlichkeit aufgrund der höheren Gesamtelas-

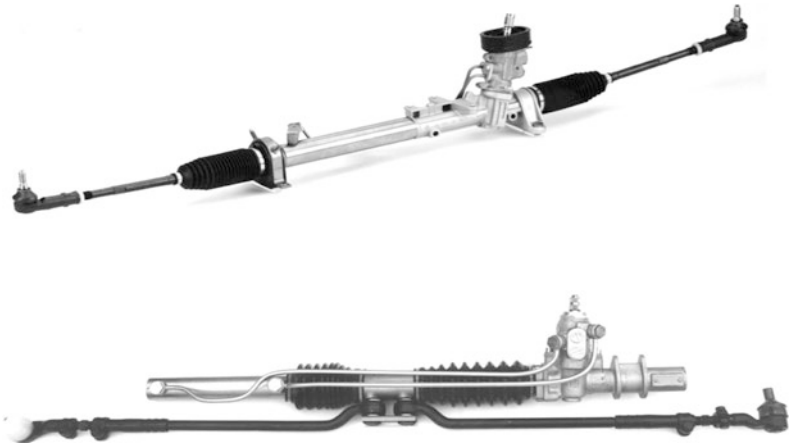


**Abb. 7.176** Zahnstangen-Hydrolenkgetriebe (Quelle: ZF)

tizität des Systems. Außerdem bietet die variable Auslegungsmöglichkeit des Lenkvierecks dem Konstrukteur große Freiheiten zur Realisierung von günstigen Vorspurkurven und Gesamtlenkübersetzungen mit niedrigen Belastungen der Spurstangen und des Lenkgetriebes. Die größere Elastizität kann sich jedoch auch nachteilig bezüglich Lenkungsansprechen und Lenkgefühl um die Mittellage auswirken.

Entscheidend für den zunehmenden Rückgang der Kugelmutterlenkung im Pkw-Sektor in jüngster Zeit dürften jedoch die deutlichen Gewichts- und Kostennachteile gegenüber der Zahnstangenlenkung sein.

**Zahnstangenlenkgetriebe** In heutigen Pkw's am meisten verbreitet ist die Zahnstangenlenkung heute in der Regel auch bei kleineren Fahrzeugen mit hydraulischer oder elektrischer Unterstützung. Auch in Fahrzeugen der Oberklasse hat sie die Kugelmutterlenkung weitgehend verdrängt, Abb. 7.176.

Bei der Zahnstangenlenkung werden die Drehbewegungen des Lenkrades über ein meist schrägverzahntes Ritzel in eine Verschiebebewegung der Zahnstange umgesetzt. Gegenüber der Verzahnung ist ein federbelastetes Druckstück so angeordnet, dass ein möglichst spielfreies Ineinandergreifen von Ritzel und Zahnstange über dem gesamten Hub gewährleistet ist.

An der Zahnstange sind die seitlichen Spurstangen über Kugelgelenke befestigt und mit Faltenbälgen aus Gummi oder Kunststoff gegen Verschmutzung und Wassereindringen geschützt. Für verschiedene Anwendungsfälle können die Spurstangen beidseitig, mittig oder beide an einem Ende der Zahnstange angebracht sein. Die Spurstangen sind außen wiederum über Kugelgelenke mit den radseitigen Achsschenkeln verbunden und können über ein Gewinde zur Vorspurwinkel-Einstellung in ihrer Länge verändert werden.

Zur mechanischen Auslegung eines Zahnstangenlenkgetriebes sind neben Festigkeits- und Bauraumüberlegungen besonders zwei Dinge wichtig: der Zahnstangendurchmesser und die Zahnstangenlänge. Der Zahnstangendurchmesser wird maßgebend durch die Belastung beim sog. Bordsteinabdrücktest bestimmt. Hierbei dürfen bei blockiertem Vorderrad mit zulässiger Vorderachslast und bei voller hydraulischer oder elektrischer Unterstützung mit einem Lenkradmoment von 80 N m keine bleibenden Verformungen an der Zahnstange auftreten. Die Zahnstangenlänge ergibt sich bei einer Hydrolenkung mit seitlich angebrachten Spurstangen zu min. 6 mal dem einfachen Zahnstangenhub ($2 \times$ Hub Verzahnung $+ 2 \times$ Hub Hydraulikkolben $+ 1 \times$ Hub Verzahnungsende bis innere Dichtung $+ 1 \times$ Hub Axialgelenk bis äußere Stangendichtung). Dazu kommen noch die axialen Bauräume für die Dichtungen und die Verzahnungsausläu-

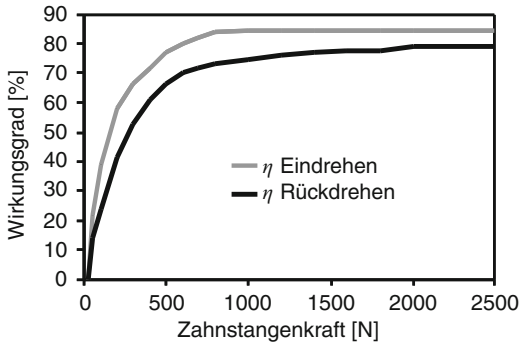



**Abb. 7.177** Wirkungsgradverläufe einer Zahnstangenlenkung

fe. Ist diese erforderliche Zahnstangenlänge nicht im Fahrzeug unterzubringen, so sind Nachteile im Wendekreis (kürzerer Hub) oder im Fahrverhalten (kürzere Spurstangen, dadurch geänderte Vorspurkurve beim Ein-/Ausfedern der Räder) zu erwarten.

Bessere Voraussetzungen für genügend lange Spurstangen bietet der erwähnte Mittenabgriff. Eine andere Möglichkeit ist, den Hydraulikarbeitszylinder außen liegend parallel zur Zahnstange anzubringen. Rein elektrisch unterstütze Zahnstangenlenkungen benötigen bauartabhängig nur 2–4 mal den einfachen Hub zzgl. Zahn- bzw. Kugelgewindelängen und -ausläufe und Bauraum für Endanschläge.

Die Vorteile einer Zahnstangenlenkung gegenüber der Kugelmutterlenkung liegen auf der Hand:

- geringere Kosten, geringeres Gewicht durch einfacheren Aufbau und Entfall von Lenkzwischenhebeln und -stangen,
- geringerer Raumbedarf; allerdings ist bei tiefliegender Lenkung u. U. weiterer Bauraum unter der Motorölwanne erforderlich,
- geringere Lenkelastizität und damit direkteres Ansprechen der Lenkung.

Bauartbedingt ist der Wirkungsgrad einer Zahnstangenlenkung in beiden Richtungen (Ein- und Rückdrehen) bei höheren Lenkmomenten zunächst gleich und liegt in der Größenordnung von 90 %, Abb. 7.177. Das bedeutet zusammen mit der hohen Steifigkeit gute Lenkpräzision, aber auch Empfindlichkeit auf Störungen (Stößigkeit, Lenkunruhe). Durch Maßnahmen wie Vergrößerung des Winkels zwischen Ritzel und Gehäuse kann der Wirkungsgrad und damit die Störungsempfindlichkeit um bis zu 10 % reduziert werden, allerdings zum Preis erhöhter Reibung auch in Eindrehrichtung. Eine Erhöhung der Dämpfung z. B. durch Rückschlagventile im Zulauf, Dämpfungsventile am Zylinder oder eine elastische Lenkgetriebelagerung steigert den Lenkkomfort ebenfalls.

Bei der Kugelmutterlenkung dagegen ist Eindreh- und Rückdrehwirkungsgrad unterschiedlich (Eindrehen 75–80 %, Rückdrehen 65–70 %), was sich auf die Isolierung von Störungen günstig auswirkt. Dämpfung und Elastizität liegen höher als bei der Zahnstangenlenkung und sorgen für guten Lenkkomfort, verbunden allerdings mit etwas geringerer Lenkpräzision.

In der Summe sind die Unterschiede zwischen beiden Lenkungsbauarten im Fahrzeug oft kaum noch fühlbar, weshalb sich die kostengünstigere Zahnstangenlenkung durchgesetzt hat.

### 7.4.5.3 Lenkunterstützung

Auch im Kleinwagensegment gehört inzwischen die Servolenkung weitestgehend zur Basisausstattung. Hierbei werden die vom Fahrer aufzubringenden Lenkkräfte durch einen hydraulisch oder elektrisch betriebenen Aktuator verringert.

Prinzipiell bietet auch das manuelle Lenkgetriebe die Möglichkeit einer gewissen Lenkunterstützung in Form der Lenkgetriebe- und Lenkgestängeübersetzung. Bei größerer Lenkgetriebeübersetzung werden die Lenkkräfte am Lenkrad dementsprechend geringer, allerdings unter Inkaufnahme größerer Lenkraddrehwinkel. So ausgelegte Fahrzeuge wirken leicht unhandlich, Agilität und Lenkgefühl gehen zunehmend verloren. Bis zu einem gewissen Grad lässt sich dieser Nachteil bei manuellen Zahnstangen-Lenkgetrieben durch eine variable Lenkübersetzung verringern. Dabei wird die Verzahnung über dem Hub mit unterschiedlichem Modul und Eingriffswinkel in einem speziellen Taumelfließpress- oder Schmiedeverfahren gefertigt, das Ritzel ist normalverzahnt. Die Übersetzung wird so ausgelegt, dass sie im Mittenbereich ausreichend direkt ist und zu den Endanschlägen hin zur Reduzierung der Parkierkräfte immer indirekter wird. Die Wirkung einer Hilfskraftlenkung ist damit allerdings nicht zu erreichen. Eine der-

artige variable Übersetzung zwischen Kolben und Segmentwelle ist auch bei einer Kugelumlauflenkung möglich.

Die Möglichkeit zur Darstellung einer variablen Übersetzung durch die Modifikation der Verzahnungsgeometrie wird heute meistens genutzt, um den Lenkwinkelaufwand des Fahrers beim Parkieren zu reduzieren. In Geradeausstellung wird die Übersetzung so ausgelegt, dass sich bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ein angenehmes, nicht zu nervöses Geradeauslaufverhalten ergibt. Zu größeren Lenkwinkeln wird die Übersetzung direkt gestaltet. Die Lenkkräfte müssen dann über die Lenkunterstützung komfortabel gestaltet werden.



**Hydraulische Lenkunterstützung** Am Beispiel einer Zahnstangenhydrolenkung mit Drehschieberventil, ◘ Abb. 7.178, soll das Funktionsprinzip der hydraulischen Lenkunterstützung erklärt werden.

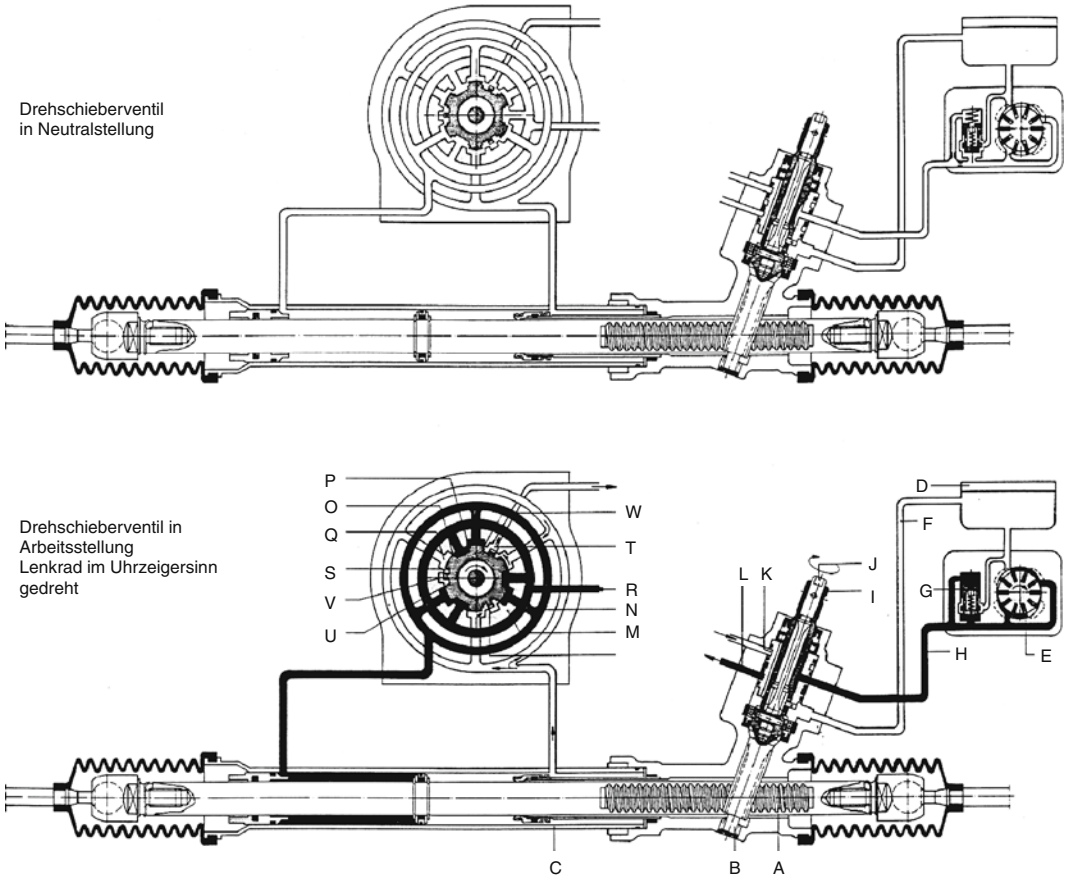
Eine vom Fahrzeugmotor üblicherweise über einen Keilriemen angetriebene Hydraulikpumpe E (bei Pkw heute vorwiegend Flügelzellenpumpen) liefert das für die Lenkunterstützung erforderliche Drucköl über einen Hochdruck-Dehnschlauch H zum Lenkventil im Lenkgetriebe. In Geradeausstellung des Lenkrades fließt ein konstanter Ölstrom durch das in Neutralstellung stehende Lenkventil (offene Mitte) und durch die Rücklaufleitung zurück in den Ölbehälter. Der Druck in den beiden Kammern des Arbeitszylinders ist gleich groß und entspricht dem wegen innerer Strömungswiderstände im Lenksystem aufgebauten Umlaufdruck von ca. 2–5 bar. Es erfolgt in dieser Stellung keine Lenkunterstützung.

Beim Drehen des Lenkrads im Uhrzeigersinn wird die Zahnstange und somit auch der Kolben des Arbeitszylinders nach rechts verschoben. Da die Bewegung des Kolbens durch Drucköl unterstützt werden soll, muss dieses in den linken Zylinderraum geleitet werden. Die drei Steuernuten des Drehschiebers werden im Uhrzeigersinn verschoben und die Einlassschlitze ($P$) für den Druckölzulauf weiter geöffnet. Die Einlassschlitze ($O$) jedoch schließen und sperren den Druckölzulauf zu den Axialnuten ($Q$) der Steuerbüchse. In der Arbeitsstellung des Ventils fließt das Drucköl durch die Einlassschlitze ($P$) in die untere Radialnut ($L$) der Steuerbüchse und gelangt von dort in den linken Zylinderraum, sodass für die hydraulische Unterstützung der Kolbenbewegung gesorgt ist. Die geschlossenen Steuerschlitze ($W$) verhindern, dass das Öl zum Behälter abfließt. Das Öl aus dem rechten Zylinderraum wird verdrängt. Es fließt über die obere Radialnut ($K$) in der Steuerbüchse zu den Rücklaufnuten ($S$) des Drehschiebers. Die Stege ($V$) des Drehschiebers unterbinden den direkten Übertritt des Öls zu den stets zum Ölbehälter geöffneten Rücklaufnuten ($T$) der Steuerbüchse. Wird das Lenkrad gegen den Uhrzeigersinn gedreht, setzt die hydraulische Unterstützung im rechten Zylinderraum ein.

Die erforderliche Größe der hydraulischen Unterstützung hängt ab von der maximal aufzubringenden Spurstangenkraft, die beim Einschlagen der Räder in den Endstellungen mit maximaler Vorderachslast, Größtwert der Reibung bei ungünstigster Reifenwahl und zusätzlicher Betätigung der Fußbremse auftritt. Zusätzliche Einflussgrößen sind wie bereits erwähnt die Gesamtlenkübersetzung (Lenkgetriebe- und Lenkgestängeübersetzung) und das maximal zulässige Handlenkmoment. Ausgehend von der erforderlichen Unterstützungskraft kann mit dem maximal von der Pumpe aufgebrachten Druck die erforderliche Kolbenfläche und mit dem aus Festigkeitsgründen meist vorgegebenen Zahnstangendurchmesser auch der erforderliche Arbeitskolbendurchmesser und damit der Lenkgetriebedurchmesser im Zylinderbereich berechnet werden.

Ein weiterer wichtiger Auslegungswert für das Lenksystem ist der von der Pumpe zu liefernde Ölvolumenstrom. Er ist bestimmend für die erreichbare Lenkwinkelgeschwindigkeit, d. h. mit welcher Geschwindigkeit der Fahrer das Lenkrad drehen kann, ohne dass eine hydraulische Verhärtung eintritt.

Wie bereits erwähnt, ist es die Aufgabe des Lenkventils, je nach Drehrichtung des Lenkrads Drucköl in die dazugehörige Arbeitskammer zu leiten und so die Kraft auf den Arbeitskolben auf der entsprechenden Seite zu verstärken, mit dem Ziel, das am Lenkrad aufzubringende Lenkmoment zu reduzieren.




A Zahnstange
B Antriebsritzel
C Arbeitszylinder
D Ölbehälter
E ZF-Flügelpumpe
F Rücklaufleitung
G Druck- und Strombegrenzungsventil
H Druckleitung
I Untere Lenkspindel
J Drehstab
K Radialnut
L Radialnut
M Drehschieber
N Steuerbüchse
O Einlassschlitz
P Einlassschlitz
Q Axialnut
R Axialnut
S Rücklaufschlitz
T Rücklaufnut
U Rücklaufschlitz
V Steg
W Steuerschlitz

**Abb. 7.178** Zahnstangen-Hydrolenkung mit Drehschieberventil und Seitenantrieb (Quelle: ZF)

Die Abhängigkeit des Handlenkmoments vom vorhandenen Öldruck wird mit der sog. Ventilkennlinie dargestellt und ist ein direktes Maß für die vorhandene Lenkunterstützung.

Meist wird bei Zahnstangenhydrolenkgetrieben der Differenzdruck in den beiden Arbeitskammern gemessen. Bei Kugelmutterlenkgetrieben ist die Differenzdruckmessung schwierig, deshalb wird hier der Öldruck am Lenkgetriebeeingang gemessen. Es ergibt sich prinzipiell die gleiche Ventilkennlinie, jedoch verschoben um den im System herrschenden Umlaufdruck.

Die Ventilkennlinie kann durch Modifikationen an den Ventilsteuerkanten und durch Änderung der Steifigkeit des Ventildrehstabs den jeweiligen Erfordernissen der Lenkungsabstimmung (Lenkkräfte, Lenkgefühl) angepasst werden. Eine Möglichkeit, die Kennlinienvariation während des Fahrbetriebs zu realisieren, wird mit der geschwindigkeitsabhängigen Servolenkung geboten. Fa. Robert Bosch

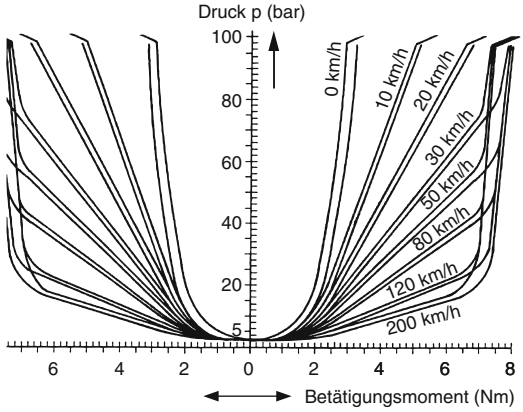



**Abb. 7.179** Servotronic-Ventilkennlinien-Diagramm (Quelle: ZF)

Automotive Steering entwickelte dafür die elektronisch gesteuerte „Servotronic".

Sie arbeitet rein geschwindigkeitsabhängig, d. h., nur die vom elektronischen Tachometer angezeigte Fahrgeschwindigkeit steuert die Leichtgängigkeit der Lenkung, unabhängig von der jeweiligen Motordrehzahl. Ein Mikroprozessor wertet die Geschwindigkeitssignale aus und bestimmt die Größe der hydraulischen Rückwirkung und damit die Betätigungskraft am Lenkrad. Diese Größe wird in Form elektrischer Impulse über einen elektro-hydraulischen Wandler auf das Drehschieberventil der Lenkung übertragen, wobei sich die hydraulische Rückwirkung im Verhältnis zur Fahrgeschwindigkeit ändert. Die spezielle Auslegung der Lenkungscharakteristik, Abb. 7.179, bewirkt, dass im Parkierbereich und beim Lenken im Stand nur minimale Kräfte am Lenkrad aufzubringen sind, während sich mit zunehmender Geschwindigkeit fast das Gefühl einer mechanischen Lenkung einstellt. Somit wird bei hohen Geschwindigkeiten exaktes, zielgenaues Lenken ermöglicht. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass Öldruck und Volumenstrom zu keinem Zeitpunkt reduziert werden und deshalb in Notsituationen, z. B. bei schnellen Lenkkorrekturen Lenkraddrehgeschwindigkeiten bis 800°/s ohne Einbruch in der Servofunktion sicherstellen. Durch diese Eigenschaften wird eine außerordentlich hohe Lenkpräzision und Sicherheit bei gleichzeitig bestem Lenkkomfort erreicht und damit der Zielkonflikt zwischen niederen Parkierkräften und Lenkpräzision bei hohen Geschwindigkeiten weitgehend gelöst.

Über Jahrzehnte hat sich die beschriebene Hydrolenkung mit „offener Mitte" (Open-Center) zur bewährten und funktional perfekt ausgereiften Standardlösung für Kraftfahrzeuge entwickelt. Infolge der mechanischen Kopplung der Hydraulikversorgung an den Antriebsmotor ergeben sich jedoch Nachteile, insbesondere hinsichtlich des Leistungsbedarfs. Diese konnten bis heute nicht vollständig behoben werden, auch wenn inzwischen durch Einsatz von bedarfsorientiert ansteuerbaren bzw. geregelten Energiesparpumpen die Verlustleistung des Hydrauliksystems deutlich reduziert werden kann [225].

Eine bezüglich Wirkungsgrad optimale Lösung wäre durch den konzeptionellen Umstieg vom hydraulischen Open-Center- auf ein Closed-Center-Prinzip möglich, bei dem im Ruhezustand kein Volumenstrom und damit auch keine Verlustleistung erzeugt wird [226]. Einem Serieneinsatz in absehbarer Zukunft stehen aber die hohe Komplexität eines solchen Systems und noch viele ungeklärte Fragestellungen entgegen.

**Elektrohydraulische Lenkunterstützung** Eine spezielle Ausführung der hydraulischen Lenkunterstützung ist die elektrohydraulische Unterstützung. Hier wird die Ölpumpe (Flügelzellen-, Rollenzellen- oder Zahnradpumpe) nicht vom Fahrzeugmotor angetrieben, sondern von einem Elektromotor. Die Einzelkomponenten E-Motor, Ölpumpe, Ölbehälter und Elektronikeinheit können zu einer kompakten Einheit, dem sog. Powerpack, zusammengefasst werden, Abb. 7.180. Das Servolenkgetriebe bleibt weitgehend unverändert (bis auf Ventilkennlinienanpassung).

Die Vorteile eines solchen Powerpacks liegen einerseits in der Kompaktheit des Aggregats, das ggf. eine Vormontage des Lenksystems ermöglicht. Andererseits bietet die elektrohydraulische Lenkung natürlich die Möglichkeit, bei abgeschaltetem (z. B. im Schubbetrieb, vor Ampeln oder Bahnübergän-

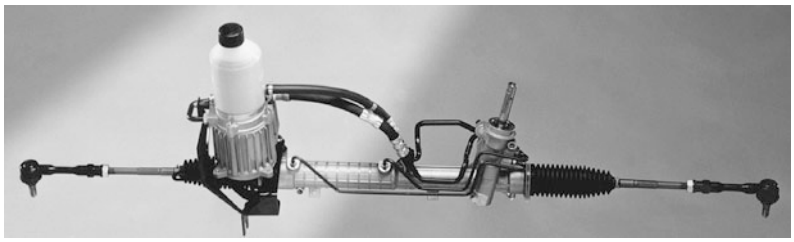


**Abb. 7.180** Zahnstangen-Lenkgetriebe mit elektrohydraulischer Unterstützungseinheit: „Powerpack" (Quelle: TRW)

gen) oder auch ausgefallenem Fahrzeugmotor weiterhin eine Lenkungsunterstützung zur Verfügung zu haben.

Der E-Motor lässt sich bedarfsgerecht ansteuern, sodass die Pumpe nur beim Lenken betrieben werden muss. Dadurch ist ein geringerer Energieverbrauch und damit eine Kraftstoffeinsparung möglich. Die bei der hydraulischen Lenkunterstützung mit relativ hohen Mehrkosten realisierte geschwindigkeitsabhängige Lenkung lässt sich durch elektronische Steuerung des E-Motors relativ einfach und kostengünstiger realisieren.

Nachteilig bei dieser Ausführung sind die höher als bei einer konventionellen Hydrolenkung liegenden Systemkosten und das durch den zusätzlichen E-Motor bedingte Mehrgewicht, welches durch den Entfall der Saug- und Rücklaufleitungen nur zum Teil kompensiert werden kann. Zudem ist der Einsatz der elektrohydraulischen Lenkung aufgrund der erreichbaren Leistung derzeit noch nicht in Fahrzeugen mit höherer Vorderachslast möglich.

**Elektrische Lenkunterstützung** Bei Personenkraftwagen hat sich die elektromechanische Lenkung (**E**lectric **P**ower **S**teering) zum Standardlenksystem entwickelt. Die wesentlichen Gründe hierfür sind:

1. **Optimaler Wirkungsgrad**: Von allen heute bekannten Lösungen ist die EPS das Lenksystem mit dem höchsten Wirkungsgrad. Im Gegensatz zur herkömmlichen Hydrolenkung verbraucht sie nur dann Energie, wenn dem System tatsächlich Lenkleistung abgefordert wird. Damit liefert diese Lenkung einen nennenswerten Beitrag zur $CO_2$- bzw. Verbrauchsreduzierung der Fahrzeuge.
2. **Zusatzfunktionen**: Im Gegensatz zur Hydrolenkung, bei der die Lenkmomentencharakteristik nur durch körperliche Modifikationen bzw. Ergänzung von Komponenten (Lenkventil, Servotronic-Steller) beeinflusst werden kann, geschieht dies bei der EPS über die Software. So kann z. B. die Unterstützungskraft geschwindigkeits- oder auch lenkwinkelabhängig geregelt werden. Damit kann auch dem Fahrer die Möglichkeit gegeben werden, per Knopfdruck zwischen unterschiedlichen Lenkungscharakteristiken zu wählen.
3. **Einfache Abstimmbarkeit**: Diese Tatsache erleichtert natürlich auch die Entwicklungsarbeit. Der „Hardware-Aufwand" bei der Lenkungs-Abstimmung für ein bestimmtes Fahrzeug kann dadurch deutlich reduziert werden.
4. „**Enabler-Funktion**": Für die Realisierung von Fahrerassistenzsystemen, die ein automatisches Fahren – z. B. beim Einparken oder zur Querführung im Stau – ermöglichen, bietet die elektrische Lenkung die besten Voraussetzungen, da die hierfür erforderliche Aktuatorik (im Gegensatz zur Hydrolenkung) bereits mit der Basislenkung zur Verfügung steht. Damit eröffnet die EPS auch prinzipiell die Möglichkeit zur Verwirklichung von sog. „steer by wire"-Systemen, bei denen die mechanische Verbindung zwischen Bedienelement und gelenkten Rädern aufgehoben ist und die Umsetzung des fahrerseitigen Lenkbefehls nur noch auf elektronischem Weg erfolgt.

Bei den elektromechanischen Lenksystemen wird die erforderliche Lenkkraftunterstützung direkt von einem E-Motor aufgebracht, der an verschiedenen Stellen im Lenksystem angeordnet sein kann. Derzeit kommen 4 Einbauorte in Betracht, die jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile haben:

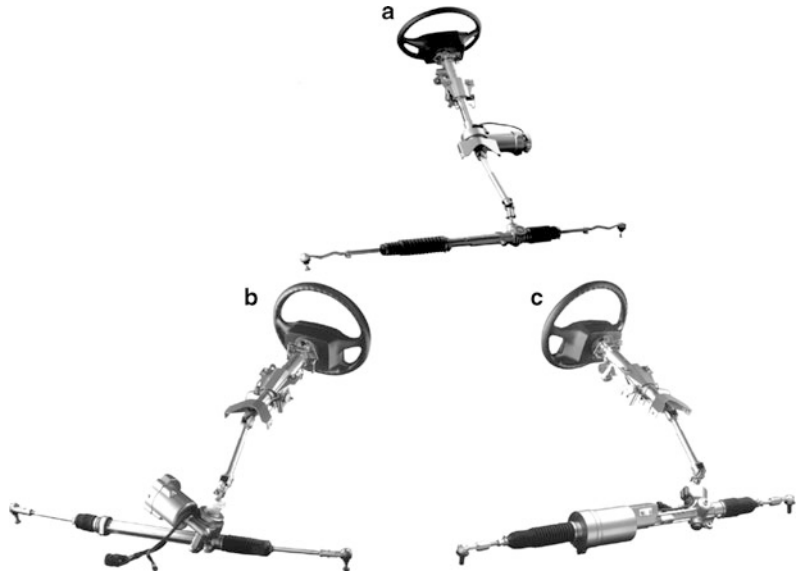



**Abb. 7.181** ZF-Servolectric, Ausführungsmöglichkeiten (Quelle: ZF)

- Die Servoeinheit, bestehend aus E-Motor, Schneckengetriebe, Elektronik und Sensorik ist in die Lenksäule integriert, Abb. 7.181a.
  Vorteile: geringer Raumbedarf, Lenksäule und Servoeinheit einbaufertig montiert
  Nachteile: evtl. beim Crashverhalten; Geräusche, wenn Servoeinheit im Fahrzeuginnenraum platziert ist; Unterstützungsmoment geht über untere Lenkspindel, deshalb nur für Fahrzeuge mit geringen Lenkkräften geeignet.
- Die Servoeinheit wirkt auf das Ritzel, Abb. 7.181b.
  Vorteile: Lenkgetriebe und Servoeinheit sind ein Bauteil, die Unterstützungskraft wirkt direkt auf das Ritzel, deshalb sind höhere Lenkmomente möglich
  Nachteile: größerer Platzbedarf im Motorraum, höhere Temperatur-, Dichtheits- und Lebensdaueranforderungen bzgl. Verschleiß
- Eine Variante dieser Ausführung ist die Doppelritzellösung, Abb. 7.181c. Dabei sitzt beim Linkslenkergetriebe die Servoeinheit an der Stelle, an der beim Rechtslenker die Lenksäule ans Lenkgetriebe montiert wird. Beim Rechtslenkerlenkgetriebe wird das Ganze spiegelbildlich ausgeführt. Die maximalen Unterstützungskräfte können bei dieser Ausführung ggü. den vorgenannten Varianten um das max. Fahrerhandmoment erhöht werden, da die beiden Momentanteile über zwei Ritzel auf die Zahnstange übertragen werden. Weiter vorteilhaft wirkt sich hier aus, dass üblicherweise der Platzbedarf für eine Rechtslenkerlenkgetriebevariante vorgehalten ist, der dann für die Servoeinheit des Linkslenkers genutzt werden kann. Nachteilig sind die Kostenmehrung und evtl. Toleranzprobleme durch die erforderlich werdenden doppelten Ritzel und Zahnstangenverzahnungen.
- Die Servoeinheit wirkt direkt auf die Zahnstange. Der E-Motor ist konzentrisch um die Zahnstange oder achsparallel zu ihr angeordnet und überträgt sein Moment mittels eines Reduktionsgetriebes, z. B. bestehend aus Zahnriemen und Kugelumlaufgetriebe (Abb. 7.182).
  Vorteil: Die Unterstützungskraft wird direkt an der Stelle erzeugt, an der sie auch benötigt wird. Damit sind auch höhere Zahnstangenkräfte zu realisieren.
  Nachteil: höherer Aufwand durch zusätzliches Getriebe, höhere Temperatur- und Dichtheitsanforderungen, Engstelle zu Ölwanne oder Vorderachsträger.

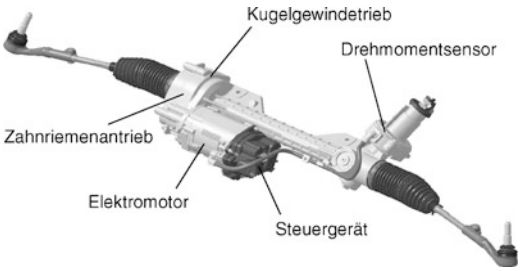



**Abb. 7.182** EPS mit achsparallelem Antrieb für die BMW 1er- und 3er-Reihe der Fa. ZFLS [229]

Der Einsatz elektrischer Lenksysteme ist natürlich sehr stark von den Gegebenheiten des elektrischen Bordnetzes abhängig. Das heute übliche 12 V-Bordnetz ist nicht immer – speziell im Oberklassesegment – für einen Einsatz der EPS ausreichend. Zusätzliche Bordnetzmaßnahmen, die z. B. die Anhebung der am Aktuator verfügbaren Spannung bewirken, können hier jedoch Abhilfe schaffen.

Das Lenkgefühl moderner Elektrolenkungen mit guter Abstimmung zwischen mechanischen Eigenschaften und Softwarefunktion und -applikation ist heute über dem Niveau von Hydrauliklenkungen. Auch das Kostengefüge konnte sich über die neuen Generationen und die weite Verbreitung anpassen.

Darüber hinaus bieten die Elektrolenkungen gegenüber der elektrohydraulischen Lösung den Vorteil einer noch größeren Kraftstoffeinsparung durch bedarfsgerechte Regelung und eine hohe Wartungsfreundlichkeit, da Ölstands- und Dichtheitskontrollen wie bei Hydrolenkungen entfallen. Die Elektrolenkung bietet schnelle und vielfältige Variationsmöglichkeiten bezüglich der Lenkungsabstimmung durch Softwareanpassungen statt durch Hardwareänderungen. So kann z. B. die Unterstützungskraft geschwindigkeits-, last- oder auch lenkwinkelabhängig geregelt werden. Eine aktive Umschaltung der Lenkcharakteristik als Fahrerwunsch ist einfach über die Software umsetzbar.

Die Elektrolenkung stellt weiterhin die bevorzugte Grundlage für zukünftige Entwicklungen hinsichtlich der Vernetzung von Regelsystemen dar.

## 7.4.6 Aktive Lenksysteme

### 7.4.6.1 Einleitung

In ► Abschn. 7.1 wurden die verschiedenen Mechanismen des Aufbaus der Reifenseitenkräfte diskutiert und die Möglichkeit dargestellt, diese Kräfte durch Radlenkwinkeländerungen, die von einem Fahrdynamikregler berechnet werden, zu beeinflussen. Im Gegensatz zu den konstruktiv vorgegebenen kinematischen und elastischen Lenkwinkelkorrekturen wirken diese nicht reaktiv als Folge von äußeren Kräften und Momenten, sondern aktiv und können als Funktion von mehreren fahrdynamischen Zustandsgrößen dargestellt werden. Auf diese Weise sind Regelungsstrategien möglich, die das querdynamische Verhalten bis zu den physikalisch Grenzen deutlich optimieren.

Sieht man von einzelnen Weiterentwicklungen der konventionellen Servolenkung ab, die der Kategorie der Aktiven Lenksysteme zugeordnet werden können (► Abschn. 7.4.6.2.1), waren es zunächst fahrdynamische Lenksysteme für die Hinterachse, die den Beginn der Entwicklung aktiver Lenksysteme in den vergangenen zwei Jahrzehnten begründeten. Treiber dieser Entwicklung war die Erkenntnis, dass durch die Beeinflussung des zeitlichen Aufbaus der Seitenkräfte an der Hinterachse und durch die Reduzierung des Fahrzeugschwimmwinkels bereits mit einer Steuerung ohne Rückführung von fahrdynamischen Zustandsgrößen oder sogar mit einer einfachen mechanischen Ankoppelung der Hinterradlenkung an die Vorderradlenkung, gleichsinniges Einschlagen der Hinterräder wie die Vorderräder, eine Verbesserung des instationären Fahrverhaltens bei höheren Geschwindigkeiten erzielt werden konnte.

Aktive Vorderachslenksysteme, die einen Lenkwinkel an den Vorderrädern ermöglichen, der von dem vom Fahrer vorgegebenen Lenkradwinkel deutlich abweichen kann, wurden sehr früh für Forschungszwecke realisiert [230, 231]. Die Idee wurde jedoch für einen möglichen Einsatz in Serienfahrzeugen erst ab Mitte der neunziger Jahre von Fahrzeugherstellern und Zulieferern wieder aufgegriffen [232, 233], zur Serienreife entwickelt [234]

und in 2003 von BMW erstmals in Serie gebracht. Seit dem Jahr 2007 bietet auch AUDI mit der Dynamiklenkung im A4 ein aktives Lenksystem an [247]. Neben den fahrdynamischen Eingriffen des aktiven Lenksystems ist die signifikante Reduzierung des Lenkradwinkelbereichs – und damit der vom Fahrer während des Parkierens aufzubringenden Lenkarbeit – ein maßgeblicher Faktor, weshalb sich aktive Vorderradlenkungen im Markt etablieren.

Mit der aktiven Winkelüberlagerung, die einen unmittelbaren Eingriff in das Fahrgeschehen darstellt, hat nach der Längsdynamik auch in der Querdynamik die elektronische Regelung zur Verbesserung des Fahrverhaltens vollends Einzug gehalten. Dies kann als ein wesentlicher Schritt hin zu einer höheren Automatisierungsebene des Gesamtfahrzeugs angesehen werden, d. h. die Voraussetzungen für ein automatisiertes oder auch teilautonomes Fahren sind somit auf der Seite der Aktuatorik geschaffen.

Im gleichen Zusammenhang sind sogenannte Spurhaltesysteme [235], zu nennen, welche durch aktive Lenkradmomente das Einhalten der Fahrspur unterstützen und bereits Marktverbreitung gefunden haben. Die hierfür erforderliche Aktuatorik wurde mit den elektrischen Lenksystemen flächendeckend eingeführt.

Neben grundsätzlichen Entwicklungszielen wie der Reduzierung von Gewicht, Kosten und Energiebedarf sowie der Sicherstellung von Verfügbarkeit und funktionaler Sicherheit ist es eine der Hauptaufgaben für den Entwickler, die aktiven Eingriffe des Lenksystems so zu gestalten, dass sie vom Fahrer entweder nicht bemerkt oder als positiv empfunden werden. Die Lenkung muss daher stets eine der Fahrererwartung entsprechende Rückmeldung und Fahrzeugreaktion auf eine Lenkwinkeleingabe gewährleisten.

Die gesetzlichen Vorschriften für Lenksysteme wurden in Europa angepasst, so dass auch nachfolgend beschriebene by-wire-Lenksysteme zulassungsfähig sind. Die europäische Vorschrift ECE R79 [248] stellt die konkreteste gesetzliche Vorgabe dar, die in vielen Ländern anerkannt wird. Die Zulassungsfähigkeit alleine ist allerdings kein ausreichendes Kriterium, auch Risiken der Produkthaftung sind im Zusammenhang mit aktiven Lenksystemen stets zu prüfen. Als verbindlicher Sicherheitsstandard – auch für aktive Lenksysteme – kann auf die Norm ISO/DIS 26262 [249] verwiesen werden, wo die Anforderungen an die E/E-Regelsysteme in Straßenfahrzeugen beschrieben werden.

### 7.4.6.2 Aktive Vorderradlenkungen

Ursprünglich unter dem Begriff „steer by wire" gerieten aktive Vorderradlenkungen ab Mitte der neunziger Jahre verstärkt in den Focus der Entwicklungsarbeit. Oft wird unter dem Begriff „steer by wire" nicht das Aufbrechen der mechanischen Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern mit Hilfe einer elektronischen Regelung verstanden, sondern der spezifische Lösungsansatz mit elektromechanischen Aktuatoren. Diese restriktive Interpretation steht jedoch im Widerspruch zum in der Luftfahrt üblichen Sprachgebrauch wo keine Einschränkungen bezüglich der Art der Aktuatoren bestehen. Aus diesem Grund wird hier der allgemeinere Begriff „aktive Vorderradlenkung" vorgezogen, der alle aktiven Lenksysteme beinhaltet, die zur Verbesserung des Zusammenspiels Fahrer/Fahrzeug eingesetzt werden können.

Im Folgenden werden die bekannten Lösungsansätze für aktive Vorderradlenkungen nach ihrer Funktion klassifiziert.

#### 7.4.6.2.1 Aktive Servolenkungen

Charakteristisch für diese Lenksysteme ist die Überlagerung des vom Fahrer aufgebrachten Momentes am Lenkrad mit einem geregelten Moment, das eine Funktion zusätzlicher fahrdynamischer Zustandsgrößen ist. Es kann die Aktion des Fahrers, situativ durch einen Regler moduliert, mehr oder weniger stark unterstützen, dem Fahrer entgegenwirken oder unabhängig vom Fahrer die Lenkbewegung kontrollieren. Eine wie bei heutigen Lenkungen übliche, weitgehend feste geometrische Relation zwischen dem Winkel am Lenkrad und dem Lenkwinkel an den Rädern bleibt dabei erhalten.

Zu dieser Kategorie von Lenkungen zählen:

- Lenkungen mit variablen, z. B. geschwindigkeitsabhängigen Betätigungskräften. Hierzu zählen die meisten elektrischen Servolenkungen, da sich bei ihnen diese Funktion ohne konstruktiven Mehraufwand realisieren lässt. Auch hydraulische Lenkungen bieten

diese Funktionalität, wozu aber ein elektrohydraulischer Aktuator wie z. B. in der ZF Servotronic [250] benötigt wird.
- Lenkungen mit Erkennung des Freihand-Modus und aktivem Lenkungsrücklauf sowie Bedämpfung der Lenkrad/Fahrzeugschwingungen. Waren diese Funktionen früher Gegenstand einer aufwändigen technischen Lösung (z. B. in Citroen-Fahrzeugen), so sind sie heute in elektrischen Lenksystemen einfach darstellbar [237].
- Lenkungen mit situativ wirkenden, angepassten Momenten im Sinne einer Assistenz für den Fahrer [235]. Solche Spurhaltesysteme warnen den Fahrer z. B. durch ein hochfrequentes Vibrieren im Lenkrad oder mit gerichteten Lenkmomenten vor dem Verlassen der Fahrspur und sind heute schon in Serie.

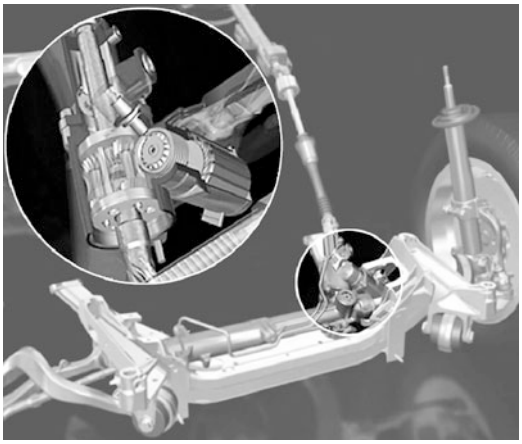


**Abb. 7.183** Überlagerungsgetriebe von BMW (Quelle: BMW)

#### 7.4.6.2.2 Lenkungen mit aktiv veränderlicher Übersetzung

Unter diesen Begriff fallen Lenkungen, bei denen die mechanische Übersetzung zwischen dem Lenkrad und den Vorderrädern über einen Verstellmechanismus verändert werden kann. Honda brachte im Jahr 2000 eine derartige Lenkung auf den Markt [238]. Das Konzept der einfachen Übersetzungsänderung hat sich jedoch nicht im Markt durchgesetzt.

#### 7.4.6.2.3 Überlagerungslenkungen

Überlagerungslenkungen sind dadurch charakterisiert, dass dem vom Fahrer vorgegebenen Lenkradwinkel ein zusätzlicher Lenkwinkel durch einen Aktuator überlagert werden kann. Der zusätzliche Winkel wird durch eine Berechnungsvorschrift vorgegeben und dient der Erhöhung von Agilität und Stabilität des Fahrzeugs sowie zur Kompensation von Störgrößen wie z. B. dem destabilisierenden Giermoment bei einer $\mu$-Split-Bremsung. Darüber hinaus kann der Gradient des Radlenkwinkels über dem Lenkradwinkel z. B. als Funktion der Fahrgeschwindigkeit und des Lenkradwinkels variabel gestaltet werden. Gegenüber der oben beschriebenen Lösung von Honda mit einer effektiven Veränderung der mechanischen Übersetzung bietet das Überlagerungsprinzip insbesondere den Vorteil, dass sich das Lenkkraftniveau nahezu unabhängig von der wahrgenommenen (Winkel-)Übersetzung verhält. Wegen der Möglichkeit, eine eigene rechnergeregelte Lenkwinkelkomponente zu erzeugen, sind die Anforderungen an das Sicherheitskonzept jedoch höher. Da bei der Überlagerungslenkung eine direkte mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und gelenkten Rädern besteht, bleibt nach Ausfall des Aktuators die herkömmliche Lenkfunktion erhalten. Durch diese Eigenschaft sind die Sicherheitsanforderungen wesentlich leichter zu erfüllen als bei den nachfolgend beschriebenen reinen „steer by wire"-Systemen. Eine weitere, in der Regel positiv bewertete Eigenschaft ist die direkte mechanische Übertragung des Rückstellmomentes der Räder auf das Lenkrad. Der Aufwand für die Erzeugung eines vollständig synthetischen Rückstellmomentes, wie bei reinen „steer by wire"-Systemen, ist nicht erforderlich.

Neben der Differenzierung durch die Regelstrategie unterscheidet man die heute im Markt befindlichen Überlagerungslenkungen durch folgende konstruktive Ausführungsformen:
- Überlagerung der Rotationsbewegung mit Hilfe eines durch ein Schneckenrad angetriebenes Planetengetriebe am Lenkgetriebe (s. Abb. 7.183). Das Planetengetriebe weist ein Übersetzungsverhältnis von ca. 1 : 1,3 auf, d. h. die Drehung der Eingangswelle wird auf die Ritzelwelle des Lenkgetriebes ins Schnelle

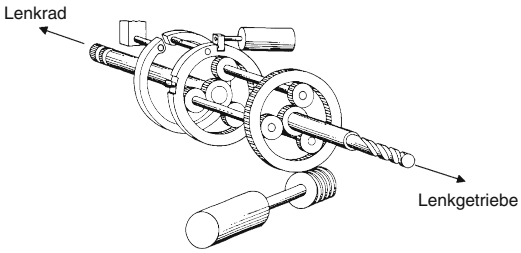



**Abb. 7.184** Wirkprinzip der aktiven Winkelüberlagerung mittels Planetengetriebe

übersetzt. Der Zusatzlenkwinkel wird gestellt, indem das Schneckenrad durch den außenliegenden elektrischen Motor angetrieben wird. Diese Lösung, deren Wirkprinzip Abb. 7.184 zeigt, wird seit 2003 von BMW in vielen Fahrzeugen angeboten. In Fahrzeugen mit Frontantriebsarchitektur ist jedoch der Bauraum an der Vorderachse begrenzt, so dass ggf. alternative Lösungskonzepte erforderlich sind.

— Überlagerung der Rotationsbewegung durch ein in der Lenksäule integriertes koaxial angeordnetes Wellgetriebe [247]. Sowohl Toyota (seit 2003) als auch Audi (seit 2007) haben dieses Konzept realisiert, das in Abb. 7.185 und in Abb. 7.186 dargestellt ist.

Kernelemente des Überlagerungsgetriebes sind das Hohlrad (CS), der darin angeordnete Flextopf (FS) und eine innenliegende elliptische Antriebswelle (WG). Die Hochachse der Ellipse reicht aus, um die Außenverzahnung des Flextopfes und die Innenverzahnung des Hohlrades in Eingriff zu bringen. Das Hohlrad weist eine geringfügig kleinere Zähnezahl als der Flextopf auf. Dreht nun die Antriebswelle, so wälzt sich der Flextopf gegenüber dem Hohlrad ab und das Hohlrad dreht sich mit einer der Übersetzung entsprechenden geringfügig kleineren Drehzahl als der Flextopf. Im passiven Betrieb der Überlagerungslenkung ist der mechanische Durchtrieb des Fahrers zur Straße über dem ruhenden Verzahnungseingriff gewährleistet. Im aktiven Betrieb wird zusätzlich die elliptische Welle über einen Elektromotor angetrieben, der Zahneingriff dreht sich mit der Antriebsdrehzahl und die Drehbewegung wird dem

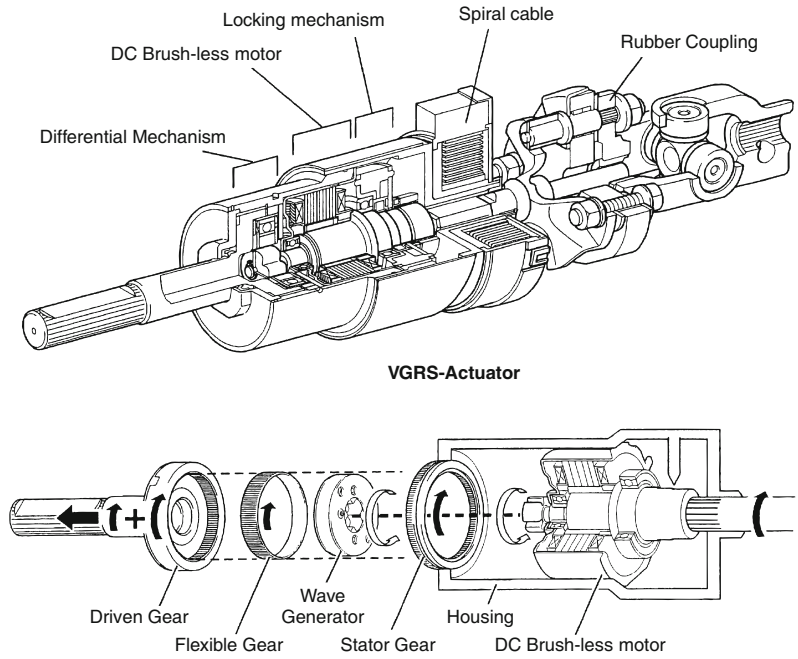



**Abb. 7.185** Überlagerungsaktuator des Toyota Land Cruiser Cygnus (Quelle: Toyota)

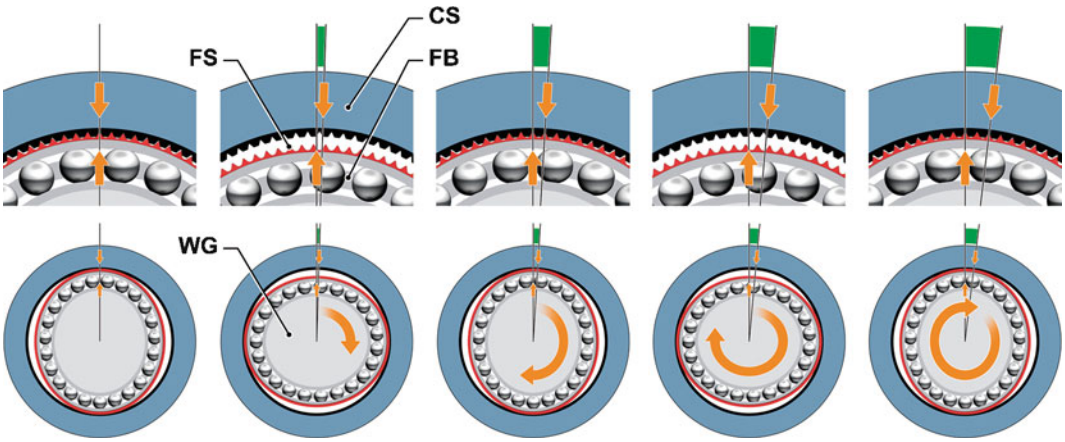



**Abb. 7.186** Wirkprinzip des Überlagerungsstellers mit Wellgetriebe [247]

Übersetzungsverhältnis entsprechend in einen Zusatzlenkwinkel umgesetzt. Der Vorteil dieses Überlagerungsgetriebes ist die modulare Bauweise in der Lenksäule, die es erlaubt, das Lenkgetriebe für die Überlagerungslenkung und für eine Basislenkung in einem baugleichen Gehäuse unterzubringen.

- Überlagerung einer Rotationsbewegung durch ein Schneckenradgetriebe im Lenkrad: Dieses Konzept der Fa. Takata [244] zeigt Abb. 7.187. Wesentliches Merkmal des Systems ist das im Lenkrad angeordnete mitdrehende Schneckenradgetriebe, das gegenüber der Karosseriestruktur nicht abgestützt werden muss. Der Vorteil dieses Getriebes ist der sehr einfache Aufbau. Die Herausforderung besteht in der Übertragung der elektrischen Stellerleistung über die drehbare Schnittstelle zwischen Lenkrad und Lenksäule.



**Abb. 7.187** Lenkrad mit Überlagerungssteller (Quelle: Takata)

Alle vorgestellten Konzepte haben den Vorteil, dass der vom Fahrer aufgegebene Lenkradwinkel in weiten Grenzen von einem elektronisch geregelten Antrieb überlagert werden kann. Darüber hinaus sind die Aktuatoren nicht im Kraftfluss zwischen Lenkunterstützung und Achse, so dass eine Überlagerung des Fahrerlenkwinkels lediglich die Fahrereingabe und nicht die Lenkkräfte an der Vorderachse abstützen muss.

Vergleicht man die Ausführungsformen von Überlagerungslenkungen, so sind die beiden letztgenannten Konzepte aufgrund ihrer Modularität vorteilhaft. Das erstgenannte Konzept von BMW bietet den Vorteil der kompakten Bauweise in einem Teilsystem Lenkgetriebe.

Bezüglich der Möglichkeit, mittels eines Reglers einen von der Vorgabe des Fahrers unabhängigen Radlenkwinkel zu stellen, unterscheiden sich

die Aktiven Lenksysteme nach dem Überlagerungsprinzip nur insoweit von den im ▶ Abschn. 7.4.6.2.5 behandelten „steer by wire"-Lenksystemen, als dass die an den Rädern wirkenden Lenkmomente auf das Lenkrad übertragen werden.

#### 7.4.6.2.4 Integration von Überlagerungslenkung und geregelter Servolenkung

Der integrierte Betrieb einer Überlagerungslenkung und einer regelbaren Servolenkung ermöglicht, beide Zustandsgrößen einer Lenkung, die Winkelzuordnung zwischen Lenkrad und Rädern sowie das Lenkradmoment, mit Hilfe eines Reglers in einem weiten Bereich frei zu gestalten. Die vielfältigsten Freiheitsgrade bietet dabei eine elektrische Servolenkung in Verbindung mit einer Überlagerungseinheit, da diese im Unterschied zu den üblichen Bauformen der hydraulischen Servolenkung in allen vier Quadranten der durch Lenkmoment und Lenkradbewegung aufgespannten Ebene auf die Fahrerrückmeldung einwirken kann.

Theoretisch ist es sogar möglich, die aus Stellbewegungen der Überlagerungseinheit resultierenden Lenkmomentanteile durch entsprechendes Ansteuern der elektrischen Lenkunterstützungseinheit zu kompensieren – und damit die vollständige steer-by-wire-Funktionalität zu erreichen. Tatsächlich ist dies eine sehr anspruchsvolle Regelungsaufgabe, die die genaue Kenntnis der Regelstrecke zwischen den beiden Aktuatoren voraussetzt. Die heute mit denen im Markt befindlichen aktiven Lenksystemen angebotenen Zusatzfunktionen erfordern diese aufwändige Mehrgrößenregelung nicht zwingend.

Wichtige Zusatzfunktionen, die heute mit den aktiven Lenksystemen angeboten werden sind die geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung und Lenkmomentregelung sowie stabilisierende Lenkeingriffe zur Beeinflussung der Gesamtfahrzeugdynamik.

Zukünftig können mit der Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen auch aktive Lenkeingriffe zur Störungskompensation, für automatisiertes oder gar autonomes Fahren genutzt werden.

Als wesentlicher funktionaler Unterschied zu den im folgenden Kapitel abgehandelten „steer by wire"-Systemen bleibt bei der „Aktivlenkung" die direkte mechanische Verbindung zu den Vorderrädern auch im Normalbetrieb bestehen. Durch dieses Merkmal wird ein „authentisches" Lenkgefühl mit feinfühliger Rückmeldung des Fahrbahnzustandes gewährleistet, wichtige Aspekte hierzu siehe [254]. Die direkte mechanische Verbindung stellt gleichzeitig eine mechanische Rückfallebene dar, wodurch das Sicherheitskonzept vereinfacht wird.

#### 7.4.6.2.5 „Steer by wire"-Lenksysteme

Bei den unter diesen Oberbegriff fallenden Systemen ist keine direkte mechanische Verbindung zwischen dem Lenkrad und den gelenkten Rädern im störungsfreien Betrieb vorhanden und der Lenkwinkel der Räder wird mittels eines geregelten hydraulischen oder elektrischen Stellers erzeugt. Wie bei der Überlagerungslenkung ist der feste kinematische Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Radlenkwinkel aufgehoben. Darüber hinaus erfolgt keine unmittelbare Übertragung des Rückstellmomentes der Räder, so dass das Lenkradmoment aktiv eingestellt werden muss und sich die Möglichkeit ergibt, das Lenkmoment rein nach ergonomischen und physio-psychologischen Gesichtspunkten zu gestalten, wie sie z. B. durch [255] beschrieben werden. Diese Freiheit wird allerdings mit der Notwendigkeit eines aktiven Lenkmomentenstellers mit der dazugehörenden Regelung erkauft.

Dient das Lenkrad nicht mehr dazu, zumindest einen Teil der vom Fahrer aufzubringenden Lenkarbeit in das Lenkungssystem einzuspeisen, kommen auch andere Formen von Betätigungsorganen in Frage. So wurde in [239] die Übertragbarkeit der vom Flugzeug her bekannten Betätigungen auf das Automobil untersucht. Zu beachten sind die beim Kraftfahrzeug auftretenden Störungen durch die Massenträgheit der Arme und des gesamten Körpers als Folge der sehr schnellen Änderung von Längs- und Querbeschleunigung. Aus diesem Grund wurde in [240] die Verwendung eines hydraulisch bedämpften, auf Störkräfte unempfindlichen Drehknaufs einem „side stick" vorgezogen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Lenkrad den Lenkhebel der ersten historischen Automobile verdrängt hat, da es eine sinnvolle ergonomische Alternative darstellte, um den Weg der durch den Fahrer ausgeübten Handkraft wesentlich über den des Lenkhebels hinaus vergrößern zu können. So

konnte bei ausreichend niedrigen Betätigungskräften lange Zeit die erforderliche Lenkarbeit auch ohne Servosystem erbracht werden.

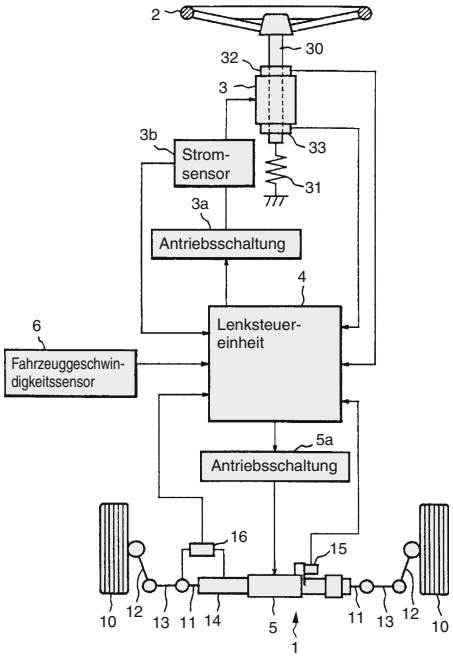
Diese Möglichkeit, die das Lenkrad bietet, hat einen wichtigen Einfluss auf die Sicherheitsarchitektur von „steer by wire"-Systemen. Um den Sicherheitsanforderungen zu genügen, muss ein „fail functional"-Verhalten sichergestellt sein, das bis zu zwei Fehler toleriert. Auch nach Auftreten des ersten Fehlers muss ein sicheres Weiterfahren gewährleistet sein. Diese Anforderung, die auch eine zweifach redundante Energieversorgung erfordert, belastet Kosten, Gewicht, Bauraumbedarf, Komplexität und Verfügbarkeit.

Bei Verwendung einer per se als sicher geltenden mechanischen oder hydraulischen Rückfallebene reicht eine einfache Ausführung der Aktuatorik des Lenksystems ausreichen, um den Sicherheitsanforderungen zu genügen.

Die Anforderungen an Lenksysteme sind in der ECE R79 [248] beschrieben. Die aktuelle Fassung (Revision 2, 2006) schließt steer-by-wire-Systeme grundsätzlich nicht aus. In allen Ländern, in denen diese Regelung verbindlich anzuwenden ist, kann daher von einer Zulassungsfähigkeit ausgegangen werden, wobei dies im Einzelfall natürlich zu prüfen verbleibt.

Eine Differenzierung der verschiedenen Systeme lässt sich bei „steer by wire"-Lenkungen nach folgenden Merkmalen durchführen:

- Gemeinsamer Steller für beide Räder einer Achse oder radindividuelle Lenkung. Letzteres erscheint wegen des hohen Aufwandes nur in Sonderfällen vertretbar.
- Elektromechanische, ◘ Abb. 7.188, oder hydrostatische Aktuatoren, ◘ Abb. 7.189.
- Vorhandensein und Ausführung einer manuellen Rückfallebene. Ein Beispiel für eine mechanische Rückfallebene mit Kupplung ist in ◘ Abb. 7.189 schematisch dargestellt.
- Steuerungs- und Regelungsalgorithmen für die Übertragungsfunktionen von Winkeln und Momenten zwischen Lenkrad und Vorderrädern.
- Strategie der Stabilisierungs- und Störgrößenausregelungsfunktionen.




◘ **Abb. 7.188** Prinzipdarstellung eines elektromechanischen Lenksystems mit elektrischem Lenkmomentensimulator [Koyo Seiko, DE 19806458 A1]

- Lenkradrückstellmomenten-Strategien sowohl im Hinblick auf die Leistungsoptimierung des Systems Fahrer/Fahrzeug/Umfeld als auch auf eine positive subjektive Bewertung durch den Fahrer.

Bisherige Bestrebungen, Steer-by-wire-Systeme in Serie zu bringen, sind an den Kosten und der Beherrschung der Komplexität gescheitert.

### 7.4.6.3 Aktive Hinterradlenkungen

Aktive Hinterradlenksysteme bieten die Möglichkeit sowohl die Größe des Schwimmwinkels als auch den zeitlichen Verlauf des Aufbaus der Seitenkräfte an der Hinterachse unmittelbar beeinflussen zu können. Ihr Potenzial kann jedoch nur in Verbindung mit einer Überlagerungslenkung oder einer „by wire"-Lenkung an der Vorderachse voll ausgeschöpft werden. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

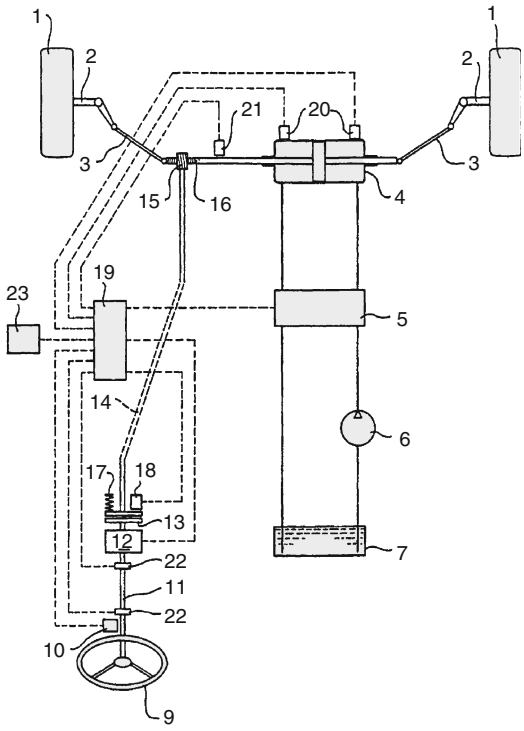



**Abb. 7.189** Prinzipdarstellung eines elektrohydraulischen Lenksystems mit elektrischem Lenkmomentsimulator und mechanischer manueller Rückfallebene [DaimlerChrysler, Patentschrift DE 19755044 C1]

- Der Einschlagwinkel der Hinterräder beeinflusst den Einschlagwinkelbedarf der Vorderräder.
- Eine rechnergesteuerte Lenkung an der Vorderachse und an der Hinterachse ermöglicht die Freiheitsgrade Querbewegung und Gieren des Fahrzeugs weitgehend unabhängig voneinander zu regeln.
- Die Hinterradlenkung ermöglicht eine vorbeugende Stabilitätsregelung, während eine aktive Vorderradlenkung auch zur Gierstabilität beiträgt, wenn die Hinterachse bereits in der Sättigung ist.

Da für die Verbesserung der Fahrdynamik nur ein relativ geringer Radeinschlagwinkel (2–3°) erforderlich ist und die Reduzierung des Schwimmwinkels zur Agilitäts- und Stabilitätserhöhung auch ohne Gierratenregelung möglich ist, werden fahrdynamische Hinterradlenksysteme bereits seit längerem von einigen Fahrzeugherstellern angeboten. Das hohe Potenzial bei der Verringerung des Wendekreises bei Fahrzeugen mit langem Radstand wie „mobile homes“ und „light trucks“ hat zur Verstärkung der Aktivitäten bei der Hinterradlenkung geführt. Der durch den großen Einschlagwinkel der Hinterräder benötigte Raumbedarf ist bei diesen Fahrzeugen nicht so entscheidend wie bei üblichen Automobilen.

Vom Sicherheitsaspekt her sind aktive Hinterradlenkungen ähnlich zu bewerten wie Überlagerungslenkungen, da ein „fail silent“ Verhalten in der Regel als ausreichend gesehen wird. Voraussetzung ist, dass die Hinterräder in ihrer Position festgesetzt werden. Dies kann bei hydraulischen Systemen vorzugsweise durch vorgespannte Federn erfolgen [241]. Bei elektromechanischen Aktuatoren bieten sich Getriebe mit ausreichender Selbsthemmung an. Eine Rückführung in Geradeaustellung ist bei Ausfall der Positionsregelung oder der Energieversorgung nur mit kaum vertretbarem Aufwand möglich.

Tab. 7.11 zeigt einen aktuellen Überblick der Allradlenksysteme, die in der jüngeren Vergangenheit und aktuell von unterschiedlichen Herstellern angeboten wurden bzw. immer noch im Markt sind.

#### 7.4.6.3.1 Hinterradlenkungen ohne fahrdynamische Regelung

Erste Systeme (z. B. Honda 1987) begnügten sich mit einer mechanischen Ankopplung einer Hinterradlenkung an die Lenkung der Vorderachse [242]. Streng genommen stellt diese nur eine spezielle Form der schon lange bekannten Allradlenkungen für Sonderfahrzeuge dar. Doch während letztere dazu dienen, den Wendekreis zu verringern und bei mehrachsigen Fahrzeugen auch den Reifenverschleiß zu reduzieren, wurden mit dem erwähnten System von Honda bereits fahrdynamische Ziele verfolgt.

Durch das gleichsinnige Einschlagen der Hinterräder zu den Vorderrädern wird der Aufbau der Seitenkräfte an der Hinterachse bei instationären Fahrmanövern beeinflusst. Hierdurch erfolgt eine Verkürzung der Ansprechzeit der Querbeschleunigung des Fahrzeugs auf Lenkwinkeländerungen bei

**Tabelle 7.11** Übersicht aktiver Hinterachslenksysteme (Quelle: BMW)

| Hersteller | Bauweise | Aufbau | Funktionsziele | Lenkwinkel [°] | Fahrzeuge |
|---|---|---|---|---|---|
| Toyota | mechanisch | Verbindung zur Vorderradlenkung, Getriebe | WKR | 4 | Celica (1990), Carina (1989) |
| | elektro-hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | WKR | 15 | Mega Cruiser (1995) |
| | elektro-hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | WKR, FS (FDR) | 5 | Soarer (1991), Crown (1992) |
| | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe, Spindeltrieb | FS (FDR) | 2 | Aristo (1997), Majesta (1997) |
| Nissan | hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | FS (VS) | 1 | Skyline (1985), Silvia (1988), 180SX (1989), Fairlady Z (1989), Cefiro (1992), Laurel (1993) |
| | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe, Spindeltrieb | FS (FDR) | 1 | Skyline (1993), Silvia (1993), Fairlady Z (1993), Laurel (1997), Cedric (1994), Stagea (1998) |
| | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe, Spindeltrieb | FS (VS), FS (FDR) | ca. 1,5 | Infinity FX50 (2008), G37 (2007), Stagea (2002), Fuga (2004) |
| Honda | mechanisch | Verbindung zur Vorderradlenkung, Getriebe | WKR | 5 | Prelude (1987), Accord (1990) |
| | elektro-mechanisch | Elektromotor, Spindeltrieb | WKR, FS (VS) | 8 | Prelude (1991) |
| Mazda | hydraulisch | Hydraulikpumpe, Elektromotor, Getriebe | FS (VS) | 5 | 626 (1988), MX-6 (1987) |
| | hydraulisch | Hydraulikpumpe, Elektromotor, Getriebe | FS (FDR) | 7 | Eunos800 (1992), RX-7 (1985) |
| Mitsubishi | elektro-hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | FS (VS) | 1,50 | Galant (1988), Lancer/Eterna (1988), GTO/3000GT (1991) |
| | elektro-hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | FS (VS) | 0,8 | Galant (1993), Emeraude (1994), Lancer/Eterna (1994) |
| Subaru | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe | FS (VS) | 1,5 | Alcyone (1991) |

**Tabelle 7.11** (Fortsetzung)

| Hersteller | Bauweise | Aufbau | Funktionsziele | Lenkwinkel [°] | Fahrzeuge |
|---|---|---|---|---|---|
| Daihatsu | mechanisch | Verbindung zur Vorderradlenkung, Getriebe | WKR | 7 | Mira (1992) |
| BMW | elektro-hydraulisch | Hydraulikpumpe, Hydraulikventile, Stellzylinder | FS (VS) | 1,7 | 850i, 850csi (ab 1990) |
| | elektro-mechanisch | Elektromotor, Spindeltrieb | WKR, FS (VS), FS (FDR) | 3<br>2,5 | 7er (2008),<br>5er GT (2009),<br>5er (2010) |
| Renault | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe, Spindeltrieb | WKR, FS (VS), FS (FDR) | 3,5 | Laguna GT (2008), Laguna Coupe (2008) |
| GM | elektro-mechanisch | Elektromotor, Getriebe, Spindeltrieb | WKR, FS (VS) | 12 | GMC Sierra (2002), Silverado (2002) |



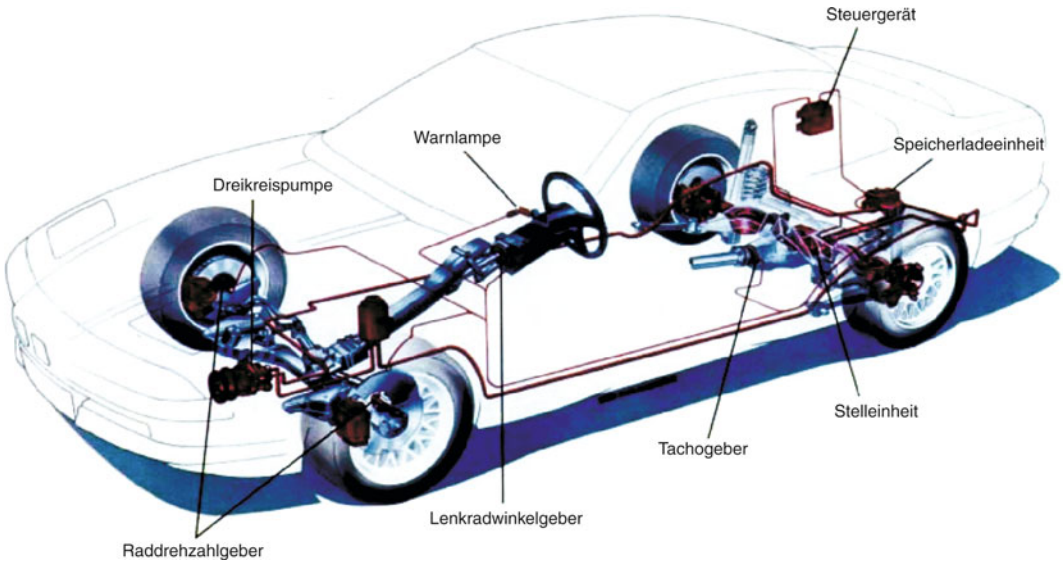



**Abb. 7.190** Hinteradlenkung BMW 850 CSI, 1990, Anordnung Gesamtsystem [251]

gleichzeitiger Verringerung des Schwimmwinkels und Erhöhung der Stabilität, da das Überschwingen der Giergeschwindigkeit verringert wird.

Bei sehr niedriger Fahrgeschwindigkeit sollte die Lenkbewegung der Hinterachse jedoch gegensinnig zu den Vorderrädern erfolgen. Auf diese Weise wird die Lenkbarkeit der Hinterachse auch zur Reduzierung des Wendekreises genutzt.

In dem von Honda entwickelten System erfolgte die Ansteuerung der Hinterachse noch durch eine Mechanik, die mit zunehmendem Lenkradwinkel den Übergang von einem gegensinnigen zu einem gleichsinnigen Radeinschlag gewährleistet. Einen Fortschritt gegenüber mechanisch gekoppelten Systemen stellte die in Abb. 7.190 gezeigte Ausführung einer elektronisch geregelten hydromecha-

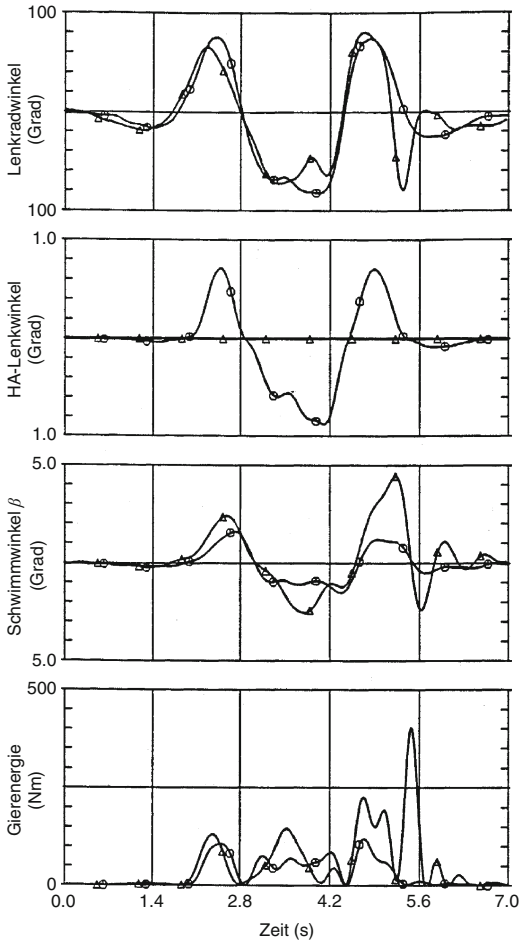



**Abb. 7.191** Beispiel eines doppelten Fahrspurwechsels mit und ohne Hinterradlenkung. Die Reduzierung von Lenkaufwand, Schwimmwinkel und Giergeschwindigkeit ist vor allem beim zweiten Fahrspurwechsel erkennbar [241]

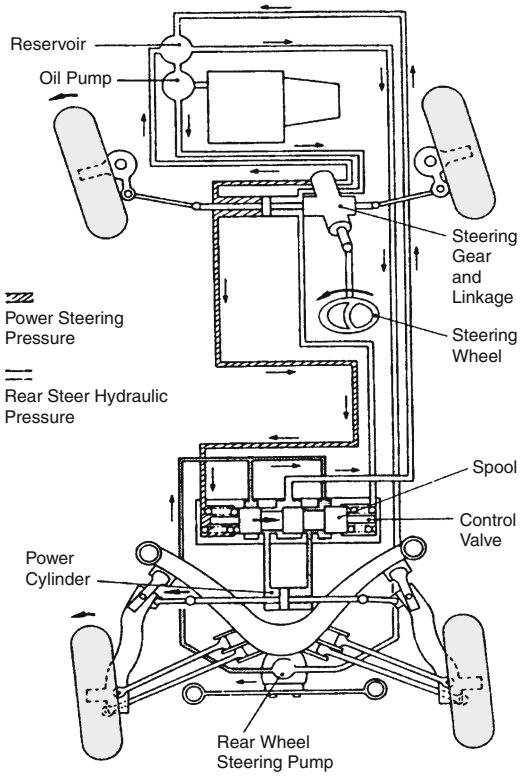



**Abb. 7.192** Hinterradlenkung Mitsubishi (1988), Prinzipdarstellung [252]

nischen Hinterradlenkung dar (BMW 1990). Der Hinterradlenkwinkel wird in diesem System mittels eines geschwindigkeits- und lenkwinkelabhängigen Kennfeldes definiert [243]. Ein Zeitglied verzögert den Aufbau des Lenkwinkels an der Hinterachse, um das Fahrverhalten im unteren Geschwindigkeitsbereich agiler zu gestalten. Da keine Rückführung von fahrdynamischen Zustandsgrößen erfolgt, stellt die BMW-Lenkung bezüglich ihrer fahrdynamischen Funktion eine Steuerung dar. In Abb. 7.191 ist die Auswirkung dieser aktiven Hinterradlenkung bei einem doppelten Fahrspurwechsel dargestellt.

#### 7.4.6.3.2 Hinterradlenkungen mit fahrdynamischer Regelung

Eine Besonderheit stellt die in Abb. 7.192 gezeigte Hinterradlenkung dar (Mitsubishi 1988), da sie eine rein hydromechanische Steuerung beinhaltet, bei der jedoch der fahrdynamische Zustand über den in der Servolenkung aufgebauten Druck Berücksichtigung findet. Mit dem Druck in der Servolenkung an der Vorderachse wird ein hydraulisches Ventil der Hinterradlenkung angesteuert, das die Richtung des Lenkwinkels der Hinterachse in Richtung Untersteuern sowie seinen Betrag bestimmt. Hierbei wird über die Druckdifferenz im Servosystem sowohl die Lenkwinkelgeschwindigkeit als auch das Seitenkraftniveau an der Vorderachse erfasst. Eine

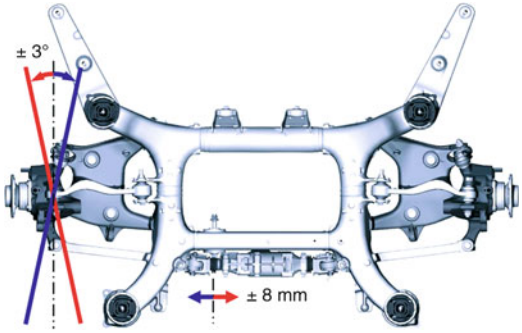



**Abb. 7.193** Hinterachse des BMW 5er (2010) mit aktivem Steller [246]



von der Hinterachse angetriebenen Pumpe versorgt mit einem von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängigen Volumenstrom das Hydrauliksystem der Hinterradlenkung. Hierdurch wird die gewünschte Abhängigkeit des Lenkwinkels der Hinterachse von der Fahrzeuggeschwindigkeit erreicht.

Mit fortschreitender Entwicklung der Sensorik, insbesondere des Gierratensensors, führten japanische Hersteller in den 90er Jahren Hinterradlenkungen auf dem japanischen Markt ein, die eine elektronische fahrdynamische Regelung verwenden. Auf diese Weise werden auch Störungen von einem Regler ausgeregelt, der gezielt ein Sollverhalten einstellt.

Eine Weiterentwicklung der Systeme der 90er Jahre stellt die von BMW im 7er (2008) eingeführte Hinterachslenkung (HSR, Hinterachs-Schräglaufregelung) dar, auf die im nächsten Kapitel noch näher eingegangen wird. Abb. 7.193 zeigt die Anordnung des Lenkaktuators an der Hinterachse. Der Spurlen-ker wird durch einen zentral angeordneten Linearantrieb ausgelenkt, so dass ein Radeinschlag von bis zu 3° einstellbar ist.

Abb. 7.194 zeigt eine schematische Darstellung des Aktuator, der über einen bürstenlosen Hohlwellenmotor und ein Kugelumlaufgetriebe eine lineare Stellbewegung einstellt.

### 7.4.6.4 Aktive geregelte Vorder- und Hinterachslenksysteme

Während in den 90er Jahren viele japanische Hersteller Hinterachslenksysteme entwickelten, hat dieser Boom mittlerweile nachgelassen. Mit Nissan, Renault und BMW setzen nunmehr drei Hersteller derzeit auf den Einsatz solcher Systeme.

BMW bietet dabei die aktive Hinterradlenkung ausschließlich mit der aktiven Vorderachslenkung als Integral-Aktivlenkung an. Abb. 7.195 zeigt die Anordnung der beiden aktiven Lenksysteme an Vorder- und Hinterachse.

Das Ziel dieser Anordnung ist die Zusammenführung der positiven Eigenschaften beider Lenksysteme in einem Fahrzeug. Beide Radlenkwinkel

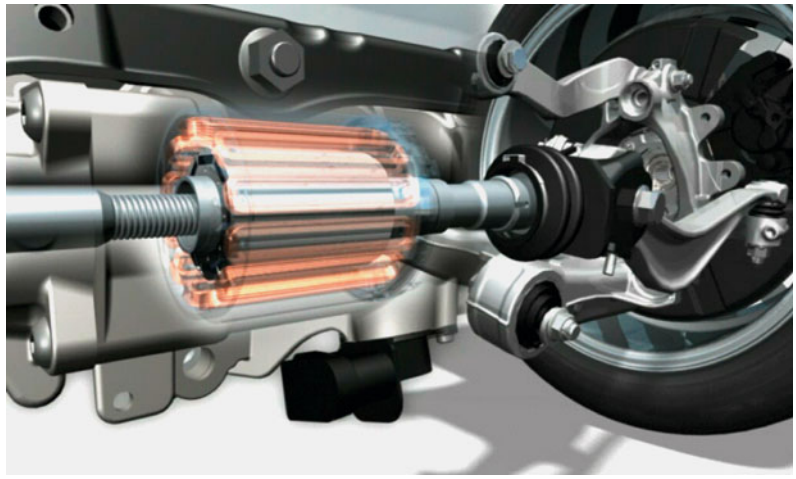


**Abb. 7.194** Darstellung des Hinterachsenaktuators am BMW 5er (2010) [246]

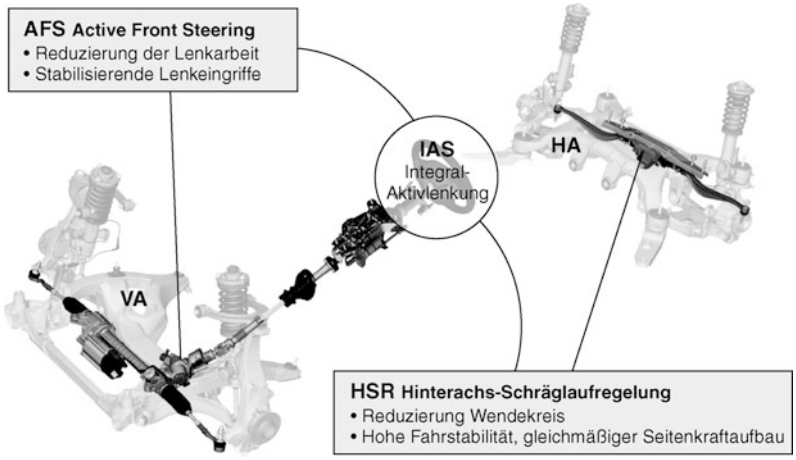



**Abb. 7.195** Kombination der Eigenschaften von aktiver Vorderachs- und Hinterachslenkung mit der Integral-Aktivlenkung im BMW 5er (2010) (Quelle: BMW)

können nach gewünschter fahrdynamischer Ausprägung frei eingestellt werden.

Das Regelungsziel, das damit verfolgt werden soll, ist die sog. stationäre Gierneutralität [246, 256]: Aus dem stationären Verhalten eines Fahrzeugs mit Hinterachslenkung geht hervor, dass bei gleichem Lenkradwinkel (und damit Radlenkwinkel) der Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt kleiner ist als der eines Fahrzeugs mit konventioneller Lenkung – was zunächst ein wünschenswertes Regelungsziel sein kann. Abb. 7.196 zeigt diesen Umstand, aus demaber auch hervorgeht, dass der mit gleichem Lenkradwinkel erzielte Kurvenradius gegenüber dem konventionellen Fahrzeug größer ist. Das durch den reduzierten Schwimmwinkelaufbau gewonnene Mehr an Fahrstabilität muss mit einem stärkeren Lenkradeinschlag erkauft werden.

Hier greift ein wesentlicher Gedanke der Integralaktivlenkung an. Durch ein aktives Zulenken an der Vorderachse kann der Zielkonflikt gelöst werden und bei gleichem Lenkradwinkel und gleichem Kurvenradius ergibt sich ein Fahrverhalten mit deutlich reduziertem Schwimmwinkel. Abb. 7.197 zeigt dieses Verhalten über der Querbeschleunigung.

Ziel der Applikation des Fahrdynamikreglers für stationäre Gierneutralität ist es, bei nahezu gleichem Lenkwinkel und gleicher Gierrate einen deutlich reduzierten Schwimmwinkel gegenüber einem

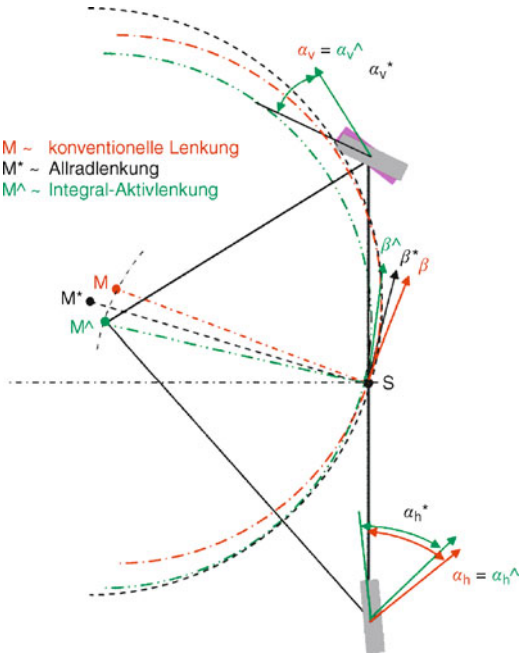



**Abb. 7.196** Veränderung des Kurvenhalbmessers und des Schwimmwinkels bei stationärer Kreisfahrt mit unterschiedlichen Lenksystemen (gleichsinniges Einschlagen der Hinterachse) [214]

Fahrzeug mit konventioneller Vorderachslenkung zu erreichen. Der Schwimmwinkel des Fahrzeugs mit der Integral-Aktivlenkung weist einen um über

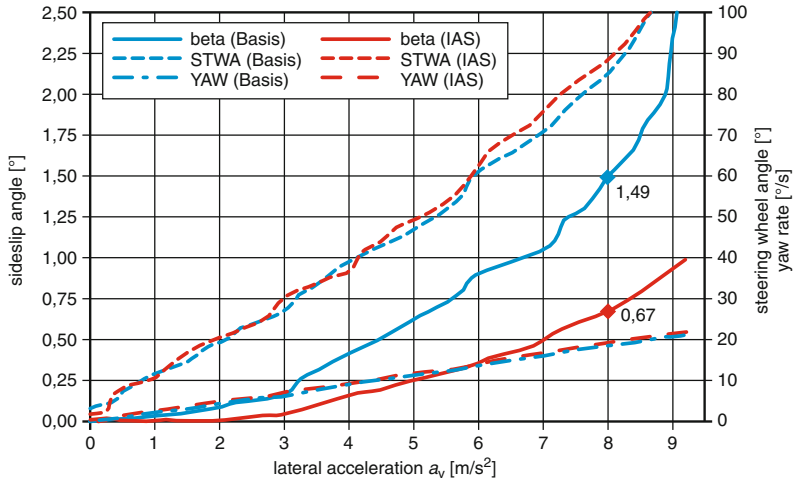



**Abb. 7.197** Veränderung des Schwimmwinkels mit einer Allradlenkung und einer Integral-Aktivlenkung bei stationärer Kreisfahrt [246]

50 % reduzierten Wert gegenüber dem konventionellen Fahrzeug auf. Zudem verläuft der Anstieg über der Querbeschleunigung gleichmäßiger, womit das Fahrzeug signifikant besser beherrschbar ist.

## 7.5 Beurteilungskriterien

### 7.5.1 Subjektive Fahreigenschaftsbeurteilung

Die subjektive Beurteilung ist auch in der Zeit hoch entwickelter Messtechnik und CAE-Entwicklungsmethoden nach wie vor ein wesentliches Instrument zur Feinabstimmung der Fahreigenschaften.

Grund hierfür ist die Fähigkeit versierter Versuchsingenieure, komplexe Zusammenhänge wie das Fahrverhalten in vergleichsweise kurzer Zeit hinreichend gut einordnen zu können. Zudem sind einige Kriterien aus den Themengebieten Geradeauslauf, Fahrkomfort und Lenkgefühl aufgrund ihrer Komplexität bisher nur unzureichend objektiv messbar [257, 277].

In der Regel gewinnt man gleichzeitig einen umfassenden Eindruck der Gesamtfahrzeugeigenschaften, wodurch auch die Sichtweise des sog. „Normal"-Fahrers, d. h. des späteren „Kunden" mit betrachtet wird.

Die Durchführung der Bewertung erfolgt üblicherweise anhand von aneinander gereihten Fahrmanövern auf speziellen Versuchsstrecken mit bekannten Kurvenverläufen, Reibwerten, usw.

Zweckmäßig ist auch der Vergleich mit einem bekannten Referenz- oder Wettbewerbs-Fahrzeug unter gleichen Voraussetzungen.

Ergänzt wird dies durch Beurteilungsfahrten unter Kundenbedingungen auf öffentlichen Straßen.

So ergibt sich für den versierten Versuchsingenieur letztlich ein umfassender Eindruck über Quer-, Längs- und Vertikaldynamik und deren Kopplungen.

Die Bewertung des weitläufigen Gebietes der Gesamtfahreigenschaften erfolgt mittels Bewertungsbögen. Diese werden untergliedert, z. B. in

- Geradeaus-Fahreigenschaften,
- Übergangs-Fahreigenschaften,
- Kurven-Fahreigenschaften,
- Lenkeigenschaften,
- Bremseigenschaften,
- Anfahren/Traktion,
- Abrollkomfort und Solidität,
- Aufbau- und Humanschwingungskomfort.

Eine klare Zuordnung der zahlreichen Einzelkriterien nach entsprechenden Themengebieten ist eine notwendige Voraussetzung für eine zielorientierte Bewertung und damit Weiterentwicklung der zu untersuchenden Entwicklungsstände von Fahrzeugen.

Für die subjektive Beurteilung der Fahrzeuge wird entsprechend der zu bewertenden Teilbereiche ein Fragebogen aufgestellt, in dem die Beurteiler die Fahrzeuge nach einer bestimmten Skala bewerten können.

Für die Bewertung der Einzelkriterien hat sich eine offene unipolare Notenskala mit 10 Stufen (0 = untauglich, 10 = herausragend) als zweckmäßig erwiesen. Hier bietet sich auch die Möglichkeit, über mehrere Beurteilungskriterien oder auch Bewerter einen Mittelwert bilden zu können.

Um hierbei die Streuung der Ergebnisse einzuengen, sind an die Beurteiler hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer Urteilsfähigkeit zu stellen. Sie müssen ausreichend sachkundig sein, um die entsprechenden Eigenschaften beurteilen und unterscheiden zu können. Des Weiteren ist ein ausgezeichnetes Wahrnehmungsgedächtnis erforderlich, um alle Empfindungen bis zur Endbeurteilung präsent zu haben.

Wird die Bewertung durch eine Gruppe von Beurteilern durchgeführt, so besteht die Möglichkeit sog. „Ausreißer" (große Abweichungen vom Mittelwert) zu erkennen und zu eliminieren.

Die subjektive Fahreigenschaftsbeurteilung ist auch ein wesentlicher Bestandteil bei der Entwicklung objektiver Messverfahren zur Beschreibung der Fahreigenschaften. Erst durch Korrelationsbetrachtung von Subjektivurteilen und objektiv erfassten Daten (siehe ▶ Abschn. 7.5.2) können die aussagekräftigsten Mess-/Kenngrößen für o. g. Einzelkriterien identifiziert werden.

## 7.5.2 Objektive Fahreigenschaftsbeurteilung

Obwohl der Fahrer eines Kraftfahrzeugs die Fahreigenschaften stets gesamthaft subjektiv beurteilen wird, gewinnt die objektive Beurteilung immer mehr an Bedeutung. Im systematischen Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs sowie beim Vergleich verschiedener Fahrzeuge untereinander ist die Ermittlung objektiver Kenngrößen ein nicht mehr wegzudenkendes Werkzeug. Diese Kenngrößen bzw. auch Kennfunktionen lassen sich aus Messungen, die während der Fahrt mit einem realen Fahrzeug aufgenommen werden, oder auch – neuerdings immer häufiger – aus Simulationsergebnissen mit einem Fahrzeugmodell am Computer, bestimmen. Die zugehörigen Fahrmanöver sind weitestgehend definiert und vereinheitlicht und zum großen Teil auch in ISO/DIN-Normen beschrieben. Hauptsächlich handelt es sich hier um sogenannte „open-loop"-Testverfahren der Querdynamik. Vertikal-dynamische Verfahren sind bisher noch nicht so weit verbreitet bzw. vereinheitlicht. Die nachfolgenden Beschreibungen beziehen sich deshalb nur auf die querdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs.

„Open-loop"-Verfahren werden gewählt, um den Fahrereinfluss aus den Messergebnissen oder auch Rechenergebnissen möglichst herauszuhalten, d. h. bei den Fahrmanövern ist die Fahreraktivität darauf beschränkt, die Bedienelemente wie z. B. Lenkrad oder Gaspedal während der Messung möglichst konstant zu halten oder auch loszulassen. Eine umfassende Übersicht über die querdynamischen Testverfahren ist in [258] zu finden.

Grundlage für die Beurteilungen sind die Fahrzeugbewegungen im Koordinatensystem nach ◘ Abb. 7.198. Hauptsächlich werden gemessen und beurteilt:

- Längs- und Quergeschwindigkeit $\dot{x}$, $\dot{y}$, auch zur Bestimmung des Schwimmwinkels

$$\beta = \arctan\left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right),$$

- Längs- und Querbeschleunigung $\ddot{x}$, $\ddot{y}$,
- Gierwinkel und Giergeschwindigkeit $\psi$, $\dot{\psi}$,
- Wank- und Nickwinkel $\varphi$, $\theta$,

sowie die Betätigungsgrößen des Fahrers:

- Lenkradwinkel und Lenkmoment $\delta_H$, $M_H$,
- Gas- und Bremspedalwege, bzw. -kräfte,
- Bremsdruck.

Als Messaufnehmer für die Fahrzeugbewegungsgrößen (Beschleunigungen und Winkel) haben

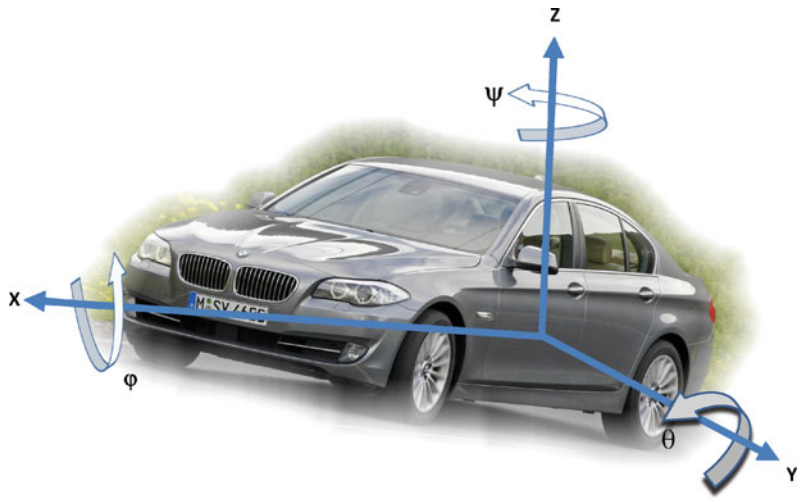



**Abb. 7.198** Fahrzeug im Koordinatensystem

sich kreiselstabilisierte Plattformen (oder ähnliche Messverfahren) und für die Geschwindigkeiten korrelationsoptische Sensoren bewährt. Die Kreiselstabilisierung ist notwendig um die Ursprungsebenen des Koordinatensystems erdfest festzuhalten und so die translatorischen Beschleunigungen des Fahrzeugs unabhängig von Nick- und Wankwinkeln messen zu können. Neuere Messgeräte (z. B. sog. VBoxen) nutzen die Ortung über Satelliten (GPS) und berechnen daraus Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Die Messung von Lenkraddrehwinkel und Lenkmoment erfolgt meist durch spezielle Messlenkräder, die anstelle des ursprünglichen Lenkrads montiert werden. Die Messdaten lassen sich über einen Messaufbau im Fahrzeug on-line verarbeiten. Neuere Testverfahren stellen immer höhere Anforderungen hinsichtlich genauer Lenkwinkeleingaben, z. T. auch abhängig von der Fahrzeugreaktion. Z. B. ist beim sogenannten „Fish-hook" Test (s. ▶ Abschn. 7.5.2.4) die Einleitung einer Lenkrichtungsumkehr abhängig vom Wankwinkel bzw. von der Wankwinkelgeschwindigkeit. Diese Tests können nur mit einer Lenkmaschine gefahren werden. Die Anordnung im Fahrzeug zeigt Abb. 7.199. Das Lenkrad wird ersetzt durch ein Messlenkrad mit Elektromotor und einer Abstützung für das Reaktionsmoment.

Zusätzlich gibt es eine Menge von Messeinrichtungen, die in der Fahrzeugentwicklung zur Beurteilung und Optimierung der einzelnen Ei-



**Abb. 7.199** Lenkmaschine im Fahrzeug zur genauen Vorgabe von Lenkwinkelfunktionen

genschaften, vor allem auch der Bauteilkomponenten, Anwendung finden. So ist z. B. zur Beurteilung der Fahrdynamik wichtig zu wissen, wie sich die einzelnen Räder am Fahrzeug hinsichtlich ihrer Vorspur- und Sturzeinstellung in den verschiedenen Fahrmanövern, z. B. beim Bremsen in der Kurve, verhalten. Eine Messeinrichtung für die Messung dieser Größen während der Fahrt zeigt Abb. 7.200. Laserstrahlen, deren Quellen radseitig befestigt sind, treffen auf karosseriefeste Empfänger, die die Radwinkeländerungen registrieren. Über die zeitgleiche Darstellung des Fahrzeugbewegungsablaufs können so wichtige achselastokinematische Funktionen analysiert und in ihren Auswirkungen



**Abb. 7.200** Einrichtung zur Messung von Vorspur und Sturz während der Fahrt

beurteilt werden. Alternativ zur Messung der Radstellung durch Laserstrahlen besteht auch die Möglichkeit Spur-, Sturz- und Radpositionsänderungen mit einem kamerabasierten optischen Verfahren aufzuzeichnen [279].

Eine Lösung zur synchronen Aufzeichnung nahezu aller fahrdynamischen Größen im fahrenden Fahrzeug ist in [278] beschrieben. Für die komplexen Messaufgaben kommen hier verschiedene Messsysteme zum Einsatz, die als kompakter Gesamtverbund vorgestellt werden.

### 7.5.2.1 Geradeausfahrt

Bei der Beurteilung der Geradeausfahrt ist zwischen zwei verschiedenen Randbedingungen zu unterscheiden:

a) die „ungestörte" Geradeausfahrt mit konstanter Geschwindigkeit, bei der nur Störungen durch die (auch vermeintlich ebene) Fahrbahn ins Fahrzeug eingeleitet werden und
b) die gestörte Geradeausfahrt, bei der Seitenwind-, Brems- und Antriebskräfte oder auch Kräfte aus einem mitgeführten Anhänger auf das Fahrzeug einwirken.

Zu a) gibt es nur wenig allgemein verbreitete Messverfahren. Zum einen sind die Fahrzeugbewegungsgrößen sehr klein und damit nur erschwert interpretierbar und zum anderen ist bei einer längeren Geradeausfahrt immer der Fahrereinfluss vorhanden, so dass eine eindeutige Fahrzeugbeurteilung nicht ohne weiteres möglich wird. Lösungsansätze sind hier in der Aufnahme von Lenkradwinkelspektren bei Fahrt auf einer bestimmten Straße, in der Zeitbetrachtung bis zum Verlassen eines Spurkanals bei festgehaltenem Lenkrad oder in der Ermittlung des „Giergeschwindigkeitsfehlers" zu finden. Nach [259] werden Giergeschwindigkeitsmessungen während der Geradeausfahrt aufgeteilt in einen Anteil, der aus den Lenkradwinkeln stammt (ermittelt aus einem „Einspurmodell") und einen Restanteil. Dieser Restanteil ist der sogenannte „Giergeschwindigkeitsfehler", der ein Maß für die Abweichung von der Geradeausfahrt ist. In [260] wird ein enger Zusammenhang zwischen dem Phasenverzug von Lenkeingabe zu Fahrzeugquerbeschleunigung und der Geradeauslaufgüte beschrieben. Fahrzeuge mit kleinen Phasenverzügen und damit schnellem Ansprechverhalten zeichnen sich durch gute Regeleigenschaften aus und werden dadurch auch im Geradeauslauf mit „gut" beurteilt. Zur Beurteilung des „Lenkgefühls" bei Geradeausfahrt eignet sich der „Weave Test" nach ISO 13674, Part 1, bei dem mit einer Lenkfrequenz von 0,2 Hz ein Sinuskurs gefahren wird und aus dem Verlauf des Lenkradmoments über dem Lenkradwinkel im Bereich der Lenkradmittelstellung auf die Lenkeigenschaften hinsichtlich Kurskorrigierbarkeit geschlossen werden kann. In ISO 13674, Part 2 wird der „Transition Test" beschrieben, bei dem aus der Geradeausfahrt bei langsamer Lenkwinkelzunahme die Fahrzeugreaktionen Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung in Abhängigkeit von Lenkwinkel und Lenkmoment aufgezeichnet werden.

Zu b) gibt es zahlreiche Testmanöver. Zum Beispiel wird die Seitenwindempfindlichkeit eines

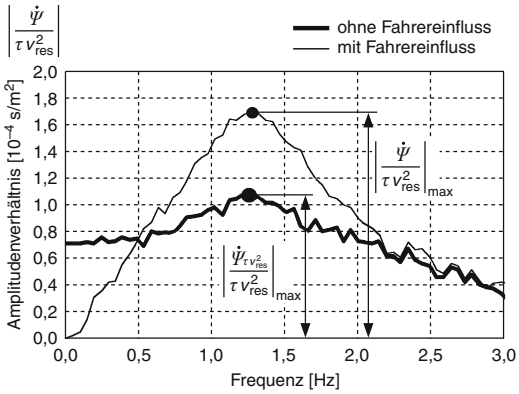



**Abb. 7.201** Fahrzeuggierreaktion (bezogen auf die Windstörung) bei Seitenwind mit und ohne Fahrereinfluss aus [269]

Fahrzeugs häufig an einer Seitenwindanlage beurteilt. Gebläse erzeugen dabei einen künstlichen Seitenwind von ca. 60–80 km/h, der meist rechtwinklig zur Fahrtrichtung wirkt. Die Gebläse haben meistens eine Gesamtlänge von 15–40 m. Als Beurteilungsgrößen werden hauptsächlich die während der Vorbeifahrt gemessenen Gierwinkel, Giergeschwindigkeiten und Querabweichungen herangezogen. Im Vergleich zum natürlichen Wind gibt es jedoch eine Reihe von Unzulänglichkeiten (Anströmwinkel, Böen), die zur Entwicklung von Messverfahren bei natürlichen Bedingungen führten. In [261] wird die Windstörung nach Stärke und Richtung mittels einer auf dem Fahrzeugdach montierten „Windfahne" gemessen und die auftretenden Fahrzeugreaktionen (Giergeschwindigkeit) dazu ins Verhältnis gesetzt. Die Untersuchung des Gesamtsystems Fahrer/Fahrzeug unter natürlichen Windbedingungen nach [269] kommt zu dem Ergebnis, dass ein Fahrer Windstörungen unter 0,5 Hz gut ausregeln kann und die Seitenwindreaktionen des Fahrzeugs dadurch geringer werden, Abb. 7.201. Zwischen 0,5 und 2,0 Hz verstärkt der Fahrer eher die Gierreaktionen und ab 2 Hz ist kein Fahrereinfluss mehr feststellbar, d. h. für die Beurteilung des Seitenwindverhaltens sind auch die Lenkeigenschaften des Fahrzeugs von großer Bedeutung.

Die Erfassung von instationären aerodynamischen Kräften am Fahrzeug unter böigem Seitenwind und beim Überholen von Lkw ist in [276] beschrieben. Die Kräfte werden aus Druckverläufen berechnet, die mit auf der Karosserieoberfläche verteilten Sensoren gemessen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass zur Beurteilung des Seitenwindverhaltens neben dem stationären Giermomentengradienten auch der instationäre Gradient betrachtet werden muss.

Versuche zur Beurteilung der Bremseigenschaften bei Geradeausfahrt beziehen sich in erster Linie auf die erzielten Bremswege (vergl. DIN 70028) und die Fahrtrichtungshaltung (auftretende Giergeschwindigkeit) auf unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen und -reibwerten. Zusätzlich wird bei diesen Versuchen und auch beim Beschleunigen der auftretende Nickwinkel gemessen, der ein Maß für die „Anti-Dive"- Eigenschaften des Fahrwerks ist. Gute Fahrwerke reagieren hier im Normalfall mit Nickwinkeln $\leq 1°$.

Bei Kombination des Pkw mit einem Anhänger kann es zu deutlichen Einbußen in der Fahrstabilität kommen. Mit dem Lenkwinkelimpulstest wird die Fahrstabilitätsgrenze ermittelt. Der Fahrzeugzug wird dazu aus ungestörter Geradeausfahrt zu Gierschwingungen mittels kurzem Lenkimpuls angeregt. Aus dem Verlauf der Differenz der Gierbewegungen zwischen Pkw und Anhänger – dem sogenannten Knickwinkel – lässt sich das Dämpfungsmaß bestimmen. Die Dämpfungsmaße bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten ergeben durch Inter- bzw. Extrapolation die Fahrgeschwindigkeit, bei der die Stabilitätsgrenze erreicht, die Dämpfung also 0 wird. Übliche Stabilitätsgrenzen für Pkw mit etwa gleichschweren Anhängern liegen je nach Anhängerbauart zwischen 80 und 140 km/h.

### 7.5.2.2 Kurvenverhalten

Zur Beurteilung des Kurvenverhaltens gibt es vor allem die Fahrmanöver:

- stationäre Kreisfahrt,
- Lastwechsel aus stationärer Kreisfahrt,
- Bremsen, Beschleunigen in der Kurve,
- Aquaplaning.

Bei der stationären Kreisfahrt wird das Fahrzeug zur Erreichung konstanter Querbeschleunigungen entweder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf einer Kreisbahn mit gleichbleibendem Radius gefahren oder mit konstanter Geschwindig-

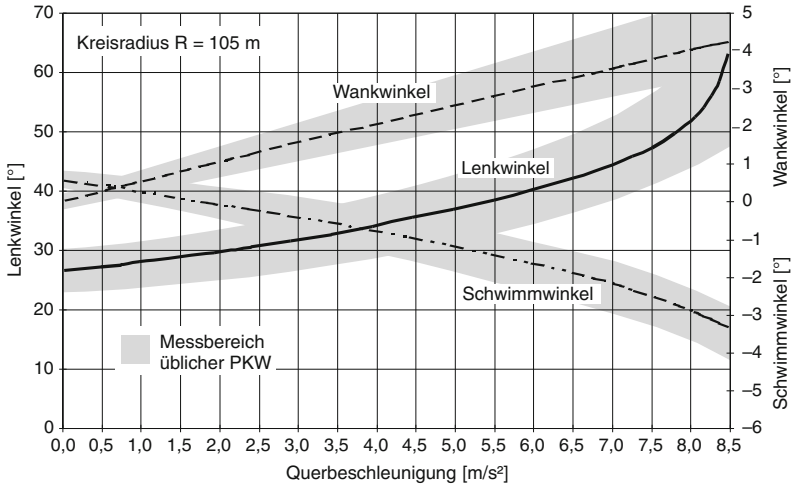



**Abb. 7.202** Lenk-, Schwimm- und Wankwinkelverlauf in Abhängigkeit der Querbeschleunigung bei stationärer Kreisfahrt mit einem Radius von 105 m

keit auf unterschiedlichen Kreisradien. Die Messergebnisse werden üblicherweise über der Querbeschleunigung, s. Abb. 7.202, aufgetragen. Der Lenkwinkelverlauf ist ein Maß für das Eigenlenkverhalten. Die Zunahme mit der Querbeschleunigung ist typisch für ein untersteuerndes Fahrzeug; der Grenzbereich (üblicherweise Querbeschleunigung ab 7 $m/s^2$) wird dem Fahrer durch eine starke Zunahme des Lenkwinkels (und meistens auch Abnahme des Lenkmoments, hier nicht dargestellt) angekündigt. Schwimm- und Wankwinkelverlauf sind ein Komfort- und Sicherheitsmaß und entsprechen in diesem Beispiel den Anforderungen eines modernen Pkw's.

Die Lastwechselreaktion bei Kurvenfahrt wird gemessen, indem bei stat. Fahrt auf einem bestimmten Kreisradius plötzlich das Gaspedal losgelassen wird. Am Fahrzeug stellt sich aufgrund des Motorbrems-moments eine Verzögerung ein, die durch Achslastverlagerungen und auch achselastokinematischen Änderungen eine Kursabweichung zur Folge hat. Die Größe dieser Kursabweichung wird beurteilt anhand der gemessenen Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung. Zur kompakten Darstellung und unter Berücksichtigung der menschlichen Reaktionszeit haben sich hier die 1-Sekundenwerte bewährt, d. h. es wird die Änderung der Fahrzeugbewegungsgröße 1 s nach Ereignisbeginn (hier das Loslassen des Gaspedals) betrachtet. Ein Ergebnisbeispiel dazu zeigt Abb. 7.203. Die Änderung der Giergeschwindigkeit nach 1 s ist über der Ausgangsquerbeschleunigung aufgetragen. Bei niedrigen Ausgangsquerbeschleunigungen ist fast keine Kursabweichung feststellbar; die Giergeschwindigkeitsänderung ist geringfügig negativ aufgrund des langsamer werdenden Fahrzeug. Erst bei höheren Querbeschleunigungen ist eine Zunahme der Giergeschwindigkeit feststellbar, d. h. das Fahrzeug dreht in die Kurve hinein.

Das Bremsen und Beschleunigen während der Kurvenfahrt wird in einem ähnlichen Fahrmanöver beurteilt. Zusätzlich wird nach der Freigabe des Gaspedals die Bremse mit unterschiedlichem Druck betätigt bzw. das Gaspedal weiter betätigt um verschiedene Abbremsungen bzw. Beschleunigungen zu erzielen. Die Darstellung der 1-Sekundewerte erfolgt ähnlich wie beim Lastwechselversuch, die Längsverzögerung erscheint als zusätzliche Variable.

Ein sehr spezielles Fahrmanöver ist die Untersuchung des Aquaplaningverhaltens. Es ist dazu eine Kreisteststrecke notwendig, die segmentweise bewässerbar ist. Das Fahrzeug wird bei verschiedenen Geschwindigkeiten und damit auch verschiedenen Querbeschleunigungen mit festgehaltenem Lenkrad und konstanter Drosselklappen-

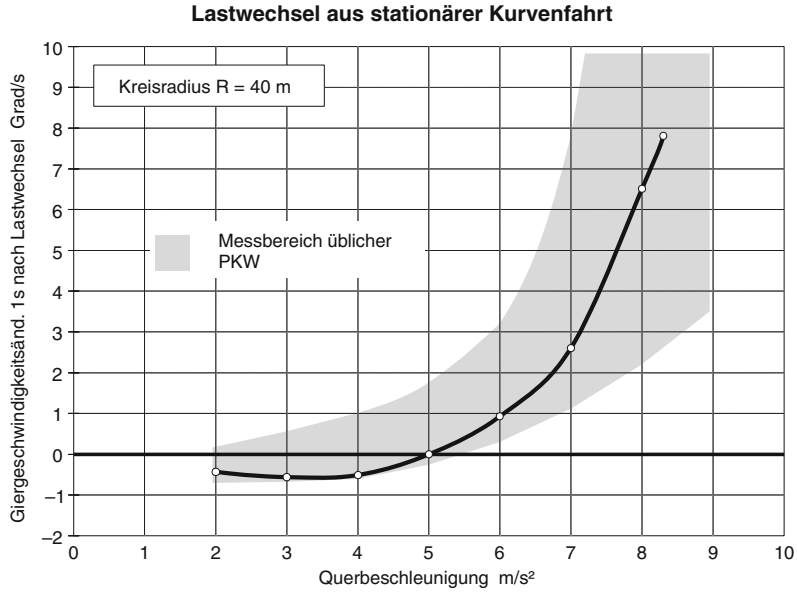



**Abb. 7.203** 1-Sekundenwerte der Giergeschwindigkeitsänderung beim Lastwechsel aus stationärer Kreisfahrt mit einem Radius von 40 m

stellung durch das Segment gefahren. Die Änderungen von Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung sind wiederum ein Maß für die Kursabweichung.

### 7.5.2.3 Übergangsverhalten

Das Übergangsverhalten beschreibt die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs, die beim Übergang von der Geradeausfahrt in eine Kurve bzw. beim plötzlichen Kurswechsel in Erscheinung treten. Der Lenkwinkelsprung ist hier ein typisches Beurteilungsverfahren. Aus der Geradeausstellung wird das Lenkrad schnell um einen bestimmten Winkel verdreht und anschließend festgehalten. Die Fahrzeugantwort, hauptsächlich gemessen in Giergeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Schwimmwinkel ist ein Maß für die Schnelligkeit des Ansprechens, die Fahrstabilität unter diesen Bedingungen und die „Direktheit" der Lenkung. Bei einem großen Zeitverzug zwischen Lenkeingabe und Anstieg der Giergeschwindigkeit wirkt das Fahrzeug träge und kurvenunwillig. Sind beim Übergang auf die stationären Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungswerte große Amplituden und lange Einschwingzeiten zu beobachten, ist die Stabilität beeinträchtigt. Der „Verstärkungsfaktor" des Fahrzeugs ist das Verhältnis aus Giergeschwindigkeit zu Lenkradwinkel und beschreibt, wieviel Lenkwinkel der Fahrer für eine bestimmte Gierreaktion des Fahrzeugs aufbringen muss. Eine sehr direkte Lenkung zeichnet sich danach durch einen großen Verstärkungsfaktor aus.

Weitere „open-loop"-Verfahren sind durch andere Eingabeformen des Lenkwinkels gekennzeichnet. Man unterscheidet eine Einzel-, Dauersinus-, Dreieckimpuls- und regellose Lenkwinkeleingabe (vergl. ISO 7401). Beim Einzelsinus werden ähnlich wie beim Lenkwinkelsprung die Verzögerungszeiten zwischen Lenkeingabe und Fahrzeugreaktion (Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung) beurteilt, bei den anderen Verfahren findet eine Auswertung der Fahrzeugbewegungsgrößen im Frequenzbereich statt. Üblicherweise werden Frequenzen bis 4 Hz ausgewertet. Die Verstärkungsfunktionen für Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung sowie die zugehörigen Phasengänge geben Aufschluss über die querdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs. Möglichst bis zu einer Frequenz von 2 Hz gleichbleibende Verstärkungen und geringe Phasenverzüge sind

Kriterien für ein harmonisches Fahrverhalten im Übergangsbereich. Eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse in einem Diagramm nach Weir DiMarco [270] lässt den Zusammenhang zwischen Gierverstärkung und Zeitverzug zwischen Fahrzeugeingabe und Fahrzeugreaktion erkennen. Die Gierverstärkung ist dabei das Verhältnis zwischen Giergeschwindigkeit und Lenkwinkel im stationären Zustand. Der Zeitverzug ist der Kehrwert der Frequenz bei der die Phasennacheilung gerade 45° beträgt.

Auch „closed-loop"-Verfahren finden hier Anwendung. Der Fahrer hat die Aufgabe, bestimmte Kurse möglichst schnell zu durchfahren. Am bekanntesten ist der doppelte Fahrspurwechsel nach ISO 3888 (nur genormte Spurgasse, die Durchführung selbst ist zu sehr fahrerabhängig und deshalb nicht als Norm geeignet). Geübte Fahrer durchfahren die ISO-Gasse mit modernen Pkw mit ca. 120–140 km/h (und mehr). Daneben gibt es noch zahlreiche Slalomtests. Die Pylonenabstände betragen meist 18, 30 oder 36 m. Als objektive Beurteilungsgrößen dienen die gemessene Durchfahrtzeit und die während der Fahrt aufgezeichneten Fahrzeugbewegungsgrößen. Bei Betrachtung der Slalomtests ist darauf zu achten, dass das Ergebnis wesentlich von dem Zusammenspiel des Pylonenabstandes mit dem Radstand, der Länge und der Giereigenfrequenz des Fahrzeuges abhängig ist.

Eine umfassende Untersuchung zum Zusammenhang verschiedener objektiver Kennwerte aus den Tests zum Übergangsverhalten mit dem menschlichen Wahrnehmungsempfinden und der Gefallensbeurteilung ist in [266] beschrieben. Mit einem Versuchsfahrzeug mit mechatronischem Vorder- und Hinterachslenksystem konnten Gier- und Querbeschleunigungsaufbau, sowie Direktheit, zeitliche Verzögerung und auch das Lenkmoment weitgehend unabhängig voneinander variiert und von den Probanden zeitnah beurteilt werden. Relativ gute Korrelationen zum Subjektivempfinden lassen sich durch Kombination von objektiven Kennwerten erzielen, z. B. der Direktheit und dem Zeitverzug. Bei der Einbeziehung der Regelkreisgrößen, z. B. im ISO-Spurwechsel, stellt sich heraus, dass die Ausprägung des Lenkmoments eine wesentliche Rolle bei der Fahrzeugbeurteilung spielt.

Im Jahre 1997 ist der „Elchtest" als Prüfung für die Kippstabilität sehr populär geworden. Aufgrund der sehr breiten Fahrgasse ist hier jedoch ein sehr großer Fahrereinflusss festzustellen, so dass der Test als objektives und reproduzierbares Beurteilungsverfahren keine Anerkennung gefunden hat. Eine zum Verband der Deutschen Automobilindustrie gehörende Expertenkommission hat den Elchtest überarbeitet und die Gassenbreite (abhängig von der Fahrzeugbreite) soweit eingeschränkt, dass der Fahrereinfluss möglichst klein gehalten wird [262]. Zudem gibt es eine eindeutige Definition zur Gaspedalbetätigung. Der „VDA"-Test wird ab 10 m vor Ende der ersten Gasse im Schubbetrieb gefahren. Diese Fahrsituation soll dem realen Geschehen näherkommen, bei dem der Fahrer in einer Notsituation wohl das Gaspedal freigeben wird. Ähnlich wie die Gasse des doppelten Spurwechsels ist auch die VDA-Gasse in der ISO 3888, Teil 2, beschrieben.

### 7.5.2.4 Weitere Testverfahren

Im Rahmen der Aktivitäten von Behörden und Verbraucherschutzorganisationen zur Entwicklung von Beurteilungsverfahren zur Aktiven Sicherheit sind einige sehr spezielle Testmanöver entstanden bzw. in der Diskussion, die durch genau beschriebene Randbedingungen möglichst reproduzierbar und revisionssicher gestaltet werden sollen. Zum Beispiel wurde von der amerikanischen Behörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) der „Fish-hook" Test zur Bewertung der Kippsicherheit eines Fahrzeugs eingeführt [267]. Über eine Lenkmaschine wird eine Lenkwinkeleingabe nach ◘ Abb. 7.204 vorgegeben. Das „Gegenlenken" findet dabei genau zu dem Zeitpunkt statt, wenn der Wankwinkel sein Maximum erreicht hat. Dadurch soll möglichst der „worst case" getestet werden. Als Bewertungskriterium für „Kippen" gilt das gleichzeitige Abheben von 2 Rädern um mindestens 50 mm von der Fahrbahn. Die Fahrgeschwindigkeit wird ausgehend von ca. 50 km/h bis auf 80 km/h stufenweise gesteigert, wenn kein „Kippen" festgestellt wird. Im Fall des „Kippens" wird der Test beendet. Ähnlich kipp-kritische Manöver und Zusammenhänge sind auch in [272] beschrieben.

Zum Nachweis der Wirksamkeit von Fahrzeugstabilisierungssystemen (ESP, DSC, ESC im Ame-

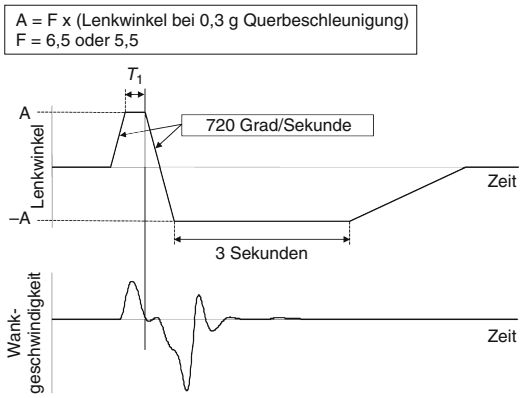



**Abb. 7.204** Lenkwinkeleingabe in Abhängigkeit der Wankbewegung beim Fish-hook Test

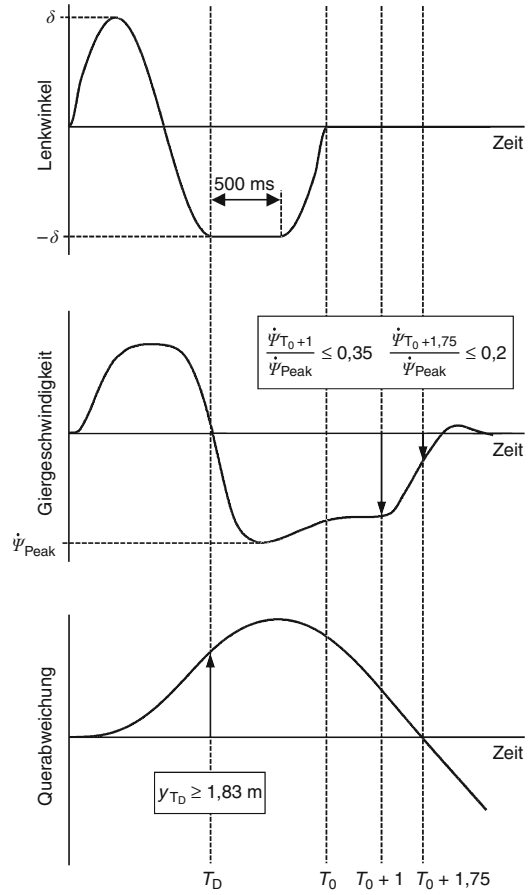



**Abb. 7.205** ESC-Nachweistest, Zeitverläufe von Lenkradwinkeleingabe und Fahrzeugantwort (Giergeschwindigkeit und Querabweichung)

rikanischen) wurde von der NHTSA in den USA der „sine with dwell"-Test vorgeschrieben [268]. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h wird nach Freigabe des Gaspedals ein sinusförmiger Lenkradwinkel mit einer Haltezeit von 500 ms in der zweiten Halbwelle aufgebracht und die Fahrzeugantwort über Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung gemessen, Abb. 7.205. Für die exakte Eingabe des Lenkradwinkels ist wie beim Fish-hook-Test eine Lenkmaschine notwendig. Die Amplitude des Lenkradwinkels wird stufenweise gesteigert bis zu einem max. Wert von 270°. Bewertet wird die Stabilität und das Ausweichvermögen (Responsiveness) des Fahrzeugs. Die Stabilität gilt als erfüllt, wenn die Giergeschwindigkeit 1 s, bzw. 1,75 s nach Beendigung des Lenkmanövers unter 35 bzw. 20 % ihres Maximalwertes gesunken ist, s. Abb. 7.205. Das Ausweichvermögen wird anhand des Querweges, integriert aus der gemessenen Querbeschleunigung, beurteilt. Hier ist ein Mindestweg von 1,83 m zu Beginn der Haltezeit des Lenkradwinkels notwendig.

Inzwischen wurde der ESC-Nachweistest auch in die Richtlinie ECE-13H [274] übernommen.

### 7.5.2.5 Ausblick

Wie beschrieben, gibt es schon eine Reihe von objektiven Testverfahren. Sie erlauben allerdings nur Aussagen über spezielle Fahreigenschaften in „künstlichen" Fahrsituationen unter genau definierten Randbedingungen. Eine Beurteilung der Gesamtfahreigenschaften ist mit diesen bisher nur beschränkt gültigen Ergebnissen nicht möglich. Es müssen vielmehr noch weitere Verfahren entwickelt werden, die zum einen auch die Vertikaldynamik mit einbeziehen und zum anderen auch den Fahrer bzw. die Fähigkeiten des Menschen als Regler berücksichtigen.

Um hier herauszufinden, welche physikalische Bewegungsgröße im Fahrbetrieb vom Menschen wahrgenommen und in ihrer Intensität als mehr weniger gut bzw. schlecht empfunden wird, wurden bereits einige Forschungsarbeiten durchgeführt. Dabei wurde stets versucht, eine möglichst gute Korrelation zwischen Fahrer-

urteilen und gemessenen Größen bei bestimmten Fahrmanövern zu finden. In einer umfassenden Studie [263], (FAT/BAST) in der zahlreiche Normal- und Testfahrer die ISO-Spurwechselgasse und einen Landstraßenkurs befuhren, wird berichtet, dass der Zeitverzug zwischen Lenkwinkeleingabe und Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsaufbau und die Größe des Schwimmwinkels wesentlich das Fahrerurteil prägen.

Der hier, wie bisher üblich, verwendete korrelative Ansatz wird in [264] kritisch hinterfragt und gerade wegen der immer geringer werdenden Unterschiede zwischen modernen Fahrzeugvarianten – zumindest im üblichen Fahrbetrieb – nicht mehr ohne weiteres als zielführendes Werkzeug angesehen. Eine verbesserte Methode wird in einem handlungsorientierten Ansatz gesehen [265], bei dem der Frage nach der Beanspruchung des Fahrers durch fahrdynamische Zustände nachgegangen wird. Die Fahrerhandlung im geschlossenen Regelkreis rückt hier also mehr in den Mittelpunkt. In individuell vorgegebenen Beanspruchungsstufen sollen die fahrdynamisch relevanten Bedienhandlungen der Fahrer analysiert werden und vor allem auch die Fahr- und Handlungsfehler betrachtet werden. In [271] wird diesen Anforderungen weitgehend entsprochen und über Fahrsimulatorversuche eine gute Korrelation zwischen Fahrerkriterien (Vorausschauzeit, Schnittfrequenzen, usw.) und Subjektivurteilen gefunden. Die Fahrerkriterien werden ähnlich wie auch in [269] aus dem gesamten Regelkreis Fahrer/Fahrzeug ermittelt. Eine weitere Studie der FAT/BAST [273] untersucht die Auswirkungen von Vertikaldynamik-Störungen auf den Regelkreis Fahrer/Fahrzeug und kommt zu dem Ergebnis, dass hauptsächlich Gier- und Wankbewegungen in die Störungsbewertung eingehen. Eine ganz wesentliche Größe des Regelkreises, das Lenkmoment, wird in [275] hinsichtlich Wahrnehmung und Auswirkungen auf die Fahrerreaktionen näher untersucht. Dabei zeigte sich, dass hier starke Abhängigkeiten von der jeweiligen Fahrsituation feststellbar und zu beachten sind.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sind die Zusammenhänge der menschlichen Wahrnehmung, der menschlichen Urteilsfindung und der objektiven fahrdynamischen Größen zukünftig noch intensiver zu untersuchen. So wird es möglich werden, grundsätzlich einen großen Bereich der Fahreigenschaften objektiv zu beschreiben und damit die systematischem Methoden in der Fahrwerksentwicklung stetig zu verbessern und den Erfordernissen nach immer mehr Fortschritt anzupassen. Nach heutigem Kenntnisstand wird letztendlich jedoch stets das Subjektivurteil über die Gesamtfahreigenschaften eines Fahrzeugs entscheiden.

Diese Zusammenhänge sind auch bei den z. Zt. laufenden Vorbereitungen eines EuroNCAP (New Car Assessment Programe) zur Aktiven (unfallvorbeugenden) Sicherheit zu beachten. Mögliche, reproduzierbare Testmanöver auf trockenen Fahrbahnen, z. B. Bremsen in der Kurve, Bremsweg geradeaus, usw., sind reine open-loop Manöver bei denen nicht festgestellt werden kann, wie gut ein Fahrer zur Vermeidung eines Unfalls mit dem Fahrzeug harmoniert bzw. schon in früher Phase durch Fahrzeug- oder Lenkmomentreaktionen einen kritischen Fahrzustand wahrnehmen und ausregeln kann. Das EuroNCAP kann deshalb nur einen Teilaspekt der Unfallvorbeugung bewerten.

## Literatur

**Literatur zu Abschn. 7.1**

1. National Highway Traffic Safety Administration: A Demonstration of the Dynamic Test Developed NHTSA's NCAP Rollover Rating System; DOT HS 809 705 August 2004
2. Wierwille, W.W., Gutmann, J.C., Hicks, T.G., Muto, W.H.: Secondary task measurement of work load as a function of simulated vehicle dynamics and driving conditions. Human Factors 557–575 (1977)
3. Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Fahrverhalten, Bd. C. Springer, Heidelberg (2004)
4. Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Vogel Fachbuch, München (1987)
5. Pauly, A.: Dynamique transitoire, contribution à l'étude du comportement de guidage non stationnaire. Vortrag S.I.A., Ecole Centrale de Lyon (1979)
6. Fleck, R.: Aktivlenkung – ein wichtiger erster Schritt zum Steer-by-Wire. HdT-Tagung Pkw-Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen, Essen, April 2003
7. Furukawa, Y., Abe, M.: Advanced chassis control systems for vehicle handling and active safety. Veh. Syst. Dyn. **28**, 59–86 (1997)
8. Greger, M.: Auswirkung einer variablen Momentenverteilung auf die Fahrdynamik. Dissertation, TU München (2006)

9. van Zanten, AT., Erhardt, R., Pfaff, G.: Die Fahrdynamikregelung von Bosch. at – Automatisierungstechnik **44**(7) (1996)
10. Birch, S.: New stability from the Porsche stable. Automot. Eng. Int. Februar 1999, 16 (1999)
11. Pauly, A.: Active Front Steering – ein wichtiger Baustein von Drive by Wire. VDI Arbeitskreis Fahrzeug- und Verkehrstechnik, UniBw Hamburg, 06. Dezember 2001
12. Leffler, H., Ayoubi, M.: ECM – Elektronisches Chassis Management; Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren – AUTOREG 2002. VDI-Bericht 1672, Mannheim, April 2002
13. Ammon, D.: CO2-mindernde Fahrwerk- und Fahrdynamiksysteme. ATZ **10**, 770–775 (2010)

7

**Literatur zu Abschn. 7.2**

14. Breuer, B., Bill, K.: Bremsenhandbuch, 4. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden (2012)
15. Strien, H.: Auslegung und Berechnung von Pkw-Bremsanlagen. Selbstverlag Alfred Teves GmbH, Frankfurt/Main
16. Trutschel, R.: Analytische und experimentelle Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von Pkw Bremsanlagen. Universitätsverlag, Ilmenau (2007)
17. Oehl, K.-H., Paul, H.-G.: Bremsbeläge für Straßenfahrzeuge. Bibliothek der Technik. Bd. 49 Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (1990)
18. Brecht, J.: Materialeigenschaften von Reibwerkstoffen. 23. Internationales $\mu$-Symposium, Bad Neuenahr, 24./25. Oktober 2003
19. Fennel, H., Gies, P., Sticher, T.: Strategien zur Software-Entwicklung für Kfz-Regelsysteme. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **1** (2002)
20. Rieth, P.: Elektronisches Stabilitätsprogramm. Die Bremse, die lenkt. Bibliothek der Technik, Bd. 223. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech (2001)
21. Fennel, H.: ABS plus und ESP – Ein Konzept zur Beherrschung der Fahrdynamik. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **4** (1998)
22. Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
23. Weisse, J.: Gibt es Verbesserungspotenzial für den Bremsassistenten? 23. Internationales $\mu$-Symposium, Bad Neuenahr, 24./25. Oktober 2003
24. Fennel, H.: Technology solutions to vehicle rollovers. An integrated strategy for active and passive rollover protection. Vortrag, SAE Government/Industry Meeting, Washington, 13.–15. Mai 2002
25. v. Albrichsfeld, C., Eckert, A.: EHB als technologischer Motor für die Weiterentwicklung der hydraulischen Bremse. Fachtagung Hydraulik im Kraftfahrzeug, Haus der Technik, Essen, 2003
26. Schmittner, B., Rieth, P.: Das Hybrid-Bremssystem – Die Markteinführung der elektromechanischen Bremse EMB. brems.tech 2004, München, 9./10. Dezember 2004
27. Rieth, P., Remfrey, J.: APIA – the way to the accident and injury preventing vehicle, crash.tech 2005, Nuremberg, 10 Mai 2005
28. Semmler, S., Rieth, P.: Global Chassis Control – Das vernetzte Fahrwerk. 13. Aachener Kolloquium „Fahrzeug- und Motorentechnik“, 04.–06. Oktober 2004
29. Huinink, H., Rieth, P., Becker, A.: Maßnahmen zur Verkürzung des Anhaltewegs in Notbremssituationen – Das „30 m Auto“. VDA Technischer Kongress 2001, Bad Homburg, 26.–27. März 2001
30. Kelling, E., Remfrey, J., Rieth, P., Semmler, S.: Integrationstrends in der Fahrzeugelektronik am Beispiel Global Chassis Control. 7. Symposium zum Thema AAET, Braunschweig, 23. Februar 2006
31. Schumann, M.: Analysenmethode zur Beurteilung des ungleichförmigen Bremsscheibenverschleißes an Pkw-Scheibenbremsen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12, Nr. 635. VDI Verlag, Düsseldorf
32. Dausend, U.: Potenzial der Selbstverstärkung und einer nicht konstanten Getriebekennung zur Verminderung der Leistungs- und Energieaufnahme einer elektromechanischen Radbremse. VDI Verlag, Düsseldorf (2006). Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 621
33. Rieth, P., Remfrey, J.: Skalierbar und kostenattraktiv – Anforderungen eines durchgängigen Sicherheitskonzepts. VDA Technischer Kongress 2009, Wolfsburg, 25./26. März 2009
34. Continental: Dynamischer und effizienter Bremsen durch Integration. Pressemitteilung. 30. September 2011
35. Sendler, J.: Untersuchungen zur ergonomiegerechten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstellen von aktuellen Pkw-Bremsanlagen. Universitätsverlag, Ilmenau (2012)
36. Koch, D.: Entwicklung von Leichtbau-Bremskomponenten; VDI-Konferenz „Innovative Bremstechnik 2014, Frankfurt/Main“

**Literatur zu Abschn. 7.3**

37. Amtsblatt der Europäischen Union, VERORDNUNG (EG) Nr. 661/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit vom 13. Juli 2009
38. Amtsblatt der Europäischen Union, VERORDNUNG Nr. 1222/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter vom 25. November 2009
39. Andre, F.: OPC Michelin Fahrwerksystem. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2002
40. N.N.: Drucklose Reifen-Felgen-Kombination. ATZ, März 2005, 182 (2005)

41. N.N.: Weniger Rollwiderstand durch Einsatz von Organosilanen. ATZ, Juni 2008, 532 (2008)
42. Bachmann, T.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Bd. 286, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12. VDI Verlag
43. Becherer, T., Oehler, R., Raste, T.: Der Seitenwandtorsions-Sensor SWT. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **11** (2000)
44. Becker, A., Seifert, B.: Simulation von Abrieb und von Reifenkennwerten für Handling mit einem stationär rollenden FE-Reifenmodell. 6. Fachtagung Reifen Fahrwerk Fahrbahn. VDI-Berichte 1350 (1997)
45. Becker, A., Dorsch, V., Kaliske, M., Rothert, H.: A material model for simulating the hysteretic behavior of filled rubber for rolling tires. Tire Sci. Technol. **26**(3) (1998)
46. Böhm, F., Willumeit, H.-P.: Proceedings of the 2nd International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis, University of. Swets & Zeitlinger Publishers, Berlin (1997)
47. Bungart, T., Huinink, H.: Alles über Reifen. ReifenMagazin **2**/03, **3**/03, **4**/03, **5**/03, **1**/04, (2003/2004)
48. Clark, S.K.: Mechanics of Pneumatic Tires, DOT HS 805 952. U.S. Department of Transportation National Traffic Safety, Washington, D.C. (August 1981)
49. Eichhorn, U.: Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einfluss und Erkennung. Dissertation, TH Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 222. VDI-Verlag, Düsseldorf (1994)
50. Eichler, M.: A ride comfort tyre model for vibration analysis in full vehicle simulation. Veh. Syst. Dyn. Supplement **27**, 109–122 (1997)
51. Ernst, G.K.: Nassgriff: Daueraufträg für die Reifenentwicklung. Tagungsband HDT, Essen, November 1994
52. ETRTO, Standard Manual, Brüssel
53. ETRTO, Engineering Design Information, Brüssel
54. Fach, M.: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn. Dissertation, TU Darmstadt (1999). Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 411. VDI-Verlag, Düsseldorf (2000)
55. Fischer, M., Ehlich, J., Schröder, C., Peda, K., Wies, B.: Virtuell basierter Entwicklungsprozess für UHP Reifen mittels Target Setting für ein exzellentes Fahrerlebnis. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2010
56. Fischlein, H., Gnadler, R., Unrau, H.J.: Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenstruktur auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **10** (2001)
57. Freitag, D.: Reifen/Fahrbahn-Geräusch, Rollwiderstands-, Verschleiß- und Nassgriff-Eigenschaften von Reifen. VDA 11. Technical Congress 2009
58. Gabler, A., Straube, E., Heinrich, G.: Korrelationen des Nassrutschverhaltens gefüllter Vulkanisate mit ihren viskoelastischen Eigenschaften. Kautschuk Gummi Kunststoffe **46** (1993)
59. Giessler, M., Gauterin, F., Wiese, K., Wies, B.: Influence of friction heat on tire traction on ice and snow. Tire Sci. Technol. TSTCA **38**, 1 (2010)
60. Giessler, M., Gauterin, F., Hartmann, B., Wies, B.: Influencing parameters on force transmission of tires on snow tracks. VDI-Berichte, Bd. 2014. VDI (2007)
61. Gipser, M.: FTire software: Advances in modelization and data supply. 25th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, 2006
62. Gnadler, R., Huinink, H., Frey, M., Mundl, R., Sommer, J., Unrau, H.-J., Wies, B.: Kraftschlussmessungen auf Schnee mit dem Reifen-Innentrommelprüfstand. ATZ **3**, 198–207 (2005)
63. Görlich, M., Volk, H., Strzelczyk, M., Wies, B.: Ein Reifenkonzept für geringe $CO_2$-Emissionen und Elektrofahrzeuge. VDI-Tagung „Reifen – Fahrwerk – Fahrbahn" 2011
64. Goertz, H., Hüsemann, T.: Der intelligente Reifen – Ein Ansatz zum unfallfreien Verkehr. tyre.wheel.tech, München (2004)
65. Haken, K.-L., Essers, U., Wohanka, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluss der Reifenbreite und -querschnittsform auf die Reifeneigenschaften und ihre Berücksichtigung bei der Fahrwerksauslegung, VDI-Tagung „Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn", Hannover, 1993
66. Heinrich, G.: The dynamics of tire tread compound and their relationship to wet skid behaviour. Prog. Colloid Polym. Sci. **90**, 16–26 (1992)
67. Heinrich, G., Schramm, J., Klüppel, M., Müller, A., Kendziorra, N., Kelbch, S.: Zum Einfluss der Straßenoberflächen auf das Bremsverhalten von PKW-Reifen. VDI-Tagung „Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn", Hannover, 2003
68. Hilscher, C.: Komfortrelevante Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Reifen in Messung und Simulation. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2010
69. Holtschulze, J.: Analyse der Reifenverformungen für eine Identifikation des Reibwerts und weiterer Betriebsgrößen zur Unterstützung von Fahrdynamikregelsystemen. Schriftenreihe Automobiltechnik. ika RWTH, Aachen (2006)
70. Huinink, H., Schröder, C.: Dynamische Interaktion Bremse – Reifen – Straße. XVIII. Internationales $\mu$-Symposium Bremsen-Fachtagung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Bd. 373. VDI-Verlag, Düsseldorf (1999)
71. Hüsemann, T., Goertz, H.: Bestimmung der Reibwerte zwischen Reifen und Fahrbahn – Ein methodischer Ansatz. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006
72. Kaliske, M., Rothert, H.: Internal material friction of rubber modelled by multiplicative elasto-plastic approach. Proceedings of the 4th International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, 1995
73. Kendziorra, N., Härtel, V.: Einsichten in die Dynamik des Reifen/ Fahrbahn-Kontaktes und deren Bedeutung für

geregelte Bremsvorgänge. VDI-Tagung „Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn", Hannover, 2003
74. Kluge, St., Volk, H.: Der intelligente Reifen – Neue Trends und Entwicklungen. 4. Darmstädter Reifenkolloquium, 2002
75. Kötz, C., Strübel, C.: Reifenrollwiderstandsoptimierung im Zielkonflikt zu sicherheitsrelevanten Reifeneigenschaften. VDA 10. Technical Congress 2008
76. Leister, G.: Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
77. Lion, A., Espenau, Kardelky, C.: Representation of the thermomechanical behaviour of reinforced rubber in continuum mechanics. Int. Rubber Conference, Nürnberg, 2003
78. Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Antrieb und Bremsung, 3. Aufl., Bd. A. Springer, Berlin (1995)
79. Normann, N.: Reifendruck-Kontrollsystem für alle Fahrzeugklassen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (2000)
80. Ozawa, Y., Endo, N., Kondo, H., Shimizu, T., Morita, K.: Recent developments in tire elastomers. Int. Rubber Conference, Nürnberg, 2003
81. Pacejka, H.B., Besselink, I.J.M.: Magic formula tyre model with transient properties, S. 234–249. Swets & Zeitlinger, Lisse, the Netherlands (1997)
82. Reimpell, J.: Fahrwerktechnik, Reifen und Räder. Vogel, München (1982)
83. Rhyne, T.B., Cron, S.M.: Development of a non-pneumatic wheel. Tire Sci. Technol. (2006)
84. Ripka, S., Lind, H., Wangenheim, M., Wallaschek, J., Wiese, K., Wies, B.: Investigation of friction mechanisms of siped tire tread blocks on snowy and icy surfaces. Tire Sci. Technol. **40**(1) (2012)
85. Scaltritti, D., Matrascia, G., Danesin, D., Girardin, C.: A new methodology for indoor and out-door tyre testing. tyre.wheel.tech, München, 2004
86. Schröder, C., Chung, S.: Influence of tire characteristic properties on the vehicle lateral transient response. 8th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, Akron, Ohio, March, 1994
87. Schulze, T., Bolz, G., Strübel, C., Wies, B.: Reifen im Zielkonflikt von Rollwiderstand und Nassgriff. ATZ 516–523 (2010)
88. Tomka, G.J., Eaton, S., Milne, J., Hall, W., Jones, P., Mottram, J.T.: Foresight vehicle: Smarter tires using advanced sensors for improved safety. SAE 2002-01-1871 (2002)
89. Wallentowitz, H.: Fahrwerkstechnologie im nächsten Jahrtausend. Tag des Fahrwerks am 5. Oktober 1998 im Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika)
90. Wang, Y.Q., Gnadler, R., Schieschke, R.: Einlaufverhalten von Automobilreifen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (1994)
91. Weber, R.: Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf. Habilitationsschrift, Universität Karlsruhe, Fakultät Maschinenbau (1981)
92. Wiese, K., Kessel, T., Mundl, R., Wies, B.: An analytical thermodynamic approach to friction of rubber on ice. Tire Sci. Technol. **40**(2) (2012)
93. Zegelaar, P.W.A.: The dynamic response of tires to brake torque variations and road unevennesses. Dissertation, Delft University (1998)
94. Arbeitskreis Räder (Audi, BMW, Mercedes Benz, Porsche, VW): AK-Lastenheft-LH08 4.42
95. Bönning, M., Michelin: Konzepte zur Optimierung von Pkw Rädern. Rad.Tech (2002)
96. Deutscher Automobil Veteranen Club e.V.: Kulturhistorische Reminiscenzen – Am Anfang war das Rad
97. ETRTO Standard Manual 2006
98. Quinkertz R.: Optimierung der Energienutzung bei der Aluminiumherstellung. Dissertation, (Mai 2002)
99. Reimpell, J.: Fahrwerktechnik Reifen und Räder. Vogel, München (1986)
100. TÜV: Richtlinie für die Prüfung von Sonderrädern an Kraftfahrzeugen, Krafträdern und Anhängern v. 14.12.1995
101. WVM – WirtschaftVereinigung Metalle: Artikel Aluminium – Leichtgewicht unter den Metallen (2006)
102. StVZO § 37, Gebotsschild Nr. 268
103. StVO § 3, Abs. 4, Höchstgeschwindigkeit 50 km/h
104. Ö-Norm V 5117, 12/2004 „Schneeketten für Fahrzeuge der Klassen M1, N1, 01, 02 – Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung" und Ö-Norm V 5119, 12/2004 „Schneeketten für Fahrzeuge der Klassen N2, N3, M2, M3, O3, O4 – Anforderungen, Prüfung, Normkennzeichnung"
105. CUNA/NC 178-01, 07/2001 „Road vehicles"
106. NFR 12-780, 1989
107. SAE Classification J 1232, 1985
108. Zeiser, P., Maute, D.: Prüfstand und Messverfahren zur Ermittlung der Hüllkurven von Gleitschutzketten mit bewegter, ebener Fahrbahn. ATZ **11** (1992)
109. N.N.: Schneeketten. lastauto-omnibus **10** (1972)
110. N.N.: Haftungsfrage. MAN-Magazin **1** (1988)
111. Stiftung Warentest 11/2003
112. Winner, H. et. al. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (ATZ/MTZ-Fachbuch). 3. Aufl. Springer Vieweg (2015)

**Literatur zu Abschn. 7.4**

113. Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge, 3. Aufl. Springer, Heidelberg (2007)
114. Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Grundlagen, 3. Aufl. Vogel Buchverlag, Würzburg (1995)
115. Haken, K.-L., et al.: Besondere Eigenschaften von Niederquerschnittsreifen bei trockener und nasser Fahrbahn und ihre Auswirkung auf die Fahrdynamik. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, K8.1, 1995
116. Zomotor, A., Reimpell, J. (Hrsg.): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Aufl. Vogel Buchverlag, Würzburg (1991)

117. Sagan, E.: Auslegung von Achskinematik und Elastokinematik – immer ein Kompromiss? Haus der Technik, Tagung Fahrwerktechnik, Osnabrück, 2001
118. Drecoll, N.: Der Einfluss der Karosseriedeformation auf die Fahrwerkskinematik. Logos Verlag, Berlin (2001)
119. Hempel, J. (Hrsg.): Schwingungstechnik für Automobile. Vibracoustic GmbH & Co. KG, Weinheim (2002)
120. Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge, 3. Aufl. Springer, Heidelberg (2007)
121. Hofmann, M.: Antivibrationssysteme. Die Bibliothek der Technik, Bd. 225. Verlag Moderne Industrie (2001)
122. Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 3. Aufl. Schwingungen, Bd. B. Springer, Heidelberg (1997)
123. Hinsch, P.: Einige Untersuchungen zum Messen dynamischer Moduln von Elastomeren. Kautschuk Gummi Kunststoffe **42**(9), 752–756 (1989)
124. Naploszek, H.: Vorgespannte Elastomerlager zur Reduktion von Nebenfederraten. ATZ **2**, 94–96 (1999)
125. Müller, M., Heidrich, M., Bernhard, U.: Die Auslegung von Motorlagerungssystemen. ATZ **2**, 92–99 (1997)
126. van Basshuysen, R., Kuipers, G., Hollerweger, H.: Akustik des Audi 100 mit direkteinspritzendem Turbo-Dieselmotor. ATZ **1**, 14–21 (1990)
127. Melcher, J., Krajenski, V., Hanselka, H.: Adaptronik im Automobilbau. ATZ **4**, 256–265 (1998)
128. Haldenwanger, H.-G., Klose, P.: Schwingungsisolation und -kompensation durch piezokeramisch aktivierte Motorlagerungen. ATZ **4**, 174–179 (1993)
129. Hartig, F., Reichel, M.: Das Fahrwerk des neuen 3er (Der neue 3er). ATZ (MTZ Sonderausgabe) (1998)
130. Denker, D.: Schnittstellenprobleme zwischen Aggregat und Karosserie und ihre Lösung bei Leichtbaukonzepten. ATZ (MTZ Sonderausgabe System Partners 97), 116–117 (1997)
131. Becker, K., et al.: Entwicklung von Akustik und Schwingungskomfort am neuen Audi A6. ATZ (MTZ Sonderausgabe Der neue Audi A6), 53–55 (2004)
132. Hutter, W., Wölfl, A.: Elastomerlager im PKW. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe **7/8**, 506–511 (1998)
133. Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 3. Aufl. Fahrverhalten, Bd. C. Springer, Heidelberg (2003)
134. Merker, T., et al.: Das SL-Fahrwerk – Dynamik und Komfort vereint. ATZ (Sonderausgabe Der neue Mercedes SL) (2001)
135. Riedl, H., Kölbel, S.: Das Fahrwerk des neuen 7er. ATZ (Sonderausgabe Der neue BMW 7er) (2001)
136. Riedl, H., et al.: Das Fahrwerk des neuen 5er. ATZ **81**(MTZ Sonderausgabe Der neue BMW 5er) (2003)
137. Bauer, M., et al.: Das Fahrwerk des Porsche Cayenne. ATZ **100/101**(MTZ Sonderausgabe Porsche Cayenne) (2003)
138. Daubenschmid, W., et al.: Auf Achse, S-Klasse – Abstimmung und Erprobung. ATZ **61/62**(MTZ Sonderausgabe Die neue SLK-Klasse) (2004)
139. Bantle, M., Braess, H.-H.: Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928. ATZ **9**, 369–378 (1977)
140. Cartwright, A.J.: The development of a high comfort, high stability rear suspension. Proc. Instn. Mech. Engrs. **200**(D5), S53–S60 (1986)
141. Leitermann, W., et al.: Der neue Audi 200 quattro. ATZ **10**, 417–421 (1984)
142. Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge, 3. Aufl. Springer, Heidelberg (2007)
143. Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Grundlagen, 4. Aufl. Vogel Buchverlag, Würzburg (2000)
144. Kurz, G.: Das Fahrwerk des neuen 5er BMW, geprägt durch moderne Kundenanforderungen. Chassis.tech plus(2010)
145. Simon, M., Gerhards, T., Frantzen, M., David, W.: Das Fahrwerk des Ford Focus RS 500. ATZ **10**, 764–768 (2010)
146. Winterhagen, J.: Der neue Opel Astra. ATZ **12** (2009)
147. Heißing, B., Ersoy, M., Gies, S. (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
148. von Estorff, H.-E.: Technische Daten Fahrzeugfedern, Teil 1: Drehfedern, Stahlwerke Brüninghaus Werdohl (1973)
149. Gold, H.: Eigenschaften einer ausschließlich mit Gas (Luft) arbeitenden Feder-Dämpfer-Einheit. VDI-Berichte, Bd. 546. VDI-Verlag, Düsseldorf (1984)
150. Griffin, M.J.: Handbook of Human Vibration. Academic Press, London (1990)
151. Hennecke, D.: Zur Bewertung des Schwingungskomforts von PKW bei instationären Anregungen. Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 12. Bd. 237 VDI Verlag, Düsseldorf (1995)
152. Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge: Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion, 3. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2007)
153. Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 4. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2004)
154. Wolf, F. J., Schleinitz, U., Koczar, P.: Drehstabschulterlager. Woco AVS GmbH, Schutzrecht EP 1048861 (10.03.2005)
155. VDI Verein Deutscher Ingenieure: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1–3, Bd. 2057. VDI (2002)
156. Krause, J.: Gummi-Lager, Vorwerk Autotec GmbH & Co.KG, DE 102 31 311 (2004)
157. Jautze, M., et al.: Das Verstelldämpfersystem – Dynamische Dämpfer Control. ATZ (MTZ Sonderausgabe Der neue BMW 7er) (2008)
158. Scheerer, H., Römer, M.: Luftfederung mit adaptivem Dämpfungssystem im Fahrwerk der neuen S-Klasse. 7. Aachener Kolloquium Fahrzeugtechnik, 1998
159. Schützner, E.-C.: Thermodynamische Analysen von Luftfedersystemen. VDI-Berichte, Bd. 1153. (1994)
160. Dreyer, W., Oehlerking, C.: Untersuchungen von Luftfeder-Rollbälgen für Personenkraftwagen. ATZ **10** (1986)
161. Hennecke, D., et al.: Anpassung der Dämpferkennung an den Fahrzustand eines PKW. VDI-Bericht: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Bd. 650. , Hannover (1987)

162. Konik, D., et al.: Electronic damping control with continuously working damping valves (EDCC). AVEC '96, Aachen (1996)
163. Fukushima, N., Fukuyama, K.: Nissan hydraulic active suspension. Fortschritt der Fahrwerkstechnik 10, Aktive Fahrwerkstechnik, Braunschweig (1991)
164. Tanaka, H., et al.: Development of a vehicle integrated control system. FISITA '92, London (1992)
165. Goroncy, J.: Citroen Xantia Activa mit neuem Fahrwerk. ATZ **7/8** (1995)
166. Parsons, K.G.R., et al.: The Development of ACE for Discovery II. SAE 2000 World Congress, Detroit, 2000
167. Williams, D.A., Wright, P.G.: Fahrzeugaufhängungsanordnung. Group Lotus PLC, Schutzrecht EP 0142947 (26.05.1988)
168. Merker, T., et al.: Das SL-Fahrwerk, Dynamik und Komfort vereint. ATZ (MTZ Sonderausgabe Mercedes SL) (2001)
169. Gipser, M.: Verbesserungsmöglichkeiten durch aktive Federungselemente aus theoretischer Sicht. VDI-Berichte, Bd. 546 (1984)
170. Acker, B., Darenberg, W., Gall, H.: Aktive Federung für Personenwagen. Ölhydraulik und Pneumatik **11**(33) (1989)
171. Wallentowitz, H., Konik, D.: Actively influenced suspension systems – Survey of actual patent literature. EAEC Conference 1991
172. Jurr, R., Behnsen, S., Bruns, H., Held, G., Hochgrebe, M., Straßberger, M., Zieglmeier, F.: Das aktive Wankstabilisierungssystem Dynamic Drive. ATZ (MTZ Sonderausgabe BMW 7er) (2001)
173. Eichler, M., et al.: Das Fahrwerk des VW Phaeton. ATZ (MTZ Sonderausgabe VW Phaeton) (2002)
174. van Meel, F., et al.: Audi adaptive air suspension – die neue Luftfederung des Audi A8. ATZ (MTZ Sonderausgabe Audi A8) (2002)
175. Wauro, F.: Querkräfte von zylindrischen Schraubendruckfedern. Federn – Unverzichtbare Bauteile der Technik. VDI-Verlag, Düsseldorf (2006)
176. Nienhuys, M., Fröhlich, M.: Das Verstelldämpfersystem des BMW X5 – Entwicklung des Sensor- und Beobachterkonzepts. ATZ **3** (2007)
177. Glaser, H., Kainz, P.: Das Fahrwerk des Audi R8. TÜV Süd, TU München, chassis.tech (März 2007)
178. Gilsdorf, H.J., Hoffmann, J.: Elektromechanische aktive Aufbaukontrolle. ATZ **09** (2009)
179. Streiter, R.: ABC Pre-Scan im F700. Das vorausschauende aktive Fahrwerk von Mercedes-Benz. ATZ **05** (2008)
180. Winterhagen, J.: Lexus bringt $CO_2$-Emission bei Luxus-Geländewagen auf unter 150 Gramm. http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/9819/Lexus-bringt-CO2-Emission-bei-Luxus-Gelaendewagen-auf-unter-150-Gramm.html. 29. November 2010
181. Danisch, R.: Der Porsche Panamera. ATZ **10** (2009)
182. Deleker, J.: Neues Komfortsystem von Mercedes. http://www.auto-motor-und-sport.de/testbericht/aktive-fahrwerke-neues-komfortsystem-von-mercedes-2747425.html#article_detail. 13. Dezember 2010
183. Strobl, H.: Every Gram Counts – Lightweight design for shock absorbers in modern passenger cars. 5th International Conference Advanced Suspension Systems. Stuttgart (2013) http://www.ukintpress-conferences.com/uploads/SPKVDX13/Day1_9_Hubert_Strobl.pdf
184. Matschinsky, W.: Radführungen der Straßenfahrzeuge, Kinematik, Elastokinematik und Konstruktion, 2. Aufl. Springer, Berlin (1998)
185. Braess, H.-H.: Ideeller negativer Lenkrollhalbmesser. ATZ 203–207 (1975)
186. Reimpell, J.: Fahrwerktechnik Grundlagen, 3. Aufl. Vogel Buchverlag, Würzburg (1995)
187. Matschinsky, W.: Bestimmung mechanischer Kenngrößen von Radaufhängungen. Dissertation, TU Braunschweig (1992)
188. Braess, H.-H.: Beitrag zur Fahrtrichtungserhaltung des Kraftwagens bei Geradeausfahrt unter besonderer Berücksichtigung des Lenkrollhalbmessers. ATZ 218–221 (1965)
189. Matschinsky, W., Dietrich, C., Winkler, E.: Die Doppelgelenk-Federbeinachse der neuen BMW-Sechszylinderwagen der Baureihe 7. ATZ 357–365 (1977)
190. Reinecke, W.: Konstruktions-Richtlinien für die Auslegung von Gelenkwellenantrieben. MTZ **10**, 349–352 (1958)
191. Eugen Klein KG Gelenkwellen: Firmenschrift
192. Dödlbacher, Gaffke: Untersuchung zur Reduzierung der Lenkungsunruhe. ATZ 317–322 (1978)
193. Weir, D.H., di Marco, R.J.: Correlation and evaluation of driver/vehicle directional handling data. SAE-Paper 780010 (1978)
194. Riedl, Kölbel: Das Fahrwerk des neuen 7er. ATZ (MTZ Sonderausgabe, November), 58–75 (2001)
195. Merker, et al.: Da E-Klasse-Fahrwerk. ATZ (MTZ Sonderausgabe, Mai), 94–106 (2002)
196. Eichler, et al.: Das Fahrwerk des VW Phaeton. ATZ (MTZ Sonderausgabe, Juli), 68–89 (2002)
197. Glaser, Rossié, Rüger, et al.: Das Fahrwerk des Audi A1. ATZ (MTZ Sonderausgabe Juni), 32 (2010)
198. Heißing, Block: Audi A4: Fahrwerk und Antriebsstrang. ATZ (MTZ Sonderausgabe November), 84 (2000)
199. Mödinger, Bublitz, Grebe, et al.: Das Fahrwerk der neuen A-Klasse von Daimler-Benz. ATZ (MTZ Sonderausgabe), 102 (1997)
200. Kreutz, Bartusch, Ullrich, et al.: Der VW Polo V: Das Fahrwerk. ATZ (MTZ Sonderausgabe Mai), 28 (2009)
201. Rischbieter, Maus, Manz, et al.: Das Fahrwerk des neuen VW Golf. ATZ (MTZ Sonderausgabe Oktober), 74 (2003)
202. Bortz, Niemöller, Thrimer, et al.: Die neue GLK-Klasse von Mercedes Benz. Souveränes Fahrverhalten unter allen Bedingungen. ATZ (MTZ Sonderausgabe, September), 20 (2008)
203. Eichler, Rischbieter, Gier, et al.: Das Fahrwerk des VW Phaeton. ATZ (MTZ Sonderausgabe, Juli), 68 (2002)
204. Aden, Bastian, Bauer, et al.: Das Fahrerlebnis Porsche Cayenne. ATZ (MTZ Sonderausgabe), 114 (2003)

205. Hartig, Reichel: Das Fahrwerk des neuen 3er. ATZ (MTZ Sonderausgabe), 72 (1998)
206. Schmitz, Lippok: Ford Mondeo: Fahrwerk und Fahrdynamik. ATZ (MTZ Sonderausgabe Oktober), 78 (2000)
207. Riedl, Kölbel, Nixel, Schwarz: Das Fahrwerk des neuen 5er. ATZ (MTZ Sonderausgabe Augus), 80 (2003)
208. Merker, Jeglitzka, Koepp, et al.: Das E-Klasse-Fahrwerk. ATZ (MTZ Sonderausgabe Mai), 94 (2002)
209. Riedl, Kölbel: Das Fahrwerk des neuen 7er. ATZ (MTZ Sonderausgabe November), 58 (2001)
210. Jeglitzka, Riedel, Wolfsried, Zech: Das Fahrwerk der Mercedes-Benz S-Klasse, Leicht und agil. ATZ (MTZ Sonderausgabe), 142 (1998)
211. Merker, Kübler, Tattermusch, et al.: Das Fahrwerk des Maybach. ATZ (MTZ Sonderausgabe September), 130 (2002)
212. Hentschel, Wahl: Das Fahrwerk des Porsche Boxster. ATZ (MTZ Sonderausgabe), 34 (1996)
213. Merker, Wirtz, Hill, Jeglitzka: Das SL Fahrwerk. ATZ (MTZ Sonderausgabe Oktober), 84 (2001)
214. Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.): Lenkungshandbuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
215. Duminy, J.: Contribution of modern steering systems to improve driving stability. 3. EAEC-Konferenz, Straßburg, 1991
216. Junker, H.: Moderne Lenkungstechnologie. Von den Anforderungen zur technischen Realisierung. Automobil-Industrie **4**, 379–389 (1990)
217. Stoll, H.: Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen, 1. Aufl. Vogel Buchverlag, Würzburg (1992)
218. ZF-Kugelmutter-Hydrolenkungen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Veröffentlichung aus dem Geschäftsbereich Lenkungstechnik der ZF Friedrichshafen AG (1995)
219. Müller, S.: Zukünftige verbrauchsarme Servolenkungen für vollständige Steer-By-Wire-Funktionalität. ATZ **4** (2004)
220. ZF-OCE-Lenksystem, Elektrohydraulisches Lenksystem für Pkw und Transporter. Veröffentlichung aus dem Geschäftsbereich Lenkungstechnik der ZF Friedrichshafen AG (1997)
221. ZF-Servolectric, die elektrische Servolenkung. Veröffentlichung aus dem Geschäftsbereich Lenkungstechnik der ZF Friedrichshafen AG (1998)
222. Ruck, G., Dominke, P.: Electric Power Steering – The First Step on the Way to "Steer-by-Wire". SAE 1999-01-0401
223. Harnett, P.: Objective methods for the assessment of passenger car steering quality. VDI Fortschritt–Berichte Reihe 12, Bd. 506.
224. Poestgens, U.: Servolenksysteme für Pkw und Nutzfahrzeuge. Verlag. Moderne Industrie (2001)
225. Bootz, A., et al.: Evolutionäre Energiesparkonzepte für die Hydrauliklenkung im PKW. 5. Internationale Fluid Power Konferenz Aachen, 2006
226. Müller, S., et al.: Analysis of a closed-center hydraulic-steering-system for full steer-by-wire-functionality and low fuel consumption. Proceedings of the Ninth Scandinavian International Conference on FluidPower, SICFP05, Linköping, Schweden, 1.–3. Juni 2005
227. Brunschweiler, D.: Moderne Lenksysteme. ATZ **2**, 104–109 (2005)
228. Harrer, M., Schmitt, T., Fleck R.: Elektromechanische Lenksysteme – Herausforderungen und Entwicklungstrends. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (2005)
229. Debusmann, C., Budaker, M.: Ein elektromechanisches Lenksystem der oberen Leistungsklasse am Beispiel der EPS-APA im 3er-BMW. PKW-Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen, Haus der Technik, 24./25. April 2007
230. Segel, L.: The Variable Stability Automobile – Vehicle Concept and Design. SAE 650658
231. Niemann, K., et al.: Entwicklungsmöglichkeiten an Lenksystemen für Kraftfahrzeuge und ihr Einfluß auf die Kurshaltung. ATZ **10**, 525–532 (1980)
232. Krämer, W.: Improved driving safety by electronic steering assistance. EAEC 6th European Congress 1997
233. Akita, T., Yamazaki, M., Kikkawa, T., Yoshida, T.: User benefits of active front steering control system: Steer-by-wire. ISATA 1999
234. Pauly, A., Fleck, R., Baumgarten, G., Eckrich, M., Köhn, P.: A steer by wire concept for passenger cars designed for function, safety and reliability. JSAE Paper, 2001, Nr. 20015329
235. Donges, E., Naab, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. at Automatisationstechnik **5**, 226–236 (1996)
236. Aerospace Recommended Practise 4754, Certification Considerations for Highly-Integrated or Complex Aircraft Systems. SAE Dezember 1996
237. Badawy, A., Zuraski, J., Bolourchi, F., Chandy, A.: Modeling and analysis of an electric power steering system. SAE Paper 1999-01-0399
238. Kawai, T., Shibahata, Y., Shimizu, Y., Kohno, F., Sano, S.: Variable gear ratio steering system. Tagung „Pkw-Lenksysteme im Jahr 2000", Essen
239. Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks. VDI Fortschrittsbericht 12. Bd. 471 (2001)
240. Pauly, A.: Lenkmaschine zur Untersuchung des instationären Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen. ATZ **7**, 307–310 (1977)
241. Schneider, R.: Konzipierung einer marktgerechten Stelleinheit als Aktuator einer aktiven Hinterradlenkung für Personenkraftwagen. Dissertation, RWTH Aachen (1995)
242. Shoichi, S., Tateomi, M., Yoshimi, F.: Operational and design features of steer angle dependent four wheel steering system. 11. ESV-Konferenz 1987

243. Donges, E., Aufhammer, R., Fehrer, P., Seidenfuß, T.: Funktion und Sicherheitskonzept der Aktiven Hinterachskinematik von BMW. ATZ **10**, 580–587 (1990)
244. Hesseling, R.: Das Lenkrad – Innovationsträger der Zukunft. Tagungsbeitrag steering.tech 2008, ATZlive, München, 2008
245. Kurz, G.: Das Fahrwerk des neuen 5er BMW, geprägt durch moderne Kundenanforderungen. Chassis.tech plus (2010)
246. Herold, P., Schuster, M., Thalhammer, T., Wallbrecher, M.: The new steering system of BMW – Integral active steering, synthesis of agility and sovereignty. FISITA 2008 World Automotive Congress 2008
247. Kohoutek, P.: Der neue Audi A4 – Entwicklung und Technik. ATZ/MTZ-Typenbuch. Vieweg, Wiesbaden (2008)
248. ECE R79 – Regelung Nr. 79, Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage. Revision 2 (2006), Deutschsprachige Fassung, Homepage des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. http://www.bmvbs.de
249. ISO/DIS 26262, Road Vehicles – Functional Safety, Part 1 to 10, International Organisation for Standardisation, 2009
250. ZF-Servotronic 2 für PKW und leichte Nutzfahrzeuge, Produktinformation ZFLS 7831 P-WA 3/07 d, ZF Lenksysteme GmbH, Schwäbisch Gmünd, 2007
251. Donges, E.: Aktive Hinterachskinematik für den BMW 850i. Automobil Revue **38** (1991)
252. Yamaguchi, J.: Global Viewpoints. Automot. Eng. April, 96–113 (1988)
253. Meitinger, T.: The electric steering systems of the BMW 5 series. chassis.tech plus 2010, ATZlive, München, 8. Juni 2010
254. Braess, H.-H.: Chassis- und Fahrdynamik-Entwicklung nach dem 2. Weltkrieg – Eine Erfolgsgeschichte. chassis.tech plus 2010, ATZlive, München, 8. Juni 2010
255. Wolf, H.: Untersuchung des Lenkgefühls von Personenkraftwagen unter besonderer Berücksichtigung ergonomischer Erkenntnisse und Methoden. Dissertation, TU München (2008)
256. Herold, P.: Die Integral-Aktivlenkung. ATZ **11**(ATZ extra: Der neue BMW 7er) (2008)


**Literatur zu Abschn. 7.5**


257. Hennecke, D.: Zur Bewertung des Schwingungskomforts von Pkw bei instationären Anregungen. Diss., TU Braunschweig (1994)
258. Zomotor, A., Braess, H.-H., Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. ATZ **12** (1997). ATZ **3** (1998)
259. Dettki, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw. VDI-Bericht, Bd. 1335, S. 385–405. (1997)
260. Loth, S.: Fahrdynamische Einflußgrößen beim Geradeauslauf von Pkw. Diss., TU Braunschweig (1997)
261. Schaible, S.: Fahrzeugseitenwindempfindlichkeit unter natürlichen Bedingungen. Diss., RWTH Aachen (1998)
262. VDA-Pressemitteilung der ad hoc Arbeitsgruppe Fahrzeugsicherheit vom 1. April 1998
263. Riedel, A., Arbinger, R.: Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V.). Bd. 139
264. Neukum, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes, Bd. 12, S. 1–20. Haus der Technik Fachbuch (2002)
265. Neukum, A., Krüger, H.-P., Schuller, J.: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? VDI-Berichte, Bd. 1613, S. 13–32. (2001)
266. Decker, M.: Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen. Diss., TU München (2009)
267. National Highway Traffic Safety Administration: A demonstration of the dynamic tests developed for NHTSA's NCAP rollover rating system DOT HS 809 705 (August 2004). http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/vrtc/ca/capubs/RolloverPhaseVIIIReport_NCAPdemo081104.pdf
268. National Highway Traffic Safety Administration: Electronic stability control systems, control and displays NHTSA-2007-27662. http://www.nhtsa.gov/Laws+&+Regulations/Electronic+Stability+Control+(ESC)
269. Wagner, A.: Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind. Diss., Universität Stuttgart (2003)
270. Weir, D.H., DiMarco, R.J.: Correlation and evaluation of driver/Vehicle directional handling data. SAE-Paper 780010 (1978)
271. Henze, R.: Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells. Diss., TU Braunschweig (2004)
272. Baumann, F.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen. Diss., TU Darmstadt (2003)
273. Neukum, A., et al.: Fahrer – Fahrzeug – Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen. FAT Schriftenreihe, Bd. 208, (2007)
274. ECE-R13H, Anhang 9, Systeme zur elektronischen Stabilitätskontrolle, Ausgabe 2009-07-03
275. Neukum, A., Paulig, J., Frömmig, L., Henze, R.: Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw. FAT Schriftenreihe, Bd. 222, (2009)
276. Schrefl, M.: Instationäre Aerodynamik von Kraftfahrzeugen: Aerodynamik bei Überholvorgang und böigem Seitenwind. Diss., TU Darmstadt (2008)
277. Botev, S.: Digitale Gesamtfahrzeugabstimmung für Ride und Handling. VDI Reihe 12, Bd. 684. VDI Verlag, Düsseldorf (2008)
278. Barz, D., Drews, R.: Kompatible Messsysteme – Unterschiedliche Fahrdynamiksysteme synchron messen. ATZelektronik **04** (2008)
279. AICON 3d systems – wheel watch – http://www.aicon3d.de/produkte/moveinspect-technology/wheelwatch/

# Elektrik/Elektronik/Software

*Dr. Heinz-Bernhard Abel, Dr. Heinrich-Jochen Blume, Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz, Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy, Dipl.-Ing. Simon Fürst, Dr. Lothar Ganzelmeier, Dr. Jörg Helbig, Dipl.-Ing. Gerhard Heyen, Dr. rer. soc. Meike Jipp, Dipl.-Ing. Günther Kasties, Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll, Dr.-Ing. Olaf Krieger, Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer, Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Dr. Wolfgang Pfaff, Dr.-Ing. Thomas Scharnhorst und Dr.-Ing. Guido Schneider*

8.1 **Bedeutung Elektrik/Elektronik/Software für das Automobil – 926**

8.2 **Das Bordnetz – 943**

8.3 **Kommunikationsbordnetze – 977**

8.4 **Elektromagnetische Verträglichkeit – EMV – 988**

8.5 **Funktionsdomänen – 992**

8.6 **Mensch-Technik-Kooperation – 1064**

8.7 **Software – 1075**

8.8 **Moderne Methoden der Regelungstechnik – 1089**

**Literatur – 1097**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_8

## 8.1 Bedeutung Elektrik/Elektronik/Software für das Automobil

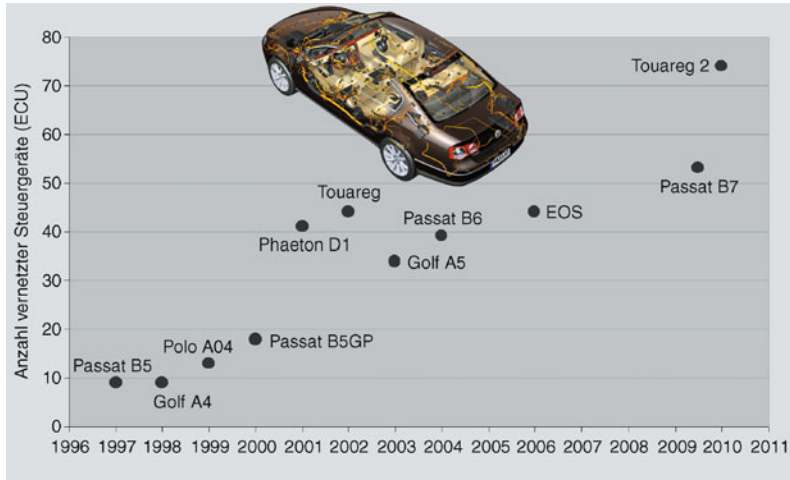
### 8.1.1 Einleitung

Steigende Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Umweltschutz und Komfort führten in den vergangenen Jahren zu einem starken Anstieg der Funktionen im Fahrzeug. Wesentliche Treiber dafür waren die gestiegenen Komfortansprüche, die Vernetzung der Fahrzeuge aber auch ganz wesentlich verschärfte Abgas- und Sicherheitsbestimmungen. So kamen in den letzten Jahren komplexe Infotainment- und Assistenzsysteme hinzu, die nur durch ein Zusammenwirken vieler Steuergeräte realisiert werden konnten. Deren intuitive Bedienung sowie Personalisierung der Funktionen erforderte eine systemübergreifende Mensch-Maschine-Schnittstelle. Durch die massiv gestiegene Anzahl an elektrischen Verbrauchern nahm auch der Energiebedarf deutlich zu, so dass über elektronische Energiemanagementsysteme ein optimierter Energiehaushalt sichergestellt werden musste.

Die Integration zusätzlicher Funktionen führte dazu, dass die Zahl der Steuergeräte in modernen Fahrzeugen auf über 70 Steuergeräte gestiegen ist (siehe ◘ Abb. 8.1). Über verschiedene Bussysteme (z. B. CAN(-FD), LIN, FlexRay und Ethernet) und ein zentrales Gateway sind die Steuergeräte eng miteinander vernetzt.

Die gewachsenen Ansprüche der Kunden konnten im Wesentlichen durch den zunehmenden Einsatz von Elektronik befriedigt werden, deren Technologie in den letzten Jahren enorme Fortschritte zu verzeichnen hatte (siehe ◘ Abb. 8.2). Rechenleistung und Speicherdichte stiegen in den vergangenen Jahren nach dem nach wie vor gültigen Mooreschen Gesetz exponentiell an, während die relativen Hardwarekosten überproportional sanken.

Die zunehmende Bedeutung der Elektronik hat und wird die Automobilindustrie geradezu revolutionieren. Die klassischen Domänen Antrieb, Fahrwerk und Karosserieelektronik haben dabei ein hohes Entwicklungsniveau hinsichtlich Vollständigkeit und Reife erreicht. Der Schwerpunkt der Weiterentwicklung im Automobil liegt im Bereich der e-Mobilität sowohl im Bereich der Steuerung der elektrischen Antriebe, der Batterie-Steuerung sowie der vernetzten on-board und off-board Ladeinfrastruktur. Weiterhin geht der Trend bei Fahrerassistenzsystemen zu hochautomatisiertem Fahren und letztlich autonomem Fahren. Die zunehmende Integration von Consumer-Elektronik in das und mit dem System Fahrzeug bietet die Möglichkeit, Daten mit der Umwelt auszutauschen. Durch die Verbindung von Smartphones und Internet mit Navigation und Fahrfunktionen im Fahrzeug tut sich ein star-




◘ **Abb. 8.1** Entwicklung der Steuergeräteanzahl in Kraftfahrzeugen, am Beispiel von Volkswagen

automotive engineering iav

# Von Assistenz bis Automatisierung

## Wir entwickeln, was bewegt.

Mit aktiver Sicherheit und intelligenten Funktionen einen Schritt voraus. Bereits seit zwei Jahrzehnten treiben wir die Vision vom hochautomatisierten Fahren voran und entwickeln vernetzte Funktionen und Gesamtsysteme vom Konzept bis zur Serie. Als einer der führenden Entwicklungspartner der Automobilindustrie bietet IAV mehr als 30 Jahre Erfahrung und ein unübertroffenes Leistungsspektrum. Mit Leidenschaft und der Kompetenz für das ganze Fahrzeug realisieren wir Lösungen in technischer Perfektion. Hersteller und Zulieferer unterstützen wir weltweit mit mehr als 6.500 Mitarbeitern und einer erstklassigen Ausstattung bei der Realisierung ihrer Projekte – von Umfeldsensorik und Algorithmik bis Simulation und Fahrzeugintegration: Ihre Ziele sind unser Auftrag.

Mehr dazu und zu unserer einzigartigen Kompetenzbreite erfahren Sie auf www.iav.com



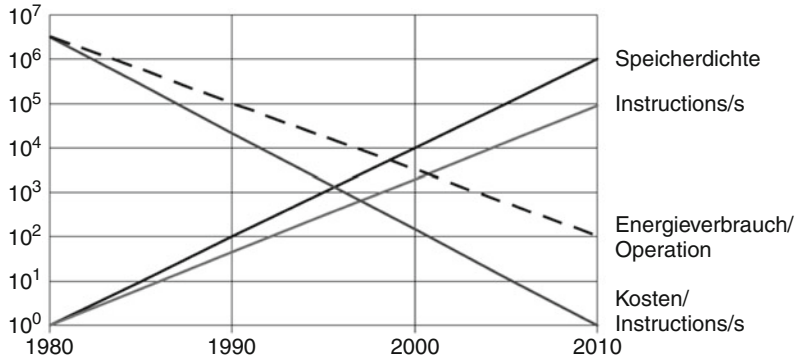



**Abb. 8.2** Entwicklung von Hardware-Performance und -Kosten

kes Innovationsfeld auf, als Fahrzeug-Connectivity bezeichnet, das eine nahtlose Verbindung aus dem Fahrzeug heraus mit der Umwelt ermöglicht.

Die Anzahl der Steuergeräte, das heißt der vernetzten Komponenten im Fahrzeug, hat ein Maximum erreicht. Weitere Steigerungen der Leistung von Elektrik und Elektronik finden über eine höhere Integration innerhalb der Steuergeräte statt.

Der Anteil der Elektroniksysteme an den Herstellungskosten des gesamten Fahrzeugs ist stetig gestiegen. Zurzeit liegt er je nach Ausstattungsvariante bei ca. 25 %. Die Wertschöpfung hat sich von der Mechanik zu Elektronik und Software verlagert [18]. Alle gegenwärtigen Prognosen gehen davon aus, dass sich dieser Verlagerungseffekt weiter fortsetzen wird (siehe Abb. 8.3).

Qualitätssichernde Maßnahmen haben dazu geführt, dass die Ausfallsicherheit von Bauteilen und Teilsystemen deutlich erhöht werden konnte (siehe Abb. 8.4a). Die gestiegene Anzahl von

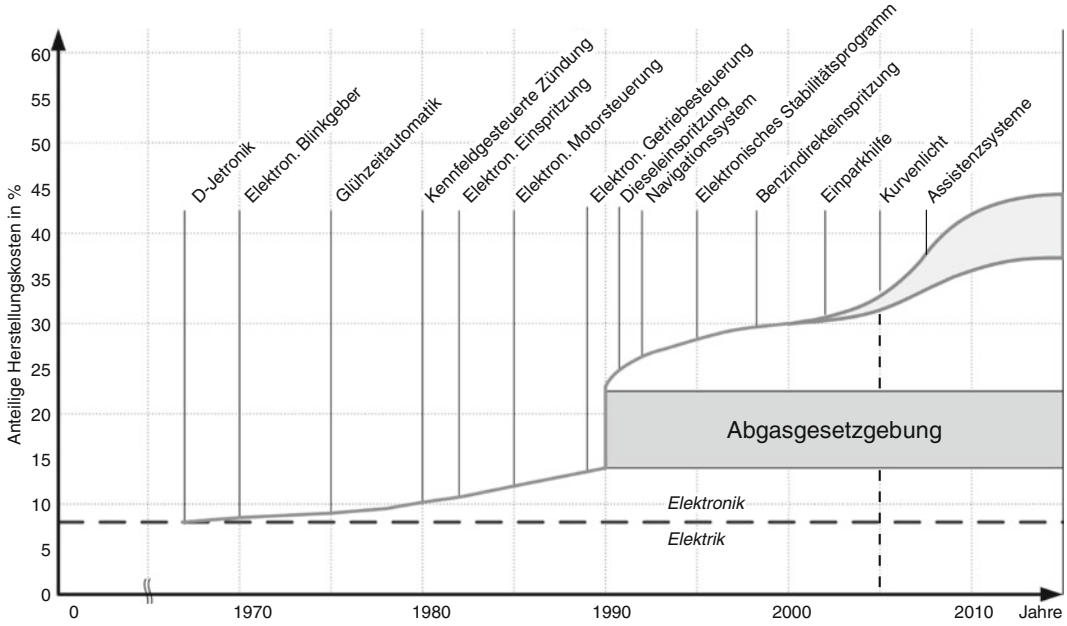



**Abb. 8.3** Entwicklung der anteiligen Herstellkosten für Elektronik nach [3]

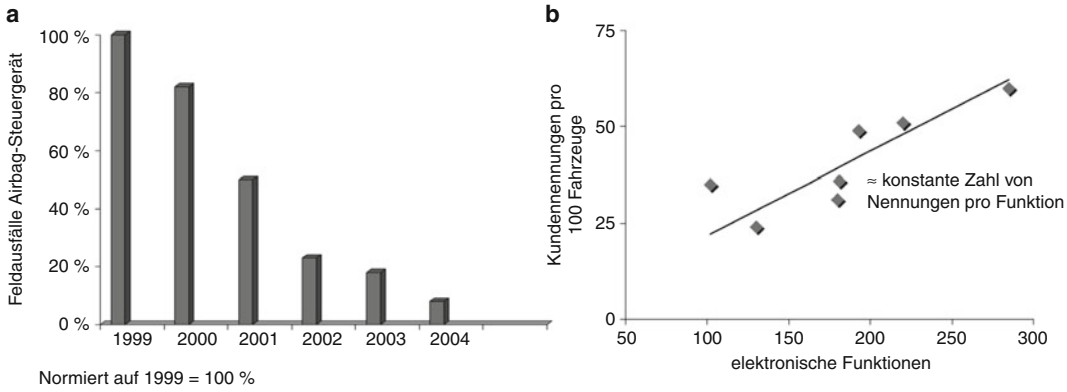



**Abb. 8.4** Ausfallsicherheit am Beispiel des Airbag-Steuergeräts (**a**) [2], Qualitätsprobleme in Abhängigkeit der Zahl elektrischer Funktionen (**b**) [9]

8

Steuergeräten bei gleichzeitig starker Erhöhung der Funktionalität hat zur Folge, dass Anzahl und Umfang der Funktionen pro Steuergerät deutlich zugenommen haben und jedes Steuergerät zu einem Konstrukt hoher Komplexität geworden ist. Das vernetzte Gesamtsystem Fahrzeug hat vielstufige funktionale Wechselwirkungen und dynamische Abhängigkeiten, die trotz umfangreichen Wissens über Komponenten- oder Teilsystemverhalten nur schwer zu beherrschen sind. Hinzu kommt eine Heterogenität bei Bussen, Subbussen, Protokollen und Gateways sowie bei den Prozessen [16].

Von dieser Entwicklung ist nicht ein Kfz-Hersteller allein betroffen, sondern alle OEMs und deren Lieferanten stehen vor derselben Herausforderung. Elektronik wird auch künftig als wesentlicher Innovationsmotor der Automobilindustrie gesehen. Auf sie entfallen in Zukunft ca. 90 % aller Innovationen im Automobil, von denen wiederum bis zu 80 % in Software realisiert werden [18].

Um die steigende Komplexität weiterhin beherrschen zu können, müssen neue Anforderungen an Entwicklungsprozesse und Technologien erfüllt werden.

### 8.1.2 Entwicklungsprozess und Technologie

Das Beherrschen der stetig wachsenden Systemkomplexität ist für Fahrzeughersteller und Zulieferer stark wettbewerbsentscheidend, vor allem wenn Zeitbedarf, Kosten und Qualität des Entwicklungsprozesses betrachtet werden. Eine ganzheitliche Entwicklung der Fahrzeugelektronik wird unter Fortführung der heutigen, komponentenorientierten Bauteilentwicklung nur noch mit enormem Aufwand möglich sein, weil die Funktionen sehr eng miteinander vernetzt und mitunter auf eine Vielzahl von Steuergeräten verteilt werden. Eine übergreifende Betrachtung des Elektrik- und Elektroniksystems des Fahrzeugs und seiner Teilsysteme ist Voraussetzung für qualitäts- und termingerechte Markteinführung zukünftiger Innovationen auf Basis einer leistungsfähigen Systemarchitektur und -integration. Dazu ist es notwendig, den Betrachtungshorizont von der Ebene der Komponentenschnittstellen auf die Ebenen der Software- und Funktionsschnittstellen zu erweitern.

Konsequentes Systems Engineering [7], unterstützt durch Standardisierung, ist die Voraussetzung, sowohl die Komplexität zu beherrschen als auch kürzeren Technologielebenszyklen und steigenden Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden. Sowohl die Spezifikation als auch die Integration softwarebestimmter Systeme muss damit zur Kernkompetenz der Automobilhersteller sowie aller an der Software-Entwicklung beteiligter Partner werden. Eine qualitätsgerechte Softwareentwicklung ist ohne strukturierte Entwicklungsabläufe nicht mehr möglich. Die Herausforderung besteht darin, die linke und die rechte Seite des V-Model horizontal zu vernetzen und

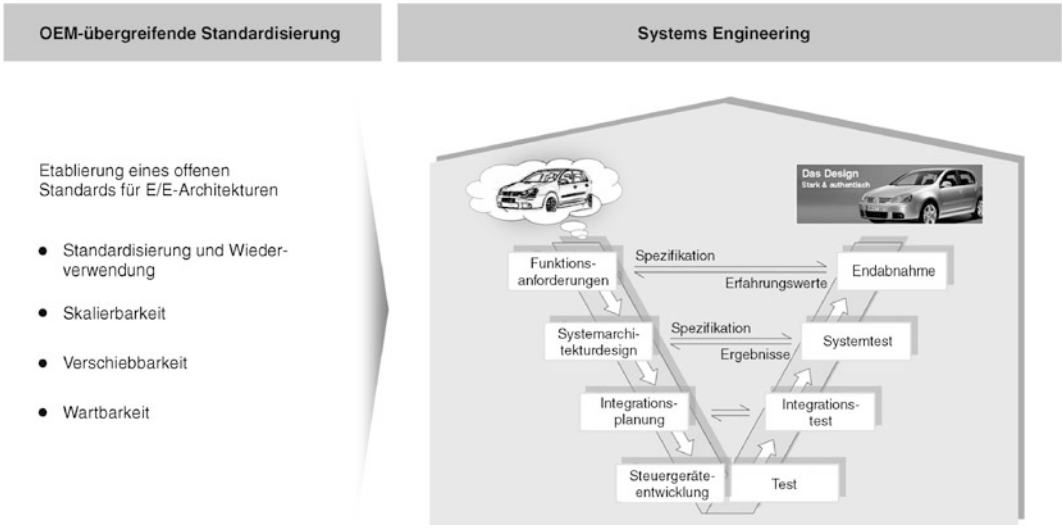



**Abb. 8.5** Unterstützung des Systems Engineering durch Standardisierung

diese Arbeitsweise in der Organisation abzubilden (Abb. 8.5).

### 8.1.3 Neue Anforderungen an Entwicklungsprozess und Technologie

Ziel des Systems Engineering ist es, sich künftigen technologischen Herausforderungen zu stellen und die Anforderungen weltweiter Märkte unter Berücksichtigung der Unternehmensentwicklung zu erfüllen (Abb. 8.6).

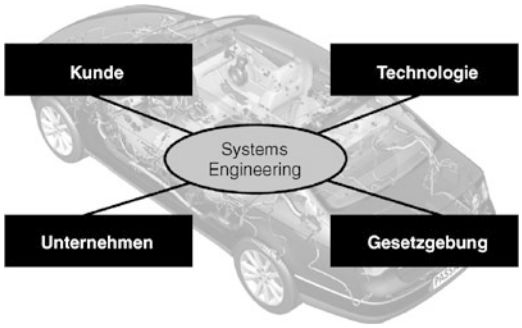



**Abb. 8.6** Ganzheitliche Sicht der Produktentwicklung beim Systems Engineering

Dabei verfolgt das Systems Engineering den interdisziplinären Ansatz, komplexe Systeme in ihrer Gesamtheit zu verstehen, deren Funktionalität und Komplexität zu beherrschen und diese in hoher Qualität umzusetzen. Systems Engineering fokussiert in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses auf Kundenwünsche und die daraus resultierenden Funktionen. Diese Vorgehensweise erfordert eine ganzheitliche, integrierte Sicht der Anforderungen an die Fahrzeugentwicklung, die den gesamten Produktlebenszyklus, d. h. von der Fertigung eines Fahrzeugs über den Kundendienst bis hin zur Verwertung erfasst. Insbesondere sind die möglichen Einflüsse der schnelllebigen Elektroniktechnologien bei den Schnittstellenanforderungen zu berücksichtigen, da eine Fahrzeugreihe bis zu 20 Jahre betreut werden muss (Abb. 8.7). Der dazugehörige Entwicklungsprozess wird im Folgenden vertieft.

#### 8.1.3.1 Eigenschaften des Entwicklungsprozesses

Die Ziele des Systems Engineering können nur durch eine methodische Vorgehensweise erreicht werden.

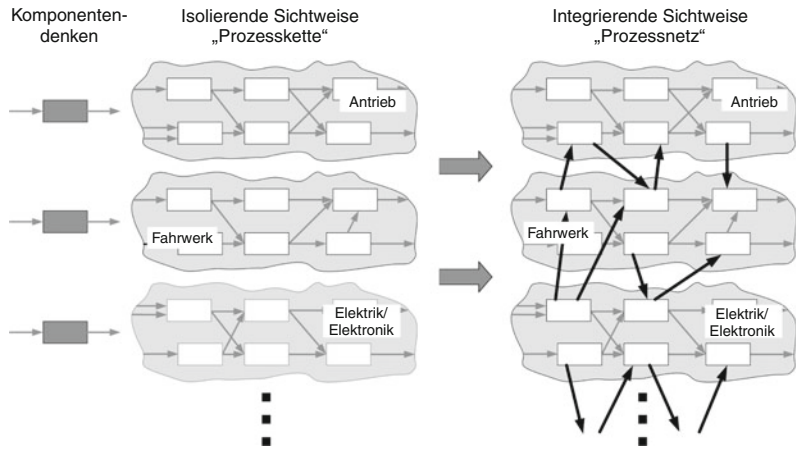



**Abb. 8.7** Systems Engineering bedingt einen Wechsel von der komponenten- hin zur funktionsorientierten, domänenübergreifenden Fahrzeugentwicklung [16]

Die Funktionsbeschreibungen und -vorgaben können mit Hilfe des Requirements Engineering (s. u.) erfasst werden. Sowohl die Spezifikation der von den Kunden direkt erlebbaren Funktionen als auch aktive Sicherheitssysteme wie Airbag stehen im Mittelpunkt. Durch Modellierung und Simulation von Funktionen kann zusätzlich eine Eindeutigkeit der Funktionsdarstellung sichergestellt werden. Erfolgt diese Beschreibung unabhängig von einer möglichen Implementierung, wird implizit deren Wiederverwendung ermöglicht. Einmal erstellte Funktionsbeschreibungen lassen sich als Basis für die Weiterentwicklung in Folgeprojekten verwenden, auch wenn sich die Technologie zur Umsetzung zwischenzeitlich geändert hat. Die Vorteile dieser Methodik werden insbesondere sichtbar, wenn Funktionen vom OEM spezifiziert und anschließend vom Zulieferer in Software umgesetzt werden. Anforderungsdokumente sind in standardisierter Form vorhanden und lassen keinen Spielraum für mögliche Fehlinterpretationen sowie für fehlerhafte und unvollständige Funktionsumsetzungen.

In frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung lassen sich zum einen, unterstützt durch Rapid Control Prototyping Verfahren (s. u.) und auf Basis ausführbarer Beschreibungen, Funktionen bereits im Vorfeld erlebbar und entscheidbar präsentieren. Dadurch können stabile Konzeptentscheidungen herbeigeführt werden. Zum anderen lassen sich aus präzisen und eindeutigen Funktionsbeschreibungen Testspezifikationen und -szenarien ableiten, um die Kundenfunktionen sowohl frühzeitig in MiL und SiL als auch später in der Integrations- und Testphase genau überprüfen zu können. Darüber hinaus eröffnet die Unabhängigkeit der Beschreibung neue wirtschaftliche Möglichkeiten, insbesondere beim Lieferantenmanagement und bei der Förderung des Wettbewerbs.

Die Erstellung von Funktionsanforderungen wird aber nur dann wirklich erfolgreich sein und den Reifegrad des zu entwickelnden Produkts deutlich erhöhen können, wenn angemessene Methoden, Prozesse und am Ende auch geeignete Tools eingesetzt werden. Die Präzision und Nachvollziehbarkeit der Anforderungen kann durch den Einsatz von Requirements Engineering erreicht werden. Die Eindeutigkeit und auch die Beurteilbarkeit von Funktionskonzepten wird durch den Einsatz von Modellierungstechniken unterstützt, während die Erstellung von frühen Umsetzungen mit Methoden des Rapid Control Prototypings erreicht werden kann. Diese drei methodischen Ansätze werden im Folgenden näher erläutert.

**Requirements Engineering** Requirements Engineering (RE) ist eine Methodik mit dem Ziel, eine explizit mit allen Beteiligten abgestimmte Anforderungs- und Systemspezifikation auszuarbeiten und zu dokumentieren, die als Basis für die

weitere Entwicklung dient [6]. So lässt sich u. a. die Vollständigkeit und Konsistenz von Anforderungen erreichen. Die in der Folge reduzierte Anzahl von Änderungen ermöglicht eine intensivere Bewertung jeder einzelnen Änderung. In Summe lassen sich durch diese Effekte der Fortschritt der Entwicklung beurteilen und Ansatzpunkte identifizieren, wie der Reifegrad erhöht werden kann.

Die Anforderungsspezifikation beschreibt sowohl die geforderten funktionalen als auch die nicht funktionalen Eigenschaften. Wesentliches Ziel ist dabei eine detaillierte Beschreibung des Verhaltens der zu entwickelnden Funktion im Fahrzeug auf Systemebene. Es werden dabei nicht nur die Funktionen beschrieben, die für den Fahrer später auch erlebbar sind, sondern auch Funktionen auf Systemebene. Das Dokument selbst wird nach Themenfeldern untergliedert, insbesondere nach funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen. Die Anforderungen sind semantisch zu analysieren, um Vollständigkeit, Konsistenz und Eindeutigkeit der Beschreibung zu gewährleisten. Die Erweiterung der Anforderungen um Modelle ist in vielen Fällen sinnvoll, um das Gesamtverständnis des betrachteten Systems zu verbessern und die Nachvollziehbarkeit der Entwicklung sicherzustellen. Die formalisierte Struktur der Anforderungsspezifikation erlaubt es, Anforderungen zu priorisieren und ihre Umsetzung und Überprüfung zu verfolgen [11].

**Agile Entwicklung** ist eine Entwicklungsmethodik aus der IT-Welt, die auch in der Automobilindustrie immer häufiger angewandt wird [19]. Im Kern geht es darum, die Softwareentwicklung in kleinen effizienten Teams – getrieben durch die Umsetzung von Features und Story Points – effizienter, flexibler, vorhersagbarer und durchgängiger zu gestalten. Im Gegensatz zum klassischen Wasserfallmodel werden hierbei alle Phasen der Softwareentwicklung in drei- bis vierwöchigen Zyklen durchlaufen, so dass am Ende immer ein lauffähiges Softwareprodukt vorhanden ist. Damit ist es möglich, kontinuierlich eine Rückmeldung aus der Anwendung bzw. Erprobung des Softwareproduktes zu bekommen, um es somit im Rahmen der regulären Entwicklungszeit kontinuierlich weiter zu verbessern. Typische agile Entwicklungsprozesse sind Kanban und Scrum.

Im Kanban-Prozess wird die Anzahl der Arbeitsschritte pro Prozessschritt reduziert und die einzelnen Schritte in einer Art „Pipeline“ sequenziell durchgeführt. Dennoch wird in allen Prozessschritten dieser Pipeline parallel gearbeitet. So kann eine hohe Durchsatzgeschwindigkeit erreicht werden und gleichzeitig für die einzelnen Prozessschritte die Durchlaufzeit reduziert werden. Dadurch lässt sich sowohl frühzeitig deren Erfolg messen oder es können Engpässe erkannt werden. Einen weiteren Beitrag dazu leistet auch der Abbau von bürokratischen Prinzipien in den etablierten Softwareentwicklungsprozessen und die stärkere Berücksichtigung der menschlichen Aspekte.

Bei Scrum [20] sind die einzelnen Prozessschritte stark inkrementell und iterativ. Dahinter steckt die Erfahrung, dass heutige Projekte häufig zu komplex sind und ihre Anforderungen sowie die technischen Lösungsansätze gerade zu Beginn noch zu unklar sind, um sie Top-Down aus zu planen. Stattdessen wird in Teams mit wohldefinierten Rollen in sogenannten Sprints entwickelt. Die wichtigsten Rollen sind dabei der Product Owner und der Scrum Master, die mit dem Entwicklungsteam zusammenarbeiten. Für jeden Sprint werden die Aufgaben dem Product Backlog entnommen und priorisiert. Die Aktivitäten der beteiligten Personen werden täglich im Daily Scrum abgestimmt. Die in dem aktuellen Sprint zu erledigenden Aufgaben werden dabei im Sprint Backlog festgehalten. Kommt es im Daily Scrum zu einer Änderung der Prioritäten einzelner Aufgaben aus dem Backlog, kann dies umgehend berücksichtigt werden, so dass sichergestellt werden kann, dass die Aufgaben mit der höchsten Priorität zuerst erledigt werden. Der gesamte Fortschritt der Arbeit wird in einem Burndown Chart dargestellt.

**Modellentwurf/Simulationstest** Modelle bilden die Realität in abstrahierter Form nach. Der Abstraktionsgrad der Modelle richtet sich nach den jeweiligen Ansprüchen. Für die Unterstützung der Anforderungsspezifikation sind die Modelle sehr abstrakt gestaltet, um die Komplexität zu reduzieren und die allgemeinen Abhängigkeiten und Abläufe verständlich darzustellen. Soll der Inhalt der Modelle erlebbar sein, müssen die Modelle detaillierter und vor allem ausführbar gestaltet werden. Hier kom-

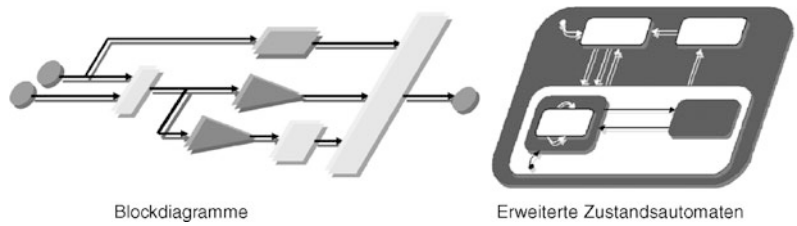



**Abb. 8.8** Grafische Beschreibungstechniken [10]

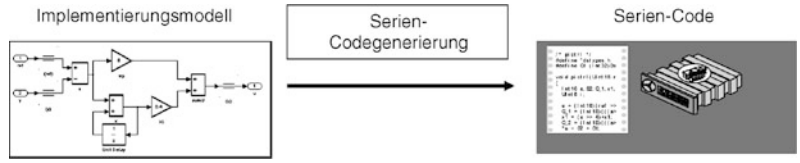



**Abb. 8.9** Automatisierte Codegenerierung für den Serieneinsatz [10]

men grafische Beschreibungstechniken wie Blockdiagramme oder Zustandsautomaten zum Einsatz (Abb. 8.8). Blockdiagramme, häufig auch als Datenflussdiagramme bezeichnet, stellen kontinuierliche Daten- oder Signalflüsse dar. Beim Zustandsautomaten hingegen werden diskrete Zustände und die jeweils klar definierten Zustandsübergänge abgebildet. Trotz der grafischen Beschreibung sind diese Techniken als formal oder zumindest semiformal anzusehen, da die verwendeten Modelle weitestgehend eine formale, eindeutige Semantik haben. Das Verhalten ist exakt beschrieben und kann daher nicht falsch interpretiert werden.

Die zu entwickelnden Funktionen lassen sich mit diesen Beschreibungstechniken nach dem Baukastenprinzip zusammenstellen. Unter bestimmten Voraussetzungen ist es auch möglich, die beiden Techniken miteinander zu kombinieren. Für die Modellerstellung sind keine Programmierkenntnisse im herkömmlichen Sinne erforderlich. Die modellierten Inhalte lassen sich überprüfen, sobald die Modelle in ausführbarer Form vorliegen.

**Rapid Control Prototyping und Codegenerierung** Simulationen im Labor können nicht alle relevanten Testfälle abdecken. Insbesondere bei dynamischen Systemen ist eine Abarbeitung in Echtzeit am realen Prozess erforderlich. Die Interpretation der Modelle selbst erlaubt keine Abarbeitung in Echtzeit. Dazu müssen die grafischen Modelle in konkrete Programmiersprachen übersetzt werden und in ein Echtzeitbetriebssystem eingebettet werden. Auf geeigneten Rechnern können die übersetzten Modelle in der realen Umgebung zuerst im Labor und anschließend im Fahrzeug erprobt werden. Diese Vorgehensweise wird als Rapid Control Prototyping bezeichnet und hat sich in den vergangenen Jahren etabliert, insbesondere bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen [21]. Dadurch können die zu entwickelnden Funktionen schon in einer sehr frühen Phase im realen Fahrzeug „erlebt“ werden. Die Validierung der Modelle lässt sich realitätsnah durchführen. Zusammen mit der abstrakten Beschreibung können schnell alternative Ideen real getestet werden, sodass in der Folge ein stabiles und abgesichertes Konzept entsteht. Die Risiken und der Aufwand bei der nachfolgenden, kostspieligen Realisierung der Modelle können so minimiert werden.

Die Implementierung eines validierten Modells im Seriensteuergerät wird automatisiert mit Hilfe von Codegeneratoren durchgeführt ([10], Abb. 8.9). Hocheffizienter Seriencode kann automatisiert jedoch nur dann generiert werden, wenn die Modelle in einem angepassten Modellierungsstil erstellt sind. Dazu gehört die Beschränkung auf solche Modellierungselemente, die vom Codegenerator in effizienten Code umgesetzt werden können und die mit den begrenzten Ressourcen des Seriensteuergeräts auskommen. Die Verwendung und Einhaltung von Modellierungsrichtlinien ist daher notwendig. Bei Verwendung eines seriennahen Prototyping-

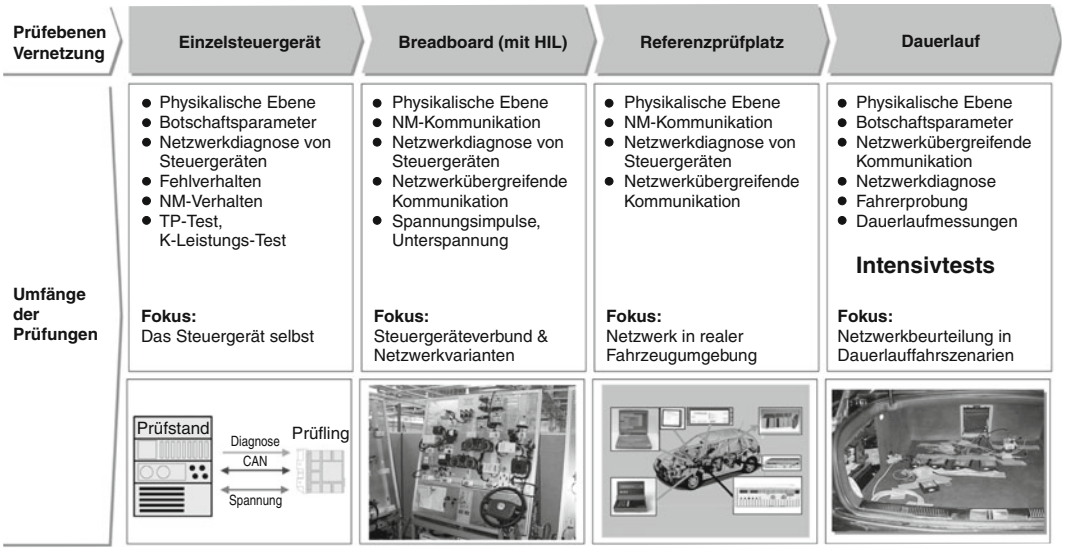



**Abb. 8.10** Prüfebenen der Vernetzung [17]

Systems oder des Seriensteuergeräts selbst ist ein Test in der realen Umgebung am Prüfstand oder im Fahrzeug möglich [21].

### 8.1.3.2 Systemintegration

Kernaufgabe des Automobilherstellers bei der Integration ist es, die Funktionssicherheit des elektronischen Gesamtsystems und insbesondere der vernetzten Steuergeräte zu garantieren. Bis vor wenigen Jahren reichte es aus, lediglich einzelne Steuergeräte unabhängig voneinander zu erproben. Heute dagegen sind in immer stärkerem Maße Erprobungen im Systemverbund erforderlich. Offene Signalschnittstellen, die im realen System durch Sensoren bzw. Aktoren bedient werden, werden durch Simulatoren nachgebildet. Zur Durchführung einer stufenweisen Integration der Elektronikkomponenten und deren Funktionsabsicherung ist ein Prozess notwendig, der aus den vier einzelnen, in Abb. 8.10 dargestellten und nachfolgend beschriebenen Testebenen besteht.

Jede Ebene hat dabei ihre eigenen Testschwerpunkte. Folgende Erprobungsumfänge werden berücksichtigt:

- Simulation und Tests der Busphysik und -topologie,
- Tests auf der Botschafts- und Signalebene,
- Test des Transportprotokolls,
- Entwicklung von Prüfständen und Teststrategien,
- Tests realer, vernetzter Steuergeräte im Verbund,
- Test der gesamten Vernetzung in einem realen Fahrzeug,
- Test des Netzwerkverhaltens im Dauerlauf,
- Einhaltung von Prüfnormen und -vorschriften.

**Testautomatisierung** Um die wachsende Menge der Aufgaben im Testumfeld bei zunehmender Reduzierung der Entwicklungszeit und unter Berücksichtigung der Kosten- und Qualitätsanforderungen zu bewältigen, muss ein immer größerer Teil der Tests automatisiert ablaufen. Dadurch können Tests auch während der Nacht und am Wochenende durchgeführt werden (Lights-out-Tests). Der Zeitgewinn kann wiederum dazu genutzt werden, Testtiefe und Testabdeckung zu steigern. In den späten Entwicklungsphasen hat sich das automatisierte Testen bereits etabliert. Die Tests der Steuergeräte werden mit Hilfe von Hardware-in-the-Loop (HiL)-Simulation durchgeführt. Dazu werden die realen elektronischen Steuergeräte in eine Simulationsumgebung eingebunden. Die Generierung der Sensorsignale sowie die Erfassung und Ver-

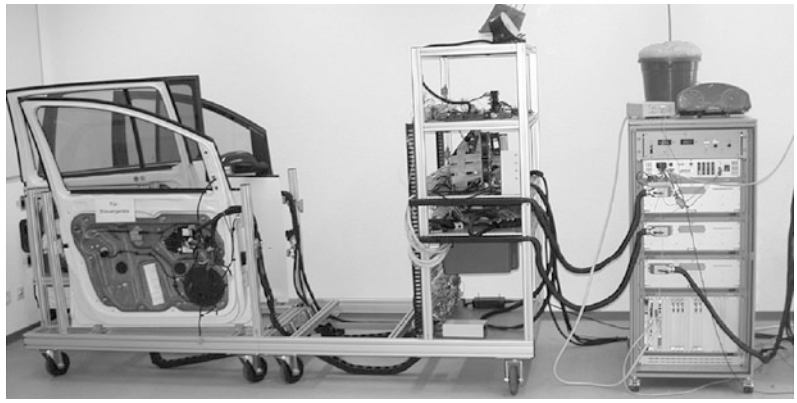


**Abb. 8.11** Breadboardaufbau des CAN-Komfortsystems (inklusive Subsysteme) [17]



arbeitung der Aktorsignale erfolgen dabei in echtem Zeit- und Werteverhalten. Komplexe Fahrzeugkomponenten wie Motor, Getriebe oder Fahrwerk werden im Simulator über spezielle mathematische Modelle nachgebildet. Großer Vorteil dieser Simulatoren ist, dass die Tests jederzeit reproduzierbar sind. Der Nutzen von HIL-Simulation und Testautomatisierung konnte bereits in vielen Projekten nachgewiesen werden [15].

**Einzelsteuergerätetest** Die einzelnen Steuergeräte werden bezüglich ihres spezifischen funktionalen Verhaltens bis zur Schnittstelle geprüft. Die Schnittstelle kann entweder ein Bussystem sein oder aber aus konventionellen Signalleitungen bestehen. Für diese Tests werden HiL-Simulatoren eingesetzt. Auf diese Weise lassen sich Funktionsfehler unter Echtzeitbedingungen aufdecken, die als Einzelfehler im späteren Fahrzeugnetzwerk nur schwer zu diagnostizieren wären.

Weiterhin wird die Grundkommunikation des Steuergeräts überprüft. Um das Verhalten des Steuergeräts im Fehlerfall, vor allem bei Leitungsfehlern, zu analysieren, werden bewusst Fehler injiziert, um die Fehlertoleranz des Prüflings zu bestimmen.

**Integrationstest** In der nächsten Teststufe werden die Wechselwirkungen zwischen Funktionen verschiedener Steuergeräte und deren Kommunikation im Verbund überprüft, um festzustellen, ob sich das zusammengesetzte System den Vorgaben entsprechend verhält.

Der so genannte Breadboardtest stellt den ersten steuergeräteübergreifenden Test eines vernetzten Systems oder Teilsystems innerhalb des Fahrzeugs dar (Abb. 8.11). Im Gegensatz zu den Komponententests werden die Schnittstellen zwischen den Steuergeräten in die Tests integriert. Dazu werden die Steuergeräte über die Bussysteme miteinander verbunden und mit Sensoren und Aktoren so funktionsnah wie möglich betrieben. Die Eingangsparameter werden über weite Bereiche variiert und dabei die Reaktionen erfasst und ausgewertet. Zusätzlich ist die Möglichkeit der Fehlerinjektion gegeben. Der Prozess kann mit HiL-Simulatoren unterstützt werden. Für jedes Bussystem werden getrennte Breadboardtests durchgeführt.

Beim Referenzfahrzeugtest werden elektronische Funktionen an einem exemplarisch aufgebauten Fahrzeug überprüft, das aus einer Fahrzeugkarosse, einem kompletten Fahrzeugbordnetz, den zugehörigen Steuergeräten sowie den Sensoren und Aktoren eines Fahrzeugprojektes besteht. Motor und Getriebe werden weiterhin mit einem eigenen Simulator nachgebildet. Ziel dieses Tests ist es, den Einsatz von Steuergeräten mit neuen Hard- und/oder Softwareversionen abzusichern. Die vernetzten Fahrzeuggrundfunktionen werden dazu nach standardisierten Testumfängen anhand

des Prüfkatalogs abgeprüft. Der Schwerpunkt liegt besonders auf Funktionen, die Fahrer und Insassen wahrnehmen.

**Gesamtsystemtest** Die Dauerlauferprobung dient der Beobachtung und Analyse von Vernetzungsproblemen in einem realen Fahrzeug im Dauereinsatz. Die Priorität liegt dabei nicht auf den gefahrenen Kilometern, sondern auf der Betriebszeit der elektrischen Komponenten. Schwerpunktmäßig wird die Zuverlässigkeit dieser Komponenten wie zum Beispiel von Scheibenwischer oder Fensterheber bei der Bedienung getestet. Dazu wird ein aus bekannten Fahrszenarien zusammengesetzter Fahrzyklus verwendet.

Die Intensivtests stellen die letzte Station der Integration von Elektronik in ein Fahrzeug dar. Das Gesamtsystemverhalten aus Kundensicht wird in intensiven Prüfungen unter definierten Bedingungen getestet, die die möglichen Einsatzszenarien des Fahrzeugs möglichst exakt widerspiegeln und auch Missbrauchstests enthalten. So werden die Fahrzeuge in Klimakammern auf ihr Verhalten in besonders heißen oder kalten Umgebungen getestet. Es werden aber auch Messungen beispielsweise des Ruhestroms oder des EMV-Verhaltens vorgenommen. Grundlage für die Durchführung dieses Tests sind elektrisch aktuelle Fahrzeuge. Durch eine kontinuierliche Aktualisierung des Baustandes wird die Verfügbarkeit solcher Fahrzeuge sichergestellt.

Als Abschluss dieses Tests sind die Erprobungsfahrten zu sehen, bei denen die fertigen Fahrzeuge in realer Umgebung auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden. Auch hier werden Extremsituationen ausgesucht, um das Grenzverhalten der Fahrzeuge festzustellen. Verlaufen diese Tests erfolgreich, steht der Freigabe für die Produktion dieser Fahrzeuge von Seiten des Gesamtsystemverhaltens nichts mehr im Wege.

## 8.1.4 AUTOSAR

2003 ging die Entwicklungspartnerschaft AUTOSAR an den Start. Unternehmen aus der Automobilindustrie, der Elektronik-, Halbleiter- und Softwareindustrie haben sich zum gemeinsamen Ziel gesetzt, eine offene und standardisierte Architektur für Fahrzeugsoftware zu schaffen und auf breiter Basis zu etablieren. Heute lässt sich sagen: Dieses Ziel wurde erreicht. Mit AUTOSAR bleibt die steigende Komplexität automobiler E/E-Architekturen beherrschbar. Der Ansatz ist zu dem Standard für Automotive-Software geworden und ist für OEMs und Zulieferer die Basis der Zusammenarbeit mit ihren Partnern. Auch in Zukunft wird AUTOSAR unterstützen, den rasanten technischen Fortschritt zu meistern. Die beteiligten Unternehmen werden hierfür die existierenden Standards weiterentwickeln, aber auch vollkommen neue Konzepte integrieren.

### 8.1.4.1 Zunehmender Umfang des Standards und Pflege der existierenden Versionen

Eine wichtige und permanente Herausforderung ist der ständig wachsende Funktionsumfang des AUTOSAR Standards, der aus den kontinuierlich zunehmenden Anforderungen der Anwender resultiert. Um diesen, sowie die, sich daraus ergebende, zunehmende Komplexität des ursprünglichen AUTOSAR Standards beherrschen zu können, hat AUTOSAR Spezifikationen mit großen funktionalen Zusammenhängen zu Produkten zusammengefasst. So ist es möglich, diese zeitlich entkoppelt weiter zu entwickeln und unabhängig voneinander zu veröffentlichen. Die existierende AUTOSAR Architektur und die Spezifikationen der Templates bilden dabei das Produkt AUTOSAR Classic Platform.

Zugleich fordert der Anwender Stabilität beziehungsweise Rückwärtskompatibilität – ein wichtiges Anliegen, das sich aus dem Serieneinsatz der Classic Platform ergibt. Um diesem Rechnung zu tragen, wurde ein weiteres Produkt, die AUTOSAR Acceptance Tests, eingeführt. Bei den Acceptance Tests handelt es sich um Standardfunktionstests, die auf Spezifikationsebene darauf abzielen, das Verhalten einer Implementierung der AUTOSAR Classic Platform an ihren äußeren Schnittstellen zu validieren. Die Ausführung dieser Tests überprüft sowohl die Interoperabilität des zu testenden AUTOSAR Basissoftware-Stacks mit AUTOSAR Anwendungskomponenten als auch in einem Fahrzeugnetzwerk.

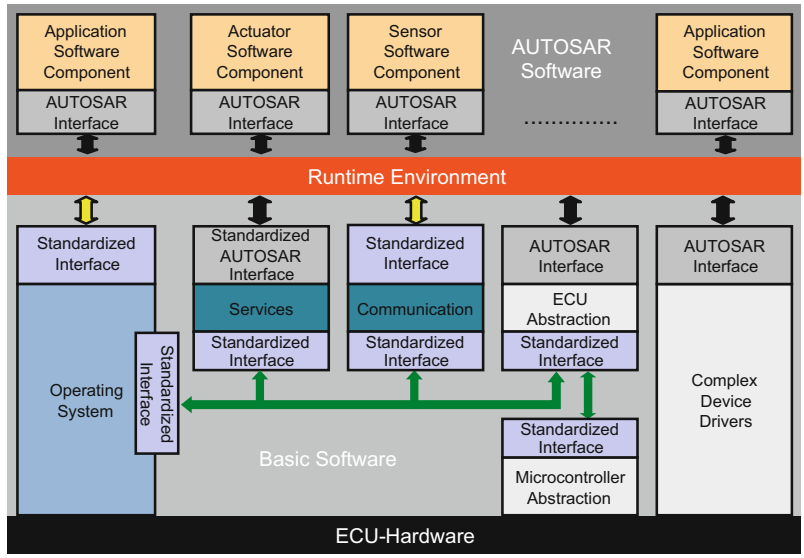



**Abb. 8.12** Die Software-Architektur der AUTOSAR Classic Platform [1]

### 8.1.4.2 Die drei Bereiche der Standardisierung von AUTOSAR Software-Plattformen

Die Standardisierung der AUTOSAR Classic Plattform unterteilt sich in die drei Bereiche Softwarearchitektur, Entwurfsmethodik und Anwendungsschnittstellen, siehe Abb. 8.12.

#### 8.1.4.2.1 Softwarearchitektur

Das Hauptkonzept der standardisierten ECU Softwarearchitektur besteht aus der Trennung von hardwareunabhängiger Anwendungssoftware und hardwareorientierter Basic Software (BSW). Dies wird erreicht durch die Software-Abstraktionsschicht Runtime Environment (RTE).

Auf der einen Seite ermöglicht diese Abstraktionsschicht die Entwicklung von OEM-spezifischen und wettbewerbsrelevanten Software-Anwendungen wie Fahrerassistenzsystemen. Auf der anderen Seite erlaubt sie die Standardisierung von OEM-unabhängiger BSW. Sie ist ferner die Voraussetzung für die Skalierbarkeit der ECU-Software für verschiedene Fahrzeuglinien und -varianten und die Möglichkeit Anwendungen auf mehrere ECUs zu verteilen und Softwaremodule aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren.

Die BSW innerhalb der AUTOSAR-Softwarearchitektur ist weiter unterteilt in die Schichten „Services“, „ECU Abstraction“ und „Microcontroller Abstraction“. Die Abstraktion der Anwendungsschicht von der BSW ist durch die RTE realisiert, die Kontrollmechanismen zum Datenaustausch zwischen diesen Schichten enthält. Dies bildet die Grundlage für eine komponentenorientierte, hardwareunabhängige Softwarestruktur auf Anwendungsebene, mit Softwarekomponenten als eigenständigen Einheiten.

Beispielsweise wird die Funktion eines Fahrerassistenzsystems durch Softwarekomponenten umgesetzt. Diese Softwarekomponenten bilden die Anwendung. Die einzelnen Softwarekomponenten kommunizieren direkt nur mit der RTE. Damit gestaltet sich die Kommunikation transparent und unabhängig davon, ob sie innerhalb eines Steuergerätes oder über Steuergerätegrenzen hinweg stattfindet.

Durch diese Unabhängigkeit wird es ermöglicht, Softwarekomponenten ohne spezifisches Wissen über die verwendete oder geplante Hardware zu entwickeln bzw. die bestehenden Softwarekomponenten flexibel zwischen den ECU zu verteilen.

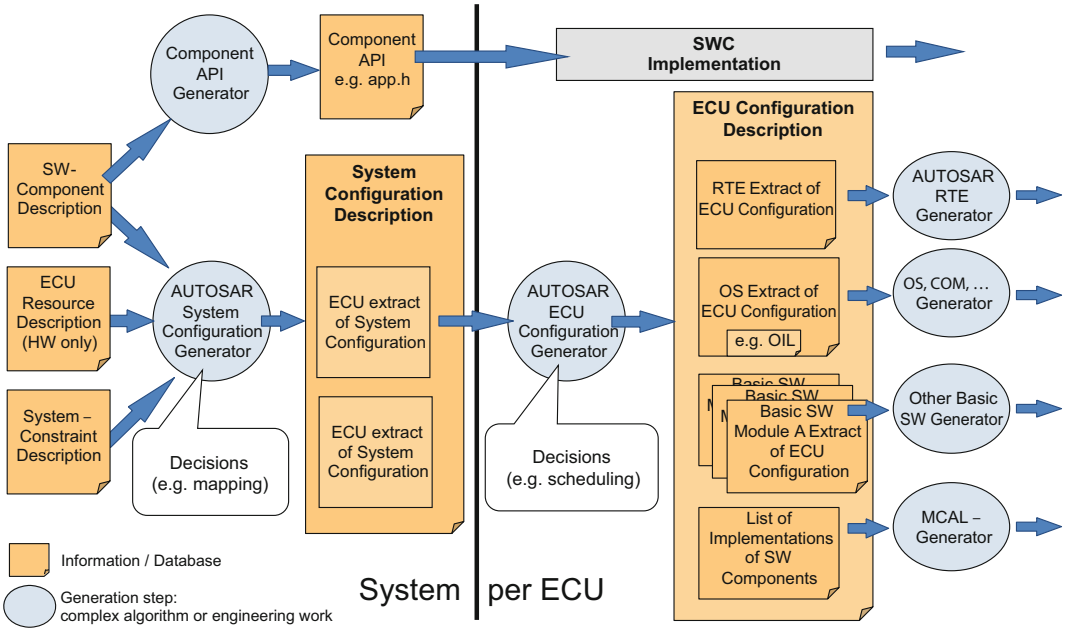



**Abb. 8.13** Das Prinzip der AUTOSAR Entwurfsmethodik [1]

### 8.1.4.2.2 Entwurfsmethodik

Neben der Softwarearchitektur standardisiert AUTOSAR auch die Methodik der Softwareentwicklung im Automobilbereich, vor allem um die Zusammenarbeit der in heutigen Serienprojekten beteiligten Partner zu erleichtern.

Die AUTOSAR Entwurfsmethodik adressiert besonders Aspekte, die notwendig sind, um Softwarekomponenten in eine ECU und verschiedene ECUs in die gesamte Netzwerkskommunikation mit unterschiedlichsten Bussystemen zu integrieren. Sie definiert die Abhängigkeiten von Aktivitäten für Arbeitsprodukte und unterstützt Aktivitäten, Beschreibungen und Nutzung von Werkzeugen in AUTOSAR. Die Methodik wird in der Entwicklung der Anwendungssoftware, der Laufzeitumgebung, sowie in der Systemkonfiguration angewandt.

Für Informationen, die in der AUTOSAR-Entwurfsmethodik entstehen oder verwendet werden, hat AUTOSAR ein formales Datenaustauschformat (AUTOSAR-Schema) mit entsprechenden semantischen Randbedingungen definiert. Die Informationen werden dann als formale Beschreibungen in AUTOSAR XML (.arxml) Dateien gespeichert. Zahlreiche Tools verwenden diese Beschreibungen für die Konfigurierung und Generierung von RTE und AUTOSAR BSW. Beispielsweise bietet die Softwarekomponentenbeschreibung ein standardisiertes Komponentenmodell für Anwendungssoftware. Oder die Systembeschreibung definiert die Beziehung zwischen der reinen Softwaresicht auf das System und der physikalischen Systemarchitektur mit vernetzten ECU-Instanzen. Sie beschreibt die Netzwerktopologie, die Kommunikation für jeden Kanal und die Zuteilung der Softwarekomponenten auf die verschiedenen ECUs.

Das Prinzip der AUTOSAR Entwurfsmethodik ist in Abb. 8.13 dargestellt.

Neben der Grundfähigkeit, E/E-Systeme im Automobilbereich zu beschreiben, gibt es viele Aspekte, die durch praktische Austauschformate unterstützt werden müssen, wie Dokumentation, Anforderungsverfolgung und Lebenszyklen verschiedener Artefakte.

Das integrierte Variantenmanagement erlaubt OEMs und Zulieferern darüber hinaus, grundlegende AUTOSAR-Produktlinien zu formulieren und diese Informationen, wann immer notwendig, mit ihren Partnern auszutauschen. Denn das gemeinsame Verständnis und die abgestimmte In-

terpretation über diese Varianten sind ein Schlüsselelement für die erfolgreiche Zusammenarbeit in gemeinsamen Projekten.

#### 8.1.4.2.3 Anwendungsschnittstellen

Die Anbindung der Anwendungskomponenten an die RTE wird durch Anwendungsschnittstellen sichergestellt. AUTOSAR standardisiert zum einen den grundsätzlichen Schnittstellenmechanismus mit der Syntax und zum anderen auch die Semantik der Anwendungsschnittstellen in den Fahrzeugbereichen Karosserie, Innenraum und Komfort, Antriebsstrang, Fahrwerk, sowie Insassen- und Fußgängerschutz. Dabei liegt der Fokus auf den Schnittstellenspezifikationen für breit eingeführte Applikationen, um die Wiederverwendung und den Austausch von Softwarekomponenten sicherzustellen. Schließlich ist der Einsatz von standardisierten Anwendungsschnittstellen für die Wiederverwendung von Anwendungen von entscheidender Bedeutung.

Die Schnittstellenspezifikationen werden von Experten aller AUTOSAR-Partner z. B. bzgl. verwendeter Datentypen, Einheiten und Skalierungsfaktoren standardisiert. Sie ermöglichen Software-Designern und Entwicklern, sie im Falle von Erweiterungen oder Wiederverwendungen von Softwarekomponenten unabhängig von einer spezifischen Hardware bzw. ECU zu nutzen.

Anwendungen wie Fahrerassistenzsysteme enthalten wettbewerbsdifferenzierende Merkmale. Daher standardisiert AUTOSAR nicht das interne funktionale Verhalten einer Anwendung, wie z. B. Algorithmen, sondern lediglich die Informationen, die zwischen den Anwendungen ausgetauscht werden.

### 8.1.4.3 Eine neue Klasse von Steuergeräten entsteht

In letzter Zeit haben sich zwei wichtige Trends herauskristallisiert, die in den nächsten Jahren großen Einfluss auf die Entwicklung von Fahrzeugsoftware haben werden: Das hochautomatisierte und autonome Fahren sowie die zunehmende Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umgebung. Die damit verbundenen Anwendungen werden eine neue Klasse von Steuergeräten hervorbringen. AUTOSAR hat im Sinne einer Vorwärtsstandardisierung beschlossen, hierfür ein neues Produkt die AUTOSAR Adaptive Platform zu entwickeln.

Die technischen Herausforderungen an dieser Stelle sind beachtlich. Entwicklungen wie das hochautomatisierte Fahren erfordern einen hohen Grad an Ausfallsicherheit, kombiniert mit sehr hohen Anforderungen an Rechenleistung und Speicherplatz, der nur durch Multi-Core Prozessoren erfüllt werden kann. Im Zusammenhang mit der Vernetzung des Fahrzeugs ermöglichen es neuartige Car-to-X-Technologien, wie im Bereich der Consumer Elektronik schon lange üblich, Funktionen im Fahrzeug als eigenständiges Softwareprodukt anzubieten und bei Bedarf nachträglich zu installieren. Diese und weitere sich abzeichnende Anwendungen, genannt sei an dieser Stelle die Vernetzung mit der Infrastruktur, erfordern die Integration in neue oder bestehende IT-Cloud-Architekturen beziehungsweise in off-board Systeme, die Daten an einen Server des Anbieters schicken werden. All dies fordert neue Sicherheitsarchitekturen, die den unterschiedlichen Zugängen zum Fahrzeug Rechnung tragen müssen.

Das Ergebnis: Die vorhandene Softwarearchitektur ist von ihren Grundeigenschaften her sehr stark auf die Bedürfnisse der Steuerungs- und Regelungstechnik zugeschnitten, also auf Themen wie ein streng deterministisches Verhalten oder die optimale Ressourcenauslastung. Um auch neue Anwendungsfelder in geeigneter Weise abdecken zu können, entschied man sich für die Entwicklung einer neuen Plattform.

### 8.1.4.4 Der nächste Technologiesprung von AUTOSAR: Die AUTOSAR Adaptive Platform

Bei neuartigen Anforderungen, etwa der dynamischen Verteilung (Deployment) von Applikationen auf Steuergeräte mit multi-core Prozessoren oder bei Technologien wie dem Update-over-the-air sind neue technologische Lösungsansätze notwendig. Diese lassen sich mit einer speziell dafür konzipierten Softwareplattform deutlich effizienter umsetzen. Hierfür wird es die AUTOSAR Adaptive Platform geben, ◘ Abb. 8.14.

Die neue Plattform orientiert sich in der Softwarearchitektur sowie in Bezug auf die Hardwarean-

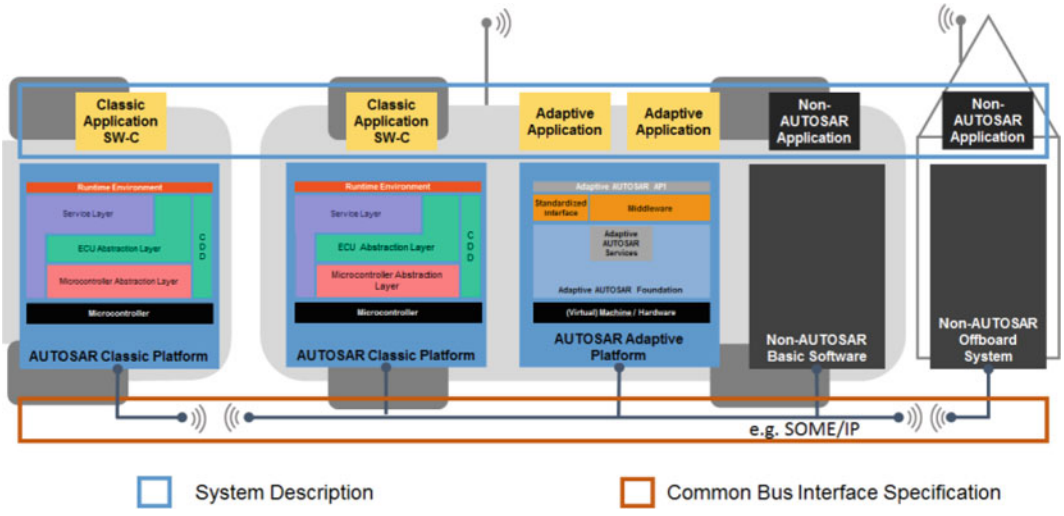



**Abb. 8.14** Integration der AUTOSAR Classic und AUTOSAR Adaptive Platform mit nicht-AUTOSAR- und off-board-Systemen [1]

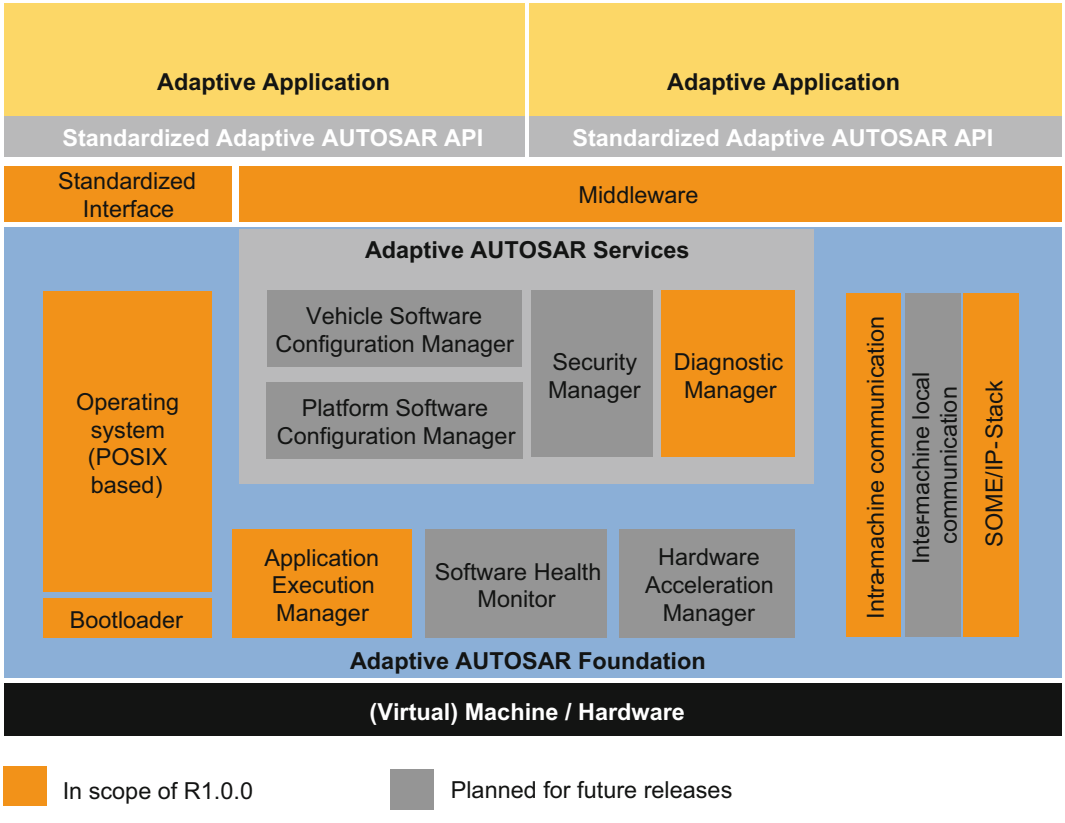



**Abb. 8.15** Architektur der AUTOSAR-Adaptive Plattform nach [1]

forderungen deutlich stärker an Lösungen, die im Consumer- und Telekommunikationsumfeld bereits weit verbreitet sind. Bei der Spezifikation der AUTOSAR Adaptive Platform soll daher auch verstärkt auf existierende Technologien und Standards wie beispielsweise den Unix API-Standard POSIX (Portable Operating System Interface) zurückgegriffen werden. Dabei ist natürlich sicherzustellen, dass diese Technologien den besonderen Anforderungen der Automobilindustrie gerecht werden und entsprechend erweitert werden. Softwarekomponenten, die auf der AUTOSAR Adaptive Platform ausgeführt werden, folgen dabei dem Paradigma der serviceorientierten Kommunikation. Die AUTOSAR-Partner arbeiten momentan gemeinsam an der Architektur dieser zweiten Softwareplattform.

Für das erste Release, siehe ◘ Abb. 8.15, sind bislang zwei Kernfunktionen vorgesehen: 1. Die Bereitstellung der Basisfunktionalität zur Integration von Applikationen verschiedener Lieferanten und 2. die Integrierbarkeit in die existierenden Fahrzeugbordnetze. Im Umfang des ersten Release soll – so der Plan der Entwickler – neben Teilen des POSIX Standards außerdem ein Zustandsmanagement, eine Middleware-Technologie zur Integration von Applikationen und die Unterstützung der automotive-spezifischen Diagnoseprotokolle (Unified Diagnostic Services) enthalten sein.

Das erste Release soll über die notwendige Basisfunktionalität verfügen, um Toplevel-Anwendungsfälle wie Update-over-the-air, Software-as-a-product und das Deployment von Applikationen zur Laufzeit zu unterstützen. Zusätzlich zu diesen Anwendungsfällen müssen auch heute schon Themen wie der Support von Fail-Operational Systems (Applikation arbeitet auch im Fehlerfall weiter) und die Unterstützung heterogener Architekturen mitbedacht werden. Daraus ergeben sich weitere Anforderungen an den angestrebten, breit aufgestellten Standard für eine Automotive Software-Plattform.

Die notwendigen Funktionen sind aus diesem Grund bereits in der Architektur der AUTOSAR Adaptive Platform vorgesehen und werden in zukünftigen Releases des Standards dann rückwärtskompatibel ergänzt. Aktuell betroffen sind beispielsweise die Integration eines steuergeräteübergreifenden Konfigurationsmanagements zum Einspielen von Software-Updates, ein Konzept zum Einbinden von Hardwarebeschleunigern und die Unterstützung von Sicherheitsmechanismen, die den heutigen Anforderungen gerecht werden.

#### 8.1.4.5 Die Integration verschiedener Plattformen

Die AUTOSAR-Methodologie ist der einzige Standard, der die Softwarearchitektur und die Bordnetztopologie eines Fahrzeugs in einem einheitlichen Format beschreibt. Im Mittelpunkt steht dabei von Anfang an die AUTOSAR-Basissoftware, die der Konfiguration eines Netzwerks aus Steuergeräten dient. Die zuvor beschriebenen neuen Anforderungen führen zu heterogenen Architekturen, da in Zukunft unterschiedliche, für ihr jeweiliges Anwendungsgebiet optimierte Softwareplattformen berücksichtigt werden müssen. Schon heute finden sich in den meisten Fahrzeugen Steuergeräte mit verschiedenen Softwareplattformen. Insbesondere die Domäne der Infotainment-Steuergeräte setzt typischerweise nicht auf AUTOSAR auf. Mit dem Aufkommen hoch performanter Zentralsteuergeräte und Integrationsplattformen wird sich dieser Trend noch verstärken. Wesentliches Ziel der AUTOSAR Methodologie muss es daher sein, die Integration dieser unterschiedlichen Plattformen zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem und die Interaktion mit off-board Systemen bestmöglich zu unterstützen.

#### 8.1.4.6 Fazit zu AUTOSAR

Seit mehr als 10 Jahren bewährt sich AUTOSAR bei der Erstellung, Wartung und Weiterentwicklung des AUTOSAR-Standards und auch bei der gemeinsamen Erarbeitung von Lösungen für zukünftige Herausforderungen als eine sehr gut funktionierende Partnerschaft. AUTOSAR verfolgt stärker denn je das Ziel, neben dem heute fest etablierten Standard, der AUTOSAR Classic Platform auch für neue funktionale und technologische Anforderungen frühzeitig standardisierte Lösungen bereit zu stellen. Daher strebt AUTOSAR an, auch für die neuen Anwendungen aus den beiden Bereichen „Connectivity“, „Digitalisierung“ und „hochautomatisiertes Fahren“ rechtzeitig ein optimales und standardisiertes Software-Framework bereitzustel-

len. So wird sichergestellt, dass die AUTOSAR-Partnerschaft ihre Position als Anbieter von Standardsoftwareplattformen in einem sich stark verändernden Umfeld auch in den kommenden Jahren behaupten kann.

## 8.2 Das Bordnetz

### 8.2.1 Einführung

Der Begriff Bordnetz wird je nach Kontext häufig in sehr unterschiedlicher Weise und für unterschiedliche Systeme verwendet. In diesem Kapitel wird das physikalische Bordnetz behandelt, welches durch die Funktionen gemäß ◘ Tab. 8.1 definiert wird. Damit hat es auf die Qualität und die funktionale Sicherheit des Endproduktes Automobil einen großen Einfluss. Infolge der hohen Teile- und Variantenzahl, seiner unhandlichen Form und vieler manueller Fertigungsschritte ist die Beherrschung jedes Details nicht nur in der Konstruktion und Validierung, sondern stärker als bei allen anderen Elektrikkomponenten auch in der Logistik und den Fertigungsabläufen von besonderer Bedeutung.

Generell ist das Bordnetz durch seine hohe Anzahl an mechanischen, elektrischen und fertigungstechnischen Schnittstellen gekennzeichnet, was während der Entwicklung eine sehr enge Abstimmung mit anderen Fachbereichen bedingt. Dabei war die Vorgehensweise bei der Grundauslegung eines Bordnetzes über lange Zeit relativ geradlinig: Ausgehend von der in Schaltplänen dokumentierten elektrischen Verschaltung der Komponenten und Systeme wurde in den durch die Fahrzeugauslegung vorgegebenen Kabeltrassen eine Leitungsführung entwickelt, die man bei Bedarf durch Unterteilung mittels Steckverbindungen an die Gegebenheiten der Fahrzeugmontage angepasst hat. Diese Vorgehensweise führt aufgrund des stark angestiegenen Umfangs an elektrisch/elektronischen Systemen in modernen Fahrzeugen nicht nur zu unwirtschaftlichen, sondern auch zu nicht mehr verbaubaren Lösungen. Besondere Anforderungen stellen in diesem Zusammenhang die Einführung der elektrischen Traktion, z. B. in Hybridfahrzeugen, der Einsatz weiterer elektrischer Nebenaggregate und die damit verbundene Implementierung eines Hochleistungsbordnetzes dar.

### 8.2.2 Bestandteile des Bordnetzes

#### 8.2.2.1 Übersicht

Das Bordnetz besteht aus allen zur Verbindung und Versorgung der elektrischen Bauteile eines Fahrzeuges erforderlichen Komponenten, einschließlich der zu ihrer Integration (Befestigung, Einbau) und Schutz im Fahrzeug nötigen nichtelektrischen Bauteile (◘ Abb. 8.16).

Von den etwa 11.000 Teilen, die laut Stückliste eines Fahrzeugmodells der Elektrik zugeordnet werden, entfällt der weitaus größte Umfang auf das Bordnetz aufgrund seiner vielen Ausführungsvarianten. In ◘ Tab. 8.2 sind die wichtigsten Teilegruppen aufgeführt. Sie sind überwiegend in Kabelsätzen als *Fertigungsmodule* zusammengefasst, können aber auch, z. B. als Befestigungs- oder Schutzteile an der Karosserie, Aggregaten oder anderen Montageeinheiten vor Einbau der Leitungssträngen im fahrzeugbauenden Werk vormontiert werden.

#### 8.2.2.2 Randbedingungen

Wie für alle Bauteile im Fahrzeug gelten auch für die Bordnetzkomponenten die allgemeinen Automobilanforderungen hinsichtlich Kosten, Gewicht, Qualität und Volumen sowie bauraumspezifische Umweltanforderungen. Letztere können in kritischen Bereichen für Steckersysteme und Leitungen hinsichtlich Temperatur, Vibration, Biegebeanspruchung, Feuchtigkeit und chemische Beanspruchung sehr hoch sein. Darüber hinaus ist das Bordnetz EMV-relevant, obwohl es weder Quelle noch Senke für elektromagnetische oder leitungsgebunden Störungen darstellt. Damit ergeben sich weitere Anforderungen für die Auslegung sowie Maßnahmen wie z.B. Schirmung. Zu berücksichtigen ist ferner, dass die höchste mechanische Beanspruchung für etliche Teile nicht im verbauten Betrieb, sondern während der Konfektion und der Montage im Fahrzeug erfolgt. Da diese beiden Prozesse auch aufwendig und potenziell fehleranfällig sind, sind häufig eine besonders ergonomische Gestaltung und fertigungsunterstützende bzw. -absichernde Elemente notwendig. Da das Bordnetz keine direkt erfahrbare

**Tabelle 8.1** Funktionalität des Bordnetzes und Abgrenzung gegenüber verbundenen Systemen

| **Bordnetz** | | **Verbundene Systeme** |
|---|---|---|
| **Funktion** | **Subfunktion** | |
| Signalverteilung | Absicherung<br>Potenzialsteuerung<br>Diagnose | Elektrische Energieerzeugung<br>Elektrische Energiespeicherung<br>Energiemanagement<br>Wandler<br>Bussysteme und Netzwerke |
| Energieverteilung | | |





**Abb. 8.16** Elektrikkomponenten (*blau*) und Bordnetz (*braun*) eines Oberklasse-Fahrzeuges

**Tabelle 8.2** Bestandteile des Bordnetzes und, in Klammern, typische Teilezahl in einem Fahrzeug der unteren Mittelklasse

| **Elektromechanik** | **Mechanik** |
|---|---|
| – Einzelleitungen (~600)<br>Leitungen mit Aktuator/Sensor<br>Spezialleitungen<br>– Steckgehäuse und Kontakte (~170/700)<br>– Potentialverteiler<br>Splice (Crimps, US-Verbindungen)<br>(~90) Massebolzen/Verbindungen<br>Andere Verbindungen<br>– Relais, Halbleiterschalter, Unterbrecher<br>Elektronische Leistungsmodule (1)<br>– Sicherungselemente | – Bänder,<br>Schläuche, Wellrohre, Schaumrohr<br>– Kabelkanäle, Schutzelemente<br>Befestigungselemente und Clipse<br>Formteile, Umschäumungen<br>Durchführungen, Tüllen<br>– Relais- und Sicherungsboxen (5) |
| Autarke Leitungssätze (Frontend, Cockpit, Himmel, Türen und Klappen, Sitze …)<br>Hauptleitungssätze | |



# **GEMEINSAM** DIE ZUKUNFT BEWEGEN.

Sie haben Ihr Studium erfolgreich abgeschlossen und möchten in der Automobilindustrie durchstarten? Oder suchen Sie eine neue berufliche Herausforderung und begeistern sich für innovative Technologien? Dann sind sie bei MD ELEKTRONIK genau richtig!

Als zuverlässiger Technologiepartner ermöglichen wir mit unseren Anbindungen automobile Sicherheit, Information und Unterhaltung. Wir stellen uns täglich zentralen Innovationsthemen, um auch in Zukunft als einer der führenden Hersteller von Datenübertragungslösungen namhafte Automobilhersteller und Systemlieferanten weltweit zu beliefern.

Dieses Ziel können wir nur mit qualifizierten und motivierten Fachkräften erreichen. Aus diesem Grund bieten wir Ihnen bei MD ELEKTRONIK vielfältige Karriereperspektiven und die Möglichkeit, in flachen Hierarchien Verantwortung zu übernehmen und Ihr Fachwissen vom ersten Tag an einzubringen.

**Denn nur gemeinsam setzen wir Impulse, die verbinden.**

Interessiert? Dann besuchen Sie unser Online Job Portal: www.md-elektronik.jobs

Wir freuen uns auf Sie und Ihre Bewerbung!

MD ELEKTRONIK

**www.md-elektronik.de**

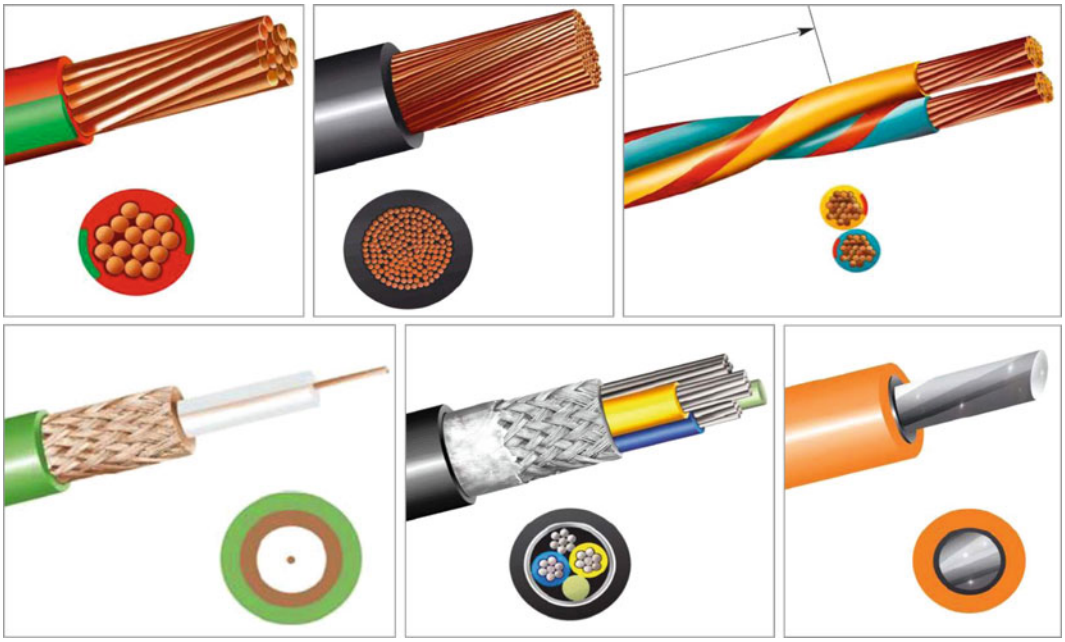


**Abb. 8.17** Beispiele von Leitungstypen (Quelle: Leoni)

Kundenrelevanz hat, sind die funktionalen Anforderungen zumeist rein elektrotechnische Größen wie Leitungs- oder Übergangswiderstand, Isolationseigenschaften oder maximale Ströme und Spannungen. Die spezifischen Randbedingungen der Komponenten schließlich werden im Folgenden beschrieben.

### 8.2.2.3 Leitungen

Das Leitermaterial von Fahrzeugleitungen ist überwiegend Kupfer und wird als Litze ausgeführt, um eine flexible Verlegung und Robustheit gegen Vibration und mechanische Belastungen zu ermöglichen. Bei Kabelstrecken, die Biegewechselbelastungen unterworfen sind, ist ggf. eine hochflexible Ausführung mit feineren Litzen erforderlich. In selteneren Fällen wird auch verzinntes Kupfer verwendet. Als Alternative für größere Querschnitte kommt zunehmend auch Aluminium aufgrund seiner Gewichts- und Kostenvorteile zum Einsatz. Allerdings benötigt Aluminium ein größeres Volumen und erfordert aufgrund seines Fließverhaltens und der Oberflächenoxidation aufwendigere Verbindungstechnologien, z. B. spezielle Crimps, Reibschweißen oder ein modifiziertes Ultraschallschweißen.

Signalleitungen können bei Bedarf zur Minimierung von Störein- und Abstrahlung verdrillt (twisted pair) oder als Koaxialleitung eingesetzt werden. Die koaxiale Ausführung besitzt zwar die besten elektrischen Eigenschaften, ist aber aufgrund ihres geflochtenen Schirms nur aufwändig zu verarbeiten. Man priorisiert daher den Einsatz von twisted pair Leitungen oder von leicht zu kontaktierenden Einzelleitern mit beigelegtem zusätzlichen Leiter in einer leitfähiger Ummantelung als Verbindung zum Schirm. Alternativ kommen für Signalleitungen auch optische Medien aus Kunststoff zum Einsatz, welche sehr breitbandig sind und keine EMV Probleme aufweisen. Nachteilig sind aber der begrenzte Temperaturbereich und der zusätzliche Aufwand für die Signalkonvertierung.

Weiterhin sind Schirmungen in Form von Einzelleiter- oder Mantelschirmung erforderlich für die Versorgungsleitungen von Hochleistungsverbraucher, da sonst bei Wechselspannungen von bis

zu einigen 100 V und Strömen von einigen 100 A nicht akzeptable Störabstrahlungen und unkontrollierte Ableitströme auftreten.

Die Leitungsquerschnitte werden zunächst nach elektrischen Kriterien bestimmt, und zwar nach dem Spannungsabfall, welcher für den angeschlossen Verbraucher noch zulässig ist, und nach der maximalen Temperatur, welche sich unter Strombelastung einstellt. Diese darf die spezifizierte Arbeitstemperatur des Isoliermaterials nicht überschreiten und ist natürlich auch von der Umgebungstemperatur abhängig. In einer heißen Umgebung ist die Stromtragfähigkeit folglich niedriger. Eine zusätzliche Randbedingung ergibt sich durch das Absicherungskonzept, da alle Leitungen eines Sicherungskreises den gleichen Querschnitt haben müssen und das Sicherungselement selbst durch den erwarteten Summenstrom definiert wird. Damit sind häufig größere Querschnitte einzusetzen als elektrisch bzw. thermisch erforderlich wären. Ein weiteres Kriterium sind die bei der Montage auf die Leiter wirkenden Zugkräfte, welche den Einsatz von Einzelleitern mit Querschnitten kleiner 0,35 $mm^2$ im Fahrzeugbau einschränken. Der Querschnitt der meisten Signalleitungen ist damit nicht durch ihre elektrische, sondern die mechanische Beanspruchung bestimmt. Für spezielle Punkt zu Punkt Verbindungen wie zwischen Geräten im Infotainment Bereich werden mehradrige Spezialkabel eingesetzt. Hier werden die Zugkräfte von dem Leitungsverbund aufgenommen, so dass auch kleinere Querschnitte eingesetzt werden dürfen.

Als Isolationsmaterial wird im Fahrzeugbau nach wie vor überwiegend PVC eingesetzt. Ersatzstoffe sind aus Umweltschutzgründen seit langem in Untersuchung, konnten sich aber wegen hoher Kosten oder schlechterer Eigenschaften bisher kaum durchsetzen. PVC erreicht seine Grenzen bei hohen Umgebungstemperaturen über ca. 105 °C, wie sie zunehmend in Aggregatenähe erreicht werden. Hier können nur Elastomere (Silikon, bis ca. 150 °C), vernetzte Kunststoffe (z. B. XPE) oder PTFE (Teflon o. ä. bis > 200 °C) verwendet werden. Neben Temperatur und Umweltverhalten ist der Isolationswerkstoff noch nach Isolierfähigkeit, Flexibilität/Härte, mechanischer Belastbarkeit, Abriebfestigkeit, Medienbeständigkeit und Flammwidrigkeit den Einsatzbedingungen entsprechend auszuwählen.

Auch hier stellen Leitungen für Anwendungen mit einigen 100 V besondere Anforderungen hinsichtlich Isolierfähigkeit, Alterung durch Teilentladung und meist auch Temperatur. Infolge der damit erhöhten Isolationsdicken, Schirmung und i. d. R. großen Querschnitte haben derartige Leitungen ein beträchtliches Gewicht, z. B. 656 g/m bei einem Querschnitt von 50 $mm^2$, und sind nur sehr eingeschränkt flexibel.

Leitungen sind in der Regel mehrfarbig kodiert, um Fertigung und Reparatur zu unterstützen. Eine standardisierte Zuordnung erfolgt i. A. für bestimmte Potenziale und Signale. Eine besondere Bedeutung kommt aus Sicherheitsgründen den Farben Gelb für Airbagsysteme und Orange für Hochvoltleitungen zu.

Neben den beschriebenen Rundleitern existieren auch unterschiedliche Formen von Flachleitern. In geeigneten Geometrien, z. B. Himmel oder Tür, bieten sie Möglichkeiten hinsichtlich Bauraum, Gewicht oder Montage. Ausführungsformen sind das FFC (Flexible Flat Cable) oder FEC (Flexible Extruded Cable), eine laminierte oder extrudierte und als Meterware verfügbare Flachleitung mit mehreren Leitern. Nachteilig sind zusätzliche Fertigungsschritte (Crimpen, Schweißen) für Verzweigungen. FPC (Flexible Printed Circuit) sind hingegen mit einer aus der Leiterplattenherstellung abgeleiteten Technologie hergestellt. Sie erlauben auf Basis flexibler Träger eine beliebige Leiterführung in einer Ebene. Lediglich für elektrische Brücken werden zusätzliche Verbindungen benötigt. Nachteilig ist der Aufwand für größere Leitungslängen. Die Potenziale dieser noch jungen Leitersysteme liegen in der möglichen Automatisierung und der Integration weiterer elektrischer/elektronischer Komponenten, z. B. LEDs. Eine weitere Entwicklung sind massive Rechteckprofile als Leiter für hohe Ströme. Sie können ggf. auch geschirmt ausgeführt werden und erlauben eine hohe Packungsdichte.

#### 8.2.2.4 Knotenpunkte

Die Topologie des Bordnetzes beinhaltet meist mehrere im Fahrzeug verteilte Knotenpunkte, in denen Leitungsmodule über Steckverbinder gekoppelt oder Energieleitungen verzweigt und erneut

abgesichert werden. Auch sind häufig Schaltelemente oder Steuereinheiten integriert. Dies führt auf Koppelstationen (Abb. 8.18 oben), deren Volumen meist durch die Steckverbinder, Sicherungselemente und Relais bestimmt wird. Zur internen Verschaltung werden meist Stanzgitter, Platinen oder auch automatisierte interne Verdrahtungen verwendet. Während Stanzgitter Vorteile bei der Stromtragfähigkeit und der Applikation von Kontaktelementen aufweisen, ermöglichen Platinen die einfache Integration von weiteren elektromechanischen oder elektronischen Baugruppen. Alle Technologien bringen den Nachteil relativ hoher Investitionskosten und langer Werkzeuglaufzeiten mit sich, so dass dort, wo große Flexibilität von Bedeutung ist, häufig eine direkte Kontaktierung und Verschaltung im Leitungssatz zum Einsatz kommt.

Aus den Anfangszeiten der Fahrzeugelektrik mit rein mechanischen Schaltern hat das Relais als elektromechanisches Funktionselement überlebt. In einer modernen Ausführung aus optimierten und automatisierten Fertigungsprozessen erreicht es akzeptable Qualitätswerte und sehr kleine Übergangswiderstände und ermöglicht, anders als bei Halbleitern, eine wirkliche galvanische Trennung. Vornehmlich bei größeren Strömen ($> 10$ A) und Umschaltern hat es noch Kostenvorteile gegenüber den alternativ eingesetzten Halbleiterschaltern. Es wird in Relais-, Verteil- und Sicherungsboxen verbaut und mit dem Leitungsstrang verbunden, allerdings infolge der Verbreitung elektronischer Steuerungen im klassischen Energieverteilungsbereich zunehmend auch in elektronische Steuergeräte („Bordnetz-Steuergeräte“, „intelligente Leistungsmodule“, „Schalt- und Auswerte-Modul“) integriert (Abb. 8.18 unten). Durch den Aufbau auf Platinen lassen sich wesentlich kompaktere Baugruppen realisieren, da Sockel und Kontakte entfallen, Signalverteilung im Layout statt über Einzelleiter umgesetzt wird sowie die Steuerlogik in Form eines Mikrocontrollers und elektronische Schaltelemente integriert werden können.

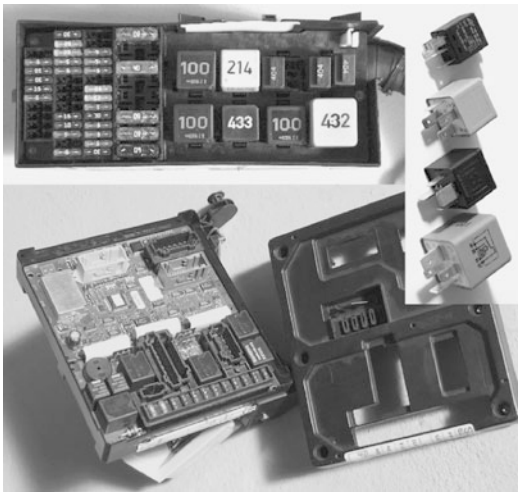



**Abb. 8.18** Bordnetzkomponenten: einfache Relais-/Sicherungsbox (*oben links*), Bordnetzsteuergerät mit Elektronik, Schmelzsicherungen, Relais und Steckeraufnahmen, geöffnet (*unten links*), verschiedene Bauformen elektromechanischer Relais (*oben rechts*)

### 8.2.2.5 Sicherungen

Sicherungselemente unterbrechen den Stromfluss im Fehlerfall. Ihre Aufgabe muss immer mit Priorität der Leitungsschutz sein, so dass sie nach elektrischer Belastung und thermischen Eigenschaften der nachgeschalteten Leitungen zu dimensionieren sind. Während in früheren Fahrzeugen oft aus Kostengründen Kompromisse im Absicherungskonzept eingegangen wurden und man sich auf die leistungsführenden Leitungen beschränkte, hat das gestiegene Qualitäts- und Sicherheitsbewusstsein dazu geführt, dass ein -wie in anderen Bereichen der Elektrotechnik üblich- konsequentes Absicherungskonzept allgemeiner Standard ist. Hierdurch bedingt hat die Zahl der Sicherungselemente im Fahrzeug deutlich zugenommen.

Thermische Sicherungen sind mit Abstand die preisgünstigste Ausführung. Dort, wo nur die reine Sicherungsfunktion gegen Leitungsfehler (Kurzschluss o. ä.) zu realisieren ist, werden sie fast ausschließlich verwendet. Ihr Hauptnachteil, die irreversible Auslösefunktion, stellt wegen der niedrigen Auftretenswahrscheinlichkeit praktisch kaum ein Problem dar. Es besteht nur die Einschränkung, dass sie in für den Nutzer einfach zugänglichen Bauräumen verbaut werden müssen. Ihre Auslösecharakteristik (max. Strom über Zeit) kann gut der zu schützenden Leitung angepasst werden. Soll die Sicherung auch Geräteschutzfunktionen übernehmen, z. B. den Schutz eines Verstellmotors gegen Überlastung bei Blockierung (festgefrorene Wi-

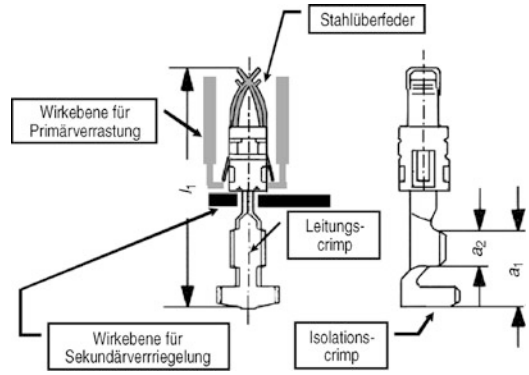
scher, Fensterheber u. ä.), werden reversible Elemente wie „Circuit Breaker“ mit thermischer Auslösung über Bimetallkontaktstreifen verwendet. Für kleinere Ströme kommen auch rücksetzbare Sicherungen aus leitfähigen Polymeren (Markennamen „Polyswitch“, „Polyfuse“) zum Einsatz. Bei Überschreitung des Auslösestromes brechen die Polymerketten auf, was zu einer drastischen Erhöhung des Längswiderstands führt. Mit Rücknahme des Laststroms und nach Abkühlung des Elementes kehrt das Material in seinen Ausgangszustand mit guter Leitfähigkeit zurück. Aktuell werden zudem Halbleiterschalter mit Stromsensorik und entsprechender Ansteuerung für die Absicherung eingesetzt. Sie bieten die Möglichkeit einer parametrierbaren Auslösecharakteristik, Diagnose, Rücksetzbarkeit und dezentrale Anordnung, weisen aber deutlich höheren Kosten auf. Ihre Anwendung ist besonders dann sinnvoll, wenn ohnehin eine Schaltfunktion erforderlich ist.



### 8.2.2.6 Steckverbindungen, Gehäuse

Man unterscheidet Steckverbindungen nach ihrem Verwendungszweck als Kupplungen und Geräteanschlüsse. Sie bestehen generell aus dem Gehäuse und dem Kontaktteil, das den Strom führt. Das Gehäuse erfüllt die folgenden Aufgaben:

- Elektrische Isolation zwischen den Kontakten: Bei hohen Spannungen bzw. hohen Eingangsimpedanzen der angeschlossenen Geräte müssen Kriechströme unterbunden werden. Ursachen sind i. d. R. Feuchtigkeit und Verschmutzung auf der Gehäuseoberfläche, welchen konstruktiv durch möglichst lange Kriechstrecken entgegengewirkt wird.
- Mechanischer Schutz der Kontakte: Das Gehäuse muss durch Materialwahl und Konstruktion allen bei Montage (Trittfestigkeit) und im Betrieb auftretenden Krafteinwirkungen widerstehen können. Eine wichtige Fehlermöglichkeit, die Verbiegung der Kontakte z. B. bei schrägem Zusammenführen der Steckgehäuse (*Kojiri-Test*), lässt sich durch lange Gehäuseführungen oder zusätzliche Nut-Steg-Führungen verhindern. Bei hohen Ansprüchen (Airbag-Steckverbinder) wird u. U. auch der Schutz bei offenem Steckverbinder gefordert, dann sind mit Scharnieren am Gehäuse angebundene oder lose Schutzhauben sinnvoll.
- Führung des Kontaktes: Die Kontaktkammern sind so zu dimensionieren, dass das Kontaktelement beim Steckvorgang gerade so viel Bewegungsfreiheit hat, dass es sein Gegenstück findet, ein Stoß auf Kanten aber ausgeschlossen ist.
- Fixierung des Kontaktes: Zur Aufnahme der beim Fügevorgang oder bei Zug an der Leitung entstehenden Kräfte stützt sich das Kontaktelement mittels Rasthaken oder der Kontaktschulter am Gehäuse ab („Wirkebene“ in ◘ Abb. 8.19). Bei Einschubkontakten kann die Abstützung über die Kontaktschulter nur durch ein parallel zur Wirkebene nach Kontaktmontage eingeführtes Teil realisiert werden. Diese sog. *Sekundärverriegelung* stellt zwar einen Zusatzaufwand dar, ist jedoch zur Aufnahme großer Kontaktkräfte und, vor allem, zur Absicherung des Montagevorganges sinnvoll (s. u.)
- Zugentlastung: Um die Zugkräfte auf die Verbindung von Leitung und Kontakt oder auf die Kontaktverriegelung zu begrenzen, kann eine Zugentlastung, z. B. durch Anwickeln bzw. Kabelbinder an eine passende Ausformung des Gehäuses erforderlich sein.
- Abdichtung der Kontakte (optional): Zu unterscheiden sind die Dichtungen Stecker zu Gegenstecker und Leitung zu Steckergehäuse. Für Ersteres stellt das radial über mehrere Lippen wirkende elastische Dichtelement das




◘ **Abb. 8.19** Funktionselemente eines Flachkontaktes

sicherstes Dichtprinzip stellt dar. Die früher meist verwendeten axial (in Steckrichtung) wirkenden Dichtungen sind empfindlich gegen Fremdkörper, da diese die Dichtlippe anheben und damit in kleinen Bereichen öffnen. Die Dichtung zwischen Leitung und Gehäuse erfolgt meist ebenfalls radial durch sogenannte *Seals*, zylindrische Silikonkörper mit radialen Dichtlippen und einer Bohrung, durch die die Leitung geschossen und die dann in die rohrförmige Gehäuseaufnahme gepresst werden. Bei hochpoligen Steckverbindern werden auch Silikonmatten oder Gele verwendet. Einzelne Hersteller setzen auch Gussmassen ein. Dichtungen sollten immer innerhalb des Gehäuses liegen, um den Schutz der empfindlichen Lippen gegen Außenwirkung zu gewährleisten.

- Dämpfung mechanischer Schwingungen: Besonders Niederdruckkontakte sind empfindlich gegen Mikrobewegungen der Kontaktzone durch Einkopplung von Schwingungen über das Gehäuse oder die Leitung. Über die o. g. Seals oder eine Zugentlastung kann eine Dämpfung oder -Entkopplung erreicht werden, auch eine geeignete Verlegung ist ggf. eine sinnvolle Maßnahme.
- Verbindung der Steckelemente: Im Fahrzeugbereich am meisten verbreitet sind bei Kunststoffgehäusen aus dem Grundmaterial im Spritzvorgang hergestellte Verriegelungsarme oder solche aus Federstahl. Sie verrasten auf Nasen auf dem Gegenstück und sollten gegen Verhakeln im Leitungsstrang durch Kammern oder Stege geschützt sein. Bei hochpoligen Verbindungen werden Hebelarme eingesetzt, die über eine Kulissenführung oder einen Zahntrieb die Steckkräfte herabsetzen. Speziell hochpolige Trennstellen im Feuchtraum werden auch mit Bajonettverschlüssen ausgeführt. Sie benötigen mehr Raum für die Montage, sind aber gut abzudichten und zu handhaben. Unabhängig vom Prinzip ist eine wirksame haptische, akustische und ggf. optische Rückmeldung über die korrekte Verriegelung entscheidend. Auch sollte eine stabile Halbsteckung nicht möglich sein, z. B. indem durch geeignete Rückstellkräfte eine solche Verbindung sich wieder löst.

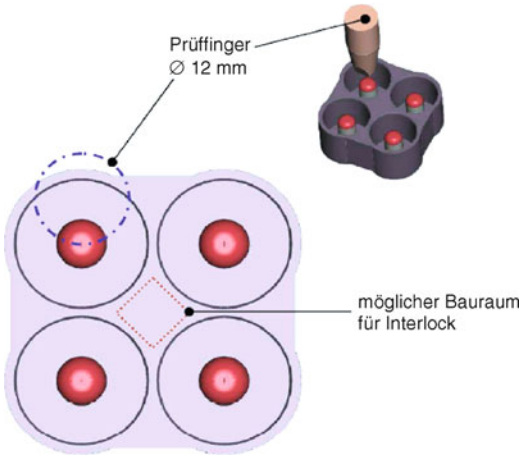



**Abb. 8.20** Berührschutz für Kontakte durch Isolation der Kontaktspitzen (Quelle: Tyco Electronics)

- Codierung der Steckverbindung als Sicherheit gegen Fehlsteckung. Eine einfache Farbcodierung ist hilfreich, aber nur als Montagehilfe geeignete. Wesentlich prozesssicherer sind Formcodierungen, bei welchen Gehäuseform oder Stege eindeutig auf das Gegenstück abgestimmt sind.
- Gehäuse von Schneid-Klemm-Verbindern werden mehrteilig ausgeführt. Beim Fügen der Gehäusehälften werden die Leiter in die Kontaktschneiden gedrückt.

Darüber hinausgehende Anforderungen werden an Hochvolt-Steckverbinder gestellt:

- Die Schirmung von der Leitung bis zur anzuschließender Komponente ist durch den Steckverbinder sicherzustellen,
- der Berührschutz leitender Teile muss gewährleistet sein (Abb. 8.20 zeigt ein Ausführungsbeispiel für Kontakte)
- und die Montage unter Spannung muss verhindert werden. Hierfür wird z. B. konstruktiv eine „Verlangsamung“ der Demontage sichergestellt und mittels in den Steckverbindern zusätzlich eingebauten Interlock-Kreisen eine rechtzeitige Abschaltung eingeleitet.

Steckverbindungen werden im Bordnetz manuell gefügt. Die Verbindungselemente sollten konstruk-

**Tabelle 8.3** Prüfplan für Kontaktsysteme nach DIN 46249

| Mechanische Prüfung | Elektrische Prüfung | Thermische Prüfung | Korrosions-Prüfung |
|---|---|---|---|
| Aufsteckkraft | Kontaktspannungsabfall | Stromerwärmung<br>1 Stunde | Spannungsabfall |
| Abziehkraft | Crimpspannungsabfall | Feuchte Wärme<br>2 Tage | Korrosion<br>Salznebel<br>96 Stunden |
| Ausziehkraft | | Temperatur-/Stromwechsel-prüfung<br>500 Stunden | Korrosion<br>Schadgas $SO_2$ |
| | | Spannungsabfall | Spannungsabfall |



tiv so ausgeführt sein, dass alle infolge der Prozessunsicherheiten möglichen Fehler verhindert werden. Praktisch lässt sich dies realisieren, indem alle Montageschritte so abgesichert werden, dass im Fehlerfall der nächste Arbeitsgang nicht vollzogen werden kann. Am Beispiel der Sekundärverriegelung (Abb. 8.19) lässt sich dies Prinzip gut darstellen: Wird der Kontakt nicht so weit in das Gehäuse eingeschoben, dass die Federn im Gehäuse verrasten, steht sein Kasten über die Wirkebene der Sekundärverriegelung hinaus und verhindert das Einschieben des Verriegelungsteils. Dies ragt damit seitlich aus dem Gehäuse und blockiert das Aufsetzen des Steckers auf sein Gegenstück. Sowohl eine einfache Sichtkontrolle als eine Durchgangsprüfung zeigen den Fehler auf.

### 8.2.2.7 Steckverbindungen, Kontakte

Eine Kontaktierung erfolgt über ein elastisches System aus Stift und Hülse. Die Funktionselemente eines Kontaktteils sind, Abb. 8.19

a) die **Kontaktzone**, auszulegen nach
   - dem Material und ggf. der Oberflächenbeschichtung: üblich sind Messing, Bronze oder Speziallegierungen, mit Oberflächen aus Zinn oder, speziell für niedrige Ströme, aus Gold,
   - den Federeigenschaften: bei guten Kontaktmaterialien verändern sich die Federeigenschaften durch Relaxation mit der Zeit, daher werden bei hochwertigen Kontakten die Kontaktkräfte über ein unabhängiges Element, eine Stahlüberfeder erzeugt. Sie werden so dimensioniert, dass bei gutem Übergangswiderstand die Steckkräfte noch akzeptabel sind,
   - dem Übergangswiderstand und damit dem zu erwartenden Spannungsfall: In einigen Kreisen, insbesondere bei hohen Strömen, ist die Gesamtwiderstandsbilanz kritisch. So darf z. B. der Widerstand im Starterkreis Werte von wenigen Milliohm nicht überschreiten, was einen Strompfad über mehrere Kontakte praktisch verbietet. Aus dem Prüfplan (Tab. 8.3) sind weitere Kriterien ersichtlich.
   - der Strombelastung: sie bestimmt die Kontaktgröße, bei Flachkontakten wird sie durch die Breite des Messerteils gekennzeichnet. Verbreitet sind die Größen 0,63 mm (<3 A), 1,5 mm (<10 A), 2,8 mm (<20 A), 4,8 mm (<35 A) und 9,5 mm (<70 A).
   - dem Konstruktionsprinzip: verbreitet für normale Signal- und Energieübertragung sind *Rund-* und *Flachkontakte*. Hohe Ströme (>100 A) oder spezielle Anforderungen wie Schirmung führen zu Sonderaufbauformen. Speziell am Aggregat und an Fahrwerksteilen sind Kontakte extrem durch Vibration beansprucht. Mikrobewegungen der Kontaktzone erzeugen hohen Verschleiß und führen zu vorzeitigem Ausfall. In solchen Fällen werden vornehmlich Hochdruckkontakte eingesetzt. Auch die Art und Anzahl der Kontaktpunkte variiert und hat großen Einfluss auf den Kontaktdruck und die Steckkraft.

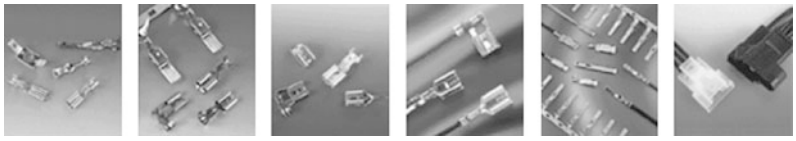


**Abb. 8.21** Kontaktausführungen (Quelle: GHW)

b) dem **Leitungsanschluss**: Die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Verbindungstechnik ist das *Crimpen* (▶ Abschn. 8.2.3.3/◘ Abb. 8.25), welches bei richtig ausgelegtem Fertigungsprozess mit Prozessüberwachung, nicht nur preisgünstig, sondern auch qualitativ ohne Einschränkungen einsetzbar ist. Auch Ultraschallschweißen wird, in weit geringerem Maße, eingesetzt, während andere Techniken wie z. B. Löten oder Widerstandschweißen kaum zur Anwendung kommen. Für die mechanische Sicherung der Leitung wird i. d. R. noch eine Fixierung auf der Isolation, der sogenannte Iso-Crimp, vorgenommen.
c) der **Gehäuseaufnahme**: *Einschubkontakte* benötigen fast durchweg Rastfedern, die den Kontakt nach dem Einschieben im Gehäuse fixieren. Bei Einsatz einer *Sekundärverriegelung* muss das Kontaktgehäuse so gestaltet werden, dass das Verriegelungselement vorbeigeführt werden und Zugkräfte aufnehmen kann (◘ Abb. 8.21). *Schneid-/Klemm-Kontakte* schließlich werden unmittelbar formgebend im Gehäuse fixiert.

Die genannten Stromwerte stellen nur Richtwerte bei normalen Umgebungsbedingungen dar. Die tatsächliche Stromtragfähigkeit wird nach der *Derating-Kurve* dimensioniert, welche durch die maximal zulässige Temperatur des Kontaktpaares, die Umgebungstemperatur, die Eigenerwärmung durch den elektrischen Verlust am Übergangswiderstand und die Kühlung thermisch bestimmt ist. Gleiche Kontakte haben also in heißeren Umgebungen wie z. B. dem Motorraum eine deutlich geringere Stromtragfähigkeit. Da die Verlustleitung im Wesentlichen vom Leiter aufgrund seiner guten Leitfähigkeit abgeführt wird, lässt sich die zulässige Belastung eines Kontaktes durch Überdimensionierung der angeschlagenen Leitung erhöhen. Größere Leitungsquerschnitte können auf diese Weise durchaus auch zur gezielten Kühlung der angeschlossenen Komponente beitragen.

## 8.2.3 Auslegungskriterien

Da das Bordnetz keine direkte Kundenrelevanz hat und gleichzeitig von nahezu allen elektrischen und mechanischen Änderungen im Fahrzeug betroffen ist, erfolgt seine Auslegung in der Regel in sehr vielen Iterationsschleifen mit hohem Abstimmungsbedarf. Neben dem Packaging (d. h. der Positionierung und Dimensionierung von Einbauräumen für Komponenten und Kabeltrassen) und den elektrischen Vorgaben sind zudem die Fertigbarkeit und die Montagefolge des Fahrzeuges zu berücksichtigen, für welche eine möglichst einfache Struktur mit wenigen Abzweigungen und parallelen Zweigen vorteilhaft ist.

### 8.2.3.1 Qualitätsorientierte Bordnetzauslegung

Aufgrund der hohen Teilezahl in Verbindung mit vielen manuellen Fertigungsschritten sowohl bei der Herstellung des Kabelbaums als auch beim Einbau in das Fahrzeug ist im Bordnetz ein sehr hoher Qualitätsstandard einzuhalten. Die zunehmende Einführung von hochgradig sicherheitskritischen Systemen, insbesondere im Fahrdynamik- und Assistenzbereich sowie die vereinbarten Anforderungen der funktionalen Sicherheit verschärfen den Anspruch hinsichtlich Zuverlässigkeit. Die elektrisch relevanten Fehlerarten sind Unterbrechungen, erhöhte Übergangswiderstände und Kurzschlüsse, wobei besonders kritisch ein intermittierend und zufällig verteilt auftretender Fehler ist. Typische Fehlerarten und -Ursachen sind:

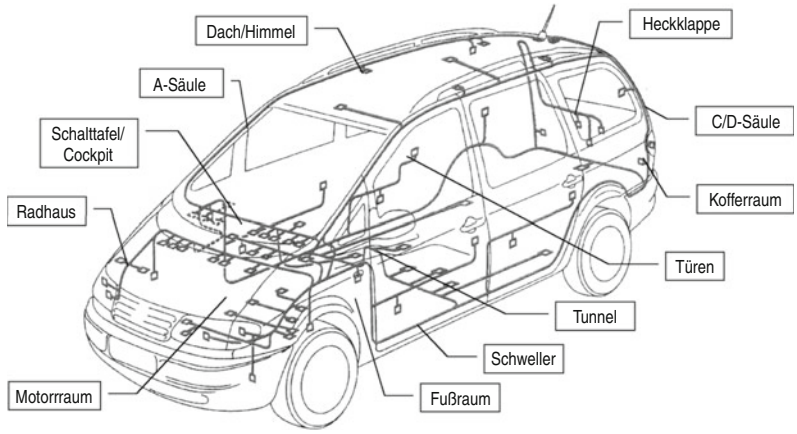



**Abb. 8.22** Typische Kabeltrassen in einem PKW



- lockere Kontakte infolge nicht gesteckter oder nicht verrasteter Steckverbindungen,
- mechanische Beschädigung der Isolation durch Scheuern oder Anliegen an scharfen Kanten,
- Bruch des Leiters durch Dauerbewegung z. B. durch Vibration oder bei Übergängen zu Türen und Klappen sowie zum Aggregat und Fahrwerkteilen,
- Überhitzung durch zu hohe Strombelastung und/oder durch Umgebungstemperaturen,
- Korrosion an Kontaktelementen durch Feuchtigkeit, ggf. in Kombination mit weiteren Substanzen. Wassereintritt ist selbst bei abgedichteten Steckgehäusen z. B. durch Kapillarwirkung über mehrere Meter im Leiter beobachtet worden.

Gute Qualitätswerte lassen sich nur durch konsequente Detailarbeit erreichen. Die konstruktive Auslegung muss nicht nur die Beanspruchungen im Betrieb, sondern gleichermaßen während Fertigung und Montage berücksichtigen. Infolge der vielen möglichen Fehlerursachen sollte sie fehlertolerant sein. So sind schon bei der Konstruktion des Bordnetzes folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Unterstützung der Fertigung: Zu verwenden sind weitgehend standardisierte Komponenten nach dem Stand der Technik (Haptik, Robustheit). Eindeutige Codierungen von Steckern und Leitungen sind vorzusehen. Prozessparameter der Verarbeitungsmaschinen sind ggf. vorzugeben, weniger robuste (z. B. Doppelanschläge) oder exotische Prozesse sind zu vermeiden und Möglichkeiten der Automatisierung sollten genutzt werden. Die Topologie des Bordnetzes schließlich hat einen wesentlichen Einfluss auf die Modularisierung der Fertigung und damit auf die Darstellung der Produktvarianz und sollte daher nicht nur nach der Funktion ausgelegt werden.
- Absicherung der Montage: Diese Anforderung bedingt viele Detaillösungen; beispielhaft seien einige allgemeine Maßnahmen aufgelistet: Eindeutige und prozesssichere Verlegung sowie Codierung der Steckverbinder, robuste Komponenten, sichere Erkennbarkeit von Fehlern, sinnvolle Verpackung und Montagehilfen, Vorformung kritischer Bereiche und nicht zuletzt Absicherung der Variantensteuerung.

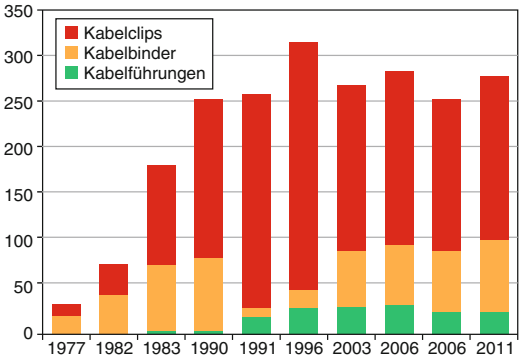
### 8.2.3.2 Leitungsverlegung

Eine immer effizientere Ausnutzung des Fahrzeuginnenraums, der wachsende elektrische Funktionsumfang und die teilweise Elektrifizierung des Antriebsstranges schränken die Freiheitsgrade des Entwicklers zunehmend ein. Die typischen Kabeltrassen in einem PKW sind in Abb. 8.22 aufgeführt. Ihre Nutzung ist durch die Position der elektrischen Bauteile und die verfügbaren Trassenquerschnitten, aber auch durch die E/E-Architektur vor-

gegeben. Zu berücksichtigen sind dabei nicht nur unterschiedliche Fahrzeugvorgaben, z. B. Karosseriederivate oder Motorvarianten, sondern auch sehr unterschiedliche elektrische Funktionsausstattungen. Erschwerend kommt hinzu, dass die EMV Anforderungen aufgrund neuer Leistungsverbraucher und sicherheitskritischer elektrischer Systeme weiter steigen und eine separate Verlegung bedingen können. Darüber hinaus gelten natürlich auch für das Bordnetz die allgemeinen fahrzeugtypischen Spezifikationen.

Im Bereich der Leitungsverlegung bedeutet dies, die Kabelstränge so präzise zu führen, dass Berührung mit kritischen Teilen sicher ausgeschlossen werden kann und ein möglicher Schaden bei Fehlverbau durch Schutzelemente wie Bandagierung, Schläuche, Wellrohre oder Kabelkanäle verhindert wird. Insbesondere der Hauptleitungsstrang muss aufgrund seiner Größe und vielen Verzweigungen eng toleriert werden. Hierzu muss er in Bereichen mit großen Krümmungen und engen Platzverhältnissen dreidimensional vorgeformt sein. Dies erreicht man durch Formgebung in der Konfektion oder mit zusätzlichen Kunststoff-Formteilen, die gleichzeitig die Einzelleitungen zusammenfassen und schützen. Zur exakten Positionierung des Leitungssatzes im Fahrzeug müssen Aufnahmepunkte an der Karosserie (Schweißbolzen, Löcher) und am Leitungssatz (Clipse, Aufnahmen an den Kabelführungen) eng toleriert gesetzt werden. Nicht zuletzt aus Qualitäts- und Kostengründen ist man dazu übergegangen, dass das Bordnetz die Befestigungskomponenten führt, deren Anzahl u. a. daher auch stark gestiegen ist (◘ Abb. 8.23). Freie Befestigungspunkte hingegen werden aufgrund der Prozessunsicherheit weitestgehend vermieden.

Für bestimmte Sonderleitungen wie Koaxialkabel und insbesondere Lichtwellenleiter, die zur Vernetzung der Infotainment-Komponenten eingesetzt werden, müssen Mindestbiegeradien eingehalten werden, da sie sonst entweder mechanisch geschädigt oder Signale zu stark bedämpft werden. Erreicht wird dies durch geschickte Trassenwahl, meist ist der Einsatz von Formteilen unumgänglich, um auch beim Handhaben der Leitungssätze eine Beschädigung sicher auszuschließen.




◘ **Abb. 8.23** Entwicklung der Zahl der Befestigungsteile des Bordnetzes über drei Dekaden

Für den thermischen und mechanischen Schutz, die Vermeidung von Störgeräuschen und, im sichtbaren Bereich, auch aus Designgründen werden leitungsstrangseitig unterschiedliche *Bänder, Schläuche, Wellrohre* und *Kabelkanäle* genutzt. Für spezielle Anwendungen, z. B. im Radbereich, kommen auch umspritzte oder umschäumte Leitungen zum Einsatz. Karrosserieseitig lassen sich als Schutzmaßnahmen z. B. *Sicken* oder *Wärmeschutzbleche* vorsehen und, soweit als möglich, scharfe Kanten vermeiden. Weitere Elemente sind *Tüllen und Faltenbälge*, die Leitungen an Übergängen zwischen Bauräumen (Karosserie zu Türen, Deckeln, …) gegen mechanische Beanspruchung, Staub und Feuchtigkeitseintritt schützen.

Ähnliche Funktionen erfüllen *Durchführungen*. Die Löcher bzw. Ausschnitte in Karosserieblechen, die zur Durchführung von Leitungen erforderlich sind, weisen oft die vielfache Fläche des Kabelquerschnitts auf, um bei der Montage das Durchfädeln der Steckverbinder zu ermöglichen. Kritischer Einsatzfall ist aufgrund der hohen Leitungszahl die Durchführung vom Innen- zum Motorraum. Neben der sicheren Abdichtung des Leitungssatzes zum Blech muss auch der Feuchtigkeitseintritt durch Kapillarwirkung zwischen den Einzelleitern verhindert werden. Dies erfolgt z. B. durch Bandagierung, elastische Massen, Verguss oder Umschäumung.

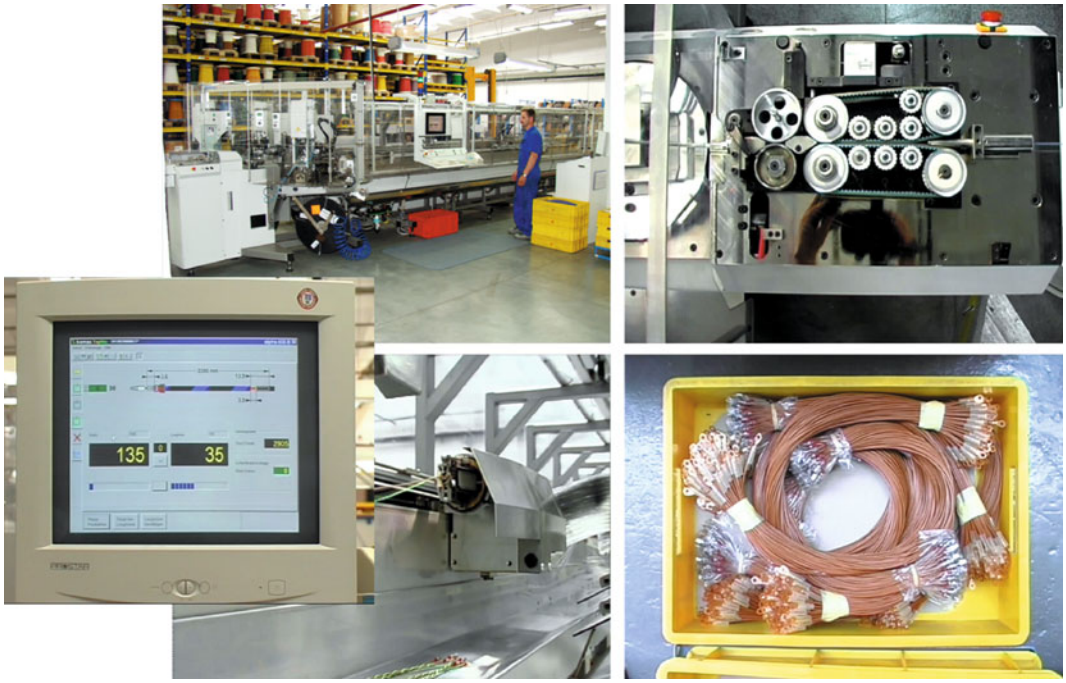



**Abb. 8.24** Ablängen von Einzelleitungen (Quelle: SEBN)

### 8.2.3.3 Leitungsstrangfertigung

Die Arbeitsschritte bei der Fertigung eines Fahrzeug-Bordnetzes sind:

- **Leitungen**: Das *Ablängen*, *Abisolieren* und *Crimpen* der Leitungen sowie das optionale Setzen von Dichtungen geschieht automatisiert (Abb. 8.24). Bei der kritischen Crimpverbindung von Leiter und Kontakt muss eine robuste und gasdichte Verpressung aller Litzen mit dem Crimp (Abb. 8.25) gewährleistet werden. Die notwendige Prozesssicherheit erfolgt i. d. R. durch eine Überwachung von Kraft und Weg der Crimpstempel, um so Fehler und Toleranzen ausschließen zu können. Auch andere Kontaktierungsverfahren wie z. B. *Ultraschall-* oder *Reibschweißen* werden, allerdings in weit geringerem Maße, eingesetzt. Während der gesamten Verarbeitungskette ist eine Beschädigung der offenen Kontakte unbedingt zu vermeiden.
- **Splice** vorfertigen: Verbindungen innerhalb des Kabelbaums sollen nur wenig Bauraum beanspruchen und besonders zuverlässig sein, da sie nach der Montage nicht mehr zugänglich sind. Bewährt hat sich hier die *Ultraschallverschweißung*, die ebenfalls prozessoptimierte Automaten verlangt. Weiterhin eingesetzt werden *Quetschverbinder*.
- **Konfektion**: Das Zusammenlegen der Einzelleitungen zu Leitungssätzen geschieht fast ausschließlich manuell auf so genannten *Legebrettern* (Abb. 8.26). Ansätze zu Automatisierung werden seit den 1980er Jahren verfolgt und könnten hinsichtlich Qualität und Logistik Vorteile bieten, sind aber bisher aufgrund ihrer Komplexität nicht wirtschaftlich im Vergleich zur manuellen Fertigung in Ländern mit niedrigem Lohnniveau. Lediglich einfache Leitungsstrangtopologien werden automatisiert hergestellt.
  Steckverbinder und Kabelführungen werden auf den *Legebrettern* fixiert, die Leiter in gabelförmige Aufnahmen eingelegt, Kontakte gesteckt und Inline-Verbindungen hergestellt. Der Strang wird abschließend umwickelt bzw. mit weiteren Schutzelementen versehen. Prä-



**Abb. 8.25** Crimpen: Verbindung von Kontakt und Leitung (Quelle: SEBN)

zise Vorgaben auf dem Legebrett sind die Voraussetzung für eine eng tolerierte Formgebung, welche für Bereiche mit komplizierter Leitungsverlegung auch dreidimensionale sein kann. Das Ergebnis dieses Prozesses sind fertige Leitungsstränge oder auch Vorprodukte (Fertigungsmodule).

- **Fertigung aus Modulen**: Um den Konflikt zwischen kostengünstiger Großserienfertigung und fahrzeugspezifischer Ausführung des Kabelbaums zu lösen, teilt man diesen in mehrere Fertigungsmodule mit wenigen Ausführungsformen auf, aus denen dann der fahrzeugspezifische Kabelbaum aufgebaut wird. Die Fertigungsschritte sind wie zuvor, ergänzt um die elektrische Verschaltung. Module können mit zeitlichem Vorlauf in großen Losen gefertigt werden, aus Kostengründen erfolgt dies meist in weiter Entfernung von der Fahrzeugmontage. Logistische Zwänge können hingegen die Produktion des fertigen Fahrzeugkabelbaums in der Nähe des Fahrzeugherstellers bedingen.
- **Weitere Fertigungsschritte** seien, da vielfältig, nur beispielhaft aufgeführt. Hierzu gehören die Montage der Knotenpunkte und ihre Bestückung mit Sicherungen und Relais, diverse Verguss, Schäum- und Schrumpfprozesse und die Konfektion von Sonderleitungen wie Batterie, Hochvoltleitungen, Antennen oder Lichtwellenleiter.
- **Prüfen**: Um die in den manuellen Fertigungsschritten und der komplexen Logistik begründeten Prozessunsicherheiten auszu-

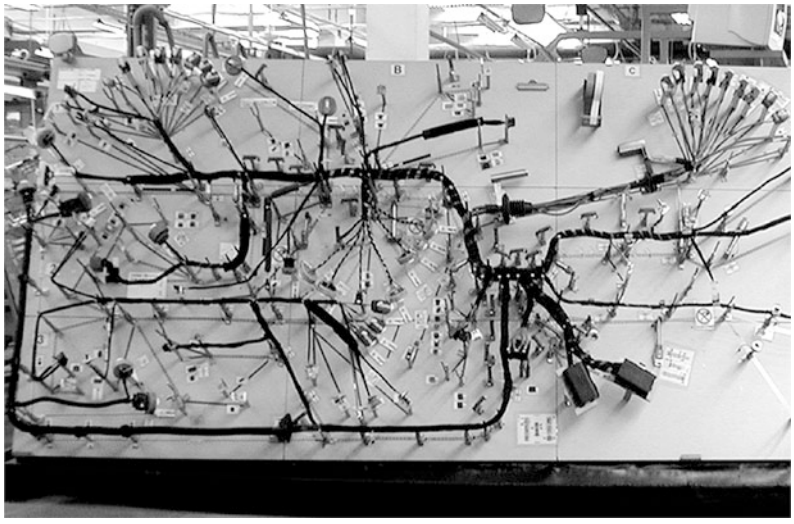


**Abb. 8.26** Leitungsstrangfertigung auf dem Legebrett (Quelle: SEBN)

**Tabelle 8.4** Variantenbildende Faktoren mit Beispielen

| Faktor | Beispiele | |
|---|---|---|
| Karosserieform & Fahrerposition | Limousine, Coupe, Kombi, Cabrio, Kurzheck, SUV, …<br>2/4 Türen, Schiebetüren, …<br>Linkslenker, Rechtslenker | |
| Antriebsstrang | Otto, Diesel, Gas, Mikro bis Full-Hybrid, E-Antrieb (Batterie, FC), …<br>Zylinderzahl, Motorsteuerung, Auslegung und Peripherie<br>Handschalter oder Automat (viele Varianten), 2 oder 4 Radantrieb | |
| Assistenzsysteme | ABS, ASR, ESP, Bremsassistent, …<br>Geschwindigkeits- und Abstandsregelanlage, Spurhaltung, Warnung, …<br>Elektrische Servo- oder Überlagerungslenkung, Wankstabilisierung, …<br>Einparkhilfe oder -assistent, … | |
| Ausstattung | Licht | Nebelscheinwerfer/-Schlussleuchte, …<br>Halogen, Xenonlampen, LED, Laserlicht, …<br>Leuchtweitenregulierung, Niveauregelung, Coming Home, Kurvenlicht, … |
| | Zugang | Zentralverriegelung, Fensterheber, Schiebedach<br>Zugangskontrollsysteme, Diebstahlwarnanlage, … |
| | Infotainment | Radio/Navigation, TV, Mobil, PC, Telematik, C2CC, … |
| | Komfort | Klimaanlage, Zusatzheizung, beh. Frontscheibe,<br>el. Sitze, Spiegel, Lenksäule, … |
| | Sicherheit | Diverse Rückhalte- und Sensorsysteme, … |
| | Andere | |
| Länder | Gesetzliche oder marktspezifische Vorgaben, z. B. Frequenzbänder, Tagesfahrlicht, Klima, Zugang, Sicherheit, … | |
| Technik | Unterschiedliche Software und Hardware-Stände (Produktänderungen)<br>Ausstattungsabhängige Umsetzung (z. B. Steuergerät/Direktschaltung) | |



schließen, wird eine elektrische, rechner- und variantengesteuerte 100 %-Prüfung des Endproduktes vor Auslieferung vorgeschrieben. Weiterhin werden automatisiert Typ, Vorhandensein und Position von Sicherungen und Relais sowie die Kontaktverrastung und korrekte Position der Sekundärverriegelung überprüft. Oft erlaubt der Aufbau der Prüftische eine Plausibilisierung der Leitungssatzgeometrie. Weitere Prüfungen sind anwendungs- und produktspezifisch.

### 8.2.3.4 Variantenbildung

Alle Variationsmöglichkeiten bei der Konfiguration eines Fahrzeuges, die elektrische Komponenten betreffen, erhöhen die Variantenzahl im Bordnetz. In modernen Großserienfahrzeugen der Mittelklasse lassen sich in der Größenordnung von weit über $10^9$ theoretische Varianten des Hauptkabelbaums ermitteln. Tab. 8.4 zeigt einige Einflussfaktoren.

Eine individuelle Fertigung des Komplettbordnetzes für Großserienfahrzeuge wäre absolut unwirtschaftlich. Da eine Senkung der Variantenzahl meist aus vertrieblichen Gründen nicht akzeptabel ist, wurden zwei Lösungen entwickelt. Ein Ansatz ist, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, durch intelligente Steuerung und Nutzung von Fertigungsmodulen kundenspezifische Hauptleitungssätze herstellen zu können. Ein alternativer Ansatz ist das sogenannte modulare Bordnetz gemäß der links in Abb. 8.27 dargestellten Topologie. Es besteht aus vielen Leitungssätzen, die räumlich begrenzt sind und demzufolge eine jeweils nur geringe Variantenzahl $n_i$ haben. Die Gesamtzahl der zu verwaltenden und zu fertigenden Leitungsstrangvarianten wäre demnach die Summe der $n_i$. Durch ihre Kombination kann dann, und das ist der Vorteil, die erforderliche wesentlich höhere Anzahl Varianten erzeugt werden, sie wäre idealerweise das Produkt der $n_i$. Dies ist nur ein theoretischer Wert, der

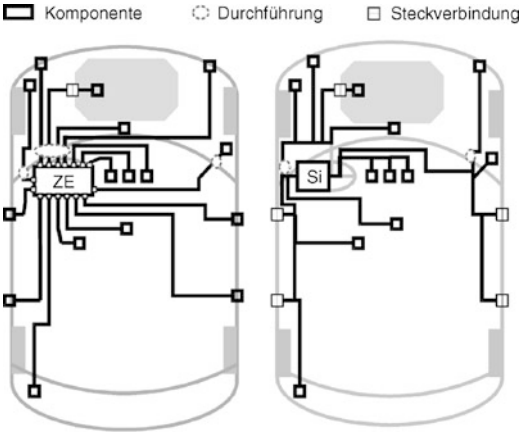



**Abb. 8.27** Mehrteiliges modulares Bordnetz (*links*) und einteiliger kundenspezifischer Kabelbaum (*rechts*)

bei weitem nicht erreicht wird, da räumliche und funktionale Aufteilung des Bordnetzes nur teilweise übereinstimmen. Die Konfektion erfolgt möglichst spät im Fertigungsfluss, also bei der Montage des Fahrzeuges oder in einer vorgelagerten Fertigungsstätte des Systemlieferanten. In Tab. 8.5 sind Vor- und Nachteile beider Ansätze gegenübergestellt, aus strategischen Gründen (Fertigungstiefenreduzierung) und Qualitätsgesichtspunkten (100 % Vorprüfbarkeit des Bordnetzes) hat sich die zweite Variante durchgesetzt.

Überwiegend dort, wo der Fertigungsablauf des Fahrzeuges ausgelagerte Montagen vorsieht (z. B. Türen, Dach, Stoßfänger, Motoren), kommen Teilleitungssätze zum Einsatz, die separat im Montagemodul verlegt und erst bei seiner Montage am Fahrzeug mit dem Bordnetz verbunden werden.

#### 8.2.3.5 Logistik und Fahrzeugmontage

Die logistischen Abläufe bei der Bordnetzfertigung sind eng mit denen des Fahrzeugherstellers verknüpft. Die langen Herstellungs- und Transportzeiten bedingen, dass der Bordnetzlieferant, um Zwischenlager zu vermeiden, seine Modulstruktur und Fertigungsabläufe auf die vom Fahrzeughersteller vorgegebenen Zeitpunkte abstimmen muss. Hierzu existiert ein mehrstufiger Informationsfluss, über den von einer Grobplanung des Fahrzeugvolumens („Vorschau“) bis zum Just-in-Time Abruf des fahrzeugspezifischen Kabelbaums Teileflüsse und Fertigungsschritte von Hersteller und Lieferant synchronisiert werden.

Der Einbau der Leitungsstränge und die Verbindung mit den elektrischen Komponenten erfolgt im Fahrzeug- oder Modulmontagewerk. Mit Blick auf die Produktqualität (Tab. 8.6) muss hier jeder Schritt prozesssicher ausgeführt werden. Eine vollständige Prüfung des Bordnetzes ist unwirtschaftlich und nach erfolgter Vorprüfung beim Systemlieferanten auch unnötig. Solange der Fahrzeughersteller konsequent seine eigenen Wertschöpfungsumfänge prüft und die Qualitätssicherung des Lieferanten entsprechend auditiert, ist eine vollständige Prüfabdeckung gegeben.

Die Verlegung des Hauptleitungssatzes erfolgt überwiegend im Innenraum. In der Regel ist er so groß und stark verzweigt, dass er in einem Behälter verpackt oder vormontiert im Cockpitmodul angeliefert wird. Als Ausgangspunkt der Verlegung wählt man sinnvollerweise einen Knotenpunkt, oft ist dies die Zentralelektrik oder eine entsprechende Koppelstation im Schalttafelbereich. Andere Konzepte gehen von einer den Innenraum abdeckenden Kabelführung aus, mit der der Leitungssatz in einem Arbeitsgang eingesetzt und verlegt ist. Aufgrund der Größe der Teile lässt sich dies in einigen Fällen nur mit Handhabungshilfen oder -automaten (Robotern) durchführen.

### 8.2.4 Architektur des Bordnetzes

#### 8.2.4.1 Topologie, Koppel- und Trennstellen

Die Topologie, d. h. die räumliche Ausprägung des Leitungsstranges ist durch die vorgegebenen Kabeltrassen begrenzt. Position und Verschaltung der elektrischen Komponenten geben die zu verlegenden Leitungen vor. Freiheitsgrade bestehen in Grenzen bei der Wahl der Trassen für die einzelne Leitung. Der so entstehende Kabelbaum muss die schon beschriebenen Randbedingungen der Leitungsstrangfertigung sowie der Montage im Fahrzeug erfüllen.

Alle ausgelagerten Montagen – die so genannten *Fertigungsmodule* (hier im Sinne des Fahrzeugs) – erfordern separate Leitungssätze und damit Trennstellen zum restlichen Bordnetz. Die Posi-

**Tabelle 8.5** Vor- und Nachteile verschiedener Modularisierungskonzepte

| Konfektion bei der Fahrzeugmontage | Konfektion in der Leitungssatzfertigung |
|---|---|
| + wenig Leitungsstrangvarianten | + Exakte Verlegung<br>+ 100 % Vorprüfung des Zusammenbaus möglich<br>+ minimale Montagezeit beim Fahrzeughersteller |
| – Montageaufwand für Zusammenbau im fahrzeugbauenden Werk – ungenaue Verlegung<br>– fahrzeugfeste Befestigungsteile bedeuten Zusatzaufwand<br>– zusätzliche Steckverbindungen | – Aufwändige Logistikkette beim Zulieferer<br>– Fahrzeugspezifische Leitungssätze mit hohen Variantenzahlen erfordern Just-in-Time Anlieferung<br>– sehr große Hauptleitungssätze |

**Tabelle 8.6** Prozesssicherheit bei der Montage des Bordnetzes

| Montagegesichtspunkte | Umsetzungsmöglichkeit |
|---|---|
| Fertigungsmodule | Vorverkabelung von Fertigungsmodulen mit robusten Trennstellen: Stoßfänger, Türen, Sitz, Motor, ggf. Dach<br>Anlieferung vorverkabelter und vorgeprüfter Baugruppen: z. B. Klimagerät, Türaggregateträger, Tank, … |
| Überprüfung der Montageschritte an Zwischenstationen und am Bandende | Leitungsdurchgang über Onboard-Diagnose der Steuergeräte, vom Prüfrechner der Fertigung abgefragt<br>Befestigungselemente von Verkleidungsteilen so auslegen, dass ihre Montage bei fehlerhafter Verlegung eines Kabelbaums blockiert wird |
| Sichere Befestigungspunkte | Am Leitungsstrang fixierte Clipse/Kanäle verhindern das „Vergessen" von Montageelementen<br>Fehlerhafter Einbau blockiert die folgende Montage der Verkleidungsteile |
| Reduzierung des Risikos von Halbsteckungen | Steckung nur im zugänglichen Bereich, dafür ggf. Stecker mittels „Kabelschwanz" von der Komponente weg verlagern |
| Prozesssichere Schraubverbindungen | Beispiel Massebolzen: mit Rohbau verschweißt, Hutmutter hält Kontaktflächen lackfrei<br>Verschraubungen automatisiert mit Drehwinkel- und Drehmomentkontrolle durchführen |

tion der Steckverbindung zu dieser Trennstelle kann fahrzeug- oder modulseitig gewählt werden. Vorteilhafterweise werden, soweit möglich, existierende Steckverbindungen mitgenutzt werden, z. B. bei einem mit modularem Stecker ausgestatteten Türsteuergerät in der Nähe des Leitungsübergangs zur Tür.

Weiterhin sind die bei der Topologie die Übergänge zu Vorder- und Hinterwagen, den Radhäusern und anderen außerhalb der Fahrzeugzelle liegenden Teilen zu berücksichtigen. Die hierfür in den Blechen vorgesehenen Durchführungen müssen i. d. R. gegen Feuchtigkeit und Staub gedichtet sein und oft auch akustisch gedämmt werden. Wird der Leitungssatz hier nicht getrennt, müssen Teile durch die Durchführungen gefädelt werden, was prozess- und dichtungstechnisch oder auch aufgrund der die Blechteile schwächenden Größe der Durchführungen problematisch sein kann. Alternativ kann eine zusätzliche Steckverbindung eingesetzt werden, mit der der Leitungssatz geteilt und damit beidseitig montierbar wird.

Leitungssätze weisen immer eine baumähnliche Struktur auf. *Maschen* sind in der Regel nicht verlegbar und müssen ggf. durch eine Steckverbindung aufgetrennt werden. In einigen Fällen schließlich

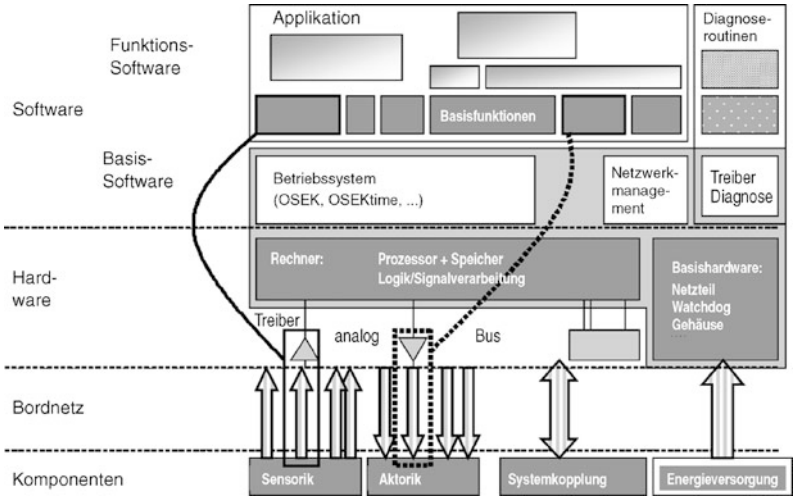



**Abb. 8.28** Steuergerätearchitektur mit Schnittstellen zum Bordnetz

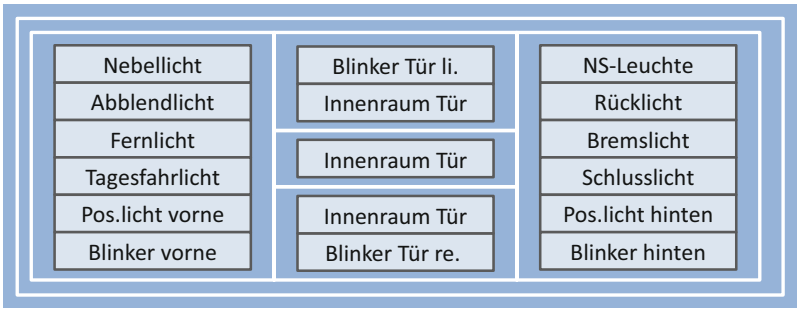



**Abb. 8.29** Alternative Funktionsaufteilungen auf ein (*äußerer Rahmen*) oder fünf (*innere Rahmen*) Steuergeräte am Beispiel einer vereinfachten Lichtsteuerung

existieren Einschränkungen bezüglich der Trassenwahl, z. B. wegen EMV Anforderungen, Diebstahlschutz oder Sicherheit (Hochvoltleitungen).

### 8.2.4.2 Systemarchitektur

Im traditionellen Entwicklungsprozess wurden die elektrischen Komponenten von den Systementwicklern vorgegeben. Sie bilden damit feste Randbedingungen für die Bordnetzauslegung, die höchstens in ihrer Zuordnung zu Einbauräumen variiert werden können.

Sprengt man dieses Paradigma und ordnet in der Konzeptphase den Einbauräumen universelle Steuergeräte zu, auf die die Funktionen frei verteilt werden können, öffnen sich neue Freiheitsgrade für die Optimierung. Abb. 8.28 zeigt die interne Architektur eines Steuergerätes mit ihren Schnittstellen zum Bordnetz. Die internen Ressourcen wie Rechenleistung, Speicher und die spezifische Ausprägung der Treiber hängen von den im Steuergerät zu verarbeitenden Funktionen ab. Mit der Zuordnung von Funktionen zu Steuergeräten sind auch die Verschaltung und damit wesentliche Parameter des Bordnetzes festgelegt. Ein *ganzheitlicher Optimierungsansatz* variiert dementsprechend neben der Bordnetztopologie die *Funktionsverteilung* im Fahrzeug, Abb. 8.29. Auch horizontale Aufteilungen sind möglich, z. B. die Zusammenfassung aller Lese-, Steuer- und Regelfunktionen in einem Steuergerät und die der Schalt und Diagnosefunktionen in weiteren Einheiten. Die Kosten setzen sich aus denen der Elektrik/Elektronik-Komponenten, der

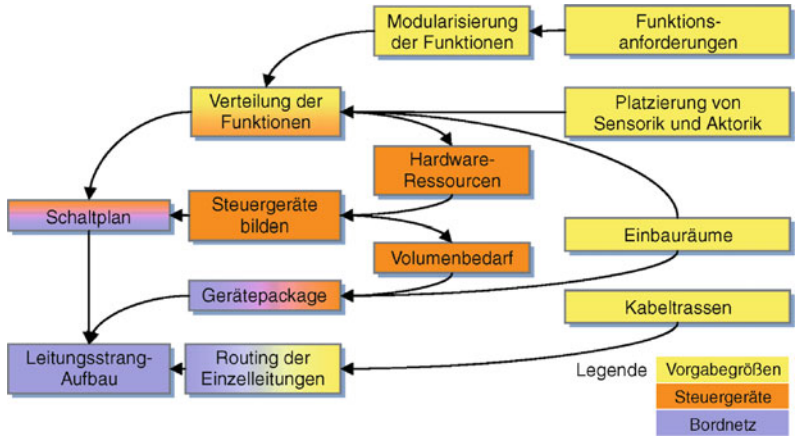



**Abb. 8.30** Arbeitsablauf bei der Architekturfestlegung

8

Bordnetzkomponenten, dem möglichen Mehraufwand für Kommunikation und der Leitungsstränge einschließlich des Aufwandes für die Leitungsverlegung zusammen.

Während auf Software- und Kommunikationsebene u. a. die Funktionsaufteilung und deren Formalisierung und Standardisierung über die Autosar Initiative adressiert werden, ist ein entsprechender Ansatz für die zugehörige Signal- und Energieverteilung noch nicht vorhanden. Wohl aber existieren bereits Werkzeuge für die Konzeptphase, welche eine durchgängige Verbindung zwischen Funktionalität, Hardware und Bordnetzarchitektur herstellen.

Die Wechselwirkung der verschiedenen Parameter und die Arbeitsabläufe bei der Konzeption der Systemarchitektur sind in Abb. 8.30 dargestellt. Zusätzlich zu den aus der Bordnetzentwicklung bekannten Vorgaben von Einbauräumen und Kabeltrassen fließen die Funktionsanforderungen mit ein. Sie resultieren aus der technischen Produktbeschreibung (Lastenheft) des Fahrzeuges. Ein gewisser Freiheitsgrad besteht bezüglich der Unterteilung der Funktionen. Wie an dem Beispiel der Lichtsteuerung (Abb. 8.29) ersichtlich, kann man sie als monolithischen Funktionsblock oder als vernetzte Struktur von Funktionsmodulen vorgeben. Die Granularität dieser Vorgabe (Unterteilung bzw. Modularisierung der Funktionen) gibt den Rahmen für die räumliche Verteilung vor. Ein monolithischer Funktionsblock erzwingt automatisch ein einzelnes Steuergerät. Bei verteilten Funktionen hingegen ergeben sich Steuergeräte aus den in den verschiedenen Einbauräumen platzierten Funktionsumfängen. Zu beachten ist, dass die Software derart *verteilter Systeme* deutlich komplexer ausfällt, z. B. müssen Zustandsinformationen und das Zeitverhalten der verteilten Prozesse synchronisiert werden.

Neben den technischen Einflüssen unterliegen derartige Architekturoptimierungen starken organisatorischen und kommerziellen Randbedingungen. Traditionell werden Steuergeräte nach Funktionsumfängen abgegrenzt und von *Systemlieferanten* entwickelt und gefertigt, die auf ein Anwendungsgebiet spezialisiert sind. Im Fall der freien Funktionsverteilung muss der Fahrzeughersteller die entsprechende Verantwortung übernehmen und die Kompetenzen zur Integration besitzen.

### 8.2.4.3 Energieversorgung und Absicherung

Über das Bordnetz werden alle elektrischen Komponenten mit Energie versorgt. Alle Leitungen sind gegen Kurzschluss abzusichern. Dabei ergibt sich eine eindeutige Zuordnung von Sicherungswert zu Leitungsquerschnitt und, zumindest prinzipiell, die Vorgabe, nach einem Sicherungselement nur Leitungen eines Querschnittes zu verwenden. Bei Abweichungen muss entweder ein sehr geringes Risiko vorliegen oder es sind konstruktive Maßnahmen vorzusehen, andernfalls ist ein weiteres Sicherungselement einzuführen. Die hohen Sicherheits- und

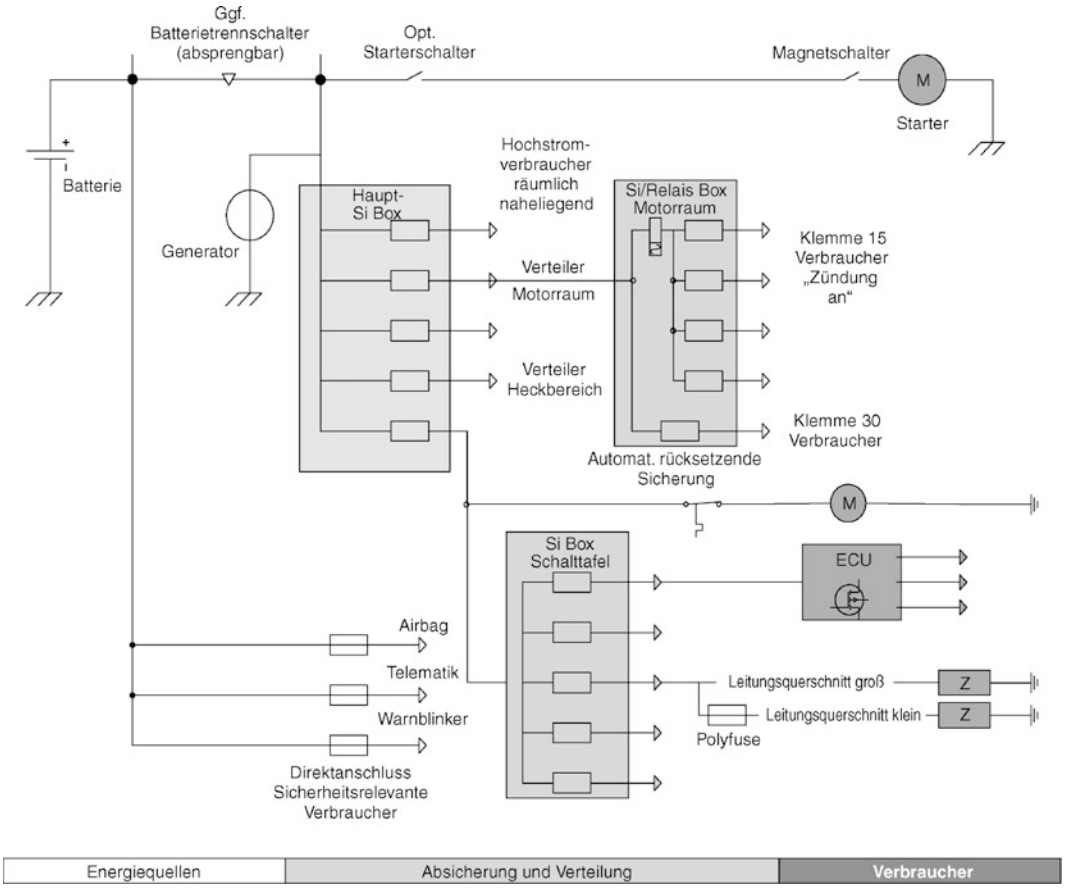



**Abb. 8.31** Konventionelle Struktur der Energieversorgung

Qualitätsanforderungen bedingen damit eine hohe Anzahl an Sicherungselementen mit einer entsprechend aufwendigen Verkabelung. Die Optimierung der beiden gegensätzlichen Zielgrößen Systemkosten und Zuverlässigkeit ist durchaus komplex.

Baumförmige Energieverteilungsstrukturen (Abb. 8.31) – wie sie bis heute überwiegend verwendet werden – sind flexibel und erweiterbar, bilden keine Maschen und sind optimal hinsichtlich Materialaufwand, verlangen aber ein hierarchisches Sicherungskonzept. Üblicherweise wird in der Nähe der Batterie eine Hauptsicherungsbox untergebracht, von der die Hauptenergieleitungen zu weiteren Verteilungsknoten in Schalttafel, Heck und ggf. Motorraum geführt und nahe liegende leistungsstarke Verbraucher gespeist werden. Die Unterverteilung und deren Absicherung finden in den Knoten statt.

Die Sicherungselemente sind so zu dimensionieren, dass nur der direkt von einem Fehler betroffene Zweig abgetrennt wird (*Selektivität*), der übergeordnete dagegen funktionsfähig bleibt. Dies erreicht man durch entsprechende Staffelung von Sicherungswert und Auslösecharakteristik (s. ▶ Abschn. 8.2.2.5). Für die Zuordnung der Sicherungen zu den Verbrauchern sind darüber hinaus nicht nur die rein elektrischen Kriterien, sondern auch die Funktionalität der zugehörigen Systeme und ihre Vernetzung zu berücksichtigen.

Problematisch ist die Absicherung der *Starterleitung*. Zum einen ist der zusätzliche Widerstand einer Schmelzsicherung unerwünscht, zum ande-

ren überlappt der Bereich zulässiger Starterströme sich mit dem der möglichen Kurzschlussströme. Die Lösung liegt in der Wahl eines anderen Auslösekriteriums. Der praktisch relevante Fehlerfall ist der Kurzschluss, der bei einem Fahrzeugcrash durch Blech- oder Motorteile, die die Leitungsisolation durchschneiden, entsteht. Der Crashsensor im Airbagsteuergerät liefert ein geeignetes Signal, mit dem ein Trennschalter nahe der Batterie geöffnet wird. Möglich sind hierfür Batterieklemmen mit Schaltern auf Basis von Pyroelektrik oder Halbleitern.

Hinsichtlich der Absicherung sind die Leitungen zur Energieversorgung von sicherheitsrelevanten Systemen besonders zu behandeln. Um ihre Verfügbarkeit zu maximieren, sollten sie auf der obersten Ebene abgesichert werden, wie in ◘ Abb. 8.31 für Warnblinker, Airbag und Telematikeinheit (Notruf) dargestellt. Für Fahr- und Standlicht des Fahrzeuges wird eine Teilredundanz gefordert. Bei Ansprechen einer Sicherung im Lichtstromkreis darf nur die Beleuchtung auf einer Fahrzeugseite betroffen sein, also sind die Leitungen doppelt zu verlegen und abzusichern. Vollständige *Redundanz*, wie sie für sicherheitskritische Systeme mit *fail-operational* Charakteristik erforderlich wird, setzt eine andere als die in ◘ Abb. 8.31 gezeigte konventionelle Energieversorgungsarchitektur voraus.

Die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung sind in ◘ Tab. 8.7 zusammengestellt. Mit Einführung der Vernetzung und elektronischer Schaltelemente, insbesondere auch für die Absicherung, im Bordnetz bilden sich neue Strukturen heraus, ebenso führt der steigende Bedarf an elektrischer Energie zu neuen Spannungsebenen oder Mehrspannungsbordnetzen.

#### 8.2.4.4 Signalverteilung

Informationen werden im Bordnetz entweder analog als Spannungs-, Strom-, Frequenz oder PWM-Signal oder in digitaler Form auf Basis serieller Busse übertragen. Das Bordnetz ist dabei Teil der untersten Schicht des Kommunikationsmodells, gehört also zum Physical Layer. Daher sei für die höheren Ebenen auf die einschlägigen Kapitel verwiesen.

Bordnetzseitig gilt es, die elektrischen Signale soweit wie möglich unverändert und frei von Störein- und Ausstrahlung zu übertragen. Auf Komponentenebene betreffen diese Anforderungen die Art der Leitung und Terminals, Übergangswiderstände und Wellenimpedanzen sowie die Schirmung. Auch sehr kurzzeitige Unterbrechungen (<us), wie sie bei Crimps beobachtet wurden, dürfen nicht auftreten, da sie in Bussen mit hoher Baudrate zu Fehlern führen. Auf Architekturebene ist die Topologie des Massekonzeptes zu berücksichtigen, um leitungsgebundene Störungen oder eine Verschiebung gegenüber dem elektrischen Massepotenzial zu vermeiden. Ebenso hat die funktionale Bustopologie (Ring, Stern, Masche und linear) einen Einfluss auf die Bordnetzarchitektur. Davon zu unterscheiden ist die physikalische Bustopologie, also die Art der Verkabelung, welche als Stern, Baum oder Ring ausgeführt sein kann.

Bussysteme haben für das Bordnetz nicht nur den großen Vorteil der Reduzierung der Leitungsanzahl, sondern sie ermöglichen aufgrund ihrer Skalierbarkeit auch eine Vereinfachung von Koppelstellen und eine Verringerung der Varianz. Sie schaffen die Voraussetzung für dezentrales Schalten oder Datenerfassen und für eine optimierte Funktionspartitionierung der Steuergeräte, woraus sich wiederum Vorteile für die Bordnetzarchitektur ergeben.

#### 8.2.4.5 Optimierung über Varianten

Die Optimierung der Bordnetzarchitektur ist also, wie beschrieben, multikriteriell. In der Regel gilt es, die Systemkosten, d. h. Materialkosten und alle direkten und indirekten Kosten der Wertschöpfungskette, unter den Randbedingungen Gewicht, Qualität, Zuverlässigkeit, Bauraum, Standards sowie den Vorgaben der Spezifikationen zu minimieren. Weitere Abhängigkeiten ergeben sich z. B. aus den zur Verfügung stehenden Fertigungsprozessen, der Zulieferstruktur oder festgelegten wieder zu verwendenden Komponenten.

Anders als bei den meisten Systemen im Fahrzeug weist das Bordnetz jedoch eine extrem hohe Variantenzahl auf (siehe ▶ Abschn. 8.2.3.4). Damit ist die Bewertung nicht auf eine Fahrzeugausstattung beschränkt, was vergleichsweise einfach wäre, sondern sollte über die vollständige Angebotspalette, möglichst noch gewichtet mit den jeweiligen Marktanteilen, erfolgen. Um die Komplexität zu be-

**Tabelle 8.7** Anforderungen an die Energieverteilungsstruktur und ihre Elemente

| Anforderung | Umsetzung |
|---|---|
| Niedrige Spannungsabfälle zum Verbraucher | Innere Widerstände minimieren |
| Möglichst konstante Versorgungsspannung | Geregelter Generator<br>Speicher (Batterie) mit Stützfunktion |
| Robuste Energieleitungen | Geschütze Leitungsverlegung mit Kabelführungen, Wellrohr, Schutzschlauch<br>Sonderleitungen mit hochflexibler Litze, speziellen Isolierungen |
| Absicherung gegen Bordnetzfehler | Kurzschluss nach Masse: Sicherungselemente<br>Weitere Fehlerarten bei Mehrspannungsbordnetzen: Weiche Kurzschlüsse zu anderen Spannungsebenen elektronisch abgesichert |
| Komponentenschutz gegen Überlast (blockierte Motoren) | Konflikt Leitungs-/Verbraucherschutz: Rücksetzbare Sicherungen bzw. Halbleiterschalter |
| Ansprechen der Absicherung betrifft möglichst wenige Verbraucher | Hoher Absicherungsgrad: Leitungszweige fein strukturiert, hierarchische Absicherung |
| Selbstheilende Absicherung | Rücksetzende Sicherungen, Halbleiter |
| Diagnose von Fehlern in allen Bordnetzelementen (Leitungen, Sicherungen, Kontakte, Verteiler) | Strom/Spannungsmessungen mit Anbindung an Kommunikationsnetzwerke |
| Hohe Verfügbarkeit, ggf. hohe Sicherheit | Ausfallsicherheit durch redundante Strukturen |
| Eingriffsmöglichkeiten für Lastmanagement | Abschaltung und Leistungssteuerung für Lastkreise durch elektronische Schaltelemente |
| Eingriffsmöglichkeiten für Ruhestrombegrenzung | Zwangsabschaltung von Zweigen durch aktive Lastschalter |
| Erfassung der Leistungsflüsse | Ankopplung der Steuerungen mit Lastschaltern an ein Energiemanagement<br>Ggf. Strommessung in Steuergeräten |
| Option auf mehrere Spannungsebenen | 12 V, 12 V–60 V, $>60$ V: Kopplungselemente (DC/DC Wandler zwischen Ebenen) |
| Minimale Störabstrahlung/keine Störeinkopplung in Steuer/Medienleitungen | Verlegung, Schirmung, Filterelemente |

grenzen, beschränkt man sich aber in der Regel auf die Betrachtung von einigen wenigen signifikanten Ausstattungen. Alternativ kann man, statt einer einzigen skalierbaren Architektur, Gerätekonfiguration und Bordnetz ausstattungsabhängig steuern, so dass sich für jede Modellvariante die günstigste Kombination ergibt. Im Prinzip nutzt man dann unterschiedliche Architekturen innerhalb einer Plattform.

Abb. 8.32 zeigt zwei Architekturvarianten für die Funktionen Zentralverriegelung und Fensterhebersteuerung. Bei niedriger Ausstattungsrate ist der modulare Aufbau (links) optimal. Bei hochvolumiger Ausstattung mit elektrischen Fensterhebern und Zentralverriegelung ist die rechte Variante vorteilhaft. Zwar sind in jedem Fahrzeug zwei Steuergeräte in den Türen zu verbauen, diese decken aber beide Funktionen ab, haben eine gemeinsame Energieversorgung und Signale können effektiv auf einem Netzwerk mit einfacher Verkabelung ausgetauscht werden. Einer Vereinfachung des Kabelsatzes steht ein höherer Aufwand in der Elektronik gegenüber.

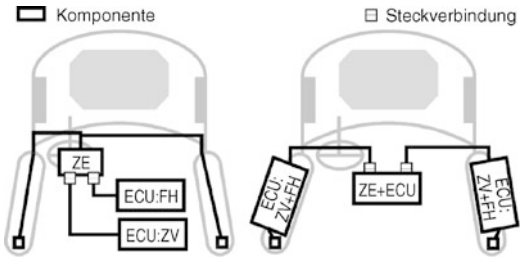



**Abb. 8.32** Architekturvarianten: Einfluss der Angebotsstruktur auf die Funktionsverteilung

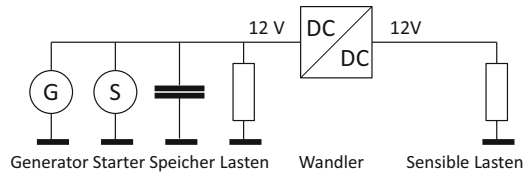



**Abb. 8.33** Bordnetzarchitektur-Varianten zur Spannungsstabilisierung über Entkopplung

### 8.2.4.6 Bordnetzstabilisierung

Die Zunahme elektrischer Verbraucher stellt neue Anforderungen hinsichtlich Energie und Leistungsbilanz. Insbesondere Verbraucher mit kurzer, aber hoher Stromaufnahme wie Start/Stopp-Systeme können kritisch sein, da zum einen die hierfür notwendige Leistung unter allen Umständen bereitgestellt werden muss und zum anderen die Qualität der Versorgungsspannung sicherzustellen ist. Zu Letzterem gehören vor allem die Vermeidung von Spannungseinbrüchen unterhalb einer kritischen Grenze und die Unterdrückung von leitungsgebundenen Pulsen.

Die naheliegende Möglichkeit, das Bordnetz und die Batterie entsprechend höher zu dimensionieren, kann sinnvoll sein, stößt aber schnell an Kosten- und Gewichtsgrenzen. Ebenso wäre der Aufwand viel zu groß, die Spezifikationen für die übrigen Verbraucher und Steuergeräte so anzuheben, dass eine geringere Stabilität der Versorgungsspannung akzeptabel wäre. Aus diesen Gründen sind weitergehende Maßnahmen auf Komponenten-, System- und Architekturebene notwendig:

- Einführung weiterer Batterien: Die Aufteilung auf Starter- und Bordnetzbatterien führt zur Stabilisierung des Bordnetz und kann auch weitere Vorteile haben, da die Batterien nach Leistung und Energie optimiert werden können und die Sicherheit durch die Redundanz der Speicher steigt. Der Aufwand für die Batterien, Bauräume und zusätzliche Schaltelemente ist allerdings erheblich und begrenzt die Einsatzmöglichkeit.
- Einsatz von DC/DC-Wandlern: Sensible oder sicherheitskritische Verbraucher, aber auch direkt für den Fahrer wahrnehmbare Funktionen wie Beleuchtung, werden an einen eigenen, mittels DC/DC-Wandler stabilisierten Versorgungskreis angeschlossen. Darüber hinaus lassen sich DC/DC-Wandler allgemein zur Entkopplung von Spannungsebenen, zur Bereitstellung höherer Versorgungsspannungen und zum optimalen Laden von Speichern, neben Batterien auch Doppelschichtkondensatoren, einsetzen (Abb. 8.33).
- Verwendung von Doppelschichtkondensatoren: Aufgrund ihres sehr kleinen Innenwiderstandes und der exzellenten Zyklisierbarkeit können Doppelschichtkondensatoren (DSK) sowohl zentral wie auch dezentral, also komponentennah, für den Ausgleich kurzfristiger Leistungsspitzen eingesetzt werden. Allerdings ist ihr spezifischer Energieinhalt über Kosten und Gewicht noch vergleichsweise gering, was ihre Anwendung zurzeit noch eingrenzt. Will man sie effizienter nutzen, so muss man, da es sich ja um Kondensatoren und nicht Batterien handelt, einen größeren Spannungsbereich zulassen. Dies kann zu Schaltungen mit DC/DC-Wandlern, Generatoren mit geänderter Spannungsregelung oder Verbrauchern mit einem weiten Versorgungsspannungsbereich führen. Auch hier sind weitere Komponenten, z. B. Leistungsschalter, notwendig.
- Energiemanagement: Maßnahmen zur Verbesserung der Energiebilanz bewirken i. d. R. auch die Sicherstellung der Bordnetzleistung. Neben Lastmanagement und Generatoreingriff ist natürlich auch die Optimierung der Effizienz und Regelung der Leistungsverbraucher ein wichtiger Ansatzpunkt.

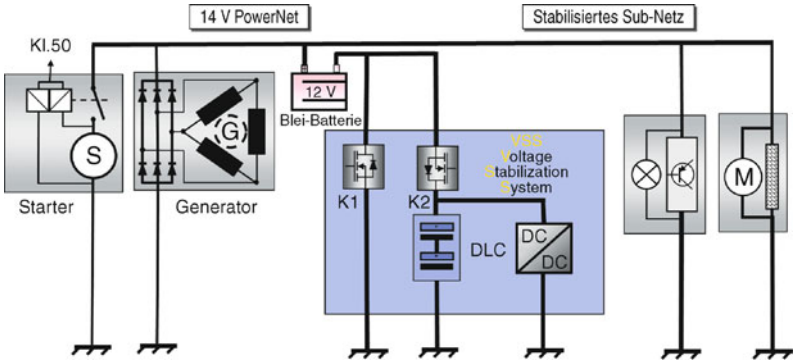



**Abb. 8.34** Bordnetzarchitektur-Variante zur Spannungsstabilisierung und Start-Stopp Unterstützung (Quelle: Continental)

- Bordnetztopologie und Absicherungsbaum: Auf konstruktiver Ebene sind kurze Wege, geringe Übergangswiderstände und eine möglichst weitgehende Entkopplung der kritischen Versorgungskreise wichtig, Gleiches gilt für die Verbindung zur Fahrzeugmasse.

Die potenzielle Anzahl an Architekturen ist aufgrund der vielen möglichen Kombinationen und Verschaltungen der Komponenten sehr hoch. Wesentlich für die Dimensionierung sind der Aufwand, die Sicherheit und das Anwendungsprofil. Abb. 8.34 zeigt beispielhaft eine Architekturvariante, in welcher durch schnelles serielles Hinzuschalten von DSK der Spannungseinbruch beim Starten für das gesamte Bordnetz, also auch den Starter, kompensiert wird. Über den DC/DC-Wandler erfolgt Ladung und ggf. Entladung der Kondensatoren. Hier wird mit moderaten Kapazitäten eine hohe Wirkung erzielt, der Aufwand entsteht dafür vermehrt auf der Seite der Leistungselektronik.

Eine andere Situation stellt sich in Hybridfahrzeugen, in welchen zum einen bestimmte Hochleistungsverbraucher an das Hochvoltbordnetz angeschlossen werden können und es zum anderen die Möglichkeit gibt, über einen DC/DC-Wandler Leistung für das Niederspannungsnetz bereitzustellen. Für E-Fahrzeuge gilt darüber hinaus, dass leistungskritische Verbraucher wie Start/Stopp-Systeme entfallen, dafür aber andere Funktionen, wie z. B. Klima und Heizung, elektrisch auszuführen sind.

### 8.2.4.7 Bordnetzspannungen

Die heutigen Bordnetzspannungen von 12 V im PKW- und 24 V im Nutzfahrzeugbereich haben sich historisch etabliert, sind aber nicht zwingend das technische Optimum. Die erhöhten Leistungsanforderungen, neue elektrische Funktionalitäten und die breitere Einführung von hybriden Antriebkonzepten erfordern daher eine Neubewertung unter Berücksichtigung der folgenden Randbedingungen:

- Verlustminimierung: Durch eine deutlich höhere Bordnetzspannung werden alle Verluste an Dioden oder ohmschen Widerständen, z. B. von Leitungen, Wicklungen oder Durchgangswiderständen, erheblich reduziert. Damit lassen sich eine höhere Energieeffizienz bei gleichzeitiger Verringerung des thermischen Deratings oder aber konstruktive Vorteile und Materialeinsparungen erreichen.
- Technische Notwendigkeit: Einige Komponenten und Systeme, z. B. Aktuatoren hoher Leistung oder eine folienbasierte elektrische Frontscheibenheizung, sind hinsichtlich Effizienz, Kosten, Volumen und Gewicht mit höheren Spannungen als 12 V wesentlich einfacher umsetzbar. Fahrzeuge hoher elektrischer Ausstattung schließlich stoßen an die Leistungsgrenze des 12 V Bordnetzes.
- Lichtbogen: Bereits ab Spannungen um 20 V besteht die Gefahr von Lichtbögen mit dem Risiko von thermischer Zerstörung oder Brand. Damit sind höheren Spannungen nachteilig für alle Komponenten, welche eine mechanische Leitungskreisunterbrechung vorsehen, also

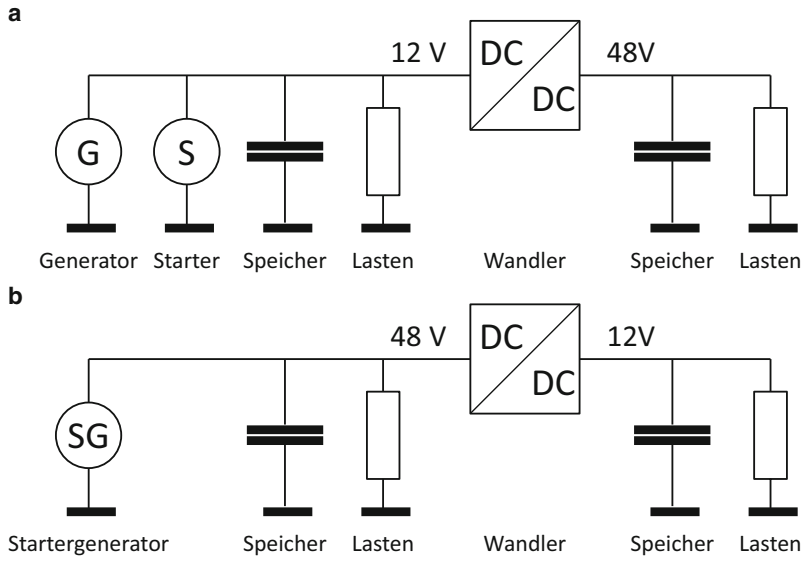



**Abb. 8.35** Bordnetzarchitektur-schematische Darstellung des 12 V/48 V Bordnetzes, **a** Insellösung für spezifische 48 V Verbraucher, **b** Aufbau für Mikro-Hybridfahrzeuge und/oder auf der 48 V Seite höher ausgestatteten Fahrzeugen

Schalter, Relais, Sicherungen und Kontakte, und erfordern zusätzliche konstruktive oder präventive Maßnahmen.

- Komponentenabhängigkeit: Leistungsaktuatoren sowie Leistungselektronik können bei höheren Spannungen kompakter und effizienter ausgelegt werde, thermische Leuchtelemente hingegen haben bei höheren Spannungen eine reduzierte Lebensdauer und Sensoren, Rechner und Signalelektronik können durchaus effizienter bei einer Bordnetzspannung unter 12 V betrieben werden.
- Sicherheit und Berührschutz: Ab 60 V Gleichspannung ist verbindlich sicherzustellen, dass kein Personenkontakt möglich ist, wodurch der konstruktive und sicherheitstechnische Aufwand deutlich zunimmt. Diese Grenze ist für alle Systemzustände einzuhalten, so dass eine Betriebsspannung um einen entsprechenden Sicherheitsabstand unter 60 V liegen sollte. Für höhere Spannungen sind zudem die Massen im Fahrzeug separat zu führen.
- Kompatibilität: Technische und ökonomische Gründe sprechen für eine Beibehaltung des 12 V Bordnetzes, so dass eine höhere Versorgungsspannung parallel zu realisieren ist. Neben einem komplexeren Bordnetz sind daher auch neue und zusätzliche Komponenten, z. B. DC/DC Wandler oder Speicher, zu berücksichtigen.

Für sehr hohe elektrische Leistungen, z. B. in Hybridfahrzeugen, sind Spannungen deutlich über 100 V sinnvoll und führen zu den in ▶ Abschn. 8.2.4.8 beschriebenen aufwendigen Hochvoltbordnetzen. Für Fahrzeuge mit nur geringer Elektrifizierung des Antriebes (Micro-Hybride) oder mit hoher elektrischer Ausstattung hingegen wird die Einführung einer Zwischenspannung unter 60 V, das sogenannte 48 V Bordnetz, angestrebt. Insbesondere für die bei moderater Rekuperation auftretenden elektrischen Leistungen bietet es Vorteile, und anders als bei der zuvor diskutierten, aber schließlich nicht realisierten 42 V Initiative ist nur eine partielle Umsetzung geplant (Abb. 8.35). Außerdem wurde in Zusammenarbeit deutscher Fahrzeughersteller eine gemeinsame Spezifikation (LV148) erarbeitet (Abb. 8.36).

### 8.2.4.8 Hochvoltbordnetze

Nach VDE Vorschriften werden Spannungen kleiner als 1 kV als Niederspannung und größer 1 kV

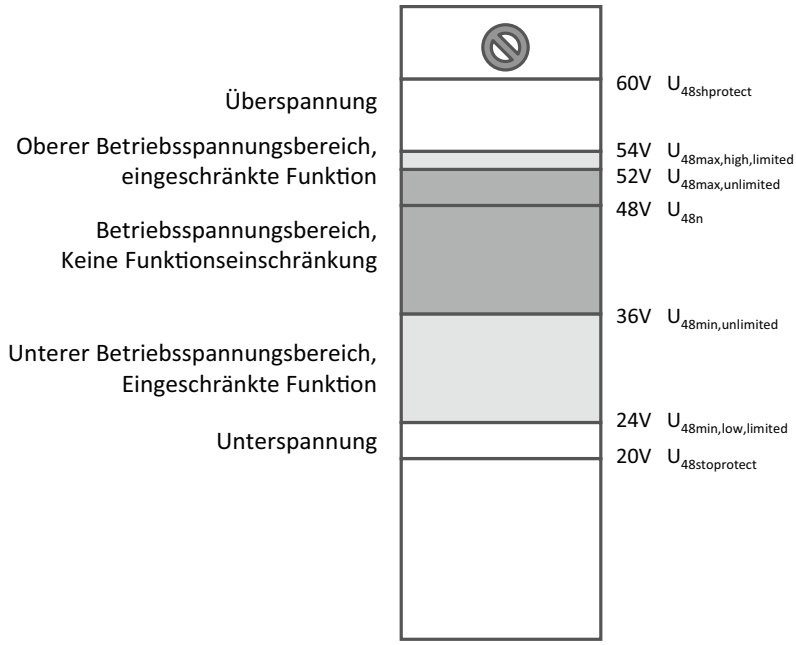



**Abb. 8.36** 48 V Bordnetz, Spannungslevel

als Hochspannung bezeichnet, wobei in der Energietechnik auch die Einteilung in Mittelspannung bis 30 kV, Hochspannung bis 110 kV und Höchstspannung für höhere Spannungen üblich ist. Hochvoltbordnetz ist ein Begriff in der Automobiltechnik und bezeichnet den Bereich von über 60 V bis zu 1 kV. Die Auswirkungen und konstruktiven Maßnahmen auf Komponenten- und Bordnetzebene wurden schon in den ► Abschn. 8.2.1 und ► Abschn. 8.2.2 beschrieben. Hinsichtlich der Architektur sind die folgenden, vom 12 V Bordnetz abweichende Aspekte zu berücksichtigen:

- Für Personen muss unter allen Umständen, auch bei Reparatur, Verunfallung oder unsachgemäßen Gebrauch, ein möglichst weitgehender Schutz gewährleistet sein. Dazu gehören konstruktive Schutzmaßnahmen, sichere Verlegung und auch aktive Vorkehrungen wie Interlockschaltungen. Ebenso sind spannungsführende Komponenten zu dokumentieren und farblich oder durch Warnhinweise zu kennzeichnen.
- Lade- und Entladevorgänge benötigen Zeit und können aufgrund parasitärer Kapazitäten zu nicht vernachlässigbaren Strömen führen.
- Generell besteht die Gefahr von Lichtbögen, vor allem natürlich bei der mechanischen Trennung von Stromkreisen unter Spannung, also z. B. bei Steckverbindern, Relais oder Sicherungen. Die Leistungsdichte kann beträchtlich sein und zur Schädigung und Zerstörung der Kontaktteile bis hin zu Brand und größeren Folgefehlern führen.
- Kriechströme, also oberflächengeleitet Ströme, sind deutlich kritischer und führen ggf. zu nichtgewollten Potenzialen.

Die Ströme liegen bei teilweise weit über 100 A. Dies hat zur Folge:

- Übergangswiderstände müssen dauerhaft sehr gering sein, um Verluste und lokale Erwärmung zu vermeiden. Bei sehr hohen Strömen werden Verschraubungen statt Steckverbinder eingesetzt. Leitungslängen sollten so kurz

wie möglich sein, die Querschnitte sind als Optimum zwischen elektrischen und thermischen Verlusten und Aufwand und Gewicht zu dimensionieren. Eine Eliminierung von Verbindungen durch Integration, z. B. Umrichter an Motor, kann sinnvoll sein.
- Die Spannungsquellen sind in der Lage, im Kurzschlussfall extrem hohe Ströme von einigen 1000 A zu liefern. Die Auslegung der Bordnetzkomponenten und der Absicherung muss dies berücksichtigen.
- Die Karosserie kann nicht als Rückleiter und Masseanbindung eingesetzt werden. Die Massen des Hochvoltbordnetzes und des 12 V Bordnetzes sind also nicht identisch. Da es Schnittstellen zwischen beiden Systemen gibt, sind Signal- und Energieübertragung mit entsprechender Potenzialtrennung auszuführen.

Neben Gleichspannung kommen auch Dreiphasen-Wechselspannungen zum Einsatz, deren PWM-Trägerfrequenzen über 10 kHz liegen und einen hohen Oberwellenanteil haben können:
- Die EMV Auslegung hinsichtlich Störausstrahlung muss konsistent sein.
- Durchgehende Abschirmungen von Leitungen und/oder Leitungsbündeln sowie von Steckergehäusen sind erforderlich., Ableitströme sind in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung.

Elektrische Energie und Leistung:
- Ein DC/DC Wandler kann das 12 V Bordnetz stützen und ein Downsizing der Bordnetzbatterie ermöglichen. Zwischenspannungen sind optional möglich.
- Hochleistungsverbraucher, wie z. B. eine elektrische Klimaanlage, können über das Hochvoltbordnetz versorgt werden.

Netzanbindung:
- In Plug-in-Hybrid- oder in E-Fahrzeugen sind neue Schnittstellen zur Netzverbindung und ggf. fahrzeugseitig ein Ladegerät vorzusehen. Eine galvanische Trennung ist vorgeschrieben Zu unterscheiden sind ein- und dreiphasige AC sowie DC Versorgungen mit teilweise länderspezifischen Spannungs- und Frequenzvorgaben. Für den Steckverbinder liegen Standardisierungen vor, welche aber noch nicht global vereinheitlicht sind. Alternativ ist die leitungslose Energieübertragung über induktive Kopplung.
- Umgekehrt können auch Netzspannungen, z. B. 220 VAC, mobil mit erhöhter Leistung zur Verfügung gestellt werden.

Topologie:
- Im Hochvoltbordnetz findet man fast ausschließlich Punkt zu Punkt Verbindungen mit meist zwei oder drei Leitungen (◘ Abb. 8.37). Damit unterscheidet sich der Produktionsprozess erheblich von der Konfektion eines konventionellen Bordnetzes, besitzt einen wesentlich höheren Automatisierungsgrad und eine einfachere Logistik.
- In einigen Fällen ist eine 3D-Formgebung notwendig; auch Schutz- und Befestigungselemente werden eingesetzt. Aufgrund des größeren Volumens und der erhöhten Steifigkeit sind Hochvoltkabelsätze sorgfältig zu dimensionieren und schwieriger zu verlegen.

## 8.2.5 Der Bordnetz-Entwicklungsprozess

### 8.2.5.1 Abläufe

#### 8.2.5.1.1 Konzeptphase

Die Entwicklung eines Bordnetzes beginnt mit der Zusammenstellung der Basisdaten (◘ Tab. 8.8). Unter Berücksichtigung der vielfältigen Kriterien aus *Funktion*, *Package* und *Fertigung* wird daraus das Konzept zur Platzierung aller Komponenten und zum Routing der Kabelstränge abgeleitet. Dieser Schritt ist zwar noch weitgehend manuell und basiert auf viel Erfahrung, wird allerdings zunehmend von Werkzeugen unterstützt, welche z. B. Anbindung zur Systemarchitektur bieten, interaktive Mensch Maschine Schnittstellen mit z. B. Autorouting ermöglichen und automatisierte Systemkostenbewertungen erlauben. Damit lassen sich in gegebener Zeit deutlich mehr alternative Architekturen über diverse Ausstattungsvarianten evaluieren, was wichtig für die Optimierung sowie für die Validierung der gefunden Lösungen ist. Weiter werden

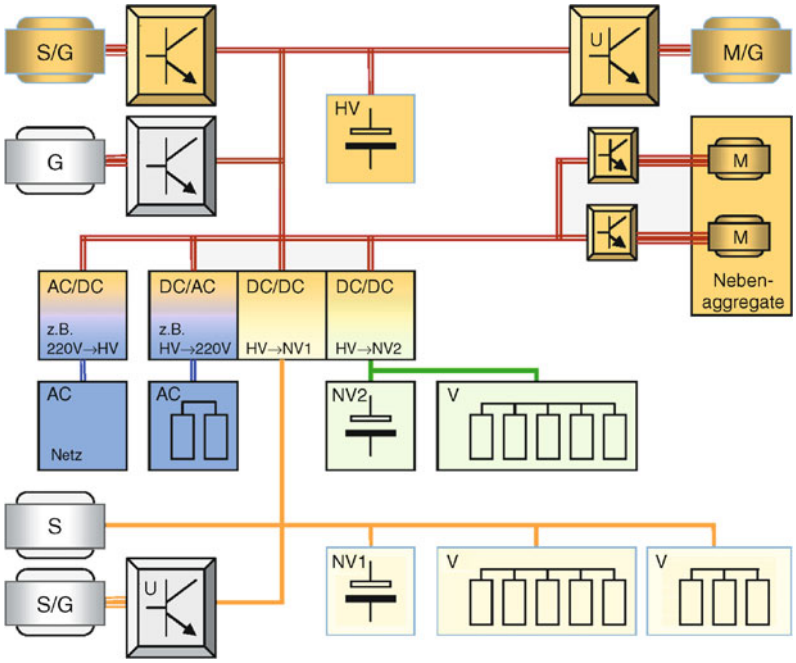



**Abb. 8.37** Bordnetzarchitektur-schematische Darstellung aller möglichen Komponenten (*S*: Starter, *G*: Generator, *M*: Motor, *U*: Umrichter/Gleichrichter, *V*: Verbraucher, AC/DC, DC/DC und DC/AC: Wandler, NV1 = 12 V, 12 V < NV2 < 60 V, HV > 60 V)

**Tabelle 8.8** Basisdaten des Bordnetz-Entwicklungsprozesses

| Elektrische Daten | Mechanische Daten |
|---|---|
| Elektrische Komponenten im Fahrzeug | |
| Schnittstellenbeschreibung<br>– Steckerzahl und -typ<br>– Signalbelegung<br>– Kontaktart<br>– Strombelastung | Geometrische Modelle mit<br>– Abmaßen: Form, Oberflächen<br>– Befestigungsart<br>– Spezifikation Temperatur, Feuchtigkeit |
| Integration zu Systemen im Fahrzeug | |
| Anforderungen an<br>– Energieversorgung<br>– Masseverbindung<br>– elektromagnetische Verträglichkeit | Einbauräume für Komponenten<br>– Lage und Größe<br>– Umgebungsbedingungen<br>– Zugang für Montage und Leitungsführung |
| Schaltpläne mit Informationen zur<br>– Verschaltung der Komponenten zu Systemen<br>– Anschluss an Netzwerke | Kabeltrassen<br>– Verlauf (Topologie)<br>– Querschnitt<br>– Umgebungsbedingungen<br>– Fertigungsbedingte Trennstellen |

Methoden zum automatisierten regelbasierten Entwurf entwickelt und ansatzweise bereits eingesetzt.

Damit lassen sich sodann die Leitungsstränge konstruieren, wobei in dieser frühen Phase der Fahrzeugentwicklung die Datenbasis i. d. R. noch eingeschränkt ist und Annahmen gemacht werden müssen. Gleichzeitig werden Absicherungs- und Massekonzept entwickelt, dabei entstehen Sicherungsdosen und elektrische Verteil- und Schaltmodule, die ebenfalls im Package vorgehalten werden müssen.

Für das Hochvoltbordnetz ist die zumeist einfache Verschaltung (mit Punkt zu Punkt Verbindungen) vorgegeben. Allerdings ist hier eine deutlich stärkere Abstimmung mit der HV-System- und Komponentenentwicklung notwendig, um z. B. eine optimale elektrische und thermische Dimensionierung zu erreichen. Wie schon in ► Abschn. 8.2.4.8 beschrieben, sind zusätzliche Randbedingungen für die Entwicklung zu beachten.

#### 8.2.5.1.2 Serienentwicklung

Der Prozess der Serienentwicklung umfasst die Detailkonstruktion aller Komponenten. Aufgrund der umfangreichen Schnittstellen ist mehr als bei allen anderen Fahrzeugteilen eine regelmäßige Abstimmung mit allen benachbarten Baugruppen (Kollisionsuntersuchungen am *Digital Mockup*, in Referenzfahrzeugen…) und den elektrischen Systemen unumgänglich. Speziell die mit der Leitungsverlegung befassten Personen müssen in vielen bereichsübergreifenden Entwicklungsgruppen (*SET*s) mitarbeiten. Die Detailkonstruktion der Leitungsverlegung beinhaltet u. a.:

- Bearbeitung der Bordnetz-Schnittstellen zu Karosserie-, Aufbau- und Aggregat-Teilen: Konstruktion von Sicken, Löcher, Gestaltung der Trassen. Ferner Setzen von Bolzen und Löchern für Clipse zur Befestigung der Kabelführungen,
- Festlegung der Masseverbindungen unter EMV-Gesichtspunkten,
- Detailkonstruktion und Einbau der Kabelführungen und Befestigungsteile (in der Regel Kunststoff-Spritzgussteile, teilweise Blechhalter). Veränderungen an Steuergeräte-Gehäusen oder Konstruktion spezieller Halter für elektrische Komponenten zur Befestigung in den Einbauräumen,
- Detailkonstruktion der projektspezifischen Relais-, Potenzialverteilungs- und Sicherungsdosen, Koppelstationen, Tüllen und Boxen,
- Einbau aller Bordnetz-Umfänge, auch der aus anderen Projekten übernommenen *Gleichteile*.

Da in Fahrzeugprojekten auch während der Entwicklungszeit häufig geändert wird und in Folge meist das Bordnetz betroffen ist, besteht der Bordnetz-Entwicklungsprozess real aus vielen Iterationsschleifen.

In dieser Phase entstehen folgende Daten:

- Systemschaltplan: elektrische Verschaltung aller zu einer Systemfunktion gehörigen Bauteile mit Detaillierung hinsichtlich Kontakt/Pinnummern und Potentialen.
- Kabelschaltplan: elektrische Verschaltung der Bauteile unter Einbeziehung der Topologie des Leitungssatzes. Er fasst alle Leitungen verschiedener Systeme, die entsprechend der Leitungsverlegung einen einzelnen Leitungsstrang bilden, zusammen. Ergänzt werden Leitungsfarben, Querschnitte und kabelsatzinterne Verbinder (Splices).
- 3D-CAD-Datensätze und Zeichnungen aller Komponenten sowie der Leitungsstrangverlegung und des Packagings der Bordnetzkomponenten.
- DMU (Digital Mockup): Geometriedaten aller Fahrzeugteile in ihrer vorgesehenen Einbauposition. Während der Entwicklung des Bordnetzes werden daraus die Informationen über die umgebenden Teile gezogen und im Gegenzug alle Teile des Bordnetzes eingestellt.
- Leitungssatzzeichnung: Zweidimensionale Zeichnung eines Leitungssatzes als Produkt- und Fertigungsdokumentation. Entsteht aus dem Kabelschaltplan, ergänzt um alle Details des Leitungssatzaufbaus (Befestigungsteile, Schutzelemente, Umwicklung, usw.) und alle geometrischen Maße, reduziert um Details der elektrischen Verschaltung.
- In der Stückliste werden die Produktdaten verwaltet, Details für die Fertigung aufgeführt

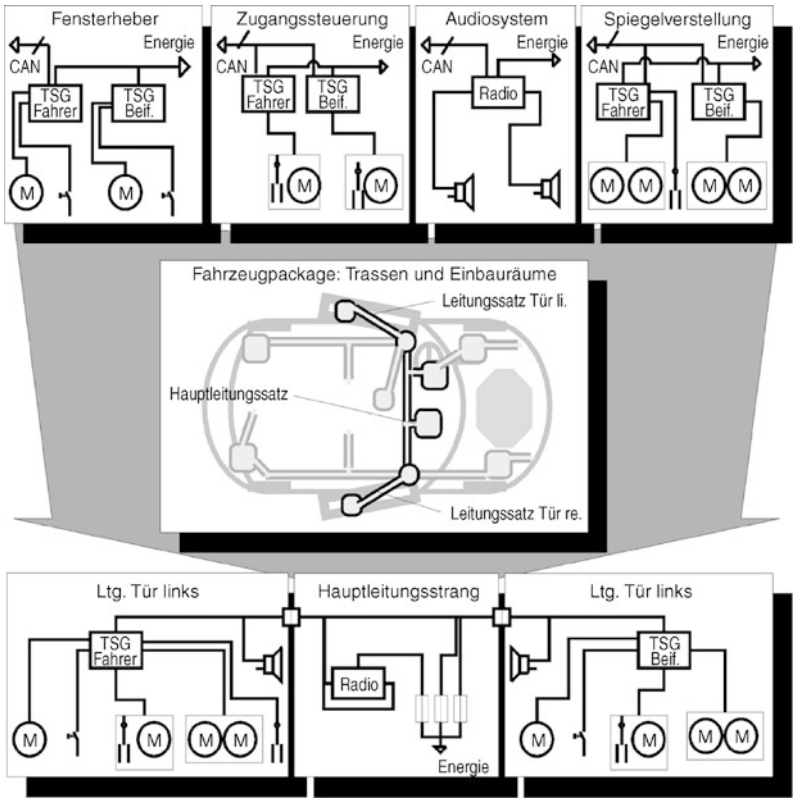



**Abb. 8.38** Ableitung der Kabelschaltpläne aus Systemschaltplänen und Package. *Oben*: Schematische Darstellung der Schaltpläne von den 4 die Türleitungen bildenden Systemen. *Unten*: Schematische Darstellung der Topologie der Türleitungssätze und eines Teils des Hauptleitungsstranges

und, besonders wichtig, die Varianten definiert.

- Weitere Dokumente werden aus den oben Aufgeführten abgeleitet, z.B. Einbauskizzen für die Fertigung, Darstellungen für den Service oder Daten für die Logistik.

#### 8.2.5.1.3 Erprobung

Während die mechanische Konstruktion des Bordnetzes in 3D CAD Systemen bereits sehr früh überprüft werden kann und spezielle Module die Betrachtung von Montagesequenzen und kritischen physikalischen Bedingungen bereits im Vorfeld erlauben, wird die elektrische funktionale Simulation meist nur auf System- und noch nicht Bordnetzebene eingesetzt. Eine breitere Anwendung von Simulation in diesem Bereich ist aber zu erwarten, auch an EMV und thermischen Simulationen wird gearbeitet.

Mit der Verfügbarkeit erster Prototypen beginnt die Erprobung in Laboraufbauten durch Zusammenschalten von Bordnetz und elektrischen Komponenten. Dies ermöglicht zwar nur das Auffinden einfacher Verschaltungsfehler, stellt aber einen schnellen und effektiven Test hinsichtlich der häufigsten Fehlerarten dar. Gezielte Messungen werden dort vorgenommen, wo die entwicklungsbegleitenden Analysen wie *fmea* oder *fta* besondere Risiken ausweisen. *Hil-Tests* im Systemverbund und der Dauerlauf im Fahrzeug vervollständigen die elektrische Erprobung. Alle mechanischen Eigenschaften der Bordnetzkomponenten werden ähnlich dem Ablauf bei anderen Fahrzeugteilen Dichtigkeits-, Schwingungs-, Festigkeits- und Klima-Tests auf

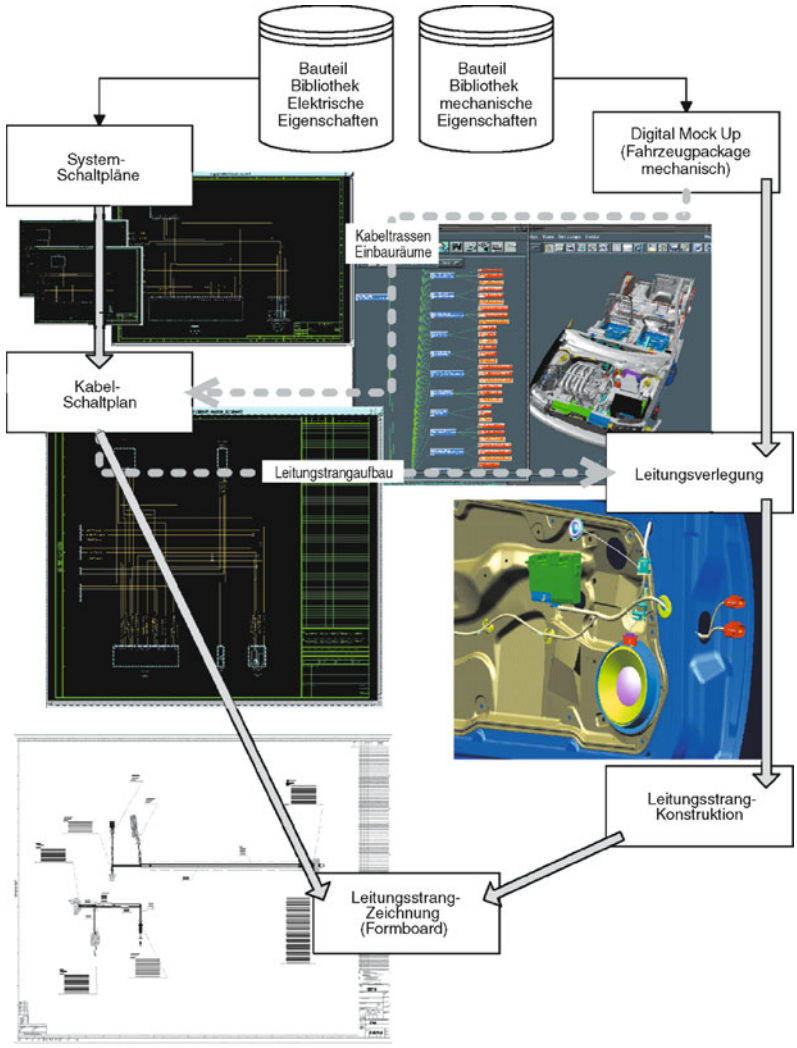



**Abb. 8.39** Datenfluss in einer CAD Werkzeugkette zur Bordnetzentwicklung

Prüfständen und im Fahrzeug unterworfen. Wie alle Komponenten wird auch das Bordnetz erst nach Erprobung im Fahrzeug freigegeben.

### 8.2.5.2 CAE und CAD-Werkzeuge

Zur Steigerung der Effizienz und der Prozesssicherheit hat man schon früh versucht, in der Entwicklung CAD-Werkzeuge einzusetzen. Zur Schaltplan- und Zeichnungserstellung war dies ab den 1960er Jahren möglich. Die beim Bordnetz unerlässliche Einbeziehung der Geometriedaten des Fahrzeuges scheiterte lange Zeit an der Leistungsfähigkeit der verfügbaren Rechenanlagen. Um ein Bordnetz hinreichend genau im CAD-System nachbilden zu können, müssen die umgebenden Teile dreidimensional mindestens in ihrer Außengeometrie sehr genau und in der Regel das ganze Fahrzeug abdeckend modelliert werden. Dadurch entstehen Datenvolumina, die erst seit den 1990er Jahren mit einer für Arbeitsabläufe akzeptablen Geschwindigkeit von Arbeitsplatzrechnern bewältigt werden.

Die Arbeitsabläufe und damit auch die Verkettung der dabei entstehenden Daten gliedern sich

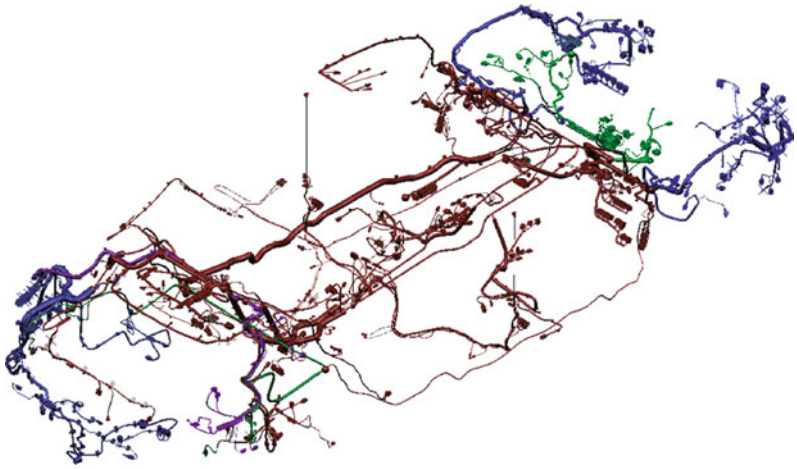


**Abb. 8.40** CAD-Modell eines Fahrzeug-Bordnetzes (VW Phaeton)

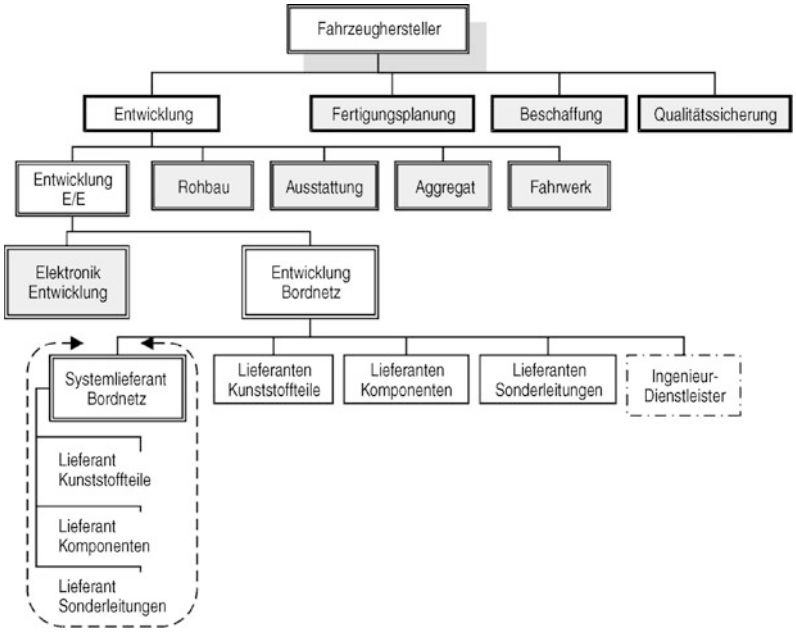



**Abb. 8.41** Organisatorische Einbindung der Lieferanten in die Bordnetz-Entwicklung

in zwei parallele Stränge (Abb. 8.38). Beide gehen von Datenbanken mit Komponenteninformationen aus. Mit auf die elektrischen Parameter ausgelegter CAD-Software werden System- und Kabelschaltpläne bearbeitet, während mit Mechanik-CAD-Werkzeugen Bauteile im DMU (Digital Mockup) platziert, Leitungsstränge, Befestigungs- und Formteile konstruiert und dann unter Verwendung der Schaltplandaten eine Zeichnung entwickelt wird (Abb. 8.39). Die Kerne der Werkzeuge sind in der Regel verbreitete Programme aus ähnlichen Anwendungsbereichen. Ein echter Effizienzgewinn wird allerdings erst erzielt, wenn über entsprechende Entwicklungsplattformen die einzelnen CAE

**Tabelle 8.9** Trends in der Bordnetzentwicklung

| Bordnetz | Trends |
|---|---|
| Leitungen und Stecker | ▬ Leitermaterialien: Aluminium für größere Querschnitte, Messing und Kupferlegierungen im Signalbereich und Einsatz von Lichtwellenleitern<br>▬ Querschnitte: Einsatz sehr kleiner Querschnitte im Signalbereich und generell bessere Querschnittsanpassung<br>▬ Isolatoren: Wachsender Anteil von nicht PVC basierten Materialien, höhere Temperaturfestigkeit<br>▬ Aufbau: Leitungen für den Hochvoltbereich, optimierte Schirmung, nichtflexible Leiter, Flachleiter (FFC/FPC), andere 2D-Leitersysteme<br>▬ Optimierte und sichere Steckersysteme für hohe Ströme und Spannungen, elektrische und mechanische Sicherungselemente<br>▬ Vermeidung von Verkabelung und Steckersystemen durch Integration |
| Schalter und Sicherungen | ▬ Neue Relais und Halbleiter im Hochvoltbereich<br>▬ Zunehmende Übernahme von Sicherungs-, Schalter- und Relaisfunktionen durch Leistungshalbleiter<br>▬ Erweiterte Diagnose-, Steuer- und Regelmöglichkeiten, Einsatz verteilter Bordnetzsteuergeräte |
| Architektur und Aufbau | ▬ Sowohl einteilige wie auch modulare Bordnetztopologien<br>▬ Eigene Masseführung im Hochvoltteil; ggf. auch im Niedervoltteil bei nichtleitenden Strukturelementen der Karosserie<br>▬ Mehrspannungsnetze, Ausbau des Hochvolt- und des 48 V Bordnetzes<br>▬ Neue Konfigurationen und Zuordnungen von Lasten, Speichern, Quellen, Schaltern und Wandlern<br>▬ Aktive Maßnahmen für die Spannungsstabilität<br>▬ Ansätze eines Energie- oder Kommunikationsbackbones |
| Kommunikation | ▬ Weitere Vernetzung bzw. Busanbindung von Steuergeräten, Sensoren und Aktuatoren sowie erhöhte Diagnosefähigkeiten<br>▬ Vermehrter Einsatz sowohl von breitbandigen Bussystemen wie auch, z. B. im Sensorbereich, von solchen mit niedriger Baudrate<br>▬ Weitere Schnittstellen für den Bereich Infotainment und für die externe Netzanbindung von Fahrzeugen (C2CC, C2IC) |
| Prozesse | |
| Entwicklung | ▬ Durchgängige, datenbankgestützte CAx Entwicklungswerkzeuge vom Entwurf bis zur Fertigungsvorbereitung<br>▬ Zunehmender CAE Einsatz in den Bereichen Simulation, Regelkonformität, Optimierung und Validierung sowie weitere Etablierung der 3D Werkzeuge und Virtual Reality<br>▬ Direkte Schnittstellen zur Systemarchitekturentwicklung<br>▬ Weitere Standardisierung auf Komponentenebene zur Umsetzung von Skalierungseffekten<br>▬ Ganzheitliche Entwicklung von Bordnetz- und Elektronikarchitektur<br>▬ Neue Entwicklungsansätze, z. B. aus der Bionik |
| Fertigung | ▬ Automatisierungsansätze in der Konfektion<br>▬ Vorformung zur Montageunterstützung<br>▬ Weitere Optimierung der Logistik und Variantensteuerung<br>▬ Alternative Kontaktierungsverfahren, insbesondere für Aluminium |

Werkzeuge untereinander und mit den diversen Datenbanken sowie dem DMU-System gekoppelt werden. Ebenso sollte eine Schnittstelle zur Fertigungsvorbereitung des Lieferanten vorhanden sein. Die Werkzeugkette sollte zudem den Entwicklungsprozess möglichst gut abbilden. Damit werden manuelle Übertragungsvorgänge überflüssig und automatische Plausibilitätsprüfungen möglich, z. B.:

- Beachtung von elektrischen, funktionalen, konstruktiven und formalen Regeln,
- Übereinstimmung und Konsistenz von Stücklisten und Variantensteuerung,

- Konsistenz der Verschaltung in allen Dokumenten im Einklang mit einer Netzliste,
- korrekte Zuordnung von Leiterquerschnitten und Kontaktgrößen auf Basis der in den Komponentendaten enthaltenen Stromwerte,
- simulatorische Validierung (siehe ▶ Abschn. 8.2.5.1, Paragraph Erprobung).

Die Systeme bilden das reale Verhalten der biegeschlaffen Leitungsstränge so gut ab, dass das daraus entstehende virtuelle Bordnetz für Kollisions- und Montageuntersuchungen im DMU verwendet werden kann. In der Regel ist jedoch eine Überprüfung der Leitungslängen über Prototypenbau und Montage und Vermessung im Fahrzeug erforderlich, um aus den vielfältigen Toleranzeinflüssen ein für die Großserie optimiertes Produkt zu ermitteln.

#### 8.2.5.3 Lieferantenstruktur

Die große Zahl an Teilen in unterschiedlichen Technologien, verbunden mit komplexen Fertigungsabläufen, bedingen ähnlich komplexe Organisationsstrukturen für Entwicklung und Fertigung eines Bordnetzes. Während bis in die 1970er Jahre viele Automobilhersteller ihre Kabelsätze selbst hergestellt haben, ist heute die Entwicklung weitgehend und die Fertigung vollständig an Systemlieferanten ausgelagert.

Der Fahrzeughersteller konzentriert sich auf die für das Fahrzeug relevanten Eigenschaften des Bordnetzes, er spezifiziert die Anforderungen, gibt Systemschaltpläne und Montageabläufe vor und koordiniert die Auslegung des Packagings. Die Detailkonstruktion wird bei Lieferanten durchgeführt. Je nach deren Produktspektrum kommen Leitungen, Komponenten und Kunststoffteile aus einer Hand oder werden weiter untervergeben. Da man anstrebt, möglichst viele Gleichteile modellübergreifend einzusetzen und außerdem gewisse Teile erst in der Fahrzeugfertigung montiert werden, greift die Beschaffung des Herstellers auch direkt auf Unterlieferanten zu. Ein großes Fahrzeugprojekt bindet allein für die Bordnetzentwicklung etwa 50 bis 100 Personen, ◘ Abb. 8.41 zeigt die typische Organisationsstruktur und ihre Schnittstellen in dieser Phase.

### 8.2.6 Entwicklungstrends

Aufgrund der zunehmenden Anzahl elektrischer Komponenten und den damit steigenden Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Funktionalität, Bauraum, Gewicht und Effizienz, aber auch wegen des relativ großen Einflusses des Bordnetzes auf Kosten und Qualität des Fahrzeugs und der starken Wechselwirkung mit anderen Bauteilen herrscht ständig Bedarf zur weiteren Optimierung. Generell resultiert daraus ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess auf Komponente- und Detailebene. Einige der darüber hinausgehenden Trends sowohl technologischer wie methodischer Art sind in ◘ Tab. 8.9 stichwortartig aufgeführt.

## 8.3 Kommunikationsbordnetze

Moderne Fahrzeuge enthalten eine Vielzahl elektrischer Systeme, um die Sicherheit, die Umweltverträglichkeit oder den Komfort des Fahrzeugs zu verbessern. Der größte Mehrwert entsteht jedoch durch die Vernetzung dieser Systeme. Nur dadurch ist es möglich, dass z. B. Fahrerassistenzsysteme optimal mit Motor, Getriebe, Bremsen und Lenkung zusammenarbeiten, dem Fahrer situationsabhängig relevante Informationen aller Fahrzeugsysteme angezeigt werden können oder alle Systeme über eine einheitliche Benutzerschnittstelle eingestellt werden können. Auch Komfortfunktionen wie Klimatisierung, Unterhaltung, Navigation, Anbindung mobiler Onlinedienste oder die Einbeziehung von Kundengeräten wie Smartphones über Bluetooth und WLAN erfordern eine entsprechende Vernetzung im Fahrzeug.

Vor der Einführung der Fahrzeug-Bussysteme wie dem CAN-Bus (Controler Area Network) mussten Systeme, die funktionale Abhängigkeiten zueinander hatten, durch verschiedenste Signalleitungen miteinander verbunden werden. Mit der Einführung des CAN-Bus in den 1990er Jahren reichte es aus, alle Steuergerät mit dem CAN-Bus zu verbinden. Dadurch konnten Leitungen und somit auch Gewicht und Kosten eingespart werden. Die meisten in heutigen Fahrzeugen vorhandenen

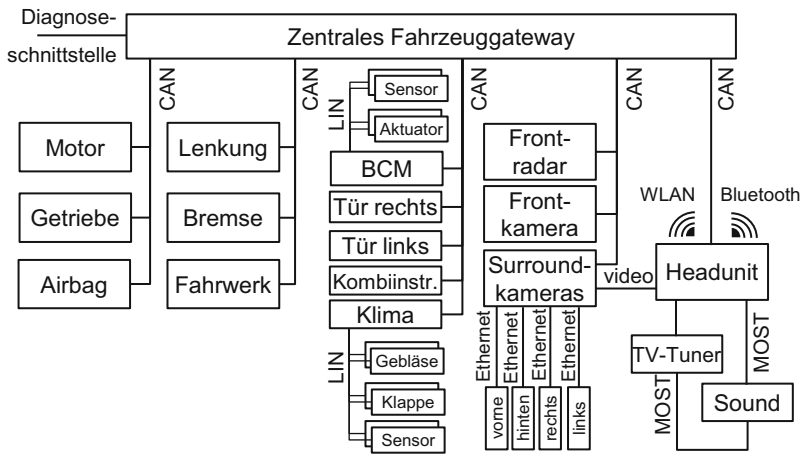



**Abb. 8.42** Vereinfachte Vernetzungsarchitektur eines Mittelklasse PKW

Funktionen würden sich ohne Fahrzeugvernetzung nicht realisieren lassen. Allerdings ist der CAN-Bus technologisch mittlerweile an seine Grenzen gestoßen, so dass in den vergangenen 20 Jahren viele neue Vernetzungstechnologien entwickelt und bestehende an die Anforderungen im Fahrzeug angepasst wurden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten davon vorgestellt. Neben dem CAN-Bus und der Erweiterung CAN-FD sind dies LIN, FlexRay, MOST und Ethernet.

Die Anforderungen an ein Netzwerk im Fahrzeug unterscheiden sich teils deutlich von Netzwerken in der IT-, Telekommunikationsindustrie oder Heimnetzwerken. Ein wichtiger Unterschied sind die Echtzeitanforderungen vieler Steuer- und Reglungssysteme im Fahrzeug. Für ein Netzwerk bedeutet das, dass die Daten nicht nur unverfälscht vom Sender zum richtigen Empfänger übertragen werden, sondern dass diese auch in jedem Fall rechtzeitig ankommen. Für die meisten Fahrzeugsysteme ist die Rechtzeitigkeit der Daten genauso essentiell wie deren Korrektheit. Was rechtzeitig bedeutet, hängt vom jeweiligen System ab.

Vernetzte Steuergeräte besitzen mindestens einen Mikrocontroller, auf dem neben der Software für die eigentlichen Funktionen des Steuergerätes ein Netzwerkstack läuft. Zur Beschreibung der Funktion eines Netzwerkstaks wird üblicherweise das ISO-OSI-Schichtenmodell verwendet. Tab. 8.10 zeigt die darin definierten 7 Schichten sowie eine kurze Beschreibung der Funktion mit Bezug auf die hier beschriebenen Vernetzungstechnologien CAN, LIN, FlexRay, MOST und Ethernet. Die Hardware der Netzwerkschnittstelle besteht typischerweise aus einem Transceiver (Physical Layer) sowie einigen passiven Bauelementen und einem Netzwerk-Controller (Data Link Layer). Ein Transceiver ist ein Halbleiterbauteil, welches einen Sender und Empfänger (engl. Transmitter, Receiver) für das entsprechende Bussystem enthält. Der Netzwerk-Controller ist in den meisten Fällen Bestandteil des Mikrocontrollers. Die höheren Protokollschichten werden durch Software auf dem Mikrocontroller realisiert.

**CAN** Der CAN-Bus kann als die bedeutendste Vernetzungstechnologie im Fahrzeug angesehen werden. Auch wenn der CAN alleine in modernen Fahrzeugen nicht mehr ausreicht, um alle Vernetzungsanforderungen zu erfüllen, ist es dennoch die am weitesten verbreitete Netzwerktechnologie im Fahrzeug.

Der CAN wurde in den 80er Jahren von der Robert BOSCH GmbH für den Einsatz in Steuer und Regelungssystemen in Fahrzeugen und Industrieanlagen entwickelt. Der einfache elektrische Aufbau des CAN-Busses macht ihn sehr robust gegenüber Störungen und stellt nur vergleichsweise geringe Anforderungen an die Leitungen und Steckverbinder im Fahrzeug. Der CAN-Bus, so wie

**Tabelle 8.10** ISO/OSI-Modell

| OSI-Schicht | | CAN | LIN | FlexRay | MOST | Ethernet |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | Application Layer Anwendungsschicht | Die Bedeutung der Daten ist Anwendungsabhängig<br>- Sensordaten, Stellgrößen<br>- Diagnosedaten<br>- Audio-/Videodaten | | | | |
| 6 | Presentation Layer Darstellungsschicht | | | | | |
| 5 | Session Layer Sitzungsschicht | | | | | |
| 4 | Transport Layer Transportschicht | Spezielles Transportprotokoll wird nur Übermittlung großer Datenblöcke benötigt. Z.B. ISO-TP für Diagnose-Kommunikation | | | Synchrones Streaming, MHP, Ethernet | TCP, UDP, AVB-TP |
| 3 | Network Layer Vermittlungsschicht | Adressierung (11Bit CAN-Identifier, 29Bit CAN-Identifier, 6Bit LIN-Identifier) | | Statisches und Dynamisches Segment mit Zeitslots für jedes Steuergerät | MOST Network Services | IPv6, IPv4, AVB |
| 2 | Data Link Layer Sicherungsschicht | Busarbitrierung, Kollisionsvermeidung (CSMA/CA) | Zeitgesteuertes Übertragungssystem festgelegte Zeitslots für jedes Steuergerät | | Synchrone Übertragung von Frames mit 44,1 oder 48kHz im MOST-Ring | MAC-Adressen Ethernet-Switches Priorisierung |
| 1 | Physical Layer Bitübertragungsschicht | Differentielle Spannungs-Signale über verdrillte Zweidrahteitung | Spannungs-Signale auf einzelner Datenleitung gegenüber Fahrzeugmasse | Differentielle Spannungs-Signale über verdrillte Zweidrahteitung | Optische oder elektrische Übertragung Ringtopologie | Differentielle Spannungs-Signale über verdrillte Zweidrahteitung |

er in der ISO 11898 und SAE J2284 standardisiert wurde kann Daten mit bis zu 1 Mbit/s übertragen. Da dies jedoch nur unter bestimmten Randbedingungen zuverlässig funktioniert, werden im PKW typischerweise 500 kbit/s, in großen Nutzfahrzeugen 250 kbit/s verwendet. Im Bereich der Komfort-Elektronik wird von einigen Herstellern ein fehlertoleranter CAN mit Datenraten zwischen 83 kbit/s und 125 kbit/s eingesetzt. Der fehlertolerante CAN funktioniert mit gewissen Einschränkungen auch dann noch, wenn eine der beiden Datenleitungen unterbrochen ist.

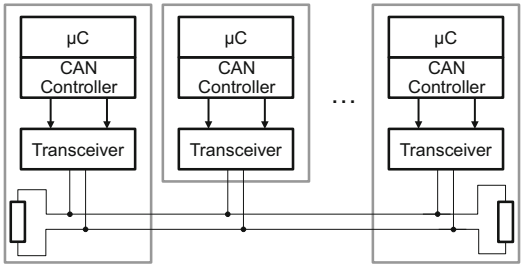



**Abb. 8.43** CAN-Netzwerk

**CAN Physical Layer** Der CAN Physical-Layer wird in der ISO 11898 [56] beschrieben. Die Steuergeräte werden durch eine verdrillte Zweidrahtleitung (UTP Unshielded Twisted Pair) miteinander verbunden. Elektrisch betrachtet sind über die Busleitung alle Steuergeräte parallel geschaltet. Wenn keines der angeschlossenen Steuergeräte Daten sendet, beträgt die Spannung zwischen den beiden Busleitungen (bei dem im PKW üblichen High Speed CAN) 0 V. Wenn eines der Steuergeräte ein dominantes Bit (logisch 0) senden will, legt es eine Spannung von ca. 2 V differentiell auf den Bus. Um ein rezessives Bit (logisch 1) zu senden wird keine Spannung auf den Bus gelegt. Wenn keines der Steuergeräte ein dominantes Signal anlegt, beträgt die Spannung auf den Busleitungen 0 V. Damit die elektrischen Wellen am Ende der Busleitung nicht reflektiert werden, enthalten die äußersten Steuergeräte einen Busabschlusswiderstand von typischerweise 120 Ohm. Die Verdrillung der beiden Adern der Zweidrahtleitung ist wichtig, damit äußere Magnetfelder keine Störungen in die Busleitung induzieren können und die Signale auf der Busleitung möglichst keine elektromagnetischen Störungen aussenden können.

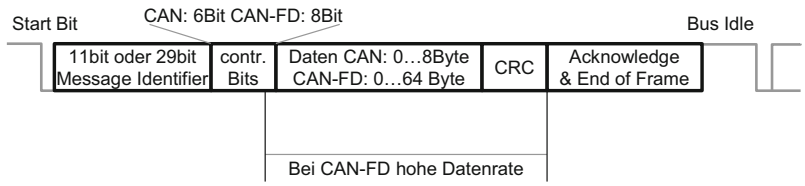



**Abb. 8.44** Aufbau einer CAN bzw. CAN-FD Message

**CAN Data Link Layer** Der Data Link Layer des CAN-Bus ist in der ISO 11898 [56] spezifiziert und wird im CAN-Controller umgesetzt. Der CAN-Controller ist typischerweise in den Mikrocontroller des Steuergerätes integriert. Die Nachrichten, die ein Steuergerät an ein anderes schickt, werden als CAN-Messages (deutsch CAN-Botschaften) bezeichnet. CAN-Messages haben ein festgelegtes Botschaftslayout, das in Abb. 8.44 dargestellt ist. Der Message Identifier am Anfang kennzeichnet sowohl den oder die Empfänger der Nachricht als auch die Art des Inhalts. Der Message Identifier kann 11 Bit oder 29 Bit lang sein. Prinzipiell kann jedes Steuergerät alle Nachrichten auf dem Bus empfangen. Eine CAN-Message kann bis zu 8 Byte Daten enthalten.

Da jedes Steuergerät jederzeit eine CAN Message auf den gemeinsamen Bus senden kann, besteht die Gefahr einer Kollision, wenn zwei Steuergeräte gleichzeitig senden. Im CAN ist dafür das CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) Zugriffsverfahren definiert. Dabei überprüft der CAN-Controller vor dem Senden zunächst ob der Bus frei ist und wartet gegebenenfalls bis der Bus frei ist. Um sicherzustellen, dass nicht zeitgleich mit ihm auch ein anderes Steuergerät anfängt zu senden, liest der CAN-Controller jedes Bit, das er auf den Bus schreibt zurück um sicherzustellen, dass der entsprechende Spannungspegel (0 V oder 2 V) sich auch auf den Busleitungen einstellt. Wenn zwei oder mehr Steuergeräte gleichzeitig einen dominantes (Transceiver eingeschaltet, Busspannung 2 V) oder einen rezessives Signal (Transceiver ausgeschalter, Busspannung 0 V) ausgeben, ist die Kollision auf dem Bus nicht erkennbar. Der konkurrierende Zugriff wird erst sichtbar, wenn gleichzeitig versucht wird einen dominanten und einen rezessiven Pegel einzustellen. In dem Fall setzt sich der dominante Pegel durch und das Steuergerät, das versucht hat, den rezessiven Pegel einzustellen, erkennt den konkurrierenden Zugriff und stellt unmittelbar das Senden ein. Es setzt sich also die CAN-Message durch, die am Anfang die meisten dominanten Bits enthält. Das Verfahren wird als bitweise Arbitrierung bezeichnet. Jede CAN-Message beginnt mit dem dominanten Startbit gefolgt von dem Identifier wobei dominant den dem Wert 0 entspricht. Je kleiner der Identifier ist, desto geringer also ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Senden abgebrochen und erneut gestartet werden muss. Daher bekommen Nachrichten mit einer hohen Priorität (die sehr zeitnah übertragen werden müssen) einen kleinen CAN-Identifier zugewiesen.

In einem 500 Kbit/s CAN mit 29 Bit Identifier und 8 Byte Daten benötigt eine CAN-Message 320 $\mu$s zur Übertragung. Wenn eine Nachricht mit der höchsten Priorität übertragen werden soll, muss der CAN-Controller maximal 320 $\mu$s warten und kann dann ungehindert senden. Dadurch lassen sich im Fahrzeug schnelle Reglungssysteme mit Anforderungen an die Kommunikationslatenz $< 1$ ms realisieren. Für Nachrichten mit einer niedrigeren Priorität lassen sich die maximal auftretenden Verzögerungen berechnen, wenn alle höherprioren Nachrichten sowie der minimale Abstand zwischen den Nachrichten bekannt sind. Da die maximal auftretenden Latenzen auf einem CAN-Bus vorhersagbar sind, lassen sich damit Systeme mit Echtzeitanforderungen realisieren.

**CAN-FD** Um die Beschränkung auf die geringe Datenrate etwas zu verbessern wurde 2012 durch BOSCH eine Erweiterung namens CAN-FD (Controller Area Network with Flexible Data-Rate) entwickelt. Damit können CAN-Netzwerke mit 2 Mbit/s oder bei kleinen Netzwerken sogar bis zu 5 Mbit/s betrieben werden. CAN-FD wird als Erweiterung der ISO 11898 standardisiert. CAN-FD

läuft allerdings nicht durchgängig mit der hohen Bandbreite. Auf Grund der bitweisen Arbitrierung am Anfang der CAN-Message ist es nicht möglich, Datenraten > 1 Mbit/s zu verwenden. Im CAN-FD erfolgt deshalb die Übertragung des Identifiers weiterhin mit einer niedrigen Datenrate von z. B. 500 Kbit/s. Während der Übertragung der Nutzdaten wird die Geschwindigkeit auf z. B. 2 Mbit/s erhöht. Dadurch lassen sich in einer CAN-Message gleicher Länge (320 µs) statt 8 Byte 32 Byte bei 2 Mbit oder sogar 64 Byte bei 4 Mbit übertragen. Das entspricht einer Vervierfachung bzw. Verachtfachung der verfügbaren Bandbreite.

**LIN (Local Interconnect Network)** Der LIN-Bus entstand Ende der 1990er Jahre um einfache elektrische Baugruppen wie Schaltermodule, Sensoren wie z. B. Regen/Lichtsensor oder Aktuatoren wie Fensterheber oder Schiebedach durch einen günstigen Datenbus mit der Fahrzeugelektronik zu verbinden. Der LIN-Bus ist auf Initiative von Motorola entstanden und als ISO 17987 standardisiert.

**LIN Physical Layer** Der Kostenvorteil gegenüber dem CAN-Bus entsteht dadurch, dass statt der verdrillten Zweidrahtleitung nur eine einzelne Ader verwendet wird und einfache Mikrocontroller ohne CAN-Controller verwendet werden können. Elektrisch ist der LIN sehr einfach aufgebaut. Alle Netzwerkteilnehmer sind über eine Leitung miteinander verbunden. Im Ruhezustand wird durch einen Widerstand 12 V auf die Leitung aufgeprägt. Die Steuergeräte können ein dominantes Signal senden, indem sie das Signal auf 0 V herunterziehen. Der verwendete Eindraht-Bus ist empfindlicher gegenüber elektromagnetischen Störungen und würde bei höheren Frequenzen auch mehr Störungen abstrahlen als dies bei einer verdrillten Zweidrahtleitung der Fall wäre. Daher ist die verwendete Datenrate wesentlich geringer als beim CAN-Bus. Eine typische Datenrate ist 19,2 kbit/s. Es werden aber auch Datenraten von 9,6 kbit/s und 2,4 kbit/s verwendet.

**LIN Data Link Layer** Ein Steuergerät auf dem LIN-Bus ist der LIN-Master, die übrigen werden als LIN-Slaves bezeichnet. Die Teilnehmer dürfen nur zu bestimmten Zeiten Daten auf den LIN senden. Sie können dann jedoch sicher sein, das kein anderer Teilnehmer zu dieser Zeit sendet und es zu Kollisionen auf dem Bus kommt. Die Steuerung des Kommunikationsablaufs erfolgt durch das regelmäßige Aussenden der Botschaftsheader durch den LIN-Master. Dieser Header enthält einen LIN-Identifier, der wie beim CAN nicht ein bestimmtes Steuergerät, sondern einen Dateninhalt identifiziert. Bei Nachrichten vom Master sendet dieser sowohl den Header als auch die Daten. Bei Nachrichten vom Slave an den Master sendet der Master den Header als Anfrage und der Slave antwortet mit den dazugehörigen Daten.

**FlexRay** FlexRay ist eine Fahrzeug-Vernetzungstechnologie, die ab dem Jahr 2000 durch das FlexRay-Konsortium entwickelt wurde. Das FlexRay-Konsortium war ein Zusammenschluss von Automobilherstellern und Zulieferern. FlexRay ist in der ISO17458 standardisiert.

FlexRay wurde mit dem BMW X5 2007 erstmals in einem Serienfahrzeug eingesetzt.

Der FlexRay wurde als leistungsfähigerer Nachfolger des CAN konzipiert, hat es jedoch nie geschafft, diesen flächendeckend zu ersetzen. FlexRay wird vor allem in Premium Fahrzeugen im Bereich Fahrwerk, Antrieb und Fahrerassistenz eingesetzt.

Vor- und Nachteile des FlexRay gegenüber dem CAN:

+ höhere Datenrate von 10 Mbit/s (20 Mbit/s bei zweikanaliger Auslegung),
+ ein Kurzschluss oder Unterbrechung der Busleitung führt nicht zum Totalausfall des Systems,
+ höhere Ausfallsicherheit durch optionale zweikanalige Auslegung (A-Kanal + B-Kanal),
+ garantierte Latenz aller Nachrichten durch Zeitsteuerung (TDMA),
– höhere Kosten gegenüber dem CAN-Bus.

**Der Physical Layer des FlexRay** Ein FlexRay-Kanal verwendet typischerweise eine Datenrate von 10 Mbit/s. Es sind Betriebsarten mit 5 Mbit/s und 2,5 Mbit/s definiert jedoch unüblich. Es ist möglich zwei Kanäle zu kombinieren und dadurch 20 Mbit/s zu erreichen. FlexRay verwendet genau wie der CAN eine symmetrische Zweidrahtleitung zur Verbindung der Netzwerkteilnehmer. Auf Grund der höheren Datenrate werden höhere Anforderungen an die Symmetrie und Verdrillung der Leitung

gestellt. Einige Hersteller verwenden gemantelte UTP-Leitungen. Der Kunststoffmantel verhindert mögliche Entdrillungen, die bei der Verlegung der Leitungen entstehen können. Wie beim CAN sind an den Enden des Busses Abschlusswiederstände notwendig, um Reflexionen zu vermeiden.

Ein linearer Bus, der durch das gesamte Fahrzeug verläuft und an dem alle Steuergeräte angeschlossen sind kann sehr lang werden. In CAN-Netzwerken werden deshalb teilweise passive Sternpunkte eingesetzt, von denen die Busleitungen sternförmig zu den umliegenden Steuergeräten führen. Das reduziert die Leitungslängen und somit auch das Gewicht und die Kosten des Fahrzeugs. Während dies bei 100 kbits/s CAN zuverlässig funktioniert, sind passive Sternpunkte bei 500 kBit/s bzw. bei CAN-FD bereits grenzwertig und funktionieren nur bei kurzen Leitungen. Der Grund dafür sind die Hochfrequenzeigenschaften der Leitungen. Durch die Zusammenschaltung der Leitungen im Sternpunkt ändert sich die Impedanz (komplexer Leitungswiderstand) was zu Signalreflexionen führt. Mit den aktiven Sternen wurde bei FlexRay eine Möglichkeit geschaffen, die Vorteile von Sternpunkten trotz der höheren Frequenzen zu nutzen. Aktive Sterne sind Halbleiterbausteine, die für jeden der abgehenden Zweige einen eigenen Transceiver enthalten. In einem FlexRay-Netz können bis zu zwei Sterne und an jedem Zweig bis zu 5 Steuergeräte angeschlossen werden. Typischerweise sind sie in zentralen Steuergeräten wie dem Gateway verbaut. Ein aktiver Stern kann alle Zweige überwachen und im Fehlerfall auch abschalten, ohne dass dies Auswirkungen auf die Funktion der verbleibenden Zweige hat. Zusammen mit der optionalen Redundanz durch den zweiten Kanal erhöht dies die Ausfallsicherheit und bringt vor allem für sicherheitsrelevante Systeme Vorteile.

**Der Data Link Layer des FlexRay** Eine bitweise Arbitrierung wie beim CAN ist bei Geschwindigkeiten von > 1 Mbit bei fahrzeugtypischen Leitungslängen auf Grund der physikalischen Signallaufzeiten nicht möglich. Um das Problem konkurrierender Buszugriffe zu lösen wurde bei FlexRay das TDMA-Verfahren (Time Devision Multiple Access) gewählt. Dabei gibt es einen Kommunikationszyklus festgelegter Länge in dem jedem Steuergerät ein oder mehrere festgelegte Zeitfenster zur Verfügung stehen, in denen es Daten auf den Bus senden darf. Der FlexRay wird deshalb auch als zeitgesteuerter Bus bezeichnet. Damit alle Steuergeräte das gleiche Zeitverständnis haben, enthält das FlexRay-Netz eine verteilte Uhr. Die gemeinsame FlexRay-Zeit wird dabei mathematisch aus den Synchronisationsbotschaften mehrerer festgelegter Sync-Steuergeräte ermittelt. Der Ausfall eines Steuergeräts führt daher nicht zum Ausfall des gesamten Netzes.

Die Konfiguration, wann welches Steuergerät Daten sendet, wird als FlexRay-Schedule bezeichnet und muss im Vorfeld eindeutig festgelegt werden. Der FlexRay-Schedule wird in die Software aller beteiligten Steuergeräte eingebracht. Das nachträgliche Ändern des Schedules sowie das Hinzufügen weiterer Steuergeräte ist i. d. R. nicht möglich. Auch das Weglassen von Steuergeräten in niedriger ausgestatteten Fahrzeugen ist nur unter bestimmten Randbedingungen möglich. Dies und die im Vergleich zum CAN höheren Kosten haben dazu geführt das FlexRay bislang nur bei Premium-Fahrzeugen zum Einsatz kommt.

**MOST (Media Oriented System Transport)** Im Gegensatz zu CAN, LIN und FlexRay wurde MOST nicht für Steuer- und Reglungsaufgaben entwickelt, sondern primär zur Übertragung von Audio- und Video-Daten. Es wird verwendet, um CD-, DVD- oder BluRay-Player, Sound-Verstärker, sowie Radio- und TV-Tuner und Telefon-Freisprecheinrichtungen an das Infotainment-System des Fahrzeugs anzubinden.

MOST ist eine Vernetzungstechnologie, die ebenfalls speziell für den Einsatz in Fahrzeugen entwickelt wurde. MOST geht auf eine Entwicklung der Firma Oasis Silicon System zurück und wurde durch die MOST-Coorporation weiterentwickelt. Im Gegensatz zu den bisher behandelten Vernetzungstechnologien ist MOST nicht bei der ISO oder einem anderen Standardisierungsgremium standardisiert. MOST gibt es in drei Generationen mit jeweils unterschiedlicher Geschwindigkeit: MOST25 mit 25 Mbit/s, MOST50 mit 50 Mbit/s und MOST150 mit 150 Mbit/s.

**Der Physical Layer des MOST** MOST ist ein Bus in Ringtopologie mit einem optischen und einem elektrischen Physical-Layer. MOST25 ist ausschließlich mit einem optischen Physical-Layer definiert. Dafür kommen Lichtwellenleiter aus Kunststoff (POF Plastic Optical Fiber) zum Einsatz. Im Steuergerät werden die optischen Signale durch einen Fiber Optical Transceiver (FOT) erzeugt und empfangen. Die Steuergeräte in einem MOST Netzwerk werden mit Hilfe der POF-Leitungen zu einem Ring verbunden. Dabei werden jeweils zwei Leitungen an den FOT angeschlossen. Über eine Leitung kann das Steuergerät nur senden, über die andere nur empfangen. Die Steuergeräte im Ring leiten die Nachrichten jeweils bis zum Empfänger weiter. Zusätzlich zu den POF-Leitungen werden die Steuergeräte durch eine elektrische Ringbruchleitung verbunden um im Fehlerfall das verursachende Steuergerät lokalisieren zu können. MOST50 verwendet als Übertragungsmedium eine symmetrische verdrillte Zweidrahtleitung vergleichbar, mit CAN und FlexRay. Auf Grund der im Vergleich zu FlexRay deutlich höheren Frequenz werden an die Leitungen und Steckverbinder nochmals höhere Anforderungen gestellt. Für MOST150 ist sowohl ein optischer als auch ein elektrischer Physical-Layer definiert. Der optische MOST150 verwendet ebenfalls Lichtwellenleiter aus Kunststoff. Für den elektrischen MOST 150 werden Koaxkabel, vergleichbar mit Antennenleitungen, verwendet.

**Der MOST Data Link Layer und höhere Protokollschichten** MOST wurde speziell für Übertragung von digitalen Audiosignalen entwickelt. Daher wird das ganze Netz durch den Audiotakt gesteuert. In MOST25 Netzen wird meist eine Botschaftsrate von 44,1 kHz verwendet. Das ist die typische Abtastfrequenz einer Audio-CD. MOST150 Netzwerke werden in der Regel mit 48 kHz betrieben. Das entspricht der Abtastfrequenz einer DVD-Audiospur sowie vieler moderner digitaler Medien. Die Nachrichten im MOST-Ring werden immer von einem Teilnehmer zum nächsten weitergeleitet, bis sie wieder beim ursprünglichen Sender ankommen. MOST ist ein zeitgesteuerter Bus, in dem jeder Teilnehmer festgelegte Sendezeitpunkte hat. Im Gegensatz zum CAN gibt es keine Kollisionen beim Buszugriff. Jede Botschaft besteht aus einem synchronen und einem optionalen asynchronen Datenbereich. Synchrone Daten sind vor allem Audio Streaming Daten. In einem MOST 25 System können bis zu 15, in einem MOST 150 bis zu 93 unkomprimierte Audio-Stereo-Kanäle übertragen werden [54]. Der asynchrone Datenbereich wird zur Übertragung von Paketdaten verwendet. Das können z. B. Bilder oder Navigationsdaten aber auch Softwareupdates sein. Im asynchronen Bereich des MOST können auch Ethernet-Frames übertragen werden um z. B. Internetdienste zur Verfügung zu stellen.

**Ethernet und IP** Ethernet ist außerhalb des Fahrzeugs die am weitesten verbreitete drahtgebundene Vernetzungstechnologie. Zusammen mit dem Internet-Protokoll (IP) bzw. der TCP/IP Protokollfamilie und dem drahtlosen WLAN wird es schon sehr lange für die Vernetzung von PCs und IT-Systemen, für moderne Telefonsysteme (VoIP – Voice over IP), sowie für die Heimvernetzung verwendet [60]. Die Automobilindustrie sieht ein enormes Potential in der Verwendung von Ethernet und IP in der Fahrzeugvernetzung. Gegenüber bisherigen Vernetzungstechnologien können wesentlich höhere Datenraten und flexiblere Kommunikationsmechanismen verwendet werden. Dadurch eignen sich Ethernet und IP besonders für den Einsatz in Fahrerassistenzsystemen z. B. zur Übertagung von Kamerabildern, in Infotainmentsystemen zur Übertragung von Audio- und Videodaten sowie als Fahrzeug-Diagnosezugang zum schnellen Einspielen von Softwareaktualisierungen. 2008 wurde Ethernet im 7er BMW als Diagnosezugang eingeführt. 2013 führte BMW ein Ethernet-basiertes Kamerasystem im X5 ein. 2014 brachte Volkswagen im Passat ebenfalls ein Fahrerassistenzsystem mit vier mit Ethernet vernetzten Kameras in Serie. 2015 haben mit Audi, Porsche, Jaguar und GM weitere Hersteller Fahrzeuge mit Ethernet in Serie gebracht [65].

In einem Ethernet- und IP-Netzwerk beschreibt Ethernet den Physical Layer und den Data Link Layer. Als Netzwerkprotokoll (Network-Layer) kommt das Internet-Protokoll (IP) zum Einsatz.

**Ethernet** Unter dem Begriff Ethernet versteht man eine ganze Reihe verschiedener miteinander ver-

wandter Netzwerktechnologien. Ethernet wurde ab 1973 von Xerox entwickelt. Ab 1980 wurde Ethernet durch die IEEE in der Arbeitsgruppe 802.3 zu einem internationalen Standard weiterentwickelt [67]. Die drei Ethernet-Derivate 10BASE-T (10 Mbit/s, 1990), 100Base-TX (100 Mbit/s, 1995) und 1000BASE-T (1 Gbit/s, 1999) werden bis heute von praktisch jedem Computer unterstützt. Darüber hinaus wurden im Laufe der Zeit zahlreiche Ethernet-Derivate für spezielle Anforderungen und Einsatzbereiche entwickelt. Speziell für den Einsatz in Kraftfahrzeugen wurden die Ethernet-Derivate 100BASE-T1 (100 Mbit/s, 2015) und 1000BASE-T1 (1 Gbit/s, 2016) standardisiert [62]. Beide Standards verwenden eine verdrillte Zweidrahtleitung ähnlich wie bei CAN und FlexRay. Wobei speziell für 1000Base-T1 die Anforderungen an die Leitung und die Verlegung im Fahrzeug wesentlich höher sind. 100Base-T1 basiert auf der vom Halbleiterhersteller Broadcom entwickelten BroadR-Reach® Technologie. Da die Technologie wesentlich besser zu den fahrzeugspezifischen Anforderungen und auch Anforderungen anderer Industriebereiche passt als das bei Computern verwendete 100BASE-TX, wurde ab 2014 eine Standardisierung bei der IEEE gestartet. Mittlerweile gibt es mehr Halbleiterhersteller, die 100BASE-T1 konforme Transceiver entwickeln als dies für MOST und FlexRay-Bausteine der Fall ist. Der Ethernet Transceiver wird oft Ethernet-PHY (Physical Layer) bezeichnet. Der Netzwerk-Controller des Data Link Layer wird oft als Ethernet-MAC (Media Access Control) bezeichnet.

**100Base-T1 Physical-Layer** 100Base-T1 Ethernet verwendet genau wie die in Computern üblichen Standards 10BASE-T, 100Base-TX und 1000BASE-T ausschließlich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Das bedeutet, dass der Ethernet-Anschluss eines Steuergerätes mittels einer verdrillten Zweidrahtleitung mit genau einem Ethernet-Port eines anderen Steuergerätes verbunden wird. Um Netzwerke mit mehr als zwei Teilnehmern bilden zu können, werden ausgewählte Steuergeräte mit Switches mit mehreren Ports ausgestattet. Passive Sternpunkte wie bei CAN oder FlexRay, bei denen alle Steuergeräte elektrisch parallel auf die gleichen Busleitungen geschaltet werden sind bei den hohen Datenraten von Ethernet nicht möglich.

100BASE-T1 verwendet eine dreistufige Pulsamplitudenmodulation (PAM3). Dabei können Symbole mit drei verschiedene Spannungswerte (1 V, 0 V, −1 V) auf den Bus gelegt werden. Aus der Bitrate von 100 Mbit/s wird dadurch eine Symbolrate von 66,66 Mbd/s (Megabaud pro Sekunde) und eine elektrische Bandbreite von ca. 33,33 MHz. Da bei Ethernet lediglich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zum Einsatz kommen, ist es möglich, das beide Teilnehmer gleichzeitig senden. Das Steuergerät muss zum Empfangen der Nachrichten kontinuierlich die Spannung auf den Busleitungen messen und von der gemessenen Spannung den Wert abziehen, den es selbst gerade sendet. Die Differenz entspricht dem Signal, das die gegenüberliegende Seite gerade sendet. Diese Betriebsart wird als full duplex bezeichnet und ermöglicht, dass ein Steuergerät gleichzeitig 100 Mbit/s senden und 100 Mbit/s empfangen kann. Es gibt keine Kollisionen beim Buszugriff wie beim CAN-Bus oder Wartezeiten wie bei FlexRay oder MOST. Das Steuergerät kann jederzeit Daten auf den Bus senden und von dort empfangen. Das macht Ethernet vor allem für Echtzeitsysteme interessant.

**Ethernet Data-Link-Layer und Ethernet-Switches** Der Datalink-Layer von Ethernet ist als IEEE802.1 [68] standardisiert und für alle Ethernet-Derivate gleich. In der Literatur wird im Zusammenhang mit dem Ethernet Data-Link-Layer häufig das CDMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) Verfahren erklärt [60]. Dieses Verfahren wurde in der Anfangszeit von Ethernet-Derivaten verwendet, die anstelle der heute üblichen Switches ein lineares Bussystem vergleichbar mit dem CAN verwendet haben. CSMA/CD dient ähnlich dem CSMA/CA-Verfahren des CAN-Buses der Kollisionsauflösung. Es hat seit der Einführung der Ethernet-Switches bei Fast-Ethernet (100BASE-TX) Mitte der 1990er Jahre jedoch keine praktische Bedeutung mehr. Ein Ethernet-Switch im Fahrzeug ist typischerweise Bestandteil eines größeren Steuergerätes z. B. des zentralen Gateways, der Headunit oder eines Domaincontrollers. Steuergeräte mit integriertem Switch haben mehrere Ethernet-Ports

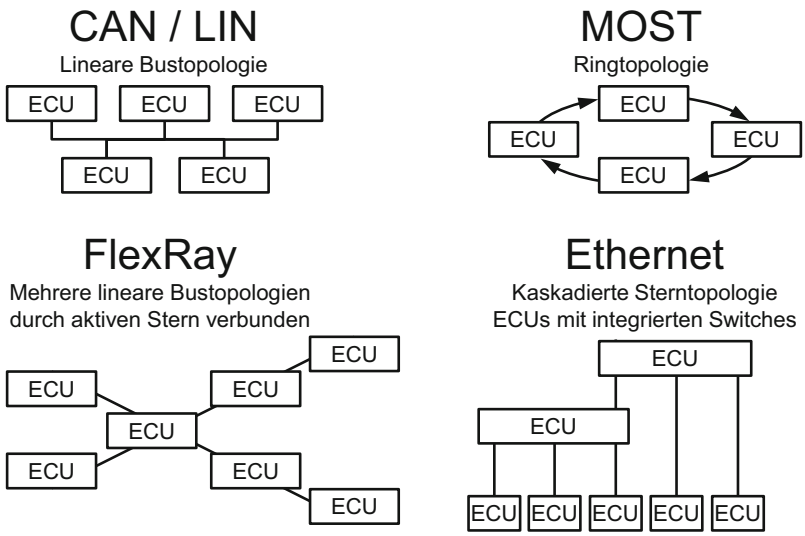



**Abb. 8.45** Topologien typischer Fahrzeugbussysteme

und verbinden darüber alle Steuergeräte zu einem Fahrzeugnetzwerk (vgl. Abb. 8.45).

Jeder Ethernet-Schnittstelle ist eine eindeutige 48 Bit-Adresse (MAC-Adresse) zugewiesen. Die Übertragung der Daten erfolgt mit Nachrichten, die als Ethernet-Frames bezeichnet werden. Jedes Ethernet-Frame enthält eine Absender- und eine Empfänger-Adresse. Anhand der Absenderadressen lernt der Switch, welche Endgeräte an den einzelnen Ports angeschlossen sind. Nachrichten, die an genau einen Empfänger adressiert sind (Unicast-Nachricht), werden nur aus genau dem Port ausgegeben, an dem der Empfänger mit der passenden MAC-Adresse angeschlossen ist. Mittels Multicast-Adressen können Nachrichten gleichzeitig an mehrere Empfänger gesendet werden. Damit der Switch weiß, welche Ports zu einer Multicast-Adresse gehören, muss er entsprechend konfiguriert werden. Darüber hinaus können Nachrichten an eine Broadcast-Adresse geschickt werden. Der Switch gibt diese Nachrichten auf allen Ports aus.

Wenn mehrere Steuergeräte gleichzeitig eine Nachricht an den gleichen Empfänger schicken, entsteht im Switch eine Konkurrenzsituation und der Switch muss entscheiden, welche Nachricht er zuerst ausgibt. Die andere Nachricht wird in einer Warteschlange intern zwischengespeichert. Die dadurch entstehende zusätzliche Wartezeit ist für Echtzeitsysteme im Fahrzeug nachteilig. Um sicherzustellen, dass Nachrichten, für die nur geringe Verzögerungen zulässig sind (schnelle Echtzeitsysteme), im Switch nicht auf Grund anderer Nachrichten warten müssen, kann mit jeder Nachricht eine Priorität übermittelt werden. Wenn in einem Switch mehrere Nachrichten zum Senden anstehen, werden die mit der höchsten Priorität zuerst ausgegeben.

Der IEEE-Standard 802.1AS [71] beschreibt eine Möglichkeit, um in Ethernet-Netzen die Uhren von Netzwerkteilnehmern sehr genau zu synchronisieren. Dies ist in Fahrzeugnetzwerken vor allem für die Übertragung von Audiodaten sinnvoll. Dadurch kann exakt der gleiche Audiotakt (typ. 48 kHZ) in allen Steuergeräten verwendet werden. Darüber hinaus ist es möglich, Bild und Ton von verschiedenen Steuergeräten zum richtigen Zeitpunkt auszugeben, ohne dass es dazwischen einen zeitlichen Versatz gibt.

**Die TCP/IP Protokollfamilie** In Ethernet-basieren Netzwerken werden heute typischerweise Netzwerkprotokolle der TCP/IP-Protokollfamilie verwendet. Die um 1974 durch Vinton Cerf und Robert Kahn entwickelten Protokolle wurden 1981 von der Internet Engineering Taskforce (IETF) in der noch heute gültigen Version IPv4 und 1998

in der Version IPv6 standardisiert. Im Internet sind heute beide Versionen anzutreffen, wobei IPv6 mittelfristig IPv4 ablösen soll. IPv6 bietet einen wesentlich größeren Adressbereich (IPv4: 32 bit, IPv6: 128 bit), was vor allem für das öffentliche Internet Vorteile bietet. Für die Fahrzeugvernetzung sind prinzipiell beide Versionen geeignet, wobei IPv6 die modernere Alternative ist. Ausführliche Informationen zu IPv6 sind u. a. in [63] zu finden.

Das Transmission Control Protocol (TCP) ist ein Protokoll zur gesicherten Übertragung großer Datenströme. Es bietet Sicherungsmechanismen, die z. B. im Fall einer Störung fehlerhafte Datenpakete erneut übertragen. TCP wird im Fahrzeug z. B. für die Diagnosekommunikation und die Updateprogrammierung verwendet. Das User Datagram Protocol (UDP) ist ein verbindungsloses Transportprotokoll zur Übertragung von Nachrichten an einen oder mehrere Teilnehmer. Vergleichbar mit den CAN-Nachrichten wird es zur zyklischen Übertagung von Status- und Regelgrößen verwendet. Zur Übertragung von Audio- und Videodaten in IP-Netzwerken kann das Realtime Transport Protocoll (RTP) oder das im nächsten Abschnitt beschriebene AVB verwendet werden. Zur Übertragung von unkomprimierten digitalen Audiodaten mit 48 kHz versendet RTP typischerweise alle 1,33 ms eine UDP Botschaft mit 64 Audiosamples. Für ein 5.1-Audiosignal (6 Audiokanäle mit jeweils 16 bit und 48 kHz) werden inklusive der zusätzlichen Protokollinformationen 5,2 Mbit/s benötigt. Abb. 8.46 zeigt den Aufbau eines Ethernet-Frames zur Übertragung von Audio-Daten mit RTP über UDP und IPv6.

**Audio Video Bridging (AVB)** AVB stellt eine weitere Alternative zur Übertragung von Audio- und Videodaten in Ethernet basierten Netzwerken dar. Im Gegensatz zu IP, UDP und RTP, die von der IETF für den Einsatz im Internet konzipiert sind, wurde AVB für den Einsatz abgeschlossener und speziell dafür vorgesehenen Audio-/Video-Netzen z. B. in Tonstudios und Beschallungsanlagen vorgesehen. Genau wie beim Einsatz von RTP im Fahrzeug wird durch eine entsprechende Konfiguration der Switche und eine Priorisierung der Nachrichten sichergestellt, dass es nicht zu unerwarteten Verzögerungen oder zum Verlust von Nachrichten kommt. AVB verwendet die bereits beschriebene Uhrensynchronisation sowie ein eigenes Audio-Video-Transportprotokoll (IEEE 1722) [66]. Ausführliche Informationen zu AVB sind u. A. in [61] zu finden.

**Weitere Vernetzungstechnologien im Fahrzeug** Neben den beschriebenen Vernetzungstechnologien im Fahrzeug existieren noch verschiedene andere digitale Schnittstellen, die meist für ganz bestimmte Anwendungen optimiert sind. Für die Anbindung von Displays und hochauflösenden Kameras wird häufig eine digitale Pixel-Schnittstelle (auch als LVDS-Link für Low Voltage Differential Signal bezeichnet) verwendet. Darüber werden die Farbinformationen der einzelnen Bildpunkte seriell übertragen, ohne dass dafür Videokomprimierung und Netzwerkprotokolle zum Einsatz kommen. Die Datenrate liegt bei hochauflösenden Displays und Kameras weit über 1 Gbit/s. Da diese Schnittstellen nicht standardisiert sind, müssen auf beiden Seiten der Verbindung Transceiver gleichen Typs eingesetzt werden. Auf Grund der hohen Datenraten kommen spezielle Leitungen und Stecker zum Einsatz. Typisch sind vor allem geschirmte verdrillte Leitungen sowie Koaxialkabel, die jeweils mit speziell geschirmten Steckern zum Einsatz kommen.

USB (Universal Serial Bus) wird häufig zur Anbindung von Speichermedien und Smartphones an das Infotainmentsystem verwendet. In der Version 2.0 unterstützt USB Datenraten von bis zu 480 Mbit/s. Mit USB 3.1 sind theoretisch Datenraten von bis zu 10 Gbit/s möglich. Darüber hinaus können angeschlossene Geräte mit Strom versorgt bzw. geladen werden [64]. Bluetooth ist eine drahtlose Schnittstelle, die unter anderem zur Anbindung von Mobiltelefonen im Fahrzeug verwendet wird. Bluetooth basiert auf den Standard IEEE802.15.1 [70] und wird durch die Bluetooth Special Interest Group weiterentwickelt. Bluetooth kann für die Telefon-Freisprechfunktion sowie zur Musikwiedergabe verwendet werden. Vor allem für mobile Onlinedienste kommt WLAN nach IEEE802.11 [69] zum Einsatz. Dadurch kann entweder das Infotainmentsystem im Fahrzeug den Internetzugang eines gekoppelten Smartphones ver-

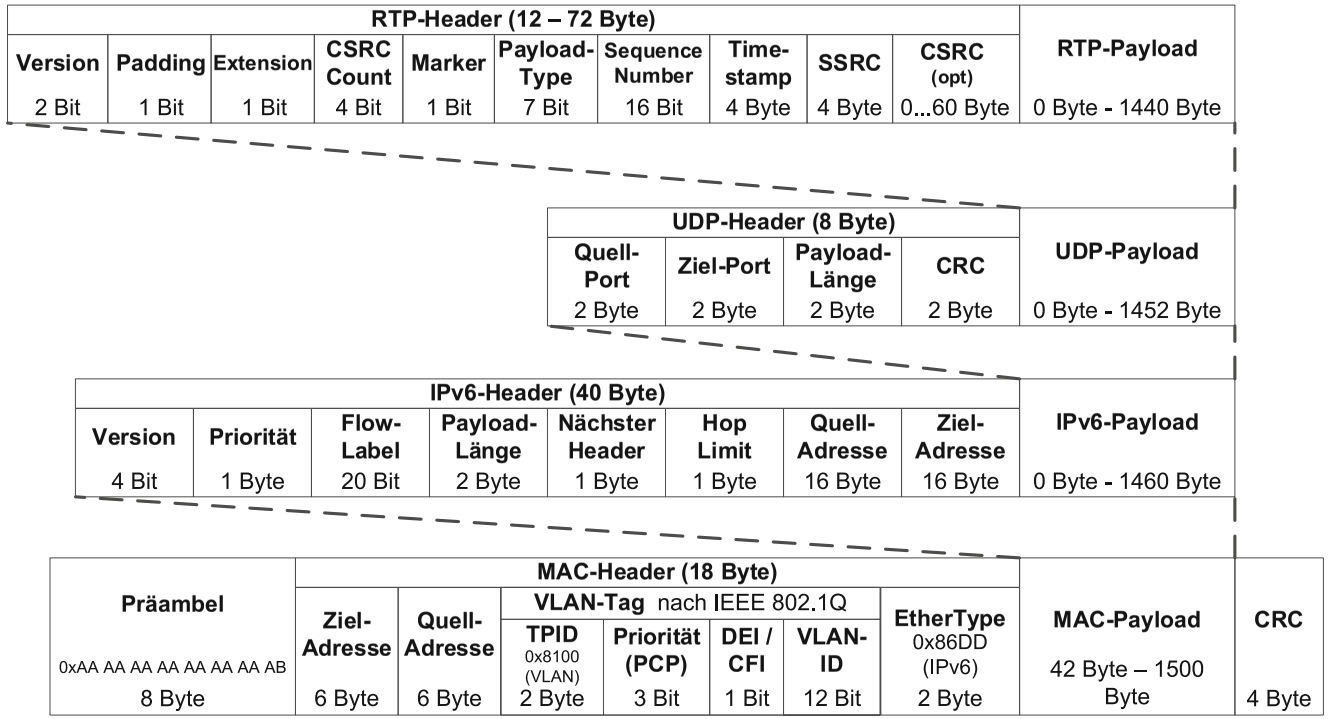



**Abb. 8.46** Aufbau eines Ethernet-Frames zur Übertragung von Audiodaten mittels IPv6 und RTP

wenden oder ein im Fahrzeug vorhandenen Internetzugang kann für Kundengeräte (Tablet PCs oder mobile Spielkonsolen) verwendet werden.

**Diagnosekommunikation** Zum Anschluss von Diagnosetestern und anderen Geräten, die auf steuergeräteinterne Diagnosefunktionen zugreifen müssen, sind alle aktuellen Fahrzeuge mit einer Diagnoseschnittstelle ausgerüstet. Der Anschluss ist von der ISO [72] standardisiert und auf Grund gesetzlicher Vorgaben zur On-Board-Diagnose bei allen PKW-Herstellern gleich. Die Kommunikation kann gemäß diesem Standard über verschiedene Datenbusse erfolgen. Bei den europäischen Autobauern hat sich in der Vergangenheit die K-Leitung [73] durchgesetzt. Seit 2008 müssen alle neuen Fahrzeuge über einen CAN-Bus diagnostiziert werden können. Einige Hersteller bieten bereits heute zusätzlich einen Diagnosezugang über Standard-Ethernet (100BASE-TX) an. Der Ethernet-Diagnosezugang ist unter dem Namen Diagnose over IP (DoIP) in der ISO 13400 standardisiert [74]. Alle diagnosefähigen Steuergeräte sind direkt oder über ein Gatewaysteuergerät mit der Diagnoseschnittstelle verbunden. Oberhalb der Kommunikationsschnittstellen liegt das eigentliche Diagnoseprotokoll, mit Hilfe dessen auf die spezifischen Diagnosedienste der Steuergeräte zugegriffen werden kann. Unter dem Namen Unified Diagnostic Services (UDS) [75] wurde ein leistungsfähigeres Diagnoseprotokoll eingeführt, welches vom darunter liegenden Bus unabhängig ist und verschiedene Nachteile älterer Protokolle beseitigt [54].

## 8.4 Elektromagnetische Verträglichkeit – EMV

Die Bedeutung der Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) hat in den letzten Jahren weiter zugenommen. Während in der Vergangenheit die meisten Fahrzeugfunktionen überwiegend mechanisch/hydraulisch oder elektromechanisch vorgenommen wurden, erfolgen die Regel- und Steuerungsfunktionen in der Regel über elektronische Systeme mit mikroprozessorbestückten Steuergeräten und elektronischen Sensoren und Aktuatoren, die über unterschiedliche Datenbus-Systeme, wie LIN, CAN FlexRay, MOST und Ethernet, miteinander vernetzt sind. Zusätzlich wird die Situation dadurch verändert, dass zunehmend auch der Fahrzeugantrieb elektrifiziert wird, wodurch erheblich größere Ströme und Spannungen im Fahrzeug zum Einsatz kommen. Allgemein versteht man unter EMV, dass ein elektronisches Gerät eine angemessene Störfestigkeit aufweist, also nicht unzulässig beeinflusst wird, und seine Störaussendung soweit begrenzt wird, dass in seiner Umgebung ein störungsfreier (Rund-)Funkempfang ermöglicht wird. Für das Kraftfahrzeug bedeutet das, dass sich die elektronischen Systeme nicht gegenseitig stören, nicht durch Sender beeinflusst werden und störungsfreier (Rund-)Funkbetrieb im Kraftfahrzeug und seiner Umgebung möglich ist (◘ Abb. 8.47).

### 8.4.1 Eigenentstörung

Für das Kraftfahrzeug bedeutet dies zunächst, dass durch die geeignete Auslegung aller elektronischen Systeme sichergestellt werden muss, dass die Systeme der Fahrzeugelektronik im selben Fahrzeug untereinander störungsfrei funktionieren und sich nicht gegenseitig beeinflussen. Bei der Behandlung dieser EMV-Problematik muss eine Vielzahl von Störmechanismen berücksichtigt werden. Unter diese Thematik fallen die durch Schalthandlungen im konventionellen Kfz-Bordnetz entstehenden impulsförmigen Störspannungen, deren Amplituden ein Vielfaches der 12-V-, 24-V-Bordnetzspannung betragen können. Diese Störimpulse, die durch benachbarte Komponenten der Bordnetzelektrik und -elektronik hervorgerufen werden können, gelangen über die Signal- und Versorgungsleitungen an die Ein- und Ausgänge der anderen elektronischen Komponenten und können dort zu Beeinflussungen führen, wenn diese Komponenten nicht entsprechend störfest ausgelegt sind. Durch geeignete Messverfahren (Laboraufbauten) werden einerseits die elektrischen und elektronischen Komponenten als Störquellen charakterisiert, andererseits wird über genormte Prüfimpulse ihre Störfestigkeit getestet. Durch die Abstimmung der Anforderungen an die Komponenten bezüglich ihres Verhaltens als Störquellen und Störsenken,

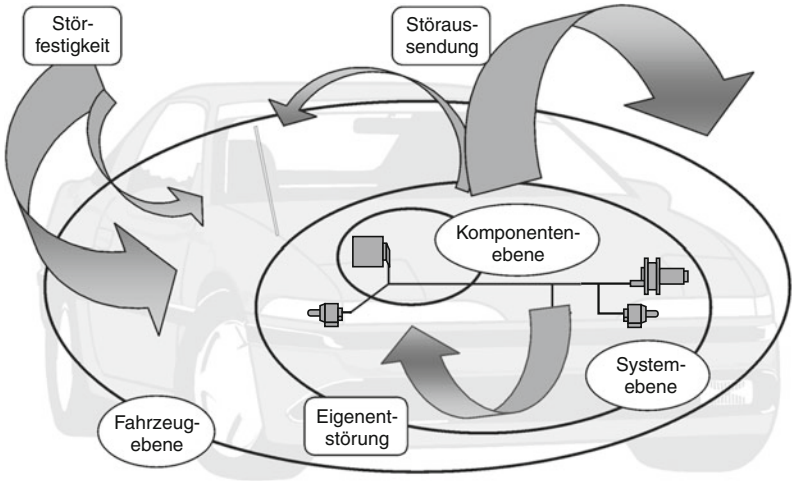



**Abb. 8.47** EMV im Kraftfahrzeug

kann der Gesamtaufwand optimiert werden. Dazu werden in den entsprechenden Standards geeignete Entstörgrade definiert. Durch geeignete Wahl der Entstörklassen für die Störquellen und der Störfestigkeitsklassen für die Störsenken kann die EMV sichergestellt werden, ohne den Aufwand für die Entstörung unnötig in die Höhe zu treiben. Besonderer Bedeutung wird hier zukünftig auch die Thematik der Elektromobilität bekommen. Es muss natürlich auch bei der Auslegung der elektrischen Antriebskomponenten sichergestellt werden, dass durch deren vergleichsweise hohen Spannungen, die benachbarten elektronischen Systeme nicht beeinflusst werden, aber auch in den Systemen der Elektromobilität selber keine Störbeeinflussungen durch Schaltvorgänge in der Leistungselektronik hervorgerufen werden. Zur Absicherung wird neben den genannten Labormessungen generell durch abschließende Fahrzeuguntersuchungen die Verträglichkeit der Systeme untereinander überprüft, da letztendlich auch der Einbau im Fahrzeug und die Fahrzeugverkabelung einen erheblichen Einfluss auf das Störverhalten haben können.

Das Thema Eigenentstörung schließt auch ein, dass in bordnetzeigenen (Rund-)Funkempfängern ein störungsfreier Empfang möglich ist und durch im Fahrzeug betriebene Sender die Systeme der Fahrzeugelektronik nicht beeinflusst werden. Die Bedeutung der mobilen Kommunikation nimmt weiter zu. Neben dem klassischen Rundfunkempfang, Navigation und dem Mobiltelefon haben auch Fernsehempfang, mobiles Internet und die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander wachsende Bedeutung. Alle im Bordnetz auftretenden Ströme und Spannungen weisen ein von den Signalformen abhängiges Frequenzspektrum auf. Die Charakteristik dieser Spektren hängt von den Eigenschaften der Komponenten ab. Gleichstrommotoren mit konventionellem Bürstenkommutator haben ein kontinuierliches Spektrum während getaktete Systeme von der Taktfrequenz charakterisierte Spektren aufweisen. Die Störsignale können bei unzureichender Entstörung als Störgrößen entweder leitungsgebunden über den Kabelbaum oder gestrahlt über die Empfangsantennen im Fahrzeug an die Eingänge der unterschiedlichen Funkempfänger gelangen, wo diese Signale nicht von Nutzsignalen unterschieden werden können. Das von den elektronischen Komponenten ausgesandte Störspektrum muss deshalb soweit begrenzt werden, dass an den Antenneneingängen keine unzulässig hohen Störsignale auftreten. Durch den Einsatz der elektrischen Antriebe in Elektro- oder Hybrid-Fahrzeugen ergeben sich auch zusätzliche Herausforderungen für den Schutz des Funkempfangs. Besonders die Auswirkungen der gegenüber der konventionellen Automobilelektronik höheren Ströme und Spannungen müssen bei der System-

auslegung durch geeignete Entstörmaßnahmen wie Schirmung und Filterung begrenzt werden. Zur Beurteilung des Störverhaltens der elektrischen und elektronischen Komponenten werden in der Prüftechnik verschiedene Messverfahren im Labor angewendet, die die Beurteilung der Störaussendung dieser Komponenten erlauben. Abhängig vom späteren Einsatz im Fahrzeug müssen dabei bestimmte Grenzwerte eingehalten werden. Abschließend wird das gesamte Störverhalten im Serienfahrzeug möglichst mit den Originalantennensystemen und fest eingebauten Empfängern überprüft.



### 8.4.2 Störfestigkeit gegen externe elektromagnetische Felder

Da Kraftfahrzeuge sich in einer unbekannten elektromagnetischen Umgebung bewegen, muss sichergestellt werden, dass zum Beispiel durch leistungsstarke Rundfunksender keine Beeinflussung der Fahrzeugfunktionen auftritt. Bei seinem Betrieb können das Kraftfahrzeug und damit seine elektronischen Komponenten wie auch bei der Verwendung von Sendern im Fahrzeug erheblichen elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sein. Die Sendersignale werden von den Fahrzeugstrukturen, z. B. vom Kabelbaum, aufgefangen und gelangen dadurch an die Ein- und Ausgänge der elektronischen Geräte. Besonders für hohe Frequenzen im Gigahertz-Bereich koppeln die elektromagnetischen Felder auch direkt in die Strukturen der elektronischen Geräte ein. In den Halbleiterbauelementen können diese Signale, ähnlich wie in den Empfängerschaltungen von Funkempfängern, demoduliert werden und zu ungewollten Pegelverschiebungen führen. Werden in den elektronischen Schaltungen die dadurch veränderten Signalspannungen als vermeintliche Nutzsignale interpretiert, kann dies zu Fehlfunktionen oder Funktionsstörungen führen, z. B. zum Abschalten von Sicherheitssystemen, wie ABS, ASR oder ESP, zu Leistungsverlusten im Motor oder auch zu fehlerhaften Anzeigen, die den Fahrer irritieren. Daher muss durch eine geeignete Auslegung der elektronischen Komponenten eine entsprechende Störfestigkeit sicher gestellt werden. Durch geeignete Messverfahren, z. B. durch Bestrahlung mit Antennen oder andere Verfahren, mit denen hochfrequente Signale in die Prüflinge eingekoppelt werden können, wird wiederum zunächst im Labor an den Komponenten und später am Serienfahrzeug die Störfestigkeit überprüft. Für Fahrzeugmessungen werden dazu große, mit Hochfrequenzabsorbern ausgekleidete Schirmhallen eingesetzt, die mit einem Rollenprüfstand versehen sind, um das Fahrzeug realistisch betreiben zu können.

Das Kraftfahrzeug nimmt, wegen seiner Betriebsart, und dass bei einer Fehlfunktion infolge einer eventuellen Beeinflussung durch externe Sender eine Gefährdung von Leib und Leben auftreten kann, gegenüber anderen Produkten in Bezug auf die Anforderungen (Feldstärke) eine Sonderstellung ein. Daher müssen die Störfestigkeit der Fahrzeuge und ihrer Komponenten für entsprechend hohe Feldstärken ausgelegt werden. In der zulassungsrelevanten Richtlinie UN ECE R10 wird für die Typgenehmigung von Fahrzeugen eine Störfestigkeit von 30 V/m gefordert. In der Praxis haben die Fahrzeughersteller meistens noch deutlich höhere Anforderungen an die Störfestigkeit ihrer Fahrzeugmodelle.

### 8.4.3 Fernentstörung

Neben den Anforderungen an die Störfestigkeit werden in der UN ECE R10 auch Anforderungen zum Schutz des ortsfesten (Rund-)Funkempfangs gestellt. Die Störaussendung des gesamten Fahrzeugs muss soweit begrenzt werden, dass in einer festgelegten Entfernung vom Fahrzeug die vorgegebenen Störfeldstärken nicht überschritten werden. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die richtige Auslegung der Hochspannungszündanlage und der Komponenten der Leistungselektronik gelegt werden, da diese in der Regel die höchsten Störfeldstärken außerhalb des Fahrzeugs hervorrufen können.

### 8.4.4 Normen und Richtlinien

Die einschlägigen EMV-Messverfahren sind in nationalen und internationalen Normen beschrieben.

**Tabelle 8.11** Internationale EMV-Normen für Kraftfahrzeuge

| Bezeichnung | Titel |
|---|---|
| Störaussendung | |
| IEC/CISPR 12 | Vehicles, boats, and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of off-board receivers |
| IEC/CISPR 25 | Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers |
| Störfestigkeit | |
| ISO 7637 | Road vehicles – Electrical disturbances by conduction and coupling<br>Part 1: Definitions and general considerations<br>Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only<br>Part 3: Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines |
| ISO 10605 | Road vehicles – Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge |
| ISO 11451 | Road vehicles – Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy –<br>Part 1: General principles and terminology<br>Part 2: Off-vehicle radiation sources<br>Part 3: On-board transmitter simulation<br>Part 4: Bulk current injection (BCI) |
| ISO 11452 | Road vehicles – Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy –<br>Part 1: General principles and terminology<br>Part 2: Absorber-lined shielded enclosure<br>Part 3: Transverse electromagnetic (TEM) cell<br>Part 4: Bulk current injection (BCI)<br>Part 5: Stripline<br>Part 7: Direct radio frequency (RF) power injection<br>Part 8: Immunity to magnetic fields<br>Part 9: Portable transmitters<br>Part 10: Immunity to conducted disturbances in the extended audio frequency range<br>Part 11: Reverberation chamber |

IEC/CISPR: Commission Électrotechnique Internationale/Comité International Spécial des Pertubations Radioélectriques
International Electrotechnical Commission/International Special Committee on Radio Interference
ISO: International Organisation for Standardisation

In Tab. 8.11 sind die wichtigsten internationalen Normen für die EMV von Kraftfahrzeugen zusammengestellt. In Deutschland ist für die Fahrzeugzulassung (Typgenehmigung) in Bezug auf EMV der § 55a der StVZO relevant, in dem die Einhaltung der in der internationalen Richtlinie UN ECE R10 beschriebenen Anforderungen festgelegt ist. In der UN ECE R10 werden für die Typgenehmigung von Fahrzeugen Anforderungen für die Störaussendung und Störfestigkeit festgelegt. Daneben kann man aber auch elektronische Komponenten und Systeme einer Typgenehmigungsprozedur unterziehen. Dafür sind ebenfalls Anforderungen bezüglich der Störaussendung von Funkstörungen und der Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern angegeben, aber auch Anforderungen bezüglich der Auswirkungen von Schalthandlungen im Bordnetz beschrieben (siehe ► Abschn. 8.4.1). In der aktuellen Ausgabe der UN ECE R10 wird auch dem Rechnung getragen, dass durch die Zunahme von

Elektro- und Hybridfahrzeugen, die aus dem öffentlichen Stromversorgungsnetz geladen werden, eine Verbindung zwischen dem Fahrzeug und dem öffentlichen Netz bestehen kann. Daher werden neben den oben beschriebenen EMV-Anforderungen für das autarke Fahrzeug auch Anforderungen für den Ladebetrieb sowohl für das gesamte Fahrzeug als auch für Ladegeräte selber, die im Fahrzeug eingebaut werden sollen, beschrieben.

### 8.4.5 Sicherstellung der EMV

Während in früheren Jahren die notwendigen Entstörmaßnahmen häufig nachträglich, außerhalb der zu entstörenden Komponente in Form eines Entstörfilters oder einer zusätzlichen Schirmung, vorgenommen wurden, ist eine derartige Vorgehensweise bei modernen Serienfahrzeugen nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar.

Eine angemessene Störfestigkeit und eine Begrenzung der Störaussendung muss wie andere Produkteigenschaften als Anforderung in den Entwicklungsprozess integriert werden und hat häufig einen erheblichen Einfluss auf die Auslegung der elektronischen Komponenten. Bei elektronischen Komponenten müssen die EMV-Anforderungen beim Schaltungskonzept, bei der Auswahl der Bauelemente, bei der Gestaltung des Gehäuses und beim Layout der Leiterplatte berücksichtigt werden. Bei Elektromotoren und elektromechanischen Stellern wird durch die konstruktive Gestaltung und ggf. durch eine geeignete interne Beschaltung mit Entstörelementen die Störaussendung minimiert. Bei komplexen Systemen muss die EMV-Entwicklung auf Systemebene erfolgen wie z. B. bei der Auslegung des Antriebs von Elektro- und Hybrid-Fahrzeugen. Hier muss der gesamte Antrieb mit Elektromotor, Leistungselektronik und Hochvoltbatterie zusammen betrachtet und die erforderlichen EMV-Maßnahmen, wie Schirmung und Filterung aufeinander abgestimmt werden. Durch den Einsatz geeigneter Berechnungsverfahren zur Schaltungssimulation und zur numerischen Berechnung elektromagnetischer Felder, begleitet durch Entwicklungsmessungen an den Mustern der Komponenten und Systeme kann die Wirkung der vorgesehenen Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV bereits frühzeitig überprüft werden. Die Erfüllung der Anforderungen wird dann in abschließenden Freigabemessungen nach den standardisierten Messverfahren überprüft.

## 8.5 Funktionsdomänen

### 8.5.1 Einleitung

Die Elektrifizierung des Automobils begann schon vor dem 1. Weltkrieg, mit Lichtmaschine, Zündung, Beleuchtung und Anlasser.

Heute gibt es kaum noch eine Funktion am Fahrzeug, an der Elektrik, Elektronik und Software nicht beteiligt sind. Deren Teilfunktionen und Zusammenwirken mit Antrieb, Fahrwerk und Karosserie sind in den entsprechenenden Teilkapiteln dargestellt.

Im Folgenden sollen noch wichtige eigenständige Funktionsdomänen erläutert werden.

### 8.5.2 Beleuchtung

Ausgehend von der Glühlampentechnologie des 20ten Jahrhunderts hat sich die Fahrzeugbeleuchtung seit den 1990er Jahren mit der Einführung der Gasentladungstechnik, der LED-Technologie und in Kombination mit moderner Sensorik ihrem Ziel, optimale Ausleuchtung, Sicherheit und Komfort bei minimaler Blendung zu ermöglichen, erheblich genähert. Trotzdem ist die Unfallhäufigkeit bei Dunkelheit immer noch doppelt so hoch wie bei Tageslicht, so dass die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung besteht [100, 101].

Die Herausforderungen liegen dabei in einer Umsetzung des technisch Möglichen zu für den Massenmarkt akzeptablen Kosten und der Optimierung der Wechselwirkungen unterschiedlicher Systeme im Verkehrsraum unter physiologischen Aspekten. Hierzu müssen auch die einschlägigen Zulassungsvorschriften weiterentwickelt werden [112].

### 8.5.2.1 Zulassung

Lichttechnische Einrichtungen an der Fahrzeugaußenseite müssen zugelassen sein. Die entsprechenden Regelungen bestehen aus Anbau- und Betriebsvorschriften. Die Richtlinie E76/756/EWG [94] regelt den Anbau der lichttechnischen Einrichtungen. Zunehmend werden nationale Regelungen durch internationale ersetzt. Die weltweite Anwendung gliedert sich in

- Länder, in denen die ECE-Regelungen für Rechts- bzw. Linksverkehr gelten,
- Länder, die im Wesentlichen ECE-Regelungen anwenden, aber diese Regelungen noch nicht voll (z. B. Japan) oder nur teilweise übernommen haben (z. B. China, Australien),
- Länder, welche die SAE-Regelungen anwenden (USA und mit Modifikationen Kanada) [95],
- manche Länder erkennen sowohl ECE- als auch SAE-Regelungen an.

Speziell zwischen den ECE- und SAE-Regelungen wird eine Harmonisierung angestrebt, um gleiche lichttechnische Einrichtungen weltweit einsetzen zu können [96]. Die Unterscheidung zwischen Rechts- und Linksverkehr bleibt dabei allerdings erhalten.

Die nationalen Zulassungsbehörden im ECE-Bereich vergeben Prüfzeichen, die aus einem E und einer Zahl bestehen. Beispielsweise steht E1 für Deutschland. Für die USA sind DOT-Zeichen erforderlich. Die Zulassungszeichen sollten möglichst auf der Außenseite von Scheinwerfern und Leuchten angebracht werden [97].

### 8.5.2.2 Lichttechnische Begriffe

**Sichtbares Licht** stellt einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums dar und reicht von 380 nm bis 780 nm Wellenlänge. Größen zur Charakterisierung von Licht und lichttechnischen Einrichtungen mit den dazugehörigen Einheiten sind in ◘ Tab. 8.12 aufgeführt.

**Tabelle 8.12** Lichttechnische Einheiten

| Lichttechnische Einheiten | |
|---|---|
| **Größe** | **SI-Einheit** |
| $\Phi$ Lichtstrom | lm (Lumen) |
| $I$ Lichtstärke | cd (Candela) |
| $L$ Leuchtdichte | $\mathrm{cd/m^2}$ |
| $Q$ Lichtmenge | lm · s |
| $P$ Leistung | W (Watt) |
| $J$ Lichtausbeute | $\mathrm{lm/W}$ |
| $E$ Beleuchtungsstärke | $1\,\mathrm{lx} = \mathrm{lm/m^2}$ (Lux) |

**Messverfahren nach ECE** – Für Scheinwerfer ist die Messentfernung in Europa oft 25 m, dann besteht der Zusammenhang 1 lx $\hat{=}$ 625 cd. Für die Messung müssen die Messeinrichtungen entsprechend der Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges $V(\lambda)$ korrigiert sein. Messungen beziehen sich auf die $V(\lambda)$-Kurve, welche für das helladaptierte Auge (Tagsehen) gilt. Am besten sehen wir bei Tageslicht im grünen Spektralbereich um 555 nm, bei Dunkelheit besser im blau-grünen um 505 nm. In der Realität finden Nachtfahrten im Bereich des mesopischen Sehens zwischen vollständiger Dunkel- und Helladaption statt.

**Reichweite** – Üblich ist die Definition eines Abstandes, in dem die Beleuchtungsstarke einen definierten Wert erreicht. Für Abblendlicht wird oft der Punkt am eigenen Straßenrand genannt, an dem die Beleuchtungsstärke 1 Lux beträgt.

**Isolux-Darstellungen** – Zur Lichtbeurteilung können Darstellungen gleicher Beleuchtungsstärke (Isolux) oder gleicher Lichtstärke (Isocandela) dienen, sowohl als Wanddarstellung (meist nur für einen Scheinwerfer) oder als umgerechnete Straßendarstellung aus der Vogelperspektive (für beide Scheinwerfer).

**Sichtweite** – Subjektive und von vielen Faktoren abhängige Entfernung, in der ein Gegenstand noch erkannt werden kann.

**Blendung** – Physiologische Blendung ist messbar als Beleuchtungsstärke, welche am Auge eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers erzeugt wird. Psychologische Blendung stellt den subjektiv empfundenen Grad der Störung dar und kann von der Lichtfarbe und der Größe der leuchtenden Fläche abhängen. Zunehmend bekommt die Leuchtdichte und ihre Messung Relevanz in Bezug auf die physiologische Beurteilung von Scheinwerfern.

### 8.5.2.3 Scheinwerfer

Scheinwerfer dienen zur Ausleuchtung der Fahrzeugumgebung. Zugelassene Scheinwerfer sind heute bei mehrspurigen Fahrzeugen stets paarweise angeordnet.

#### 8.5.2.3.1 Historische Entwicklung

Acethylenscheinwerfer, versorgt über einen mitgeführten Karbid-Gaserzeuger, erlaubten bereits um 1905 eine als ausreichend und von manchen als zu grell empfundene Illumination bei Nachtfahrten.

Acethylensysteme wurden allerdings bald vollständig durch elektrische Systeme ersetzt.

Ab 1957 wurde dann asymmetrisches Abblendlicht eingeführt, welches den eigenen Fahrbahnrand weiter ausleuchtet, ohne den Gegenverkehr zu blenden. Damit wurden unterschiedliche Scheinwerfer für Rechts- und Linksverkehr notwendig.

Während in den USA zeitweise nur „sealed beam" Scheinwerfer zulässig waren, welche eine geschlossene Einheit aus Lichtquelle, Reflektor und Abschlussscheibe bilden, arbeitete man in Europa mit genormten und wechselbaren Lampentypen.

Ab 1960 kamen weltweit Halogenlampen zum Einsatz, die gegenüber konventionellen Glühlampen etwa die doppelte Lichtmenge pro Zeiteinheit (Lichtstrom) abstrahlen.

Seit der Einführung der Xenonscheinwerfer 1991 mit 3200 lm pro Lichtquelle konzentriert sich die Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern vermehrt darauf, mit dem verfügbaren Lichtstrom den Verkehrsraum optimal auszuleuchten, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Seit 2002 sind mechatronische Lichtsysteme im Markt, die durch Bewegung von Modulen und Blenden die erzeugte Lichtverteilung der jeweiligen Straßen- und Verkehrssituation anpassen.

Mit der Einführung der LED Technologie für Fahrzeugscheinwerfer wurden noch smartere Lösungen für adaptive Lichtsysteme möglich (◘ Abb. 8.48).

### 8.5.2.3.2 Scheinwerferarten

- Abblendlichtscheinwerfer – bei der heutigen Verkehrsdichte das am meisten (95 % bis 97 %) benutzte Fahrlicht.
- Fern- und Zusatzfernscheinwerfer – werden allein oder zusammen mit dem Abblendlicht betrieben.
- Nebelscheinwerfer – Einsatz bei Nebel, Regen oder Schnee und geringen Sichtweiten, länderspezifisch ist auch die Verwendung als „Kurvenscheinwerfer" möglich.
- Rückfahrscheinwerfer – sind eigentlich Signalleuchten, auch wenn speziell bei Nutzkraftwagen (NKW) oft Nebelscheinwerfer als Rückfahrscheinwerfer eingesetzt werden.
- Arbeits- und Suchscheinwerfer – dürfen nicht zur Fahrbahnbeleuchtung während der Fahrt verwendet werden.

**Zwei-/Vier-Reflektor-System** – Wird derselbe Reflektor für Abblend- und Fernlicht verwendet, so handelt es sich um ein Zwei-Reflektor-System. Sind dagegen Abblend- und Fernlichtfunktion getrennt, so ergibt sich ein Vier-Reflektor-System.

**Rechts-/Linksverkehr** – in Europa werden für Großbritannien und Irland linksasymmetrische Scheinwerfer benötigt, ansonsten rechtsasymmetrische. Für Fahrten vom Kontinent nach Großbritannien und umgekehrt sollte die Möglichkeit bestehen, den asymmetrischen „Lichtfinger" des Abblendlichtes abzuschatten. Bei Reflexionsscheinwerfern geschieht dies durch Abkleben der Streuscheibe, bei Projektionsscheinwerfern müssen interne Abschatter betätigt werden.

### 8.5.2.3.3 Reflektoren

Scheinwerfer bestehen neben Gehäuse, Abschlussscheibe und Einstellelementen im Wesentlichen aus der Lichtquelle und einem Reflektor, der das Licht sammelt und in die gewünschte Richtung lenkt. Zusätzlich können transparente optische Elemente wie Linsen oder Prismen die Lichtverteilung beeinflussen und eventuell in die transparente Abschlussscheibe integriert sein. Zwei grundsätzlich verschiedene Systeme lassen sich unterscheiden:

**Reflektionssystem** – Licht aus dem Brennpunkt einer Rotationsparabel (Paraboloid) wird parallel gerichtet und stellt damit eine gute Basis für Fernlicht dar. Wird die Lichtquelle außerhalb des Brennpunktes platziert, so erzeugt sie z. B. ein konvergierendes Lichtbündel (◘ Abb. 8.49). Der obere geneigte Teil des Bündels wird für das Abblendlicht genutzt, der untere Teil muss für europäische Lichtverteilungen abgeschattet werden. Beim Einsatz von zwei Wendeln wie z. B. in der H4-Lampe können mit einem Paraboloidreflektor Abblend- und Fernlicht erzeugt werden. Die eigentliche Lichtverteilung wird durch Prismen und Zylinderlinsen auf der Streuscheibe erzeugt [97]. Heute werden statt einfacher Paraboloid-Reflektoren Freiflächen-Reflektoren eingesetzt, die mit Computerprogrammen so berechnet werden, dass die gewünschte Lichtverteilung ohne eine Streuscheibe erzeugt wird. Sinnvoll ist der Einsatz einer Strahlenblende, die innen matt sein sollte, um das Licht der Lichtquelle abzuschatten, welches direkt emittiert wird ohne auf den Reflektor zu treffen. Aus dekorativen Gründen werden die Strahlblenden außen meist glänzend beschichtet.

**Projektionssystem** – Während das Reflektionssystem großflächige Reflektoren benötigt, kann das Projektionssystem bei gesteigertem Lichtstrom mit einer kleinen asphärischen Linse auskommen (ca. 70 mm Durchmesser). Seit Mitte der achtziger Jahre haben sich Projektionssysteme zunächst mit Ellipsoid-, dann mit Freiflächen-Reflektoren durchgesetzt und dominieren die automobile Mittel- und Oberklasse. Vorteile sind neben dem kompakten und modularen Aufbau die definierte Gestaltung der Hell-Dunkel-Grenze durch die Form der im Inneren befindlichen Blende, deren Abbild von der Linse auf die Straße projiziert wird [100, 101].

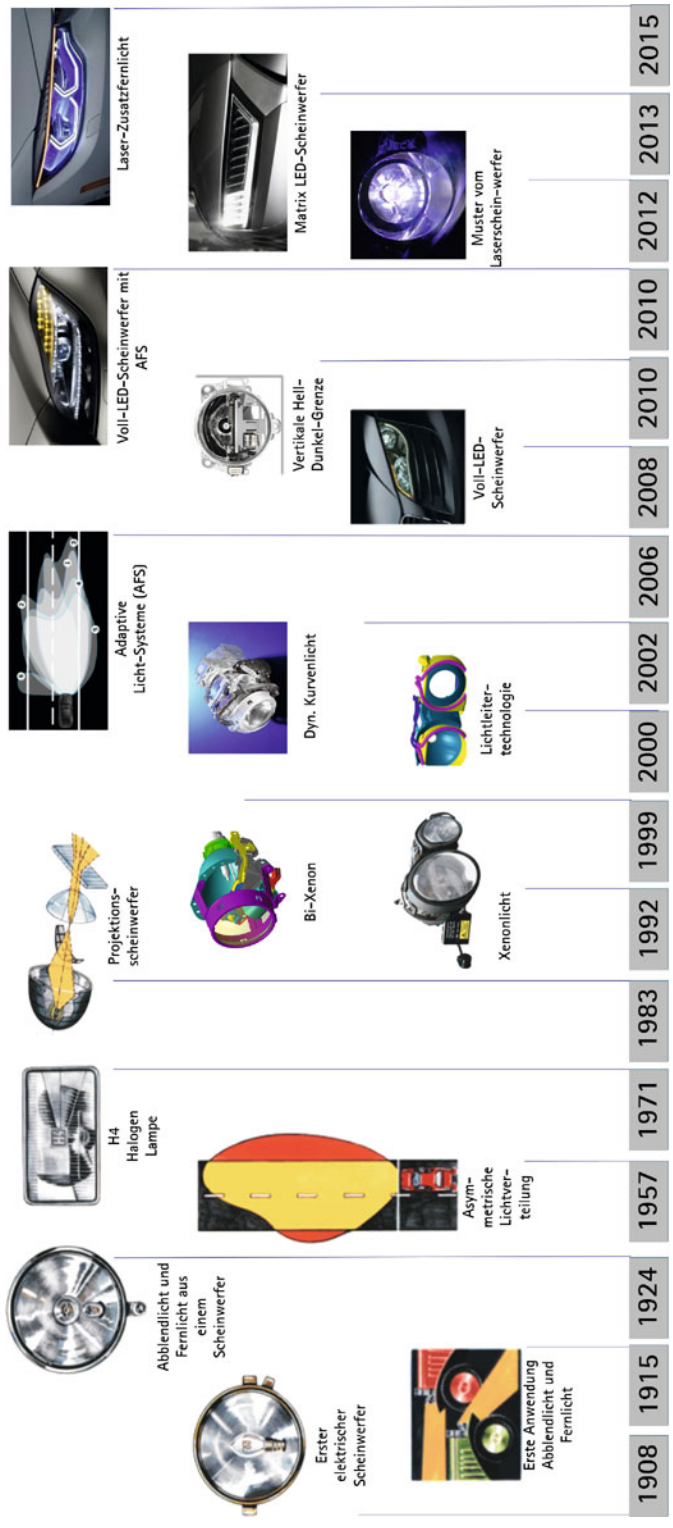



**Abb. 8.48** Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern




**Abb. 8.49** Strahlengänge in Scheinwerfersystemen

Im Zusammenhang mit LED-Scheinwerfern ergeben sich weitere Möglichkeiten für das optische System. Insbesondere durch das „kalte" Licht der LED (den geringen Infrarotanteil der Strahlung) lassen sich Freiformlinsen und transmissive Optiken aus Kunststoff einsetzen, die neben lichttechnischen auch neue stilistische Möglichkeiten bieten [111, 114].

**Reflektormaterialien und Oberflächen** – Traditionelle Reflektoren wurden aus Blech, überwiegend Stahl, seltener Messing oder Aluminium gepresst [96]. Die Oberfläche wird durch Schichtlack eingeebnet, grundiert und mit Reinaluminium im Vakuum bedampft. Einschließlich des zusätzlichen Korrosionsschutzlackes beträgt der Reflexionsgrad etwa 87 %. Reflektoren aus Metallguss (Magnesium, Aluminium und früher Zink) werden bei kleinen Abmessungen und hohen Temperaturen (speziell bei Projektionssystemen) benutzt. Bei größeren Reflektionssystemen, die aufgrund des größeren Abstands zwischen Lichtquelle und Reflekor geringeren thermischen Belastungen ausgesetzt sind, wird heute vor allem Duroplast (BMC) verwendet (z. B. LPP – *Low Profile Polyester*), das gute Wärmebeständigkeit und Formtreue vereinigt, aber eine Grundlackierung benötigt.

An die Reflektorfläche werden hohe Ansprüche gestellt. Die Rauigkeit darf nur etwa 0,1 µm betragen. Kondensierte Flüssigkeit im Scheinwerfer zerstört die Reflektoren, deshalb ist auf eine geeignete Durchlüftung der Scheinwerfer sowie auf einen geeigneten Oberflächenschutz zu achten.

#### 8.5.2.3.4 Abschlussscheiben

Abschlussscheiben mit optischen Profilen (sog. Streuscheiben) können nur max. 25° aus der Senkrechten gekippt werden. Bei Freiflächen-Reflektoren sind „optikfreie" Abschlussscheiben möglich, die erheblich stärker geneigt und „gepfeilt" sein können. Summenwinkel von 60° und mehr sind keine Seltenheit. Treffen die Lichtstrahlen senkrecht auf die Scheibe (Auftreffwinkel 0°), so

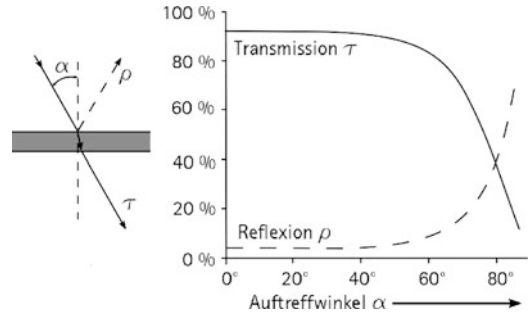



**Abb. 8.50** Reflexionsgrad und Transmissionsgrad in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

beträgt die Transmission bei Glas etwa 92 % und bei Kunststoff etwa 88 %. Diese Lichtverluste nehmen mit steigendem Auftreffwinkel stark zu (Abb. 8.50).

In Europa wurden früher ausschließlich gepresste (seltener gewalzte) Glasscheiben als Abschlussscheiben verwendet. Der Pressvorgang legt der Gestaltung enge Grenzen auf und ergibt durch schnellen Werkzeugverschleiß grobe Toleranzen. Positiv sind die Kratzfestigkeit und die relativ gute Temperaturbeständigkeit, die durch chemische oder thermische Härtung gesteigert werden kann.

1993 wurde erstmalig eine Kunststoffscheibe nach der neuen ECE-Regelung zugelassen [99, 100]. In USA und Japan wurden schon etwas früher Kunststoffscheiben erfolgreich eingesetzt [98]. Die Vorteile gegenüber Glas sind das geringe Gewicht und die Designfreiheit. Überwiegend ist das Basismaterial Polycarbonat, geschützt durch eine äußere Hartbeschichtung, die unter Reinraumbedingungen aufgebracht werden muss. Eine maximale Temperatur von 145 °C darf auch bei verschmutzter Scheibe nicht überschritten werden, das erfordert speziell bei Verwendung von Halogenlicht besonde-

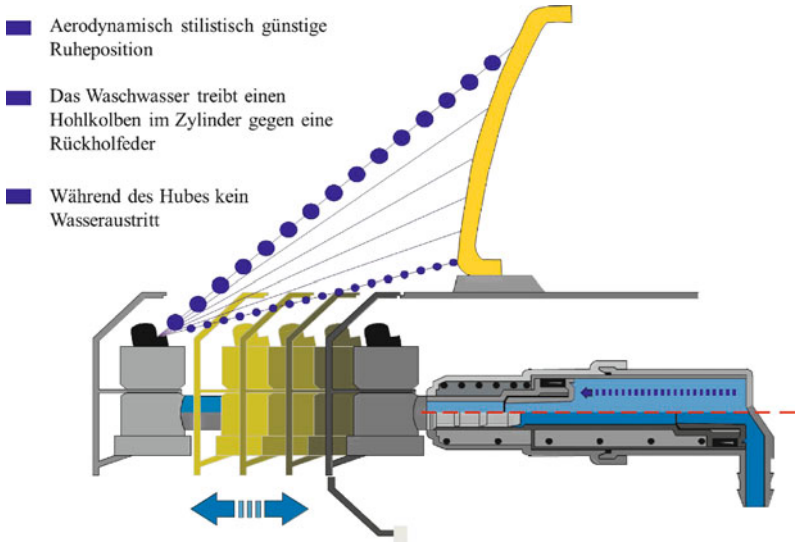



**Abb. 8.51** Scheinwerfer-Reinigungsanlage

re Berechnungs- und Simulationsprogramme. Gepresste Glasscheiben werden heute nur noch bei geometrisch kompakten Zusatzscheinwerfern verwendet, wo ihre gute Wärmebeständigkeit von Vorteil ist.

Bei leichter Verschmutzung der Abschlussscheiben erhöht sich zunächst der Streulichtanteil, was zu vermehrter Blendung des entgegenkommenden Verkehrs führt. Stärkere Verschmutzung reduziert die emittierte Lichtleistung. Deswegen stellen Scheinwerfer-Reinigungsanlagen (Abb. 8.51) ein wichtiges Sicherheitselement dar und waren bis zur europaweiten Regelung beispielsweise in Skandinavien Vorschrift. Für die Reinigung von Kunststoffscheiben können aufgrund der mäßigen Kratzfestigkeit nur Strahlwasseranlagen und keine Wischer eingesetzt werden [98–100]. Neben feststehenden Düsen werden vorzugsweise Teleskope eingesetzt, die einfach durch den Wasserdruck ausgefahren werden. Die Betätigung erfolgt in Verbindung mit der Windschutzscheibenreinigung, wenn das Licht eingeschaltet ist [96, 97, 100]. Bei Verwendung von Hochleistungshalogenlampen und speziell Xenonlampen für das Abblendlicht ist in der ECE-Regelung die Installation einer Scheinwerfer-Reinigungsanlage vorgeschrieben.

#### 8.5.2.3.5 Lichtquellen

Nur die in den internationalen Regelungen genormten Lichtquellen dürfen als austauschbare Lichtquellen verwendet werden. Durch „Deregulation" in Amerika und die Übernahme von amerikanischen Glühlampen in die europäischen Regelungen ist für viele Lichtquellen ein weltweiter Einsatz möglich geworden.

Glühlampen strahlen vor allem unsichtbares Infrarotlicht (also Wärme) und zu einem geringen Teil sichtbares Licht ab, das im Vergleich zum Tageslicht gelblich-weiß erscheint. Bis 1992 war in einigen Ländern (speziell in Frankreich) gelbes Licht vorgeschrieben und ist dort auch noch zulässig. Die Anforderungen an Fahrzeug-Glühlampen sind bedingt durch Erschütterungen und Spannungsschwankungen des Bordnetzes erheblich höher als an Haushaltslampen. Glühlampen gibt es für 6 V, 12 V und 24 V Anwendungen, letztere hauptsächlich für Nutzfahrzeuge.

Der Halogenprozess verhindert das Schwärzen des Lampenkolbens und regeneriert die Glühwendel, so dass im Vergleich zu normalen Glühlampen etwa die doppelte Lichtmenge, eine höhere Lichttemperatur (weißeres Licht) und eine verdoppelte Lebensdauer erzielt werden können [102, 103]. Einwendel-Halogenlampen sind in ECE-Regelung

**Tabelle 8.13** Lebensdauerwerte verschiedener Halogen-Lampen, spezifizierte und tatsächliche Lebensdauer

| | **Spezifizierte Lebensdauer Tc (DIN 60810) (in Stunden)** | **Realistische Lebensdauer Tc (in Stunden)** |
|---|---|---|
| H1 | 400 | 960 |
| H3 | 400 | 990 |
| H4 (Abblendlicht) | 700 | 1050 |
| H7 | 550 | 630 |
| H7LL = long life | 930 | 1000 |
| H11 | 2000 | 2100 |
| Xenon | ~2000 | ~2000 |
| Xenon: LED | 50.000 für einzelne Chips | deutlich weniger im System |



37 und H4-Doppelwendel-Halogenlampen in Regelung 8 genormt [111, 115].

Bedeutung haben:

- H1 für Abblendlicht, Nebellicht und Fernlicht,
- H3 vorzugsweise für Nebelscheinwerfer,
- H4 für Abblend- und Fernlicht aus demselben Reflektor,
- H7 alternativ zu H1.

Neuer sind Halogenlampen mit Dichtsockel: H8 (vorzugsweise für Nebellicht), H9 (Fernlicht) und H11 (Abblendlicht). Der Bajonett-Sockel erleichtert den Austausch besonders bei der Sonderform der H7-Lampe als „One-Touch", die neben dem Bajonett auch Schleifkontakte zur elektrischen Verbindung aufweist.

In Nordamerika sind die Ein-Wendel-Lampen HB3 (Halogen Bulb) für Fernlicht und HB4 für Abblendlicht üblich. Bei den Zwei-Wendel-Lampen hat dort der Typ HB5 die HB1-Lampe ersetzt und ist ihrerseits in den letzten Jahren durch die H13 ersetzt worden. Wegen einer anderen Gewährleistungspraxis sind in Nordamerika vorwiegend Lampen im Einsatz, die bei Verzicht auf hohe Lichtleistung eine hohe Lebensdauer aufweisen.

Zur Angabe der Lampenlebensdauer dienen verschiedene Kennzahlen (Tab. 8.13):

Tc bezeichnet die Anzahl von Stunden bis 63,6 % der Prüflinge ausgefallen sind. Glühlampen sind extrem empfindlich gegen Überspannung, andererseits ist die tatsächliche Lebensdauer von Qualitätslampen höher als die Spezifikation. Wenn auf ein langes Lampenleben Wert gelegt wird, sind bei gleicher oder nur geringfügig schwächerer Lichtleistung unter verschiedenen Herstellerbezeichnungen Lampen mit optimierter Lebensdauer, sogenannte LL (Longlife) Typen erhältlich.

Neben den Halogenlampen werden seit 1992 erstmals in Serie die als Xenonlicht bekannten Gasentladungslampen (GDL D *gas discharge lamp* oder HID D *high intensity discharge*) für Abblendlichtscheinwerfer im Kfz eingesetzt.

Die Lebensdauer einer Xenonlichtquelle hängt von der Anzahl der Einschaltvorgange nicht von der Brenndauer ab. Im Normalfall übertrifft die Lebensdauer diejenige des Fahrzeugs. Die hohe Leuchtdichte der anfangs relativ kleinen Projektionslinsen, die bei Xenonsystemen zum Einsatz kommen (Durchmesser 60 mm bis 70 mm), wurde von vielen Verkehrsteilnehmern als störend, die überragende Lichtleistung dagegen als entscheidender Sicherheitsgewinn empfunden.

Mit Xenonbrennern wird in etwa der 2,5-fache Lichtstrom einer Halogenlampe erzeugt und dementsprechend auch eine höhere Beleuchtungsstärke erreicht (vgl. Abb. 8.52). Zudem ist das Licht tageslichtähnlicher als Halogenlicht. In einem erbsengroßen Entladungsgefäß, in dem sich in kleinen Mengen Salze von seltenen Erden befinden, wird ein etwa 4 mm langer Lichtbogen erzeugt.

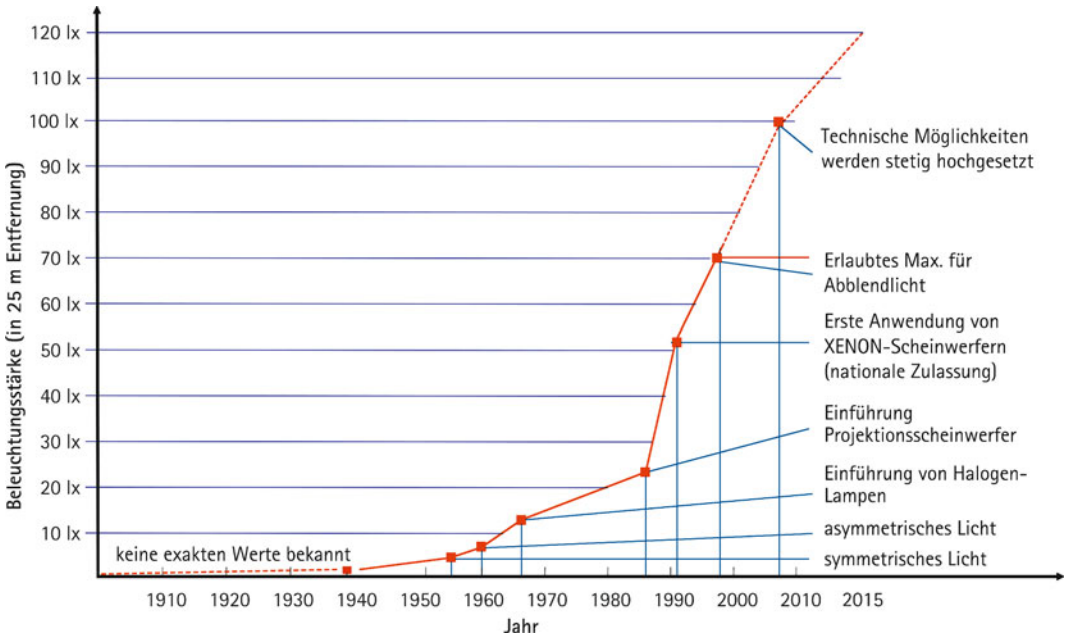



**Abb. 8.52** Anstieg der Beleuchtungsstärke bei Kraftfahrzeug-Scheinwerfern

Während bei der Halogenlampe ein kontinuierliches Spektrum mit wenig UV- und viel IR-Licht abgestrahlt wird, besteht Xenonlicht fast nur aus sichtbarem Licht und sehr wenig IR. Bei der ersten Generation der Xenonlampen wurde außerdem ein hoher UV-Lichtanteil emittiert. Bei der zweiten Generation seit 1995 wird durch einen zusätzlichen Filterkolben der UV-Lichtanteil reduziert (Abb. 8.53) [97, 132, 135].

Im Gegensatz zu Halogenlampen benötigt die Xenonlichtquelle eine Ansteuerelektronik (Ballast) zum Betrieb am 12 V- oder 24 V-Bordnetz. Die Funktionen dieser Elektronik sind:

- Erzeugen einer Zündspannung von 18.000 V bis 28.000 V,
- Verdampfen der Halide durch kurzzeitig hohe Energiezufuhr (bis 17 A),
- Konstanter Betrieb mit nur ca. 35 W Leistungsaufnahme (also deutlich weniger als den 60 W einer Halogenlampe),
- Automatisches Wiederzünden z. B. bei Erlöschen des Lichtbogens durch starke Erschütterung,
- Spannungsstabilisierung für Versorgungsspannungen zwischen 9 V und 18 V,
- Kurzschluss- und Nebenschlussüberwachung zum Schutz gegen Berührung.

Bedingt durch das komplizierte Startverfahren erreicht Xenonlicht bei einem Kaltstart erst nach etwa 3 s die volle Leistungsfähigkeit. Um sofort beim Einschalten des Lichtes eine ausreichende Beleuchtungsstärke zu haben, enthält das Entladungsgefäß eine Xenongasfüllung.

Seit 1996 ist mit den ECE Regelungen 98 und 99 ein weltweiter Einsatz von Xenonscheinwerfern möglich. Für das ECE-Gebiet sind in Regelung 48 für Lichtquellen mit einem Lichtstrom von mehr als 2000 lm pro Scheinwerfer Scheinwerferreinigungsanlage und automatische Leuchtweitenregulierung vorgeschrieben. Ebenfalls seit 1996 ist die zweite Lampengeneration D2R für Reflexions- und D2S für Projektionssysteme auf dem Markt. Diese Lampen weisen eine konzentrische Steckverbindung auf. Sie sind damit auswechselbar, was aber wegen des empfindlichen Aufbaus und der mögli-

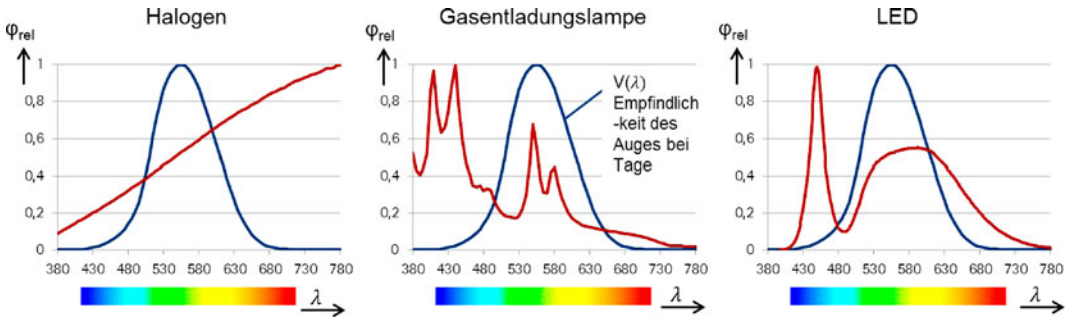



**Abb. 8.53** Typische Spektren von Halogen-, Gasentladungs- und LED-Lampen



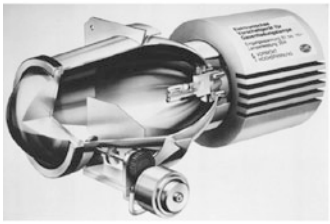

**Abb. 8.54** Halogen und Xenonlampen (R2, sog. Bilux *Nicht-Halogen-Lampe* zum Vergleich)

chen elektrischen Gefährdung nur in einer Fachwerkstatt erfolgen sollte. Der Aufbau der Ansteuerelektronik kann variieren, gängig ist eine Trennung von Hochspannungs- und Niederspannungsteil. Dabei stehen seit einigen Jahren mit der D1S oder D1R Lampentypen mit integriertem Hochspannungsteil zur Verfügung (Abb. 8.54). Hinsichtlich der Integration weiterer Funktionen variiert der Niederspannungsteil, beispielsweise kann die Ansteuerung dynamischer Lichtfunktionen wie Kurvenlicht in den Niederspannungsteil der Xenonelektronik integriert sein. Im Markt findet man aber auch Lösungen, bei denen eine Funktionstrennung zwischen Xenon-Ballast und einem zusätzlichen Scheinwerfersteuergerät für Kurvenlicht und z. B. die Ansteuerung von LED-Modulen realisiert ist.

Die aufgrund des geringen Quecksilberanteils (ca. 0,5 mg) in den D2 und D1 Lampen über Jahre geführte Diskussion der Umweltverträglichkeit dürfte seit der Einführung leistungsfähiger quecksilberfreier Gasentladungslampen unter den Bezeichnungen D3 (mit integriertem Zündteil) und D4 (ohne Zündteil) und den ersten Anwendungen in Serienfahrzeugen obsolet sein.

#### 8.5.2.3.6 Bi-Xenon-Scheinwerfer

Der Einsatz von zwei Xenonlichtquellen für Fern- und Abblendlicht in einer Lampe ist prinzipiell unmöglich. Da die Verwendung von zwei Xenonsystemen für Fern- und Abblendlicht sehr aufwändig ist, wurde das Fernlicht zunächst durch Hinzuschalten einer Halogenlichtquelle zum Xenon-Abblendlicht umgesetzt. Eine konsequente Weiterentwicklung der Xenon-Technologie stellen jedoch seit 1999 die Bi-Xenon-Systeme dar (Abb. 8.55). Bei diesen wird ein Umschalter eingesetzt, der angetrieben durch einen Zugmagneten eine Blende so bewegt, dass wahlweise Abblend- und Fernlicht aus derselben Xenonlichtquelle entsteht. Die Umschaltung erfolgt dabei so schnell (<0,3 s), dass auch eine effektive Lichthupenwirkung erzielt werden kann. Bei einem Ausfall geht das System durch Federzug in die Abblendlichtstellung zurück. Wegen des einfachen und betriebssicheren Aufbaus und der überragenden Lichtleistung hat sich das System in Projektionstechnik schnell durchgesetzt, während entsprechende Reflektionssysteme mit bewegter Lampe, verschobenem Reflektor oder bewegter Strahlenblende nur vereinzelt eingesetzt werden [104, 106, 109].



Erster Prototyp – 1989



Projektionsmodul 1. Generation – 1999



Projektionsmodul 2. Generation – 2004

**Abb. 8.55** Projektionsmodule (Quelle: Hella KgaA)

#### 8.5.2.3.7 Intelligente Scheinwerfer

Im Prozess der internationalen Normung wurde in den letzten Jahren AFS (Adaptive Frontlighting System), ein Scheinwerfersystem, das sich selbsttätig und optimal an die jeweiligen Verkehrsverhältnisse anpasst, intensiv diskutiert und mit der ECE-Regelung 123 verabschiedet (Abb. 8.56). Im Einzelnen sind statt des bisherigen Abblendlichtes mehrere Lichtverteilungen für spezifische Fahrsituationen erlaubt. Diese können folgendermaßen bezeichnet werden:

- **Town Light** (Stadtlicht) – breite Lichtverteilung für niedrige Fahrgeschwindigkeiten,
- **Cross Country Light** (Landstraßenlicht) – wie heutiges Abblendlicht ohne Blendung des Gegenverkehrs,
- **Motorway Light** (Autobahnlicht) – als weit vorausreichendes Licht für hohe Geschwindigkeiten,
- **Adverse Weather Light** (Schlechtwetterlicht) – Minimierung der Blendung des Gegenverkehrs bei gleichzeitiger kräftiger Ausleuchtung des eigenen Fahrbahnrandes.

Auch diese neuen Lichtverteilungen lassen sich mit einem **Kurvenlicht** kombinieren. Beim statischen Kurvenlicht oder Abbiegelicht wird zur Kurveninnenseite Licht aus einem separatem Reflektor oder Projektor hinzugeschaltet. Beim dynamischen Kurvenlicht schwenken die Scheinwerfer in Abhängigkeit vom Kurvenradius ebenfalls zur Kurveninnenseite. Während für statisches Kurvenlicht häufig Halogen- oder neuerdings LED-Licht verwendet wird, kann dynamisches oder „mitlenkendes" Kurvenlicht sowohl durch Halogenlicht als auch besonders vorteilhaft durch schwenkende Bi-Xenon Projektionsmodule oder LED-Systeme realisiert werden. In der Ober- und Mittelklasse ist dies bereits die bevorzugte Ausführung. Ihr Vorteil ist eine Verbesserung der Sichtweite um 60 % bis 90 % in engen Kurven sowohl beim Abblendlicht als auch beim Xenonfernlicht. Durch modularen Aufbau lässt sich eine solche kompakte Schwenkeinheit mit Bi-Xenon-Projektions-Modul und Schrittmotor mit Getriebe und gegebenenfalls Rückmeldung leicht im Scheinwerferdesign integrieren.

Der modulare Aufbau kann so erweitert werden, dass an Stelle der beweglichen Blende des Bi-Xenon-Systems entweder mehrere Blenden oder eine drehbare Freiform-Walze die unterschiedlichen Lichtverteilungen erzeugen. Zusätzlich sind speziell beim Autobahnlicht (motorway light) einfache aber wirksame Maßnahmen wie das Anheben des Scheinwerfers durch den Leuchtweitesteller sowie eine elektrische Leistungssteigerung des Xenonlichtes möglich.

Seit 2006 sind AFS-Scheinwerfersysteme am Markt [110].

Zur Ansteuerung der „intelligenten" Scheinwerfer können neben Geschwindigkeitssignal, Lenkwinkelsensor und Querbeschleunigungssensor alle weiteren Informationen über die Verkehrssituation vorzugsweise über Kameras und Bildverarbeitung sowie das Navigationssystem herangezogen werden [106–109, 113, 114]. Werden Informationen aus dem Verkehrsraum für die prädiktive Lichtsteuerung eingesetzt, so spricht man von „assistierenden" Lichtsystemen. Diese können neben Witterungsbedingungen und der Infrastruktur vor dem Fahrzeug auch andere Verkehrsteilnehmer identifizieren und bei der Auswahl der Lichtverteilung berücksichtigen. Ein erstes System dieser Art wurde 2005 als

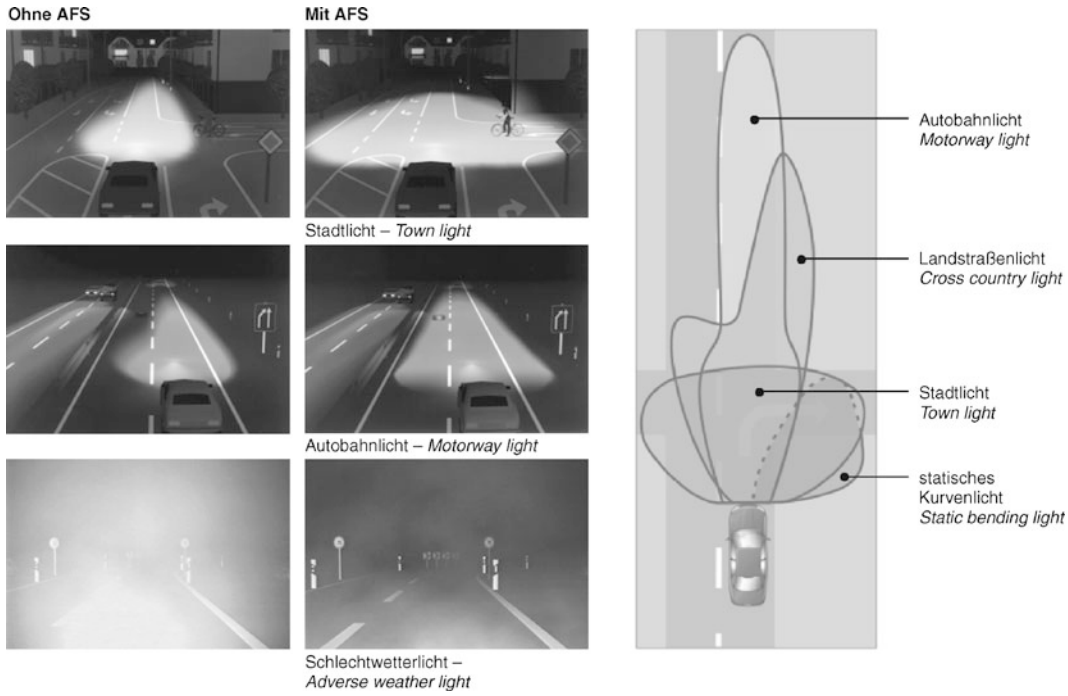



**Abb. 8.56** AFS-Prinzip

Fernlichtassistent in den Markt gebracht und schaltet automatisch zwischen den klassischen Fern- und Abblendlichtverteilungen um. Seit 2008 gibt es auch Systeme, die kamera- und bildverarbeitungsbasiert die Lichtfunktionen innerhalb der AFS-Regelungen variieren. Die Kameras werden dabei mit Spurhaltesystemen, Schildererkennung, ACC-Funktionen oder Nachtsichtsystemen gemeinsam genutzt. Zur Kurvenlichtsteuerung kommen neben Kameras auch GPS-Signale zum Einsatz.

Reine Nachtsichtsysteme für Kfz haben sich dagegen bisher nur in Nischen etabliert. Während die passiven Nachtsichtsysteme nur die vorhandene Wärmestrahlung aufnehmen, wird bei den leistungsfähigeren aktiven Systemen gezielt für den Menschen nicht sichtbares Infrarotlicht in den Fernbereich zur Unterstützung des sichtbaren Abblendlichtes ausgestrahlt. Die über eine Kamera aufgenommenen Infrarotbilder werden für den Fahrer in einem Display dargestellt [109]. Kritisch ist hier die Abwendung der Fahreraufmerksamkeit von der Straße weg durch das Fehlen kontaktanaloger Darstellungsmöglichkeiten.

#### 8.5.2.3.8 LED-Scheinwerfer

LEDs (Light-Emitting-Diodes) sind Halbleiterdioden, in denen die Energie des elektrischen Stroms bei geringer Wärmeentwicklung am so genannten pn-Übergangen in Licht umgewandelt wird. Dabei wird Licht eines sehr schmalen Spektrums ausgesendet. Lichtfarben wie rot, gelb, blau oder grün werden direkt durch den eingesetzten Halbleiter erzeugt. Zur Realisierung weißer LEDs kann entweder das Licht verschiedener Farb-LEDs überlagert oder das Licht blauer LEDs mittels eines fluoreszierenden Leuchtstoffes in weißes Licht transformiert werden. Da einzelne LEDs aufgrund begrenzter Chipgröße nur einen relativ geringen Lichtstrom erzeugen, werden meist mehrere LEDs in Modulen oder mehrere Chips in Arrays zusammengefasst, wobei je LED eine eigene Optik oder gemeinsame Optiken für ein Array eingesetzt werden.

Die treibende Kraft in der Entwicklung von LED-Scheinwerfern sind stilistische und technologische Motive, da das optische System, die LEDs mit ihrer elektronischen Beschaltung sowie die Klimatisierung der Geräte zunächst noch deutlich auf-

wändiger ist als bei Halogen- und Xenonsystemen. LED-Scheinwerfer bieten eine ganze Reihe an Vorteilen, welche mit komplett neuen Gerätekonzepten und Leistungssteigerungen der Halbleiter einhergehen:

- weißes Licht (Farbtemperatur über 4000 K),
- geringerer Energieverbrauch,
- kein Lampenwechsel (da LEDs eine sehr hohe Lebensdauer aufweisen),
- kleinere Gerätevolumen und neue Integrationskonzepte,
- freie Programmierbarkeit der Lichtverteilung.

Erste Voll-LED-Scheinwerfer, d. h. Geräte, bei denen neben den heute schon vielfach realisierten Signalfunktionen erstmals auch Abblendlicht und Fernlicht mit Leuchtdioden als Lichtquellen realisiert sind, wurden ab 2006 in Fahrzeugen der Luxusklasse in den Markt eingeführt. Seit 2010 gibt es Voll-LED-Scheinwerfer, welche intelligente Lichtfunktionen (AFS-Funktionen) bereitstellen [114]. Dabei erzeugen diese LED Scheinwerfer auf der Straße gemessen Lichtströme von 1100 lm und mehr, wie sie bisher Xenonsystemen vorbehalten waren. Einige Beispiele dazu sind in ◘ Abb. 8.57 dargestellt.

Es haben sich grundsätzlich zwei unterschiedliche LED-Lichtsysteme durchgesetzt. Einfache LED-Scheinwerfer bestehen aus einem leistungsstarken LED-Array und einer Linse. Sie sind vom Aufbau mit den Xenon-Modulen vergleichbar und erlauben keine getrennte Ansteuerung der einzelnen LED-Chips. Bei solchen Systemen kann die AFS-Funktionalität z. B. durch mechanisches Verschieben einzelner Komponenten realisiert werden. LED-Matrixscheinwerfer hingegen besitzen mehrere räumlich voneinander getrennte LED-Lichtquellen mit eigenen Reflektoren oder Linsen, welche einzeln in ihrer Helligkeit angesteuert werden können. Da jedem Subsystem ein räumlicher Teil der Fahrzeuglichtverteilung zugeordnet ist, lassen sich so spezifische Lichtverteilungen erzeugen, die beispielsweise basierend auf den Daten der Fahrzeugkamera den Gegenverkehr aussparen. Auf diese Weise ist auch die Realisierung von Kurvenlicht möglich.

Aktuelle Matrixbeam-Scheinwerfer, wie sie z. B. im Audi A8 serienmäßig erhältlich sind, weisen



◘ **Abb. 8.57** Beispiele für LED-Scheinwerfer (Quellen: BMW AG, Seat S.A., Audi AG)

mehrere hundert einzeln adressierbare Pixel auf. Dadurch ist es möglich, nahezu jederzeit mit Fernlicht zu fahren und nur dort das Licht zu dimmen, wo sich andere Verkehrsteilnehmer befinden.

Darüber hinaus befasst sich die Forschung mit Systemen, welche einige tausend Bildpunkte ansteuern, um noch besser adaptierbare Lichtfunktionen realisieren zu können. Als Technologien dafür kommen die aus Videoprojektoren bekannten DMDs und LC-Displays in Frage aber auch abzei-

lende (scannende) Verfahren sowie der Einsatz von LED-Arrays mit einer Vielzahl von einzeln ansteuerbaren Halbleiterchips. Ziel dieser hochauflösenden Scheinwerfersysteme ist es, den Fahrer durch Bereitstellung einer ideal kontrastreichen Beleuchtung zu unterstützen. So können auch Blendungen beispielsweise durch helle Reflexionen an Verkehrsschildern reduziert sowie wichtige Informationen auf die Straße projiziert werden [167–170].

Eine zusätzliche Neuentwicklung im Bereich der Halbleiterlichtsysteme stellen die Laserscheinwerfer dar. Diese Lichtquellen sind ähnlich wie weiße LEDs aufgebaut. Sie bestehen aus einer blauen Halbleiterlichtquelle (Laserdiode), deren Strahlung durch einen Leuchtstoff in ungefährliches, weißes Licht umgewandelt wird. Vorteil laserbasierter Beleuchtungseinrichtungen ist die nahezu punktförmige Abstrahlcharakteristik der Laserdioden. Dadurch lassen sich besonders präzise Lichtverteilungen sowie kleine optische Systeme realisieren. Erster Serieneinsatz von Laserscheinwerfern ist ein Zusatzfernlicht mit besonders hoher Reichweite im BMW i8 sowie im Audi R8 LMX [171].



#### 8.5.2.3.9 Scheinwerfer-Einstellung und Leuchtweitenregulierung

Die korrekte Ausrichtung des Lichtbündels muss bei der Erstmontage, nach Reparaturen und eventuell nach dem Lampenwechsel hergestellt werden. Beim Abblendlicht richtet sich die Vertikaleinstellung nach der waagerechten Hell-Dunkel-Grenze, die horizontale nach dem Knickpunkt des (meist) 15° Winkels in der Lichtverteilung. Dazu kann eine Markierung auf einer Tafel, ein optisches oder ein elektronisches Einstellgerat dienen. Die Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts wird in der Grundeinstellung um 1,0 % bis 1,6 % nach unten geneigt. Dieser Wert ist am Scheinwerfer angegeben. Fernscheinwerfer werden – wenn sie nicht mit dem Abblendlichtteil verbunden sind – so eingestellt, dass das Maximum ihrer Lichtverteilung direkt in Fahrtrichtung zeigt [94].

In Nordamerika wurde aus Anlagepunkten auf der Streuscheibe der lange Zeit allein zulässigen *Sealed Beam*-Einsätze eine rein mechanische Einstellung abgeleitet, die mit sogenannten *„Aimern"* erfolgt [95].

Seit 1990 ist es zulässig, vertikale (meist Wasserwaagen) und horizontale Aimer in jeden amerikanischen Scheinwerfer einzubauen. Damit wurde der Einsatz von „Gehäuse-Scheinwerfern" mit feststehender Frontscheibe auch in Nordamerika möglich [95].

Seit 1997 ist in Nordamerika auch ein dem europäischen Verfahren ähnliches „visual aiming" wahlweise für eine rechte oder linke waagerechte Hell-Dunkel-Grenze zulässig [95]. Ist die horizontale Ausrichtung – wie in Nordamerika häufig – nicht genau definiert, kann auf eine horizontale Einstellung ganz verzichtet werden.

Die Scheinwerfer-Einstellung ist auf das unbeladene Fahrzeug ausgelegt. Beladung bewirkt ein Absenken des Fahrzeughecks und dadurch zum Teil erhebliche Blendung des Gegenverkehrs.

Eine vom Fahrersitz aus bedienbare vertikale Leuchtweitenregelung (LWR) der Scheinwerferneigung ist seit 1991 in Deutschland und seit 1998 europaweit Vorschrift [94]. Hierbei haben sich elektrische Systeme gegenüber mechanischen, hydraulischen und pneumatischen durchgesetzt. Die korrekte Bedienung der LWR ist nicht immer gegeben. Für Xenonlicht und andere intensive Lichtquellen schreibt die ECE-Regelung 48 daher eine automatische LWR vor, die selbsttätig Beladungsänderungen ausgleicht. Nicht vorgeschrieben aber sehr wirksam ist eine Erweiterung zur dynamischen LWR, durch die auch Fahrzeugbewegungen beim scharfen Bremsen und Beschleunigen ausgeglichen werden. Diese LWR müssen in Sekundenbruchteilen reagieren und erfordern sehr viel größere Verstellwege der Reflektoren. Hierzu werden meist Schrittmotoren eingesetzt [100].

Zur Ansteuerung der automatischen LWR muss die Lage der Fahrzeugkarosserie relativ zur Fahrbahn erkannt werden. Dazu dienen Drehwinkelsensoren, die über ein Gestänge die Einfederung der Vorder- und/oder Hinterachse feststellen.

#### 8.5.2.3.10 Lichtbewertung

Der überproportionale Anteil von Unfällen bei Nacht zeigt, dass hier ein erhöhtes Risiko herrscht. Die Sicht bei Scheinwerferlicht wurde daher als wichtiges Sicherheitselement erkannt und bewertet [96]. Weiterhin bleibt auch die Weiterentwick-

lung von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Kombination mit moderner Sensortechnik ein wichtiger Baustein der Fahrzeuglichttechnik [112, 113].

Allgemein sollte ein gutes Scheinwerfer-Abblendlicht

- die Straße gleichmäßig und fleckenlos ausleuchten,
- eine gute Sichtweite am eigenen Fahrbahnrand haben,
- die eigene Fahrbahn betonen (Führungslicht),
- ausreichende Streubreite haben,
- den Gegenverkehr nicht blenden,
- bei Nebel nur geringe Eigenblendung erzeugen,
- die eigene Fahrbahn bis etwa 40 m nicht zu stark ausleuchten, da bei nasser Straße dies durch Reflexion zu extremer Blendung des Gegenverkehrs führt.

Gegenüber dem Abblendlicht ist Fernlicht in Mitteleuropa von untergeordneter Bedeutung, wird in Nordeuropa aber sehr viel höher bewertet (geringere Verkehrsdichte, Gefährdung durch Elche).

Die Lichtleistung wird durch die Eigenschaften der Scheinwerfer und durch fahrzeuggebundene Einflüsse bestimmt. Beim Scheinwerfer spielen die Reflektorgröße bzw. die Linsengröße des Projektionssystems sowie Neigung und Pfeilung der Abschlussscheibe eine entscheidende Rolle, außerdem der verwendete Lampentyp und speziell die tatsächliche Versorgungsspannung. Fahrzeuggebunden sind Anbauhöhe, Sitzposition, Neigung der Windschutzscheibe und eventuelle Tönung oder Metallisierung der Scheibe.

Vergleichende Lichttests von Zeitschriften sind populär aber umstritten. Fair durchgeführt können sie das Bewusstsein für gutes Scheinwerferlicht schärfen und fortschrittlichen Lichttechniken zum Durchbruch verhelfen. Ein guter Lichttest umfasst einen statischen Test, vorzugsweise in einem „Lichtkanal“, und Fahrtests unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Durch „Virtual Reality-Methoden“ lässt sich in der Entwicklungsphase die spätere Scheinwerferleistung heute sowohl statisch als auch dynamisch (Virtuelle Nachtfahrt) bereits gut simulieren und optimieren [99].




**Abb. 8.58** Tagfahrlicht integriert in den Scheinwerfer (Quelle: Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG)

### 8.5.2.4 Tagfahrlicht und Positionslicht

Um bewegte Fahrzeuge auch bei Tage auffällig zu gestalten und damit Unfälle zu vermeiden forderten unter anderem die skandinavischen Länder, Kanada und die Schweiz durchgängig Tagfahrlicht. 2008 wurde für Europa mit der Richtlinie 2008/89/EG der Rahmen geschaffen, nach dem ab Februar 2011 alle neuen PKW mit Tagfahrlicht und ab Februar 2012 alle neuen Fahrzeuge mit Tagfahrleuchten ausgestattet sein müssen, während in den USA und Kanada weiterhin das Fahren mit Abblendlicht oder speziellen Fernlichtern möglich sein wird.

Die Lösung mit speziellen Tagfahrleuchten wird in Europa deshalb favorisiert, da beim ständigen Fahren mit Abblendlicht relativ viel elektrische Energie und damit Kraftstoff verbraucht wird (die für Halogenlicht erforderlichen 120 W Leistung entsprechen etwa 0,12 l Kraftstoff pro 100 km), während spezielle Tagfahrleuchten typisch nur etwa 12 W, beim Einsatz von weißen LEDs noch weniger Leistung verbrauchen. Ein zukunftsweisender Ansatz ist hier die Integration der Tagfahrleuchten in den Scheinwerfer und die Kombination mit der Positionslichtfunktion, speziell wenn diese als Stylingelement geformt ist. 2003 stellte der Einsatz von weißen LEDs für Tagfahrlicht bzw. Positionslicht die erste LED-Anwendung für Scheinwerferfunktionen überhaupt dar [107, 109] (Abb. 8.58). Inzwischen nutzen viele Fahrzeughersteller die stilistischen Optionen, die diese Funktion bietet, um ihr Nachtdesign markenspezifisch zu definieren.

### 8.5.2.5 Zusatzscheinwerfer

Nach ECE-Regelung 19 ist ein Paar Nebelscheinwerfer zulässig, die bei schlechter Sicht das Abblendlicht unterstützen oder zusammen mit dem Positionslicht allein betrieben werden können. Große Streubreite zur Ausleuchtung der Fahrbahnränder und eine scharfe waagerechte Hell-Dunkel-Grenze sind Kennzeichen guter Nebelscheinwerfer [96].

Eine Verstärkung des Fernlichts kann durch fest zugeschaltete oder wahlweise betriebene Fernscheinwerfer bewirkt werden. Die regionalen Regelungen sind unterschiedlich.

### 8.5.2.6 Signalleuchten

Im Gegensatz zu Scheinwerfern dienen Signalleuchten nicht der Fahrbahnausleuchtung (Ausnahme Rückfahrlicht), sondern um die Fahrzeugabmessungen, das Kennzeichen und die Absichten des Fahrers darzustellen. Auch hier dürfen nur die in den Regelungen enthaltenen Funktionen und zulässigen Lichtquellen verwendet werden. Signalleuchten tauchten erst spät an Fahrzeugen auf und beschränkten sich oft auf eine kombinierte Rück- und Kennzeichenleuchte. Fahrtrichtungsänderungen wurden zunächst freiwillig durch drehbare Pfeile, Armzeichen und später durch beleuchtete Winker dargestellt.

Signalleuchten sind heute großflächige Gestaltungselemente, die bei homogener oder „brillanter" Ausleuchtung eine große Vielfalt von Erscheinungsbildern darstellen und zudem im „kalten" (inaktiven) Zustand große farbliche Designfreiheit bieten (◘ Abb. 8.59).

Die Fahrzeugabmessungen werden vorne durch zwei weiße Positionslichter, hinten durch zwei rote Positionslichter (Schlusslichter) dargestellt. Hintere Kennzeichenbeleuchtung oder selbstleuchtende Schilder und gegebenenfalls seitliche Markierungsleuchten komplettieren die bei Dunkelheit ständig zu betreibenden Signalleuchten.

Die vorderen Begrenzungsleuchten (Positionsleuchten) sind oft in einem der Scheinwerferreflektoren für Abblend- oder Fernlicht angeordnet. Zusammen mit dem Abblendlicht stellen sie das „Nachtdesign" des Fahrzeuges dar. Eine viel beachtete Alternative stellt die Gestaltung des Positionslichtes als beleuchtetes Designelement dar. Im Jahr 2000 wurden erstmalig leuchtende Ringe eingesetzt, die ein „Markenzeichen" geworden sind. Ursprünglich mit flexiblen Lichtleitern beleuchtet, eignen sich heute besonders weiße LEDs zur direkten Einkopplung und ermöglichen die Kombination mit Tagfahrlicht, die von unterschiedlichen Herstellern genutzt wird, um die Identität ihrer Fahrzeuge zu erhöhen.



◘ **Abb. 8.59** Dynamischer Blinker (Quelle: Audi AG)

Fahrtrichtungsänderung und Warnblinken werden durch vordere, hintere und seitliche Blinkleuchten angezeigt. Einige Automobilhersteller bieten in höheren Modellklassen für vordere sowie hintere Blinkleuchten einen sogenannten dynamischen Blinker an (siehe ◘ Abb. 8.59). Das dynamische Blinklicht erzeugt eindeutige Signale über die Abbiegerichtung. Das Blinklicht ist entweder in einzelne LEDs oder in LED-Blöcke aufgeteilt.

Beim Aktivieren des Blinkers vom Fahrer leuchten sie nacheinander von innen nach außen auf. Für eine kurze Zeit bleiben alle Lichtquellen des Blinklichtes an und erlöschen anschließend. Dieser Vorgang wird, wie bei klassischen Blinkleuchten, periodisch wiederholt.

Die Intensität der vorderen Fahrtrichtungsanzeiger richtet sich, um eine gute Erkennbarkeit zu gewährleisten, nach dem Abstand zum Abblend- oder Nebellicht. Für vordere Blinkleuchten wird aus Stylinggründen im ausgeschalteten Zustand oft ein „weißes" oder ein brillantes Erscheinungsbild gewünscht, ihr Licht ist gelb (amber). Rückwärtige Fahrtrichtungsanzeiger sind ebenfalls gelb, in den USA auch oft rot. Die lichttechnischen Anforderungen sind geringer als bei den vorderen. Das gilt auch für die für Neufahrzeuge geforderten seitlichen Zusatzblinkleuchten.

Das Rückfahrlicht dient der Ausleuchtung der rückwärtigen Fahrbahn, zeigt aber auch die Absicht des Rückwärtsfahrens an. In Schweden sind zudem vordere Rückfahrleuchten zulässig.

Eine oder zwei Nebelschlussleuchten sind bei neuen Fahrzeugen vorgeschrieben, in den USA geduldet.

Passive Rückstrahler sind aus praktischen Gründen oft in die Heckleuchten integriert, wobei dreieckige Rückstrahler Anhängern vorbehalten sind.

Das Bremsen wird durch zwei seitliche und eine mittige, hochgesetzte Bremsleuchte angezeigt. In den USA können Schlussleuchten in Mehrfachfunktion als Bremsleuchten und auch als Fahrtrichtungsanzeiger dienen [95]. In Europa sind Doppelfunktionen von Schluss-Bremslicht mit Zweiwendellampen zulässig, allerdings sind Einzelfunktionen vorzuziehen. Ab 1980 wurde zunächst in Deutschland ein Paar hochgesetzte Bremsleuchten zulässig. Von Vorteil war die Sichtbarkeit durch die Rückfenster und Frontscheiben mehrerer Fahrzeuge hindurch, was eine frühere Bremsbereitschaft ermöglicht hat [96, 97]. Durch zu hohe Lichtwerte, Abstrahlung ins Fahrzeuginnere und fragwürdige mechanische Befestigung geriet das Konzept in Europa in Misskredit. In USA wurden mit einer einzelnen hochgesetzten Bremsleuchte erfolgreiche Feldversuche gemacht [98]. 1985 wurde in den USA die hochgesetzte Bremsleuchte Vorschrift [95], seit 1991 wird sie in Europa geduldet, seit 1998 ist sie auch hier Vorschrift (EG).

Eine oder zwei rote Nebelschlussleuchten, deren Lichtstärken höher sind als die des Bremslichts, sollen bei schlechter Sicht das Fahrzeug sichtbar machen. Zum Bremslicht muss ein Abstand von 100 mm eingehalten werden.

Parkleuchten sind optional und strahlen nach vorn weiß, nach hinten rot. Häufig werden ein vorderes Positionslicht und eine Schlussleuchte als Parkleuchte verwendet.

#### 8.5.2.6.1 Lichtquellen für Signalleuchten

Normale Glühlampen dominierten lange Zeit die Signalleuchten-Anwendungen, werden jedoch zunehmend, trotz des höheren Preises, durch LEDs ersetzt. Für Glühlampen in Signalleuchten sind Bajonettsockel und *Wedgebases* üblich. Eine Kodierung der Bajonette verhindert die Fehlbestückung der Leuchten. Solange die Lichtquellen wechselbar sind, dürfen nur solche verwendet werden, die in der ECE-Regelung verankert sind. Zur Erleichterung des Lampenwechsels werden speziell bei Heckleuchten die Lampen auf Lampenträgern zusammengefasst.

Halogenlampen finden nur gelegentlich Anwendung bei Signalleuchten, obwohl sie Vorteile hinsichtlich Lichtfarbe (weiß), Energieverbrauch und Intensität haben. Ein Beispiel für Halogenlampen ist der Typ H6W, der im vorderen Positionslicht eingesetzt wird.

LEDs bieten im Vergleich zu Glühlampen viele Vorteile für Signalfunktionen, insbesondere

- schnelles Einschaltverhalten, ca. 170 ms kürzere Reaktionszeit,
- neue Optiksysteme und Gestaltungsmöglichkeiten,
- geringer Energieverbrauch, da direkt Licht z. B. im roten Spektrum erzeugt wird,
- lange Lebensdauer,
- geringer Raumbedarf.

Im Zuge der steigenden Effizienz und damit Einsatzfähigkeit von LED-Lichtquellen wurden ausgehend von der Bremslichtfunktion speziell bei hochgesetzten Bremsleuchten nach und nach weitere Signalfunktionen durch LEDs realisiert. Hierzu zäh-

len Schluss- und Bremslichtkombinationen sowie Blinker.

Neonröhren haben ähnliche Eigenschaften wie LEDs, erfordern aber wegen der Ansteuerelektronik und der schwierigen EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) hohen Aufwand und werden nicht mehr in Signalleuchten eingesetzt [98, 99].

#### 8.5.2.6.2 Bauformen von Signalleuchten

Signalleuchten können sowohl als Einzelfunktionen als auch zusammengefasst ausgeführt werden. Im Frontbereich werden die Signalfunktionen Positionslicht, Fahrtrichtungsanzeiger und für die USA beleuchteter *sidemarker* (sowie der passive *side reflector*) meist mit dem Scheinwerfer zu einer Lichteinheit vereinigt. Im Seitenbereich dominieren Einzelfunktionen für Zusatzblinkleuchten und – wenn vorhanden – Seitenmarkierungsleuchten. Im Heckbereich sind die Funktionen meist in einer gemeinsamen Heckleuchte pro Seite vereinigt, gelegentlich auf zwei Teilbereiche verteilt. Bei Heckleuchten werden häufig komplizierte Spritzgusstechniken in Mehrfarbenmaschinen (bis zu vier Farben) angewendet. Die farbigen Signalfunktionen können betont oder kaschiert werden, in letzter Zeit sind ähnlich wie bei Scheinwerfern brillante Aufbauten mit klarer Abschlussscheibe populär geworden.

Früher wurden die Leuchten in zwei Kategorien eingeteilt: Leuchten mit (Paraboloid-)Reflektor, die sowohl das direkte Licht als auch das vom Reflektor gerichtete Licht ausnutzen, und Leuchten ohne Reflektor, die das direkt abgestrahlte Licht über Prismen in der Abschlussscheibe verteilen [97]. Inzwischen sind weitere Prinzipien wie Ellipsoidreflektoren, Facettenreflektoren und Freiformreflektoren entstanden.

Bei den Streuoptiken gibt es verschiedene Muster, die ein homogeneres Erscheinungsbild erlauben [100]. Die nach dem französischen Physiker benannte Fresnel-Optik stellt eine Stufenlinse mit guten Richteigenschaften dar. Bei flachem Aufbau erfasst sie einen großen Raumwinkel [97].

Ähnlich der Fresnellinse kann ein Leuchtenreflektor aus konzentrischen Reflektorsegmenten zusammengesetzt werden. Eine zukünftige Weiterentwicklung stellen holographische Reflektorstrukturen dar [100–103].

Ähnlich der Anwendung im Scheinwerfer erlaubt der Freiflächenreflektor eine kontinuierliche Lichtverteilung ohne optische Profile auf der Lichtscheibe.

Leuchtenfunktionen lassen sich auch mit Lichtleitern darstellen, wobei farbiges Licht in transparente Stäbe eingespeist und durch Prismen quer zur Stabachse abgestrahlt wird [100].

#### 8.5.2.6.3 Neuentwicklungen adaptiver Signalfunktionen

Zur Anzeige von starker Verzögerung ist ein zweistufiges Bremslicht bereits im Einsatz. Hierbei wird die leuchtende Fläche oder die Intensität des Bremslichtes vergrößert. Eine andere Lösung ist es, die hochgesetzte Bremsleuchte oder alle Bremsleuchten mit einer Frequenz von 7 Hz blinken zu lassen. Ebenfalls realisiert wurde die automatische Einschaltung der Warnblinkanlage bei besonders starker Verzögerung.

In Untersuchung sind weitere Verfeinerungen der Signalbeleuchtung wie Anpassung der Leuchtstärke an die Umgebungsbedingungen wie Helligkeit, Sichtweite oder Verschmutzung, wozu auch der sinnvolle Ersatz der Nebelschlussleuchte(n) gehört. Denkbar wäre es auch, bei Verwendung eines rückwärtigen Näherungssensors zu schnell herankommende Verkehrsteilnehmer z. B. am Stauende durch die Signalleuchten automatisch zu warnen.

Bisher konnten diese adaptiven sicherheitsverbessernden Lösungen allerdings noch nicht in Vorschriften überführt werden.

### 8.5.2.7 Innenbeleuchtung und Einstiegsleuchten

Den gestiegenen Komfort-Erwartungen wird eine einfache Innenleuchte nicht mehr gerecht. In Oberklassenfahrzeugen werden z. T. mehr als hundert Lichtaustritte im Innenraum installiert (Abb. 8.60). Neben Bedarfslichtquellen wie Leseleuchten ist es das Bestreben der *ambienten Innenbeleuchtung* Orientierung und Raumgefühl zu vermitteln. Fortschritte in der LED-Technologie haben dazu geführt, dass bevorzugt wartungsfreie LEDs statt Glühlampen (z. T. mit Lichtleitern) eingesetzt werden. Das gilt auch für spezielle Einstiegsleuchten im Außenbereich wie Vorfeld- und Handgriffleuchten [105].

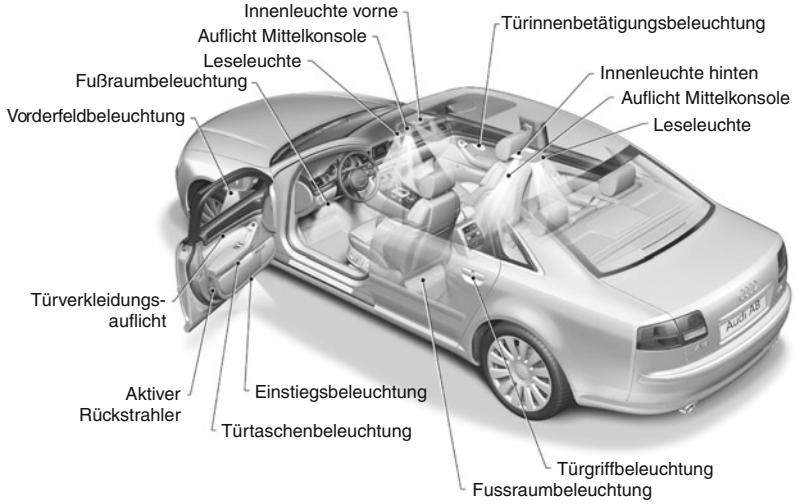



**Abb. 8.60** Innenbeleuchtung (Quelle: Audi AG)

Zukünftig könnten gerade im Innenraum erste Anwendungen für den Einsatz organischer LEDs in der Fahrzeugbeleuchtung liegen.

#### 8.5.2.8 Beleuchtungsstyling

Die Beleuchtungseinrichtungen am und im Fahrzeug haben sowohl im „kalten" wie im eingeschalteten Zustand einen dominierenden Styling-Effekt bekommen. Beim Tag- wie Nachtdesign wird eine eigenständige Erscheinung der Fahrzeuge bei gleichzeitigem Behalten einer „Familienähnlichkeit" angestrebt. Zusätzlich gilt es Modetrends zu berücksichtigen. Darüber hinaus eignen sich die Beleuchtungseinrichtungen dazu, bei Sondermodellen und „Facelifts" ein geändertes oder frischeres Aussehen ohne grundlegende Änderung des Fahrzeugblechkleides zu realisieren.

Moderne Berechnungs- und Entwicklungsverfahren sowie Fortschritte bei den Lichtquellen ermöglichen die Berücksichtigung von Stylingwünschen ohne Einbuße oder sogar bei Steigerung der lichttechnischen Funktionalität.

Im Fahrzeugaußenbereich dürfen zusätzliche (über Scheinwerfer und definierte Signalleuchten hinausgehende) Leuchten und Lichtzeichen nur im Stand funktionieren. Hierzu gehören z. B. Coming-/Leaving-Home-Funktionen, Parkplatz- und Näherungslicht oder auch ein Blinken zur Signalisierung von Schließfunktionen. Hier ergeben sich stilistisch vielfältige Individualisierungsmöglichkeiten.

### 8.5.3 Instrumentierung für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

#### 8.5.3.1 Einleitung

Unter dem Begriff Instrumentierung fasst man die Anzeigen und Bediengeräte zusammen, mit deren Hilfe der Fahrer Funktionen aktiviert, deaktiviert, parametriert und überwacht. Die Instrumentierung ist eine zentrale Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (engl. Human Machine Interface, HMI) im Fahrzeug. Zugleich trägt die Instrumentierung maßgeblich zur stilistischen Gestaltung des Cockpits bei. Abb. 8.61 zeigt eine typische Anordnung der Instrumente.

Wegen ihrer Bedeutung befindet sich der Anteil der Instrumentierung, der sich auf die unmittelbare Fahraufgabe bezieht, innerhalb eines 30° umfassenden Blickfeldes in Sehrichtung des Fahrers. Bei geeigneter Auslegung (Blindbedienbarkeit, Haptik) lassen sich Bediengeräte aber beispielsweise auch am Fuße der Mittelkonsole ergonomisch sinnvoll integrieren [172].

Um Fahrerassistenz- und Informationssysteme, die Anbindung des Fahrzeugs an das Internet (engl.



**Abb. 8.61** Typische Struktur der Instrumentierung im Cockpit (Head-up Display, Kombinationsinstrument, integrierte Mittelkonsole) (Quelle: Continental)



**Abb. 8.62** Kombinations-Instrument mit zwischen den Rundinstrumenten integrierter Farb-TFT-Anzeige (Quelle: Continental)



Connectivity) sowie den generell großen Funktionsreichtum intuitiv beherrschbar und transparent zu machen, gewinnt ein systemübergreifender HMI Ansatz an Bedeutung, der Hardware und Softwarekomponenten miteinander vernetzt. Dies ermöglicht ein ganzheitliches HMI (engl. Holistic HMI), das die vielfältigen Informationsbedürfnisse des Fahrers ergonomisch optimal bedient [173].

### 8.5.3.2 Informationsdarstellung

Eine Hauptaufgabe der Instrumentierung besteht darin, Fahrzeugzustände (z. B. Geschwindigkeit und Drehzahl sowie wichtige Zustands- und Warnmeldungen) unter allen Lichtverhältnissen gut erfassbar darzustellen. Als zentrale visuelle Schnittstelle dafür dient das Kombinations-Instrument. Weil seine Größe sehr häufig vom Lenkradauschnitt begrenzt wird, werden die Kontrollleuchten und dedizierten (Rund-)Anzeigen der Hauptinstrumente in der Regel durch ein multifunktional genutztes Display ergänzt, auf dessen Fläche sich vielfältige Informationen im Wechsel darstellen lassen. Marktspezifisch ist das Kombinations-Instrument im oberen Feld der Mittelkonsole integriert.

Im Kombinations-Instrument und auf der übergeordneten Ebene nutzt man das Prinzip der situativ optimierten Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug: Je nach Verkehrssituation, persönlichen Präferenzen oder je nach momentaner Verfassung des Fahrers werden Informationen zunehmend häufig auf einem der Situation angemessenen Kanal vermittelt (Multimodalität: visuell, akustisch, haptisch). Dies kann im Kombinations-Instrument erfolgen, in einem Head-up-Display, im Display der Mittelkonsole, über Signaltöne oder Sprache, im verbundenen mobilen Endgerät sowie über das Lenkrad oder das Fahrpedal.

#### 8.5.3.2.1 Kombinations-Instrument

Im Kombinations-Instrument spielt die Displaytechnik für die Visualisierung grafischer Informationen eine Schlüsselrolle. Vollfarbige Aktivmatrix-Displays in Dünnschichttechnik (Thin Film Transistor LCD, TFT-LCDs) mit einer Diagonale von 12,3″ sowie 2D und 3D Darstellung bestimmen heute die Anzeigemöglichkeiten. Auf dieser optisch anspruchsvollen Basis wird der Trend in Richtung immer höherer Auflösung gehen. Abb. 8.62 zeigt beispielhaft eine aktuelle technische Umsetzung [172].

Die elektronischen Bauteile des Instruments werden auf einer Funktionsleiterplatte bestückt, die wegen der geforderten Miniaturisierung und Bauraumoptimierung aus bis zu zehn Lagen bestehen kann. Als mechanischer Antrieb analoger (Rund-) Anzeigen sind Schrittmotoren Stand der Technik.

Alternativ zu größeren Displays im Kombinations-Instrument kann auch das gesamte Kombinations-Instrument auf einem Display dargestellt




**Abb. 8.63** Frei programmierbares Kombinations-Instrument (FPK) auf einem 12,3″ TFT-Display (Quelle: Continental)




**Abb. 8.64** Das LED Backlight ist ein wesentliches Element leistungsfähiger und gut ablesbarer Kombinations-Instrumente (Quelle: Continental)

werden. Dieses Prinzip des frei programmierbaren Instruments (FPK) gibt besonders hohe Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Anzeigen. Erste Anwendungen mit einer Auflösung von 1920 × 720 Pixel sind inzwischen im Markt, Abb. 8.63. Der Trend geht weiter in Richtung Retina-Auflösung.

In heutigen Kombinations-Instrumenten wird leistungsfähige Mechatronik mit hoch getakteten 32- und 64-bit Mikrocontrollern verbaut [172]. RAM- und Flash-Werte im Gigabyte Bereich sind keine Seltenheit mehr, und bei HD-Auflösung ist die Elektronik des Kombinations-Instruments fast so anspruchsvoll wie in einem Multimediasystem. Die geforderte Grafikfähigkeit sowie neue Funktionen und das hohe Maß an Vernetzung einzelner Funktionen und Subsysteme (z. B. Wegfahrsperre, Map Matching als Teil des Navigationssystems) haben den Softwareanteil an der Instrumentierung stark gesteigert.

#### 8.5.3.2.2 Beleuchtung

Bei der Beleuchtung der Instrumentierung muss ein sehr großer Dynamikbereich in Bezug auf die Umgebungslichtverhältnisse im Straßenverkehr abgedeckt werden. Dafür werden standardmäßig kompakte LEDs verwendet, deren Leuchtstärke tagsüber vielfach der Umgebungshelligkeit nachgeführt wird. LEDs sorgen für Brillanz (Kontrast, Farbsättigung, Leuchtdichte), gleichmäßige Ausleuchtung und Farbhomogenität als wesentliche Qualitätsmerkmale einer Instrumentenbeleuchtung, Abb. 8.64.

In Form von Leuchtbändern mit Farb- und Lauflichteffekten lassen sich LEDs zudem nutzen, um die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt in Richtung potenziell kritischen Fahrsituation zu lenken. Als Teil stimmungsprägender Beleuchtungseffekte (engl. Ambient Lighting) sind LEDs auch an der Schnittstelle zwischen HMI und Innenraumbe-




**Abb. 8.65** Gebogenes AMOLED Display als Basis für eine integrierte Mittelkonsole (Quelle: Continental)

leuchtung zu finden. Hier dient die Farbvariabilität der LED-Technik dazu, das Beleuchtungskonzept um das Kombinations-Instrument und das Mittelkonsolendisplay herum fahrerindividuell und zugleich harmonisch konfigurieren zu können.

#### 8.5.3.2.3 Weitere Display-Arten im Cockpit

Neben den hinterleuchteten TFT-Displays erreicht eine weitere Displaytechnik schrittweise die Reife für den Automobileinsatz: Anzeigen auf Basis Organischer Licht Emittierender Dioden (Organic Light Emitting Diode, AMOLED) bieten für den Automobileinsatz spezifische Vorteile. Erstens sind sie sehr sparsame Stromverbraucher mit nur minimaler Bauhöhe. Zweitens können sie gekrümmt ausgeführt werden, was für die optische und gestalterische Integration in ein HMI neue Möglichkeiten bietet. Abb. 8.65 zeigt einen seriennahen Demonstrator auf Basis eines gebogenen AMOLED-Displays, bei dem die Übergänge zwischen den einzelnen Anzeigeelementen vollständig verschmelzen.

Eine zunehmend wichtige Rolle spielen Touchscreens, bei denen die Darstellung von Informationen und die Eingabe von Befehlen verschmelzen. Funktional steht damit eine Schnittstelle zur Verfügung, die auch für komplexere Berührungsgesten geeignet ist (etwa Bilder drehen, Zoomen usw.).

#### 8.5.3.3 Head-up-Display (HUD)

Nachdem Head-up-Displays (HUDs) in vollfarbfähiger Ausführung anfangs nur in Oberklassefahrzeugen zu finden waren, ist die dritte Systemgeneration der Windschutzscheiben-HUDs inzwischen auch in der Mittelklasse eine Option. Das HUD spiegelt Fahrzeug- und verkehrsbezogene Informationen in den unteren Bereich der Windschutzscheibe ein. Das HUD-Modul mit dem Spiegelsystem, einem transmissiven TFT-Display und einer LED-Lichtquelle ist im Inneren der Armaturentafel [172, 173] platziert. Bedingt durch den optischen Strahlengang nimmt der Fahrer die Anzeige (virtuelles Bild) in einer Entfernung von 2 bis 2,5 m wahr, Abb. 8.66.

Wegen der im Vergleich zum Kombinationsinstrument deutlich größeren Sehentfernung reduziert sich die Akkomodationsarbeit der Augen beim Ablesen der Anzeige. Das Ablesen erfolgt schneller, und der Fahrer kann das Verkehrsgeschehen dabei weiter erfassen.

Ergänzend dazu bietet das Combiner-HUD eine Plattformlösung für viele Fahrzeugbaureihen. Hier dient eine kleine transparente Kunststoff- oder Glasscheibe (engl. Combiner) als Spiegel, was den Aufbau und die Integration des Combiner-HUD im Cockpit vereinfacht sowie seinen Platzbedarf verringert, Abb. 8.67. Mit dem Combiner-HUD existiert eine Lösung, die unabhängig von der Windschutzscheibe integriert werden kann [174].

Eine neue Form des HUD erzeugt visuelle Hinweise im direkten Sehbereich des Fahrers im Kontext mit der Umgebung: Das Augmented Reality-HUD (AR-HUD) auf der Basis einer bildgebenden Einheit mit DMD (Digital Mircomirror Device) mit einem vergrößerten Projektionsabstand von ca. 7,5 m. Dies eröffnet eine neue Kommunikationsform mit dem Fahrer, weil es relevante Hinweise richtungsanalog und situationsbezogen in die reale Außenansicht des Fahrers einfügt. Damit wird die Wirklichkeit um virtuelle Elemente ergänzt (augmentiert), Abb. 8.68. Die Bedeutung dieser Augmentierung wird vom Fahrer intuitiv verstanden, weil sie ein integraler Bestandteil der Verkehrsansicht ist.

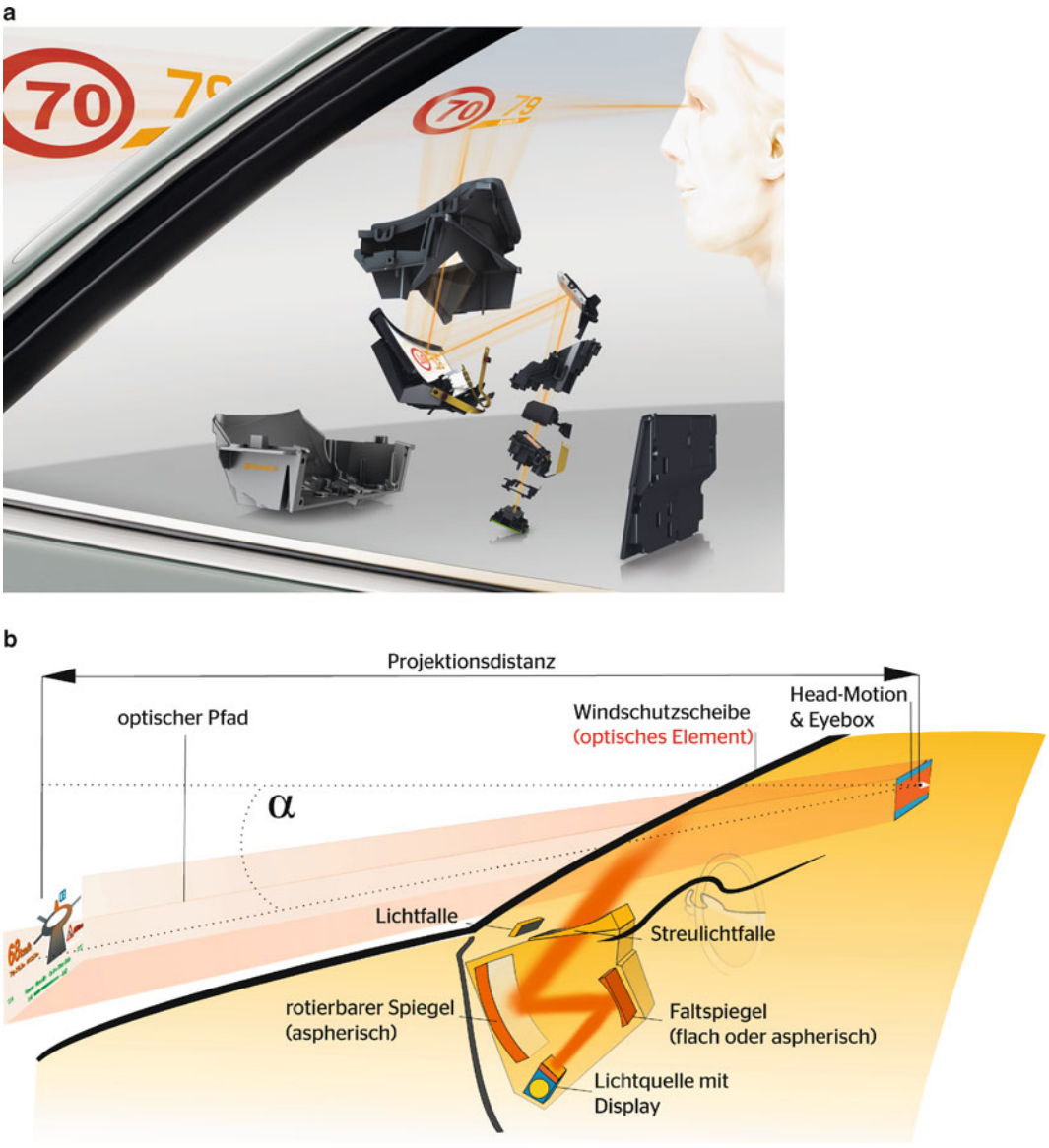



**Abb. 8.66** HUD-Strahlengang (**a**) und HUD-Modul (**b**) (Quelle: Continental)

Das AR-HUD lässt sich in verschiedenen Anwendungsfällen nutzen, beispielsweise für die Navigation sowie für Fahrerassistenzsysteme eine Spurverlassenswarnung oder einen adaptiven Tempomaten (Adaptive Cruise Control, ACC) [175, 176].

### 8.5.3.4 Eingabeelemente

Neben den etablierten elektromechanischen Bedienelementen (Lenkstockschalter, Schalter, Taster) bedingt die Funktionsfülle in höher ausgestatteten Fahrzeugen neue Bedienkonzepte [172, 174]. Dazu gehören zentrale Eingabeelemente, die meist als Dreh-, Drücksteller mit umliegend angeordneten Funktionstasten ausgeführt sind. Eine wachsende Bedeutung spielen aus der Unterhaltungselektronik bekannte berührungssensitive Oberflächen mit kapazitiver Technologie. Sie lassen sich auch für zentrale Bedienelemente nutzen, Abb. 8.69.



**Abb. 8.67** Combiner-HUD als Plattformlösung für viele Fahrzeugbaureihen (Quelle: Continental)





**Abb. 8.68** AR-HUD mit Abstandshinweisen als Teil der realen Außenansicht (Quelle: Continental)



**Abb. 8.69** Zentrales kapazitives Eingabeelement mit gekrümmter kapazitiver Oberfläche aus Glas (Quelle: Continental)

Funktionen wie die Erkennung von Multi-Touch-Gesten sowie die Eingabe von Schriftzeichen, die der Fahrer einfach mit dem Finger auf eine solche kapazitive Oberfläche eingibt, sind damit besonders ergonomisch realisierbar. Mittels programmierbarer haptischer Rückmeldung kann dem Fahrer eine erfolgreiche Eingabe bestätigt werden, was die Blindbedienbarkeit ausbaut [177, 178]. Sprachbedienung stellt eine weitere HMI Modalität dar, die sich bereits als Eingabemöglichkeit im Fahrzeug etabliert hat.

Auch das Fahrpedal (ugs. „Gaspedal") kann Teil des HMI sein. Beim Active Force Feedback Pedal (AFFP) dienen Gegenkraftimpulse am Fahrpedal dazu, dem Fahrer diskrete Hinweise für einen sicheren und effizienten Fahrstil zu geben.

### 8.5.3.5 Connectivity

Die Digitalisierung der Mobilität ist in vollem Gange und schafft neue Möglichkeiten das Fahren effizienter, sicherer und komfortabler zu machen. Ausgangspunkt war die komfortable Verbindung von Smart Devices wie z. B. Smartphones mit dem Fahrzeug und der Einzug von Onlinediensten und Apps ins Fahrzeug. Diese Entwicklung wird sich mit einer immer besseren Integration fortsetzen. Vorlieben und individuelle Voreinstellungen von Geräten werden nahtlos ins Auto übertragen. Darüber hinaus ermöglicht die immer stärkere Digitalisierung und Vernetzung die Nutzung neuer Datenquellen für die intelligente Steuerung des individuellen und gewerblichen Transports. So erlaubt etwa die Auswertung von Sensordaten vorausfahrender Verkehrsteilnehmer die Vorhersage kritischer Verkehrssituationen noch bevor diese zu einer Gefahr für nachfolgende Fahrzeuge werden. Ebenso können Daten aus der Infrastruktur für mehr Sicherheit und Komfort genutzt werden. Eine ganzheitliche Vernetzung verbindet Fahrzeuge weltweit nahtlos und in vielfältiger Weise: mit dem Fahrer, mit anderen Fahrzeugen, mit mobilen Endgeräten und mit der Infrastruktur. Das System besteht dabei aus verbundenen Hardware- und Software-Komponenten und ermöglicht so sichtbare und unsichtbare Dienste.



**Abb. 8.70** Holistischer HMI Ansatz mit der Möglichkeit mittels Gestensteuerung Anzeigeinhalte zwischen verschiedenen Anzeigeorten zu verschieben (Quelle: Continental)

Beispiele für Connectivity-Funktionen sind eHorizon, Passives Zugangskontroll- und Startsysteme (PASE), Intelligente Antennenmodule, Reifendrucküberwachung und Intelligente Telematik-Systeme.

### 8.5.3.6 Holistischer HMI Ansatz und Automatisiertes Fahren

Die ganzheitliche Mensch-Maschine-Schnittstelle ist ein systemübergreifender Ansatz, bestehend aus vernetzten Hard- und Softwarekomponenten, die sich dynamisch an Präferenzen und Bedürfnisse des Benutzers sowie an Situation und Umgebung anpassen. Diese ordnet Informationen und gestaltet den Zugang zu diesen schnell und übersichtlich, wobei zugleich Fahrsituation und Fahrerzustand berücksichtigt werden.

Darüber hinaus erhält der Fahrer zuverlässige Rückmeldungen zu jeder Aktion, die er veranlasst, wodurch das Vertrauen in die einzelnen Funktionen des Fahrzeugs gestärkt wird. Zusätzlich signalisiert das Fahrzeug deutlich, dass der Fahrer jederzeit Herr des Geschehens ist und bleibt. Das sind die grundlegenden Herausforderungen, die eine zukunftsweisende, ganzheitliche Mensch-Maschine-Schnittstelle meistern muss. Dies gilt insbesondere auch mit Blick auf zukünftige Anwendung wie das Automatisierte Fahren.

Abhängig vom Level des automatisierten Fahrens informiert das HMI den Fahrer über den Fahrzustand und darüber welche Ausprägung die Fahraufgabe hat (Überwachen bzw. aktive Kontrolle der Längs- und Querdynamik). Dieses sogenannte „Driver-in-the-Loop" Verhalten kann z. B. durch gezielte visuelle Informationen im Augmented Reality Head-up-Display oder Kombi-Instrument abgedeckt werden, da diese im primären Sichtbereich des Fahrers angeordnet sind.

### 8.5.3.7 Ausblick

Die Bedeutung der Displaytechnik im automobilen HMI wird weiter steigen, weil sie in Form von Freiprogrammierbaren Kombiinstrumenten FPKs, AMOLED-Instrumenten und dem AR-HUD neue Visualisierungsmöglichkeiten bietet. Im Hinblick auf die rapide fortschreitende Anbindung des Fahrzeugs an das Internet (z. B. Nutzung von Apps) sowie das automatisierte Fahren steigt die Bedeutung ganzheitlicher HMI Konzepte, die den Fahrer situationsgerecht unterstützen [174].

Die Rechen- und Speicherkapazitäten der Elektroniksysteme werden weiter zunehmen, da

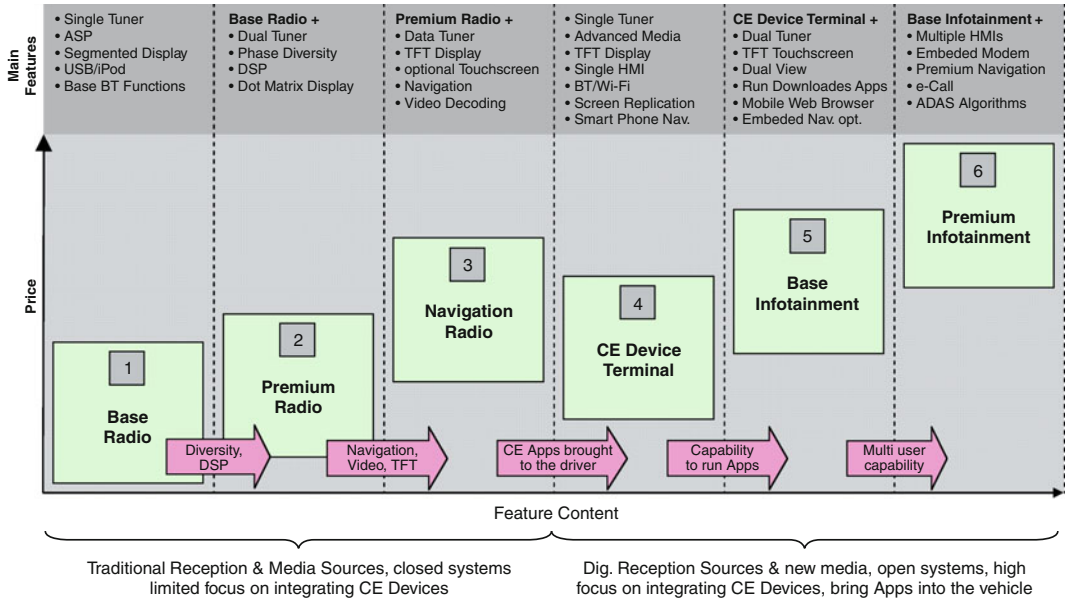



**Abb. 8.71** Übersicht Infotainmentsegmente

aufgrund der zu erwartenden Funktionsvielfalt auch der Softwareanteil weiter wächst. Eine neue Entwicklung ist der Einsatz von Mehrkern-Prozessorsystemen (eng. Multicore-CPU) und einer Virtualisierung mittels Hypervisor Technologie, um so unterschiedliche Softwarewelten wie AUTOSAR, GENIVI/Linux und Android sicher nebeneinander auf einer Hardware integrieren zu können [179].

Für vernetzte Fahrzeuge und automatisiertes Fahren bildet das ganzheitliche HMI eine Schlüsselkomponente, weil es als am jeweiligen Nutzerbedarf orientiertes Konzept Transparenz in der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug schafft. Neue HMI-Anteile, wie etwa Kamerasysteme, die den Fahrer beobachten, schaffen die Grundlage dafür, den Kommunikationsfluss vom Fahrzeug zum Fahrer zu einer wechselseitigen Interaktion zu machen, bei das Fahrzeug auch Informationen über den Fahrer verarbeitet [178].

## 8.5.4 Infotainment/Multimedia

### 8.5.4.1 Einleitung

Unter einem Infotainmentsystem versteht man im Automobilbereich ein System, welches verschiedene Funktionen im Bereich Information und Entertainment bereitstellt. Das Infotainmentsystem ermöglicht die zentrale Steuerung dieser Bereiche mit den jeweiligen Unterfunktionen und stellt weiterhin auch häufig die Benutzerschnittstelle für weitergehende Fahrzeugfunktionen, die selbst in anderen Geräten untergebracht sind.

Abb. 8.71 gibt einen Überblick über die wichtigsten Marktsegmente im Bereich Infotainment sowie eine Zusammenstellung der wichtigsten Funktionen die in den einzelnen Segmenten angeboten werden.

Erwähnenswert ist hierbei die Abgrenzung zwischen den „geschlossenen Systemen“ (Segmente 1–3) sowie den „Offenen Systemen“ (Segmente 4–6). Die geschlossenen Systeme stellen derzeit noch den Standard auf dem Markt dar. Sie sind nicht offen für sog. „Apps“ (→ Applikationen wie sie in sog. „App Stores“ erworben werden können) was bedeutet, dass die Funktionalität des Gerätes über die Lebensdauer nicht erweitert werden kann. Im Gegensatz dazu können die offenen Systeme mit Hilfe von Apps bei Bedarf in ihrem Funktionsumfang erweitert werden. Für diese Art von Infotainmentsystemen ist für die nächsten Jahre ein rasantes Wachstum vorhergesagt, getrieben durch das Bedürfnis im Fahrzeug eine ähnliche Funktio-

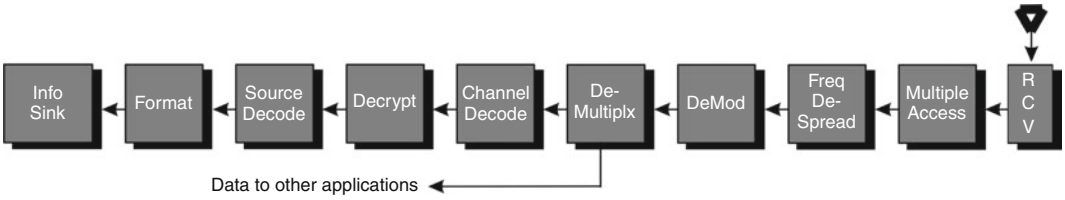



**Abb. 8.72** Signalpfad bei HD Radio

nalität zur Verfügung gestellt zu bekommen wie es bei Mobiltelefonen bzw. Smartphones der Fall ist.

In den folgenden Unterkapiteln werden nun zunächst die wichtigsten Funktionen bzw. Einzelkomponenten der Infotainmentsysteme betrachtet.

### 8.5.4.2 Broadcast

Unter Broadcast versteht man die Übertragung von Informationen, Audio oder Video, von einem zentralen Sender an viele Empfänger gleichzeitig. Klassisch ist Broadcasting die Ausstrahlung und der Empfang von analogen Radio- und Fernsehsendungen. In jüngerer Vergangenheit sind daneben digitale Übertragungsverfahren aufgekommen, die mittelfristig die analoge Technik vollständig ersetzen werden. Dabei bleibt die grundsätzliche Eigenschaft des Broadcasting, die Verbindung eines Senders mit vielen Empfängern ohne Rückkanal erhalten.

#### 8.5.4.2.1 Audio Broadcast

**AM/FM Radio**

Die etabliertesten Broadcast-Technologien, analoge Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM), sind seit Jahrzehnten in Gebrauch. Amplitudenmodulation für Audiorundfunk wird vorwiegend auf Mittel-, Lang- und Kurzwelle (ca. 520–1710 kHz/150–300 kHz/2,3–26 Mhz) verwendet, während Frequenzmodulation mit deutlich besserer Störfestigkeit im Ultrakurzwellenbereich (UKW, 88–108 MHz) eingesetzt wird. Bei Amplitudenmodulation wird nur ein Audiosignal auf jeweils einer Trägerfrequenz gesendet; die derzeitig verwendete Variante der Frequenzmodulation trägt Stereo-Audio sowie einige Daten nach dem RDS Standard pro Träger. In den USA wird zusätzlich digitales Audio und Daten nach dem in-band-on-channel (IBOC) Verfahren übertragen. Zum Empfang von FM Signalen im Auto kommen häufig Doppeltuner zum Einsatz, die aus den schwankenden Signalen zweier Antennen jeweils das günstigere auswählen.

Neben dem traditionellen Rundfunk auf UKW, Mittelwelle und Kurzwelle entwickeln sich weltweit mehrere digitale Standards. Sie zeichnen sich durch eine verbesserte Klangqualität und zusätzliche Datendienste aus.

**Digitalradio**

**HD Radio**

Eine effiziente Möglichkeit, die Klangqualität zu verbessern und gleichzeitig die bestehende FM Infrastruktur zu erhalten ist HD-Radio. Hierbei werden die 200kHz Abstände zwischen den Sendern benutzt, um zusätzliche digitale Informationen zu versenden – hier können digitale Daten und mehrere digitale Audiokanäle untergebracht werden. Das Verfahren nennt sich In-Band-On-Channel (IBOC) und findet in den USA Anwendung, ist jedoch andernorts wenig verbreitet. Moduliert wird im Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex (COFDM)-Verfahren. Hierbei wird das kodierte Signal mit einer Fehlerkorrektur versehen und dann über mehrere modulierte Trägerfrequenzen verteilt gesendet. Das Verfahren sorgt dafür, dass die sonst üblichen Störgeräusche und Signalschwankungen, so genannte Kanalfadings und Überlagerungen, nicht mehr auftreten. Der komplette Daten/Signalpfad ist in Abb. 8.72 gezeigt.

**Digital Audio Broadcasting (DAB)**

Die Verbreitung von Radioprogrammen auf UKW stößt an ihre Grenzen, da die Frequenzen angesichts der Vielzahl von Veranstaltern knapp werden.

Weiterhin unterliegen analoge Funksignale unterschiedlichen Arten von Störungen wie z. B. Reflektionen, die u. a. durch Berge, Gebäude und Witterungseinflüsse verursacht werden. DAB ist ein digitales System zur terrestrischen Übertragung von Daten aller Art. Es wurde im Rahmen des Eureka 147 Projektes entwickelt und bietet nahezu CD Qualität, sowie zusätzliche Radio- und Datendienste. Die Codierung der Audiodaten erfolgt über MP2 (DAB), AAC (DAB+) und AAC bzw. BSAC (DMB).

DAB verwendet die folgenden beiden Frequenzbänder:

1. das Band III (174-240 MHZ),
2. das L-Band (1452-1492 MHZ).



In Deutschland wird in beiden Frequenzbereichen gesendet, während in Großbritannien nur im Band III und in Kanada nur im L-Band gesendet wird. Das L-Band wird in Deutschland für lokale Ausstrahlungen genutzt während das Band III landesweit zu empfangen ist.

Beim Digitalradio muss der Hörer keine Frequenz mehr einstellen. Mehrere Programme, deren Namen auf dem Display angezeigt werden können, sind in sog. Ensembles auf einer Frequenz zusammengefasst. Ensembles werden regional unterschiedlich angeboten. Die Rundfunkstationen strahlen in der Regel programmbegleitende Informationen wie z. B. Liedtitel, Komponist oder Albumname aus, die vom Empfänger angezeigt werden können. Die Betriebskosten von DAB sind verglichen mit UKW geringer, obwohl mehr Sender notwendig sind um eine gleichgroße Fläche abzudecken.

Beim Einsatz im Automobilbereich geht der Trend zum Doppeltuner wobei der zweite Tuner folgende Funktionen haben kann:

- Aktualisierung der Senderlisten,
- Empfang von Datendiensten außerhalb des aktuellen Ensembles,
- Diversity Empfang (ähnlich wie beim verbreiteten AM/FM Doppeltuner).

#### Satellite Digital Audio Radio Services (SDARS)

Das digitale Satellitenradio ist in den USA mittlerweile sehr erfolgreich. Dem Zuhörer stehen etwa 150 Kanäle zur Verfügung, angefangen vom Musikspartensender über Informationssendungen bis hin zu Verkehrsinformationen. Alle Kanäle werden in den gesamten USA in annähernder CD-Qualität ausgestrahlt. Die Empfänger werden durch Bezahlung einer monatlichen Gebühr freigeschaltet. Der Anbieter Sirius/XM verwendet ein Hybrid-Übertragungssystem aus Satelliten und terrestrischen Sendern. Das Modulationsverfahren der terrestrischen Transmitter ist COFDM, die Satelliten benutzen QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Die Satellitenträgerfrequenz beträgt 2,3 GHz.

#### Digital Radio Mondiale (DRM)

Eine weitere Alternative zum konventionellen Rundfunk ist DRM. Hierbei werden digitale Audiodaten und Informationen über Kurz-, Mittel- und Langwelle versendet, womit sehr große Reichweiten erreicht werden können. Die sehr schmalen Kanalbreiten erfordern eine leistungsstarke Komprimierung der Audiodaten. Hierfür wurde der MPEG4 AAC Codec in Kombination mit einem Spectral Band Replication (SBR) Verfahren ausgewählt. SBR ermöglicht eine weitere Datenreduktion um 40 %. Als Modulationsverfahren wurde ebenfalls das COFDM-Verfahren verwendet. Somit ergibt sich eine quasi-UKW Klangqualität mit großer Reichweite. Außerdem lassen sich Zusatzinformationen wie Programmnamen und Textmeldungen übertragen. DRM wird seit 2003 ausgestrahlt, hat aber bisher keine sehr große Abdeckung.

Beim etwas neueren DRM+ handelt es sich um eine Weiterentwicklung von DRM, die ebenfalls einen Übertragungsmodus für das FM-Band vorsieht.

### 8.5.4.2.2 Video Broadcasting

Ebenso wie der digitale Radioempfang wird auch der digitale Fernsehempfang als Funktion in Infotainmentsystemen angeboten. Üblicherweise wird dieser deaktiviert sobald sich das Fahrzeug in Bewegung setzt. Wie im Heimbereich gibt es weltweit eine Vielzahl unterschiedlicher Standards, die in Abb. 8.73 dargestellt sind.

#### Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T)

Das im Heimbereich schon sehr weit verbreitete DVB-T wird zunehmend auch für den digitalen

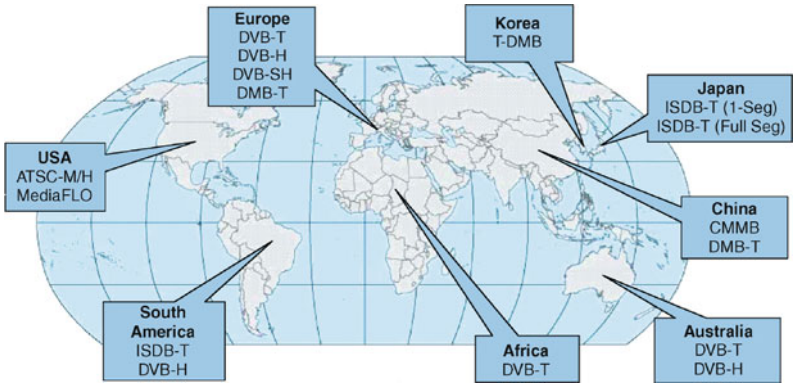



**Abb. 8.73** Übersicht digitaler Fernsehstandards

Empfang von Fernsehprogrammen im Fahrzeug genutzt. Da DVB-T ursprünglich nicht für bewegte Empfänger entwickelt wurde, wird im Fahrzeug ein (im Vergleich zum Heimempfänger) aufwändigerer Doppeltuner benötigt. Dieser garantiert einen weitgehend störungsfreien Empfang auch oberhalb von 80 km/h.

DVB-T arbeitet mit MPEG2-codierten Fernsehsignalen. Als Modulationsverfahren kommt COFDM zum Einsatz. Der Nachfolgestandard DVB-T2 zeichnet sich durch eine höhere Effizienz aus und verwendet MPEG-4 codierte Signale.

**Advanced Television Systems Committee (ATSC)**
Bei ATSC handelt es sich um eine amerikanische Organisation die Standards für digitales Fernsehen festlegt. Sie wurde 1982 gegründet und hat ihren Sitz in Washington, D. C.

Der ATSC Standard soll das bisherige amerikanische NTSC-Fernsehsystem ersetzen und bietet Vorteile in der Auflösung der Bilder. ATSC unterstützt Bilder im 16:9 Format mit bis zu 1920x1080 Pixel was in etwa der sechsfachen Auflösung des NTSC Standards entspricht.

**Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial (ISDB-T)**
Dieser Standard für digitale Medienübertragung basiert auf MPEG-2 und wurde 1999 in Tokio eingeführt. Er erlaubt mehrere Modulationsverfahren und kann so den vielfältigen Inhalten bei der Medienübertragung gerecht werden. Bei Bedarf können mobile Endgeräte (z. B. Mobiltelefone) Daten in reduzierter Qualität mit geringerer Bandbreite empfangen.

### 8.5.4.3 Medien

#### 8.5.4.3.1 Lokale Medienquellen

Aktuelle Infotainmentsysteme werden mit CD- oder DVD-Laufwerken, teilweise auch mit zusätzlicher Festplatte als Massenspeicher ausgestattet. CD-Laufwerke befinden sich bereits auf dem Rückzug, einerseits aus Kostengründen, andererseits weil sie aus Speicherplatzgründen nicht mehr das bevorzugte Medium für die Musikbibliothek sind. Deutlich beliebter sind hierfür USB Stick und Mediaplayer die noch in den nachfolgenden Kapiteln behandelt werden. In Asien und Südamerika werden DVD-Laufwerke noch etwas länger eingesetzt werden, da hier ein Fokus auf dem Abspielen von Videos liegt.

Bei höherwertigen Infotainmentgeräten werden fest verbaute Festplatten verwendet zum Aufbau einer Musikbibliothek im Fahrzeug sowie dem Speichern der Navigationskarten. Eine Ablösung der mechanischen Festplatten durch Flashspeicher (SSD, solid state disk) ist bei sinkenden Preisen, geringerem Bauraum und höherer Ausfallsicherheit immanent.

#### 8.5.4.3.2 Connectivity

Die Bedeutung von Connectivity hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Während Infotainmentsysteme in der Vergangenheit in erster Linie auf lo-

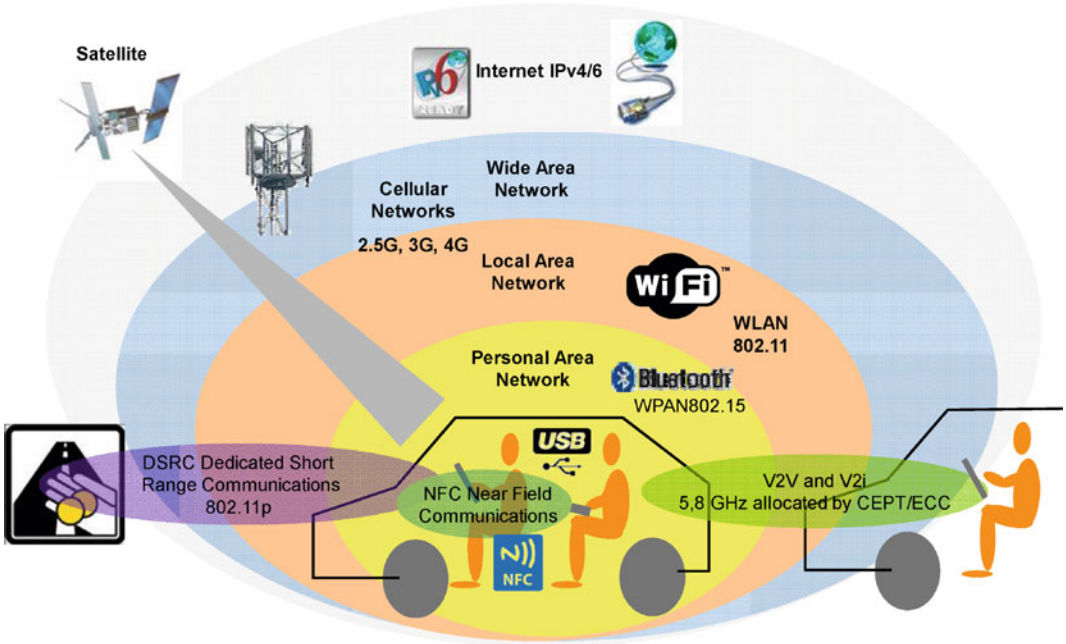



**Abb. 8.74** Übersicht Connectivity Technologien

kale Medienquellen zugegriffen haben (siehe ▶ Abschn. 8.5.4.3.1), gewinnt die Vernetzung mit mobilen Geräten (z. B. USB Stick, MP3-Player, Mobiltelefon) sowie Infrastrukturen außerhalb des Fahrzeuges zunehmend an Bedeutung. Die Insassen eines Fahrzeuges erwarten inzwischen, dass o. g. mobile Geräte aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik mit dem Fahrzeug vernetzt werden können, sodass ihre Funktionen in das Infotainmentsystem des Fahrzeuges integriert sind. Für den Fahrer spielt hier die Sicherheit eine große Rolle, da aus den zusätzlichen Funktionen keine Ablenkung resultieren darf.

Abb. 8.74 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Technologien, die zur Vernetzung innerhalb des Fahrzeuges bzw. zur Herstellung einer Verbindung mit einer Infrastruktur außerhalb des Fahrzeuges dienen. Diese Technologien werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

#### Nomadic Device Connectivity

Hierbei wird eine Verbindung innerhalb des Fahrzeuges zwischen einem sog. „Nomadic Device" (z. B. iPOD, USB Stick, Mobiltelefon, Smartphone, etc.) und dem Infotainmentsystem hergestellt. Diese Verbindung kann entweder drahtlos oder drahtgebunden erfolgen. Wird eine Verbindung zu einem Mobiltelefon bzw. Smartphone hergestellt, besteht die Möglichkeit dieses als Zugangspunkt zum Internet zu verwenden.

Die hierfür derzeit gängigsten Technologien werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

#### USB

USB ist ein serieller Bus mit weiter Verbreitung in der Computertechnik. Standardisiert sind die physikalische Ebene (Kabel, Stecker, Signalpegel, Stromversorgung) bis hin zu den Protokollen zum Ansprechen verschiedener Geräteklassen, vom einfachen Speicher über HID „Human Interface Devices", bis hin zu Kommunikationsschnittstellen und einer Vielzahl weiterer Geräte. Standardgeräte lassen sich über im Hostgerät vorhandene Treiber ansprechen, während viele spezielle USB Geräte die Nachinstallation spezieller Treiber erforderlich machen. Im Fahrzeug werden in der Regel MSC (Mass Storage Class) Speichergeräte sowie Streaming stan-

dardmäßig genutzt; darüber hinaus verwenden verschiedene nicht-USB Protokolle wie MTP, MirrorLink, CarPlay die USB Datenverbindung.

Die Datenübertragung erfolgt symmetrisch über zwei verdrillte Leitungen. Übertragen wird das Datensignal auf der einen und das invertierte Datensignal auf der anderen Leitung; dies reduziert Abstrahlung und Störungen durch elektromagnetische Felder. Damit werden Bruttodatenübertragungsraten von ursprünglich 12 Mbps (USB 1.0) über 480 Mbps (USB 2.0) bis zu 5 Gbps (USB 3.0) möglich.

Zwei weitere Leitungen im 4poligen Kabel und Stecker dienen zur Stromversorgung der angeschlossenen Geräte, wobei je nach speisendem Gerät bis zu 100 mA, 500 mA, 1 A oder 2,1 A bei jeweils 5 V möglich sind.

#### Bluetooth (BT)

Bluetooth ist ein offener Standard zur drahtlosen Kommunikation zwischen Desktop- und Laptop-Computern, PDAs, Mobiltelefonen, Druckern, Scannern und sogar Haushaltsgeräten. Eine weltweite Kompatibilität ist über die Benutzung des global verfügbaren Frequenzbandes von 2,4 GHz gewährleistet. Bluetooth wurde ursprünglich von Ericsson entwickelt und nun von der Special Interest Group (SIG) vorangetrieben. Die SIG ist eine Interessengemeinschaft von mehr als 8000 Firmen, die an der Weiterentwicklung und Verbreitung der Technologie interessiert sind. Sie ist Eigentümer des Bluetooth-Warenzeichens und Herausgeber der Bluetooth-Spezifikation. Diese beinhaltet den Link Layer und den Application Layer, diese unterstützen Daten, Sprache und Applikationen.

Da verschiedene Anwendungen unterschiedliche Anforderungen haben, wurden diese in sogenannten Profilen zusammengefasst, die im Bluetooth Standard definiert werden. Die Profile regeln den Austausch der Daten zwischen den kommunizierenden Bluetooth Geräten. Nach dem Aufbau der Bluetooth Verbindung tauschen die Geräte ihre Profile aus und legen dadurch fest, welche Dienste sie für das jeweils andere Gerät zur Verfügung stellen können bzw. welche Daten und Befehle sie für die Kommunikation benötigen.

Beim Kauf von Geräten muss unbedingt auf die Kompatibilität der Profile geachtet werden, da ansonsten keine fehlerfreie Kommunikation gewährleistet ist. Die unterstützten Profile werden üblicherweise auf der Verpackung bzw. Bedienungsanleitung der Geräte angegeben.

Im Fahrzeug wird Bluetooth primär für die Einbindung von Mobiltelefonen in die Freisprechfunktion des Infotainmentgerätes verwendet; die dazu grundsätzlich erforderlichen Profile werden von nahezu allen Telefonen mit Bluetooth im Prinzip unterstützt. Jedoch gibt es im Detail unterschiedliche Implementierungen des Standards, sodass im Einzelfall möglicherweise nicht alle Funktionen eines Gerätes unterstützt werden. Dies führt gelegentlich zur Notwendigkeit der Nachbesserung des Infotainmentgerätes, wenn nach Serienanlauf ein populäres neues Telefon nicht vollständig funktioniert.

Weiterhin werden im Fahrzeug häufig Audiostreaming (AVRCP/A2DP), Telefonbuchzugriff (PBAP) und Nachrichtenzugriff (MAP)-Profile verwendet. Weniger häufig sind Simkartenzugriff (SAP) und Netzwerkprotokolle (DUN/PAN) anzutreffen, wobei auch die Unterstützung auf der Telefonseite nicht immer gegeben ist.

Darüber hinaus ist die Liste der freigegebenen bzw. in der Entwicklung befindlichen Profile mittlerweile lang. Es wird deshalb an dieser Stelle auf eine detaillierte Auflistung verzichtet. In Abb. 8.75 ist der für Bluetooth notwendige Software Stack im Vergleich zum OSI Referenzmodell dargestellt.

#### WiFi

In einigen Ländern wird WiFi als Synonym für WLAN (Wireless Local Area Network) verwendet. Es handelt sich um einen für Marketingzwecke erfundenen Kunstbegriff, der auch ein Firmenkonsortium (das Geräte mit Funkschnittstellen zertifiziert) bezeichnet. Diesem gehören mehr als 300 Unternehmen an, die Produkte verschiedener Hersteller auf der Basis des IEEE-802.11 Standards zertifiziert. Hierdurch soll die fehlerfreie Kommunikation zwischen den Geräten, die das WiFi Logo tragen, gewährleistet werden.

Im Infotainmentbereich ist WiFi noch nicht sehr weit verbreitet, jedoch zeigen Marktprognosen einen langsamen Anstieg. Vorteil gegenüber dem weit verbreiteten Bluetooth 2.0 ist die deutlich höhere Übertragungsgeschwindigkeit, die jedoch vom neuen Bluetooth 3.0 Standard auch erreich wird.

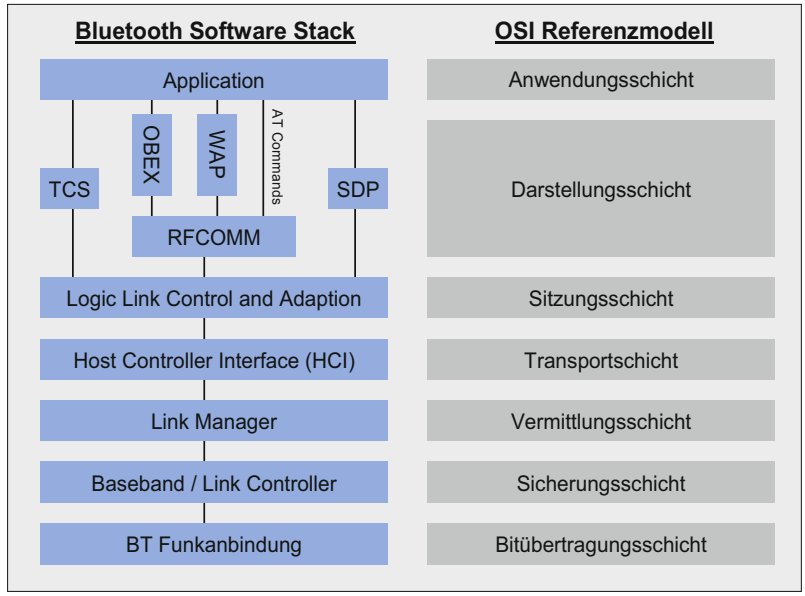



**Abb. 8.75** Vergleich des BT Software Stacks mit dem OSI Referenzmodell

Im Gegensatz zu Bluetooth gibt es keine definierten Profile zur Regelung der Datenübertragung für die gebräuchlichsten Anwendungsfälle, weshalb für eine wirksame Verbindung weitere Kommunikationsstandards von beiden Seiten unterstützt werden müssen.

Grundsätzlich sind für ein lokales WiFi Netzwerk ursprünglich ein „Access Point" (AP) sowie eine oder mehrere „Stations" (STA) erforderlich. Eine Verbindung zwischen nur zwei Geräten kann auch mit „WiFi direct" erreicht werden, ist jedoch weniger gängig. Damit im Fahrzeug eine WiFi Kommunikation möglich wird, wird i. d. R. das Infotainmentgerät die Rolle des AP stellen. Damit ist es aber gleichzeitig nur mit erhöhtem Aufwand möglich, dass sich das Infotainmentsystem über WiFi in einen anderen AP (z. B. einen Internet Hotspot) einloggt.

Bereits im Fahrzeug erhältlich sind Infotainmentsysteme, die WiFi unterstützen und selbst als Hotspot agieren können. D. h. dass Fahrzeuginsassen eine WiFi Verbindung von ihrem Notebook zum Infotainmentsystem aufbauen können, worüber wiederum eine Internetverbindung z. B. über die Telematics Unit des Fahrzeuges aufgebaut werden kann.

**SD Memory Card**

Eine SD Memory Card (Kurzform für Secure Digital Memory Card) ist ein Digitales Speichermedium, was nach dem Prinzip der Flash-Speicherung (Flash-EEPROM) arbeitet. Die Bezeichnung „Secure Digital" resultiert aus zusätzlich implementierten Hardware-Funktionen, die das sog. „Digital Rights Management" (DRM) unterstützen. Hierdurch wird das unrechtmäßige Abspielen geschützter Mediendateien verhindert.

SD Karten gibt es in unterschiedlichen Bauformen (SDHC, miniSD, microSD), wobei in Infotainmentsystem üblicherweise SDHC Karten mit maximal 32 GB Speicherkapazität unter dem Filesystem FAT32 eingesetzt werden. Sie werden bevorzugt zur Speicherung der Navigationskarten eingesetzt und haben in diesem Bereich in den letzten Jahren die CD und DVD verdrängt. Karten höherer Kapazität erfordern ein geeignetes Filesystem, z. B. xFAT oder NTFS.

Obwohl heutige Infotainmentsysteme bevorzugt USB Ports im Bereich der Nomadic Device Connectivity zur Verfügung stellen, haben SD Karten einen wesentlichen Vorteil in der Bauform. Während USB Sticks je nach Anbringung der Schnittstelle einige Zentimeter abstehen (was bei

der Crashsicherheit ein Problem darstellen kann) lassen sich SD Karten einfacher im Gerät versenken wobei sie bündig mit der Frontblende abschließen.

#### TerminalMode

Hinter dem Begriff „TerminalMode" verstecken sich mehrere konkurrierende Softwareprotokolle, die alle den Zweck verfolgen, die Anzeige eines angeschlossenen Smartphones auf das Display des Infotainmentsystems auszugeben, und umgekehrt die HMI Bediengeräte des Infotainmentsystems zur Steuerung des Mobiltelefons zu verwenden. Damit ist es im Wesentlichen möglich, alle Funktionen des Smartphones, einschließlich der geladenen Apps, dem Infotainmentsystem zur Verfügung zu stellen. Hierdurch wird das Infotainmentsystem im Fahrzeug befähigt, der rasanten Entwicklung der Smartphones zu folgen, ohne selbst geändert werden zu müssen.

Die verschiedenen TerminalMode Implementierungen benutzen auf den niedrigeren Ebenen des OSI Referenzmodelles verschiedene Standards, soweit dies von Smartphones typisch unterstützt werden. So erfolgt die physikalische Verbindung meist über USB oder WiFi, und es liegen „Virtual Network Computing" (VNC) Protokolle aus der IT Welt zugrunde.

Als TerminalMode-Implementierungen werden auf Smartphones im Moment MirrorLink (C4A Konsortium), CarPlay (Apple) oder Android Auto (Android) auf der Telefonseite herstellerseitig unterstützt; und es gibt weitere Protokolle Dritter (wie z. B. AppLink (Ford/Genivi)), die dann auf dem Smartphone nachinstalliert werden müssen. Das Infotainmentsystem muss seinerseits alle gewünschten Protokolle unterstützen.

#### Infrastructure Connectivity

Hierunter versteht man eine drahtlose Datenübertragung zwischen dem Infotainmentsystem und einer Infrastruktur außerhalb des Fahrzeuges (z. B. Server). Diese Verbindung kann entweder bidirektional (GSM, WiFi) oder unidirektional als Broadcast (► Abschn. 8.5.4.3) (AM/FM Radio, Digitalradio, Digitalfernsehen) bestehen.

#### Global System for Mobile Communications (GSM)

Dieser weit verbreitetet Standard für Mobilfunknetze wurde in seinen Anfängen hauptsächlich für Telefonie und Kurzmitteilungen (SMS), inzwischen aber verstärkt für leitungs- und paketvermittelte Datenübertragung genutzt. Es handelt sich um einen Telefonstandard der zweiten Generation (2G), da die Übertragung im Gegensatz zur ersten Generation (A-, B- und C-Netz) komplett digital erfolgt. In Europa verwendet der GSM-Standard die Frequenzbereiche 900 MHz und 1800 MHz, in den USA wird der Frequenzbereich 1900 MHz verwendet.

#### Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Hierbei handelt es sich um einen Mobilfunkstandard der dritten Generation (3G), mit dem im Vergleich zu GSM deutlich höhere Datenübertragungsraten möglich sind (bis zu 14,4 MBit/s). UMTS ermöglicht erweiterte multimediale Dienste wie z. B. Audio- und Videotelefonie, Nachrichtendienste und Internetzugang.

#### Long Term Evolution (LTE)

Hierunter versteht man einen Mobilfunkstandard, der als UMTS Nachfolger vom „3rd Generation Partnership Project" (3GPP) definiert wird. LTE wird üblicherweise als Mobilfunkstandard der vierten Generation (4G) angesehen. Bei einer Bandbreite von 20MHz sollen Datenraten von bis zu 300 MBit/s im Downlink und bis zu 75 MBit/s im Uplink erreichbar sein.

Seit der flächendeckenden Einführung von LTE ca. 2015 ist nun auch schon die Rede von der nächsten Generation der „5G" Netzwerke, mit denen aber erst weit jenseits 2020 zu rechnen ist.

### 8.5.4.4 HMI

#### 8.5.4.4.1 Herausforderungen

Klassisch ist das Autoradio in der Mittelkonsole der Vorgänger eines modernen Infotainment-Steuergerätes. Während jedoch das Autoradio noch eine Benutzeroberfläche ähnlicher Komplexität wie das in der Regel direkt darunter befindliche Klimasteuergerät aufweist, erfordern erweiterte moderne Infotainmentfunktionen weitaus mehr an Benutzerinteraktion. Damit erhält ein modernes Infotainmentgerät eine graphische Bedienoberfläche mit einem hochauflösenden Farbdisplay sowie dazu passende Eingabegeräte. Die Benutzerschnittstelle für Infotainment ist demzufolge so komplett

und anpassbar ausgestattet, dass sie durchaus auch die Bedienung anderer Fahrzeugfunktionen wie z. B. Klimatisierung ersetzten und mit übernehmen kann.

Die Benutzerschnittstelle (HMI, „Human-Machine Interface“) für Infotainment hat viele Anforderungen zu erfüllen.

Zum einen bedingen es die Funktionen von Infotainment, dass sehr viele Parameter erreichbar sein müssen, von denen einige wiederum einen sehr großen Wertebereich annehmen können. Beispielhaft sei die Zieleingabe bei der Navigation genannt: die Auswahl einer Adresse, bestehend aus Land, und dazu passend Stadt, Straße und Hausnummer, mit möglichst wenigen Eingaben und zudem tolerant gegenüber abweichenden Schreibweisen und Zuordnungen kann durchaus eine Herausforderung sein. Ähnliches kann für die Auswahl eines bestimmten Musiktitels aus einer Auswahl von einigen tausend auf der Festplatte gelten.

Gleichzeitig soll die Bedienung während der Fahrt ohne große Ablenkung des Fahrers möglich sein; das setzt eine intuitive und effektive Bedienerführung in Verbindung mit übersichtlicher Bildschirmgestaltung und gut zugänglichen Anzeige- und Bedienelementen voraus.

Außerdem stellt die für den Benutzer sehr sichtbare Benutzerschnittstelle das größte Potential dar, ein Fahrzeug in Punkto Infotainment von anderen zu unterscheiden. Die Benutzerschnittstelle mit all ihren Gestaltungsmöglichkeiten wird von den Fahrzeugherstellern bewusst zur Unterscheidung zwischen Fahrzeugen verschiedener Modelle und Marken herangezogen.

Bei der Gestaltung der HMI wirken sich beschränkend die Kosten aus: hochauflösende Displays, die Rechenleistung zur Erzeugung komplexer graphischer Animationen mit hohen Bildwiederholfrequenzen sowie Speicherplatz für unterstützende Daten wie Kartenmaterial, Cover Art oder die Fotos der Kontakte im Telefonbuch tragen spürbar zu den Gesamtkosten des Systems bei.

#### 8.5.4.4.2 HMI Struktur

Bedingt durch die Vielfältigkeit der Funktionen können der Entwurf und die Umsetzung eines HMI sehr umfangreich sein. Der Entwurf muss unterschiedliche Aspekte unterstützen:

- die äußere Erscheinung gegenüber dem Benutzer, auch Präsentation genannt, berücksichtigt durch das „graphical design“,
- die Logik der Bedienung, implementiert durch ein „interaction design“,
- die gegebenen Eigenschaften der zu bedienenden Funktion.

Diese Aspekte können in einem entsprechend strukturierten HMI design unabhängig voneinander umgesetzt werden. Man spricht dann von einem „model-view-controller“ Design (◘ Abb. 8.76).

Bei dieser Strukturierung des HMI verbessert sich dadurch bezüglich seiner Wartbarkeit und Wiederverwendbarkeit: bei Änderungen in einem Aspekt können die anderen unverändert erhalten bleiben. Dies tritt beispielsweise in den folgenden Fällen auf:

- ein Gerät soll für Anwendungen in verschiedenen Fahrzeugreihen unterschiedlich erscheinen – hier wird die Präsentation angepasst, während Modell und Steuerung identisch bleiben,
- eine zu bedienende Funktion verändert sich strukturell, z. B. durch Austausch eines angeschlossenen Gerätes oder Dienstes – eine Anpassung des Modells kompensiert dies während die Änderung für den Benutzer transparent bleibt.

**Modell**

Das Modell repräsentiert an seiner Schnittstelle zu Präsentation und Steuerung ein normalisiertes Bild der Funktion und ihrer Zustandsdaten, unabhängig von deren konkreter Umsetzung. Mehrere Modelle repräsentieren alle im System vorhandenen Funktionen, soweit diese eine Benutzerschnittstelle haben.

**Präsentation**

Die Präsentationsschicht ist für die Darstellung der Zustände und Daten aus dem Modell sowie für die Form der Benutzerinteraktionen zuständig, nicht aber deren Logik. Benutzerdaten und -interaktionen werden formatiert übergeben, jedoch nicht weiterverarbeitet. Es können mehrere Präsentationen parallel existieren, die dem Benutzer alternativ oder auch teilweise nebeneinan-

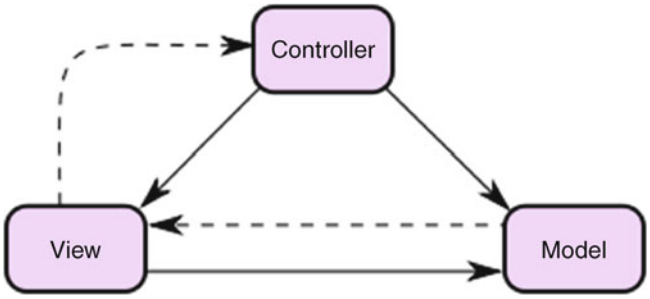



**Abb. 8.76** Beziehungen zwischen Model, View und Controller. *Durchgezogene Linien* repräsentieren direkte Assoziationen, *gestrichelte Linien* indirekte

der, z. B. auf mehreren Ausgabegeräten zugänglich sind.

**Steuerung**
Die Steuerung verwaltet eine oder mehrere Präsentationen sowie eines oder viele Modelle im System. Sie beobachtet die Zustände der Modelle, verarbeitet Änderungen und gibt dies an die Präsentationen weiter. Benutzereingaben werden von der Präsentation entgegengenommen, entsprechend der gewünschten Systemfunktion verarbeitetet und zur Steuerung der Modelle verwendet. Außerdem kann die Steuerung erforderliche Interaktionen zwischen mehreren Präsentationen oder Modellen veranlassen.

#### 8.5.4.4.3 Ausgabegeräte

**Displays**
Die Anzeigeelemente und die damit verbundenen Schnittstellenkonzepte wachsen mit der Ausbaustufe des Infotainmentsystems.

Nach wie vor kommen bei einfachen Radios monochrome segmentierte Anzeigen zum Einsatz. Ein- bis zweizeilige Displays reichen im einfachsten Falle aus. Sobald jedoch auch Medien aus potentiell vielen vorhandenen Titel selektiert werden müssen, sind zur Handhabung der Listen mindestens vier Zeilen erforderlich.

Mit monochromen Dotmatrix-Displays mit einigen hundert Pixel lassen sich dann auch einfache Graphiken und Symbole sowie unterschiedliche Schriftgrößen umsetzen. Frühere Implementationen die mit solchen Displays auch eine einfache Turn-by-Turn Navigation umgesetzt haben sind jedoch nicht mehr üblich.

TFT Farbdisplays haben häufig eine WVGA (800 × 480) Auflösung und 5- bis 7-Zoll Bildschirmdiagonale, was durchaus die Umsetzung einer vollwertigen GUI (Graphical User Interface) ermöglicht. Bei den größeren Bildschirmdiagonalen helfen höhere Auflösungen für eine klarere Darstellung ohne dass einzelne Pixel sichtbar werden – die größten derzeit eingesetzten Displays reichen bis über 12 inch Diagonale und HD (1920 × 1080) Auflösung. Größere Bildschirmdiagonalen sind im Fahrzeug räumlich schwer unterzubringen, und höhere Auflösung bei gleicher Diagonale bringt kaum noch sichtbaren Qualitätsgewinn.

Auf Grafikdisplays werden auch Animationen eingesetzt; hier bestimmt die erreichbare Bildwiederholfrequenz die Flüssigkeit des Bildes; 2 fps (frames per second) ermöglichen bewegte Grafiken mit deutlich ruckartigen Übergängen; für flüssige Videowiedergabe sind 25 fps erforderlich. Einzelne Systeme erreichen 50 fps.

**Sekundäre Displays**
Neben einem oder mehreren Hauptdisplays werden häufig auch Sichten auf Infotainmentdaten auf anderen Anzeigeelementen angeboten. Beispielsweise erscheinen ausgewählte Infotainmentdaten, insbesondere Navigationsanweisungen, im Kombiinstrument und auf dem Head-up Display. Die Übertragung der Daten kann sowohl als Rohdaten mit anschließender Erzeugung der Präsentation im sekundären Display oder auch als fertig gezeichnete Grafikdaten über eine Videoverbindung erfolgen.

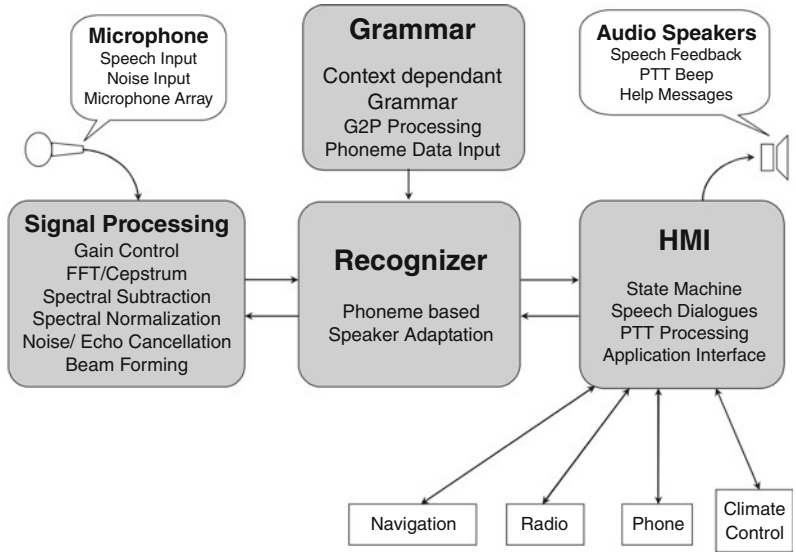



**Abb. 8.77** Spracherkennung

Eine Umsetzung eines Sekundärdisplays kann auch ein eventuell vorhandenes Head-up-Display sein, das die Daten auf die Windschutzscheibe vor dem Fahrer projiziert. Der Blickkontakt muss dabei nicht von der Straße genommen werden.

**Töne und Sprachausgabe**

Neben visueller Anzeige bieten hörbare Ausgaben die Möglichkeit, dem Benutzer mit geringer Ablenkung Informationen zu vermitteln. Dies reicht von einfachen Signaltönen über gespeicherte Sprachnachrichten bis zu synthetisch erzeugten Sprachausgaben beliebiger Texte.

### 8.5.4.4.4 Eingabegeräte

**Diskrete Bedienelemente**

Verschiedene Bedienelemente werden eingesetzt, um eine bestimmte Funktion (z. B. „Radio hören") mit bestimmten Parametern (Lautstärke, Senderfrequenz) direkt erreichen zu können.

Naturgemäß können auf einfachen Displays keine großen Auswahlmenüs dargestellt werden; deshalb haben solche Geräte in der Regel eine größere Anzahl von Bedienelementen, die direkt jeweils nur einer Funktion zugeordnet sind (z. B. Lautstärke, Sendereinstellung, Stationstasten).

**Pointerdevices und virtuelle Bedienelemente**

Mit zunehmender Systemkomplexität würde diese Strategie sehr schnell sehr viele dedizierte diskrete Bedienelemente erforderlich machen – stattdessen werden die Auswahlmöglichkeiten auf der dann größeren Anzeige dargestellt und mittels weniger Mehrzweck-Bedienelemente (Softkeys, Cursortasten, Pointerdevice, etc.) ausgewählt. Ein berührungsempfindliches Display erlaubt die direkte Wahl der angezeigten Elemente auf dem Bildschirm.

**Spracherkennung**

Die Kommunikation mittels Sprache ist für den Menschen die natürlichste Form der Kommunikation. Insbesondere für den Fahrer eines Kraftfahrzeuges bietet die automatische Spracherkennung daher die Möglichkeit bestimmte Funktionen innerhalb des Fahrzeuges unter minimaler Ablenkung vom Straßenverkehr auszuführen.

Abb. 8.77 zeigt ein Blockdiagramm eines modernen Spracherkenners, welcher die oben genannten Anforderungen zur Anwendung in einem Kraftfahrzeug erfüllt.

Während der Funktionsumfang und damit auch die Anzahl der Kommandos, die das Spracherkennungssystem erkennen muss für die Bereiche Klima

und Audio recht beschränkt ist, ist dies für die Bereiche Navigation und Telefon nicht mehr der Fall. Nimmt man beispielsweise die Funktion der Zieleingabe bei einem Navigationssystem, so muss das Spracherkennungssystem in diesem Fall alle in Frage kommenden Zielorte erkennen können, wobei es sich um einige tausend verschiedene Worte handeln kann. Zudem ist das jeweils anwendbare Vokabular der Spracherkennung offensichtlich vom Kontext abhängig, z. B. Straßennamen einer gegebenen Stadt.

Falls sich die vom Spracherkennungssystem zu erkennenden Worte dynamisch ändern können, wie dies zum Beispiel bei Telefonbucheinträgen oder Medienbibliotheken der Fall ist, so muss das System selbstständig in der Lage sein, aus der geschriebenen Form des zu erkennenden Wortes die phonetische Transkription zu ermitteln. Dies geschieht mittels eines „Grapheme to Phoneme" (G2P) Konverters.

Die Qualität einer Sprachanwendung hängt neben der reinen Erkennungsleistung des Spracherkenners in sehr hohem Maße vom guten Design des Sprachdialogs, der sogenannten Grammatik, ab. So hat z. B. die Art und Weise, wie der Dialog im Falle einer Fehlerkennung fortfährt einen großen Einfluss auf die vom Benutzer „gefühlte" Qualität der Sprachanwendung.

Zunehmend werden Systeme unter dem Stichwort „Natural Language Understanding" (NLU) entwickelt, die in höherem Grade natürliche Sprache, d. h. mit weniger oder ganz ohne Einschränkungen beim erkennbaren Vokabular und der Syntax einer Benutzeräußerung. Einerseits zeigen diese Bemühungen Erfolge; andererseits wachsen die Anforderungen der Spracherkennung an Verarbeitungsgeschwindigkeit und Speichergröße erheblich.

Weil der Aufwand für eine zeitgemäße Spracherkennung im Fahrzeug hoch ist, und gleichzeitig insbesondere Smartphones der gehobenen Klasse eine solche Fähigkeit seit einiger Zeit mitbringen, geht ein Weg dahin, die Aufgabe Spracherkennung vollständig auf das angeschlossenen Telefon abzuwälzen. Die resultierenden Systeme sind einerseits kostengünstig, arbeiten aber nur für die Telefonfunktionen gut.

Ein anderer Weg zu besserer Qualität der Spracherkennung bei gleichzeitig beschränktem Aufwand ist die Auslagerung der Erkennungsfunktion „off-board" in die Internet-Cloud. Hierzu werden die zu erkennenden Äußerungen ganz oder teilweise einem Internetdienst übermittelt, dort auf erkannte Parameter hin analysiert, die dann zur Ausführung zurückübermittelt werden. Damit bei nicht vorhandener Internetverbindung noch Spracherkennung möglich ist, wird ein Basisdienst dennoch „on-board" zusätzlich umgesetzt und aus den Ergebnissen beider Erkennungen ausgewählt (◘ Abb. 8.76).

#### Zeichenerkennung

Für die Eingabe von Ziffern und Zeichen wird meist eine Softkey-Tastatur auf dem Touchscreen eingeblendet oder einzelne Zeichen können über den Dreh-Drück-Steller in der Mittelkonsole auf dem Bildschirm angewählt werden. Daneben kann auch das Zeichen auf einem druckempfindlichen Feld mit dem Finger „geschrieben" werden, entweder auf dem Touchscreen oder einem separaten Touchpad. Die Spur des Fingers wird dann ausgewertet und daraus ein Zeichen des gültigen Zeichensatzes gelesen. Dieses Verfahren ist insbesondere dann von Interesse, wenn die sehr großen Zeichensätze asiatischer Sprachen nicht auf einer Tastatur oder in einer Auswahlliste darstellbar sind.

#### Gestensteuerung

Wie schon auf den Touchscreens von Mobiltelefonen und Pads, wird zunehmend auch im Fahrzeug Gestensteuerung verwendet. Hierzu wird auf dem Touchscreen eine Bewegung mit einem oder auch mehreren Fingern ausgeführt, die vom Gerät zur Manipulation der Objekte auf dem Bildschirm verwendet wird. Tap, Pan, Pinch, Zoom, Drag&Drop sind bekannte Ein- oder Zweifingergesten auf dem Touchscreen.

Grundsätzlich können auch Handbewegungen im Raum mittels stereoskopischer Verfahren als Gesten interpretiert werden. Solche Geräte für den Einsatz im Automobil sind noch in der Entwicklung.

#### Multimodalität

Schließlich sind moderne HMIs „multimodal", d. h. sie erlauben Ein- und Ausgaben mit verschiedenen redundanten Geräten, je nach Situation und Präfe-

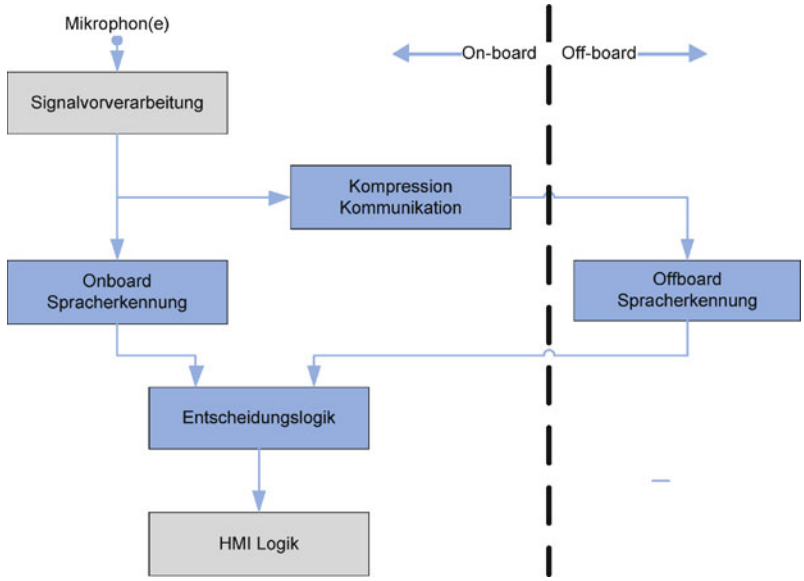



**Abb. 8.78** Hybride Spracherkennung

renz des Benutzers. So können Menüpunkte über den Touchscreen oder alternativ über Cursortasten am Lenkrad oder ein Pointerdevice in der Mittelkonsole angesteuert werden. Die Eingabe z. B. einer Telefonnummer kann über Auswahl von Zeichen auf dem Bildschirm mittels Pointerdevice, direkt auf einer Tastatur oder auch als Spracheingabe erfolgen (Abb. 8.79).

### 8.5.4.5 Architektur

#### 8.5.4.5.1 Hardwarearchitektur im Fahrzeug

**Infotainmentgeräte**

Das Infotainment-Gesamtsystem im Fahrzeug war historisch als ein einziges Gerät implementiert. Bei den ersten Autoradios war außer zu Stromversorgung, Antennen und Lautsprechern keine weitere Verbindung zu anderen Geräten gegeben. Eine solche Eingerätekonstellation findet sich auch heute noch bei Ausstattungen am unteren Ende des Preis- und damit Komplexitätsspektrums (Abb. 8.80).

Allerdings haben im Laufe der Zeit die wachsenden Funktionsumfänge zu komplexeren Systemen geführt.

Schon bei ansonsten sehr einfachen Systemen verfügen die Geräte meist über eine Datenverbindung zum Fahrzeug. Hierüber werden Zustandsinformationen des Fahrzeuges bereitgestellt, wie z. B. die Geschwindigkeit für eine geschwindigkeitsabhängige Lautstärkeeinstellung. Darüber hinaus werden über diese Datenverbindung auch im Fahrzeug verteilte Bedien- und Anzeigeelemente angeschlossen (z. B. Bedienelemente am Lenkrad oder in der Mittelkonsole, oder Anzeige von Infotainmentinformationen im Kombiinstrument), sowie im Wartungsfall Diagnosedaten und Softwareupdates ausgetauscht. Eine solche Datenverbindung wird meist als CAN-Bus ausgeführt. Dieser Infotainment-CAN-Bus wird in der Regel von anderen Fahrzeugnetzwerken mit höherer Betriebssicherheitsanforderung für Karosserie- oder Antriebsstrangsteuerung getrennt und nur über ein Gateway verbunden.

Im Fahrzeug sind bezüglich der Einbausituation des Infotainmentsystems besondere Anforderungen zu erfüllen. So müssen natürlich die Bedienelemente vom Fahrer und teilweise auch vom Beifahrer leicht zu erreichen sein, was im unteren und mittleren Bereich der Mittelkonsole der Fall ist. Anzeigeelemente müssen vom Fahrer gesehen werden können, ohne dass der Blick weit oder lange von der Straße genommen wird – das wird am besten im oberen Teil des Cockpits der Fall sein. Zusammen mit anderen Bauraumbeschränkungen




**Abb. 8.79** Multimodalität

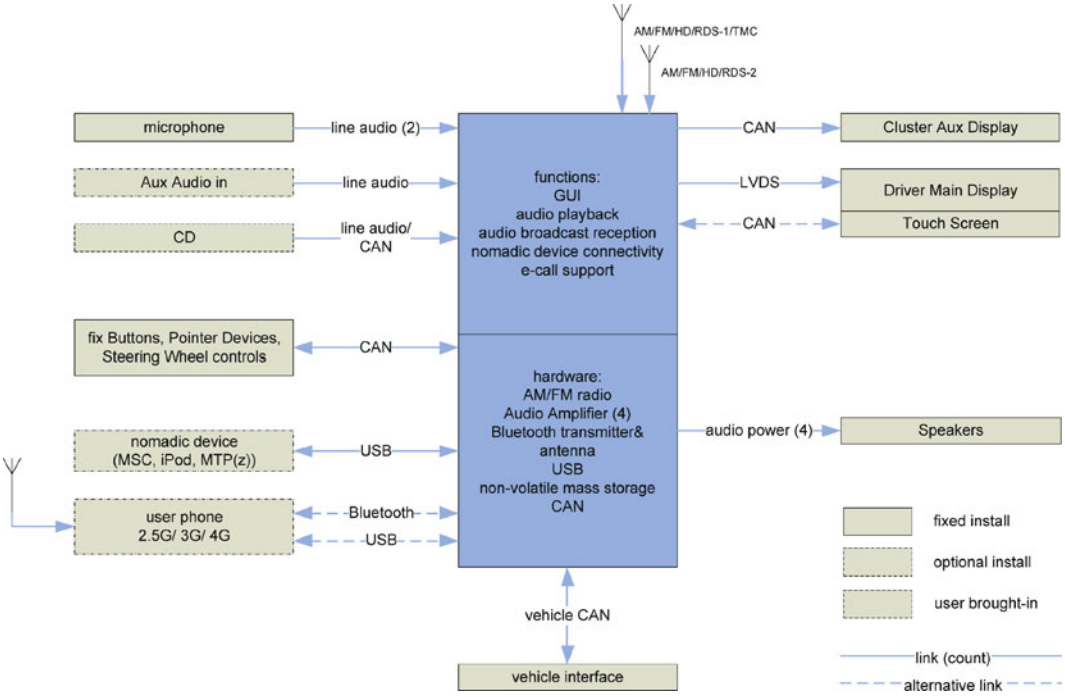



**Abb. 8.80** Infotainment System „Entry" (Beispiel)

im Bereich von Mittelkonsole und Cockpit führt dies immer öfter zu einer Trennung auch der Anzeige vom eigentlichen Infotainmentgerät. Solange an die Anzeige nur Zustandsinformationen übertragen werden, kann dies noch mit einem CAN-Bus erfolgen. Sobald aber eine hochauflösende Grafik vom Steuergerät erzeugt wird ist mehr Bandbreite erforderlich: Bildwiederholfrequenz (10 Hz–50 Hz) · Auflösung (400 × 240 bis 1920 × 1080 Pixel) · Farbtiefe (16–24 Bit/Pixel) ergibt Nettodatenraten bis in den Gbit/s-Bereich, die im Allgemeinen durch eine dedizierte Punkt-zu-Punkt LVDS (Low Voltage Differential Signal) Videodatenverbindung umgesetzt werden.

Mit wachsender Funktionalität des Gesamtsystems werden häufig Zusatzgeräte als Optionen angeboten, die dann nur im Bedarfsfall installiert und mit dem Basisgerät verbunden werden. Solche sind heute zum Beispiel Abspielgeräte für CD oder VD, TV-Tuner, Rückfahrkamera, externe Schnittstellen zum Anschluss von vom Benutzer mitgebrachten Geräten wie Telefone und Audio- oder Video-Abspielgeräte, oder Schnittstellen für die Verbindung mit Mobiltelefonnetzen und damit dem Internet. Neben der Forderung, solche zum Teil unterschiedlichen Funktionen als Optionen in unterschiedlichen Märkten anbieten zu können, führt auch die rasante Entwicklung in der Unterhaltungselektronik häufiger dazu, dass neue Peripheriegeräte eher als separates Modul angeboten werden, bis sie effizient in das zentrale Steuergerät integriert werden können. Diese externen Geräte müssen so mit dem zentralen Steuergerät verbunden werden, dass sie sowohl von dort gesteuert werden können, als auch Multimediadaten wie Audio oder Video austauschen können. zeigt ein Beispiel der resultierenden Architektur des Infotainmentsystems im Fahrzeug am oberen Ende der Ausstattungsoptionen – Funktionsinhalte, Geräteaufteilung, Schnittstellen variieren von Hersteller zu Hersteller.

Häufig findet man zur Kommunikation zwischen Steuergerät und Peripheriegeräten eine Kombination von CAN für Steuerdaten und analogen Schnittstellen für A/V Signale oder auch einen MOST-Bus. Letzterer kann mit einer Bandbreite von 25–150 MBit/s ausreichend viele unkomprimierte Audiosignale übertragen; komprimierte Videoübertragung ist beschränkt möglich während eine unkomprimierte Videoübertragung mit dieser Bandbreite nicht möglich ist. Ein Vorteil der MOST-Technologie ist, neben der synchronen Übertragung der abgetasteten Audiosignale auch die Mitübertragung asynchroner Daten und Steuersignale. Bei den Steuersignalen definieren standardisierte MOST-Funktionsblöcke den Datenaustausch bis zur Präsentationsebene des OSI Referenzmodells. Dennoch wird die Kompatibilität zwischen Geräten verschiedener Automobilhersteller wegen Unterschieden in den Funktionsblöcken leider nicht erreicht.

Wegen der hohen Kosten und beschränkten Bandbreite des MOST-Busses wird derzeit die alternative Verwendung von Ethernet AVB bis zu 1 Gbit/s zum Einsatz gebracht. ◘ Abb. 8.81 zeigt beispielhaft ein Infotainmentsystem mit sowohl integrierten als auch externen Peripheriegeräten.

Während optionale, regional unterschiedliche oder neue Peripheriegeräte meist als externe Module an das Infotainmentsteuergerät angeschlossen werden, wächst dennoch die in das Steuergerät integrierte Funktionalität stetig. So waren z. B. Bluetooth-Schnittstelle, Sprachsteuerung oder USB-Schnittstelle anfangs als externe Module implementiert, sind aber mittlerweile im Standardumfang des Infotainmentsteuergeräts enthalten.

**Modularisierung**

Ein Blick auf die Komponenten eines Infotainmentsystems zeigt schnell, dass ein Teil davon recht kurzlebig ist und schon nach kurzer Zeit auf dem Markt der Konsumelektronik durch neuere Lösungen überholt ist während andere Teile für die angestrebte Lebensdauer des Fahrzeuges adäquat verwendbar sind.

Komponenten langer Lebensdauer sind die Schnittstellen zum Fahrzeug, darunter Fahrzeugnetzwerke und deren Daten, Schnittstellen zu anderen wenig veränderlichen Systemen wie Broadcast Receiver und Audioverarbeitung einschließlich Verstärker.

Weniger lange Lebensdauer haben dagegen die Anzeigegeräte und Konnektivität im Allgemeinen (beide wegen einer schnellen Entwicklung in der Konsumelektronik) sowie natürlich jedwede Software, die in irgendeiner Form auf off-board Daten und Dienste zurückgreift.

Diese Unterscheidung kann zu einer Aufteilung von Infotainment in zwei Geräte führen: eines mit überwiegend variablem Inhalt, das nach zwei bis drei Jahren in der Produktion grundsätzlich verändert wird sowie ein weiteres mit langlebiger Technologie, das eine deutlich längere Lebensdauer in der Produktion hat (◘ Abb. 8.82).

**Domaincontroller**

Während bisher das Infotainmentgerät mit seiner eigenen Benutzerschnittstelle ausgestattet wenig Verbindung zu anderen Geräten (z. B. Kombiinstrument) im Cockpit hatte, zeichnet sich derzeit eine Entwicklung ab, die alle Geräte der „Domäne“ Cockpit sowie deren Benutzerschnittstellen in einem Gerät zusammenfasst. Damit lässt sich dann

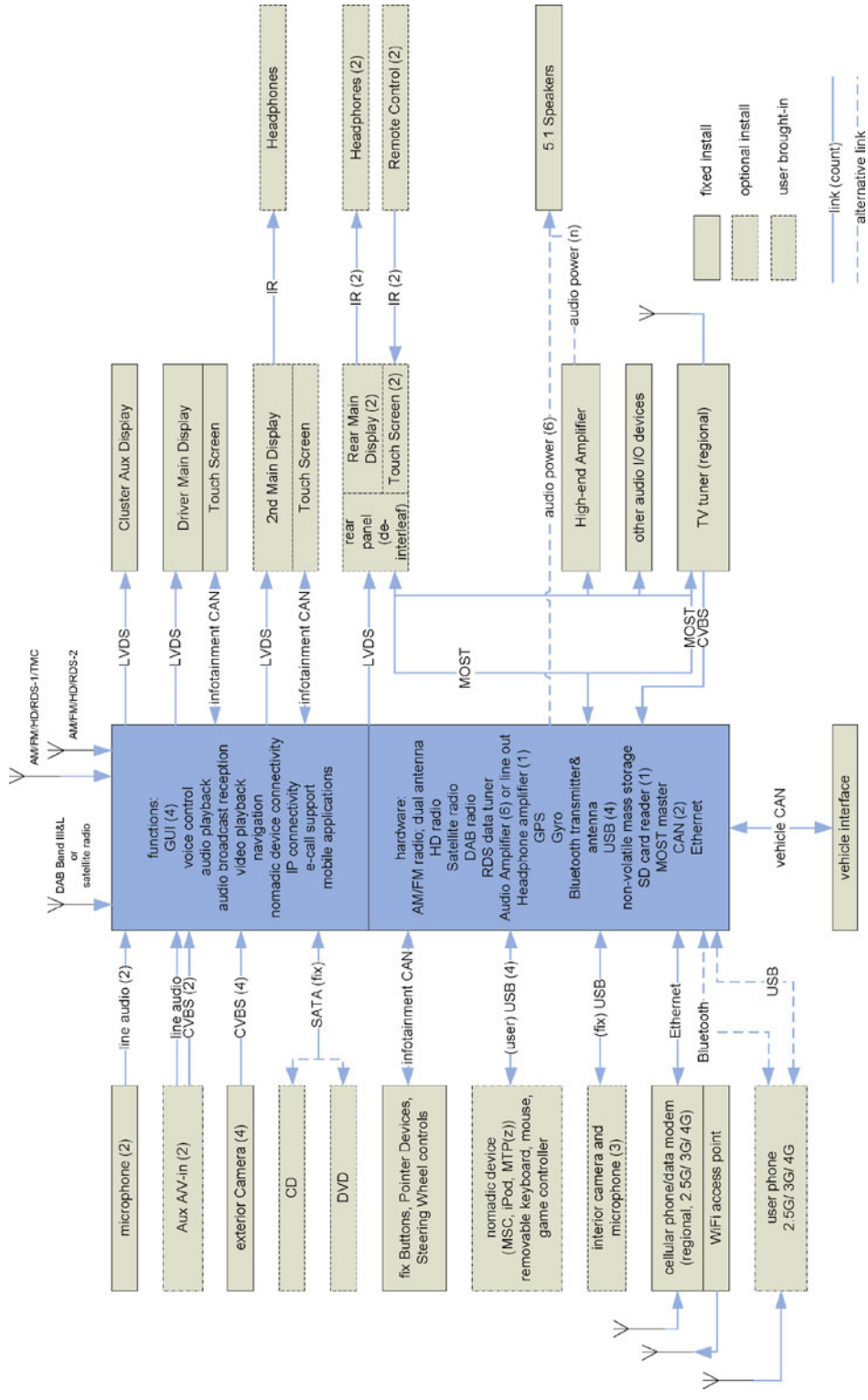



**Abb. 8.81** Infotainment Fahrzeugarchitektur „High" (Beispiel)

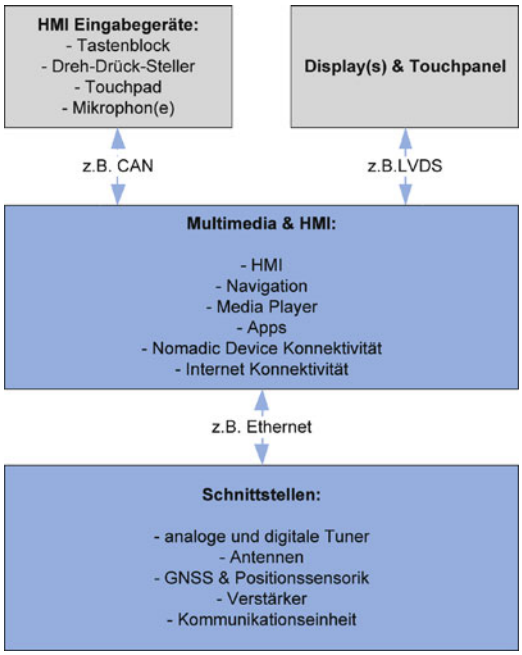



**Abb. 8.82** Partitionierung im Fahrzeug nach Entwicklungsgeschwindigkeit

die ständig zunehmende Vielfalt an Funktionen besser verbinden und besser in einer durchgängigen Benutzerschnittstelle auf einem oder mehreren Displays im Cockpit koordiniert präsentieren. Gleichzeitig reduzieren sich die Infrastrukturkosten dadurch, dass weniger Geräte verbaut und verbunden werden müssen. Auf diese Weise würde der Funktionsbereich Infotainment in Zukunft nicht mehr durch ein eigenes Gerät repräsentiert sein, sondern möglicherweise zusammen mit Funktionen aus den Bereichen Fahrerinformationssystem, Fahrerassistenz, Telematik und Komfortelektronik in einem Cockpit-Domaincontroller aufgehen.

Diese Integration bringt es mit sich, dass potentiell sicherheitsrelevante Systeme Ressourcen teilen mit anderen Systemen, die nicht nach den Vorgaben der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262 entwickelt und validiert werden können. Gleichzeitig bringen die Teilsysteme unterschiedliche Anforderungen mit, was dazu führt, dass im Domaincontroller mehrere, verschiedene Software Laufzeitumgebungen für die verschiedenen Anwendungen bereitgestellt werden müssen, die gleichzeitig auch eine Kompromittierung der Sicherheitsanforderungen bestimmter Teilsysteme verhindern. Hier wird die sogenannte „Virtualisierung" eingesetzt, die der Software der Teilsysteme jeweils eine eigene Hardware vorspiegelt, obwohl doch alle Teilsysteme im gleichen Gerät residieren und Hardwareressourcen teilen. Ein störender Zugriff aus einer Partition auf Ressourcen (wie Prozessor, Speicher, Peripherie- und Kommunikationsgeräte) anderer Partitionen soll durch die Virtualisierung der Ressourcen effektiv verhindert werden (Abb. 8.83).

Es gibt verschiedenen Verfahren zur Virtualisierung, unter denen sich wegen der höheren Sicherheit und Performance und der zunehmenden Verfügbarkeit geeigneter Prozessoren die sog. Hardwarevirtualisierung zunehmend durchsetzt.

#### 8.5.4.5.2 Infotainment – Interne Hardwarearchitektur

Abb. 8.84 zeigt einen typischen inneren Aufbau eines Infotainment Steuergerätes am unteren Ende der Skala, mit integrierten HMI Ein- und Ausgabegeräten.

Abb. 8.85 zeigt zum Vergleich den inneren Aufbau eines Infotainmentgerätes am oberen Ende der Ausstattungsskala, wie dort weitgehend üblich mit abgesetztem Display und Bedienelementen.

#### 8.5.4.5.3 Infotainment-Softwarearchitekturen

Auch bei der Softwarearchitektur des Infotainment-Steuergeräts ist eine Entwicklung erkennbar, die den rapide wachsenden Funktionalitäten bei high-end Geräten Rechnung trägt.

Einfache Autoradios haben historisch den Großteil der Signalverarbeitung in Hardware oder fest programmierten Signalprozessoren oder Modulen umgesetzt. Die Benutzerschnittstelle ist mit der Verwendung von segmentierten oder kleinen Matrix-Displays ebenso wie die verbleibende Steuersoftware relativ einfach und wird deshalb oft noch mit proprietären Betriebssystemen umgesetzt.

Bei komplexeren Geräten neuerer Bauart sind zum einen weit mehr Funktionen enthalten (z. B. graphische animierte Bedienoberfläche, Navigation, Sprach-Ein- und -Ausgabe). Zudem sollen immer mehr Funktionen über die Lebensdauer des Fahrzeuges upgradefähig bleiben – dies trifft insbesondere für die Schnittstellen-Softwarestacks bei

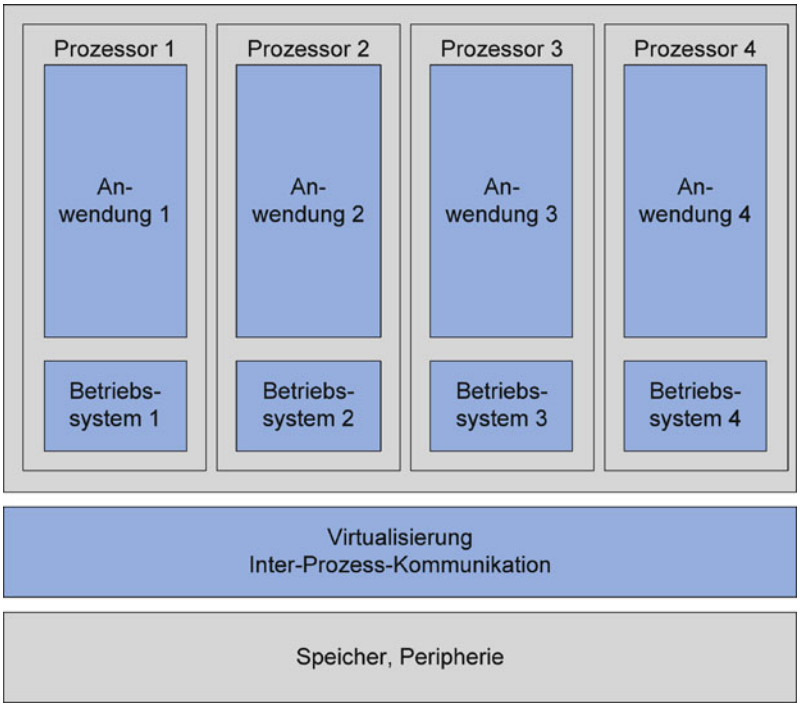



**Abb. 8.83** Hardwarevirtualisierung

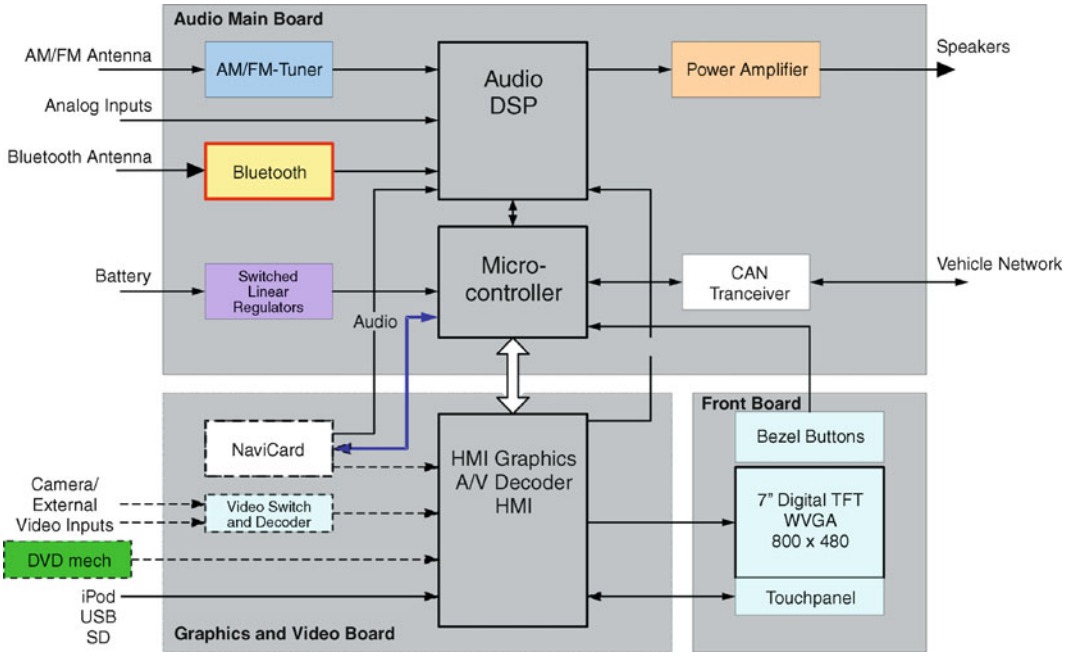



**Abb. 8.84** Low End Infotainmentgerät

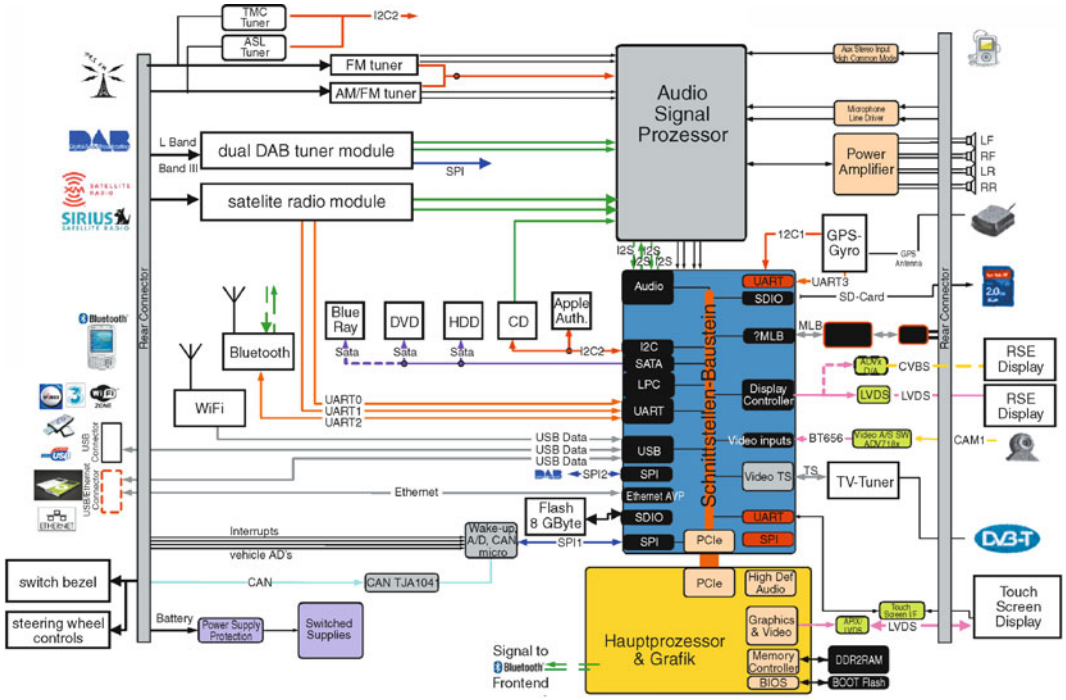



**Abb. 8.85** High End Infotainmentgerät

Bluetooth, USB und WiFi, die Audio- und Video-Codecs sowie auf komplexere Funktionen wie Navigation zu. Damit wird dann die Verwendung kommerzieller Standardbetriebssysteme wie QNX, Windows oder Linux schon deshalb erforderlich, um auch für die Anwendungen Grafik, Navigation, Spracherkennung, Kommunikation usw. auf für diese Betriebssysteme kommerziell verfügbare Software zurückgreifen zu können. Eine proprietäre Eigenentwicklung des gesamten Softwarepaketes wird aus Kosten-, Zeit- und Qualitätsgründen zunehmend unmöglich. Abb. 8.86 zeigt beispielhaft eine Infotainment Softwarearchitektur, wie sie in der Genivi Initiative zugrunde gelegt wird.

### Off-board Dienste

Ganz neue Herausforderungen an die Software bringen diejenigen Systeme, die eine Verbindung zum Internet dazu nutzen, um ständig neue Dienste in das Fahrzeug zu bringen. Dies können zum einen vom Fahrzeughersteller vermittelte Telematikdienste sein, zum anderen aber auch von Drittanbietern im Internet generell angebotene Dienste aller Art sein. All diesen Diensten ist gemeinsam, dass das Infotainment-Steuergerät einen Dienste-Client enthalten muss, der über eine IP (Internet Protocol)-Verbindung mit einem Dienste-Server im Internet kommuniziert. Da aber die angebotenen und auch vom Endverbraucher gewünschten Dienste sehr vielfältig sind und sich sehr schnell verändern und weiterentwickeln, kann eine feste Programmierung der Clients im Infotainment-Steuergerät keine adäquate Lösung bieten. Vielmehr bietet es sich hier analog zur Entwicklung bei Smartphone „Apps“ an, eine standardisierte Laufzeitumgebung für Clients anzubieten, sodass der Endbenutzer jederzeit selbst neue oder verbesserte Clients von einem „AppStore“ herunterladen, installieren und ausführen kann (Abb. 8.87).

Grundsätzlich werden sowohl Infotainmentsysteme als auch andere Systeme im Fahrzeug zum Serienanlauf vollständig und im Fahrzeugumfeld validiert, so dass von einer bekannten und hohen Qualität des ausgelieferten Produkts ausgegan-

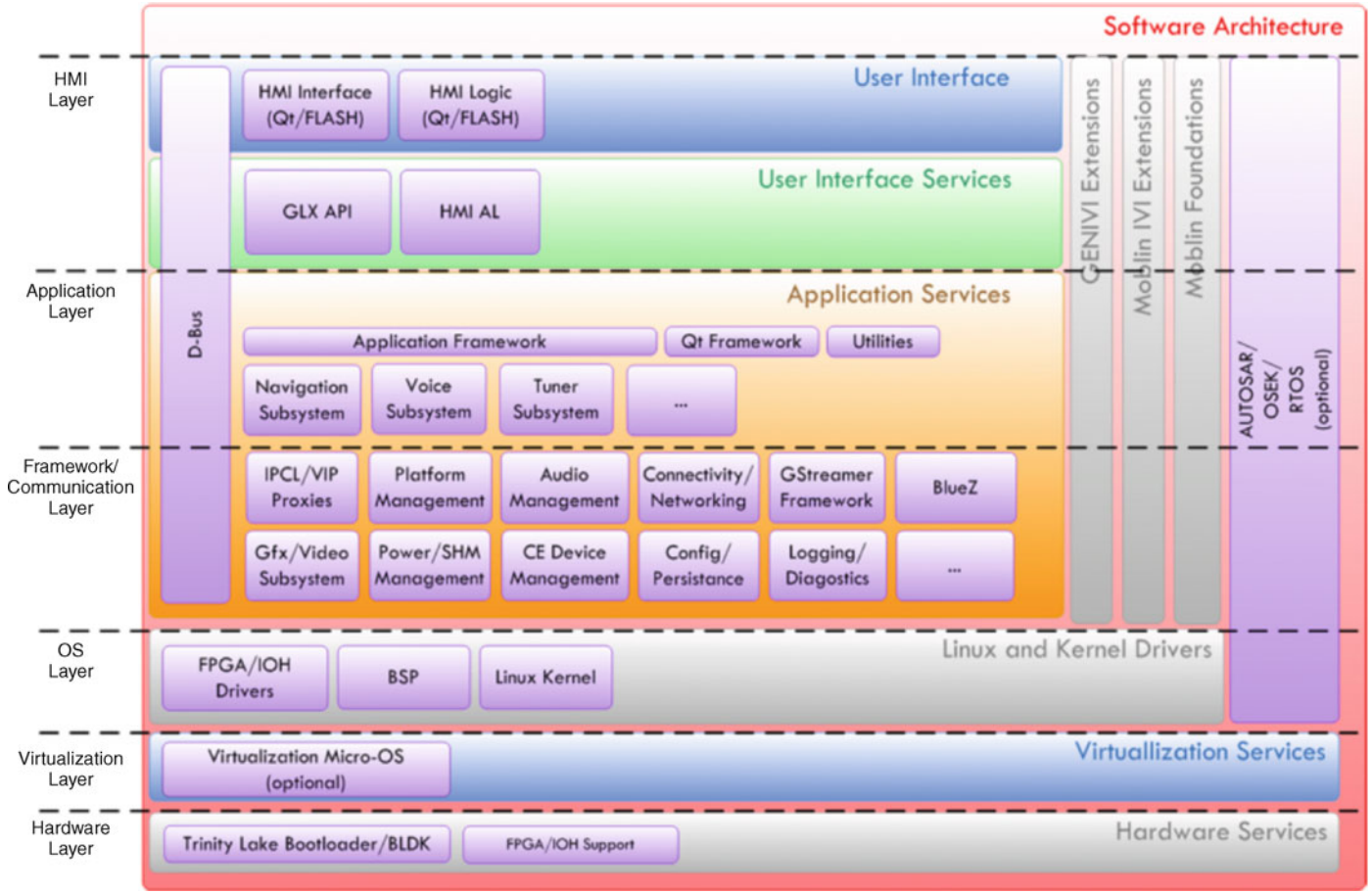
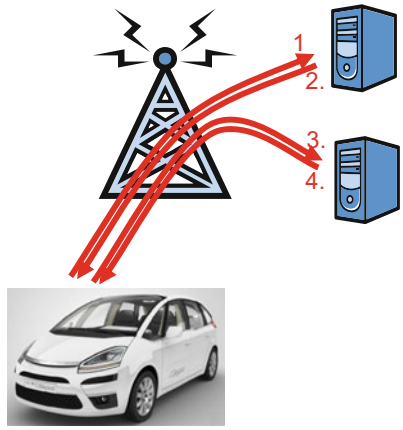



**Abb. 8.86** Infotainment Software Architektur




1. Zugriff auf den AppStore
2. Laden der Client Application
3. Client Application fordert Daten vom Internet Server an
4. Daten werden für den Benutzer durch die Client Application sichtbar

**Abb. 8.87** Prinzip der „Downloadable Apps"



gen werden kann. Wenn aber nun zukünftig vom Endbenutzer Teile der Software aus möglicherweise unbekannter Quelle nachgeladen werden können, ergeben sich nachträglich unvorhersehbare und damit unvalidierbare Konfigurationen. Um hier noch eine akzeptable Gesamtfunktion sicherstellen zu können wird versucht, die a priori unbekannten Applikationen in ihrer Laufzeitumgebung so zu isolieren, dass sie zwar im Falle ungenügender Qualität vielleicht selbst nicht einwandfrei funktionieren, in keinem Falle aber die vorinstallierten Grundfunktionen des Gerätes beeinflussen können („Sandboxing"). Damit wird auch die Gewährleistung für solche Fehlfunktionen von der Gewährleistung für das Grundgerät getrennt und dem jeweiligen Lieferanten zugeordnet.

### 8.5.4.6 Ausblick

Schon immer ist Infotainment im Kraftfahrzeug der Entwicklung im Konsumerbereich gefolgt – wenn eine neue Entwicklung als Consumer Electronics in den Regalen auftauchte und sich durchsetzte, so war diese Entwicklung stets mit einiger Verzögerung auch im Fahrzeug erhältlich. Diese grundsätzliche Entwicklung wird sich auch in der Zukunft fortsetzen, wenn auch in stark beschleunigter Form:

- Die Innovationsrate bei Geräten der Konsumelektronik steigt stetig an. Während die Zyklen für eine Technologie früher Jahrzehnte dauerten (z. B. die Lebensdauer der analogen Radioübertragung), so halten heute neue Technologien nur wenige Jahre (die Ära der CD im Fahrzeug erreicht bereits jetzt ihr Ende) während andere Technologieumsetzungen noch nicht einmal die Lebensdauer des Fahrzeuges erreichen (Fahrzeuge mit frühen Navigationssystemen sind durchaus noch straßentauglich während die Navigation im Vergleich zu Konsumelektronikangeboten deutlich veraltet ist).
- Zunehmend sind viele der Funktionen, die der Endverbraucher in der Konsumelektronik wahrnimmt und dementsprechend auch im Fahrzeug erwartet, gar nicht mehr in der Gerätetechnik angelegt. Stattdessen sind Funktionen weitgehend durch austauschbare Software im Gerät und immer mehr auch durch ständig sich erneuernde Dienste von Internetservern bestimmt.

Diese beiden Entwicklungen bedingen Folgen, die in den nächsten Jahren sehr stark die Entwicklung von Infotainmentsystemen im Kraftfahrzeug bestimmen werden:

- Zunehmend werden Konsumelektronikgeräte selbst ins Fahrzeug importiert, um damit die Aktualität des bestehenden Infotainmentsystems aufrechtzuerhalten. Die Herausforderung wird darin bestehen, die vom Benutzer mitgebrachten Geräte mit ihren Funktionen sinnvoll im Fahrzeugkontext darzustellen – das Kon-

sumelektronikgerät selbst wird weiterhin für die Benutzung durch den Fahrer weitgehend ungeeignet bleiben.

- „Off-board"/„On-Line" Dienste von Internetservern werden auch im Fahrzeug angeboten. Aber auch hier bleibt die bestehende Umsetzung der Clients für das Smartphone in der Regel ungeeignet für den Fahrer eines Fahrzeuges. Abhilfe werden auf das Fahrerumfeld abgestimmte Clients sein, die dann entweder weiterhin auf einem mitgebrachten Smartphone oder auch direkt in der Infotainment Headunit ausgeführt werden. Wichtig wird es in jedem Fall sein, dass die Bereitstellung der Funktion im Fahrzeug zeitnah der Verfügbarkeit auf anderen Geräten wie Smartphones folgen kann – das bedingt die Notwendigkeit, dem Endverbraucher einen einfachen Weg an die Hand zu geben, selbst seine Clients im Fahrzeug auszuwählen und aufzufrischen.

### 8.5.4.7 Fahrzeugantennen

Während noch vor wenigen Jahrzehnten Fahrzeuge nur zur Versorgung des Radios mit einer Antenne ausgestattet wurden, hat heutzutage die Anzahl der Dienste, die im Fahrzeug empfangen werden, stark zugenommen. ◘ Tab. 8.14 zeigt eine Aufstellung der in modernen Fahrzeugen vorhandenen Dienste mit ihren Frequenzen.

Die Aufgabe aller Antennen besteht darin, die Energie aus dem elektromagnetischen Feld einer Freiraumwelle in das elektromagnetische Feld einer Leitungswelle zu überführen, d. h., die Feldwellenimpedanz des freien Raums von $Z_{\text{Freiraum}} = 120\pi\,\Omega \approx 377\,\Omega$ [125] auf die Impedanz der im Fahrzeug verlegten Leitung – typ. 50 Ω, selten 75 Ω – zu transformieren. Eine wichtige Kenngröße von Antennen für den Einsatz im Fahrzeug ist daher die Fußpunktimpedanz, eine weitere das Richtdiagramm, das die Strahlungsleistung $S_r$ einer Antenne in Abhängigkeit der Raumwinkel angibt.

◘ Abb. 8.88 zeigt links das Richtdiagramm eines vertikal ausgerichteten Hertz'schen Dipols [125, 126] der Länge $h$, der von einem konstanten Strom $I_0$ durchflossen wird, in logarithmischer Darstellung in der Ebene senkrecht zur Dipolachse, rechts in der Ebene parallel zur Dipolachse. Der Dipol und seine Ausrichtung im Raum wird durch den Pfeil gekennzeichnet. Ein Hertz'scher Dipol besteht aus einem sehr kurzen, sehr dünnen elektrischen Leiter und soll hier stellvertretend für kurze lineare Antennen, wie sie als Kotflügel- oder Dachstabantennen häufig für Rundfunkempfang eingesetzt werden, betrachtet werden. Sein Richtdiagramm in der horizontalen Ebene (links) über dem Azimutwinkel ist kreisrund, d. h., der Dipol empfängt aus allen Richtungen gleich gut. In der vertikalen Ebene im Bild rechts zeigt sich in der Längsrichtung des Dipols eine Nullstelle, d. h., aus dieser Richtung ist mit einer solchen Antenne kein Empfang möglich. Da die Ausrichtung eines Automobils zu einem zu empfangenen terrestrischen Sender im Alltagsbetrieb rein zufällig ist, ist für praktisch alle Fahrzeugantennen ein kreisrundes Richtdiagramm in der horizontalen Ebene notwendig. Prinzipiell eignen sich daher Dipolantennen bzw. kurze lineare Antennen oder auch $\lambda/4$-Monopole über leitenden Ebenen besonders gut für Anwendungen im Automobil.

Eine weitere wichtige Anforderung an Fahrzeugantennen liegt in der Breitbandigkeit. So lautet z. B. die Fußpunktimpedanz $R_s$ einer kurzen linearen Antenne mit $h \ll \lambda$ [125] im Freiraum

$$R_s = \frac{2}{3} Z_{\text{Freiraum}} \pi \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 = \frac{2}{3} Z_{\text{Freiraum}} \pi \left(\frac{hf}{c}\right)^2 \tag{8.1}$$

mit der Wellenlänge $\lambda$, der Ausbreitungsgeschwindigkeit $c$ und der Frequenz $f$. $R_s$ hängt quadratisch von der Frequenz $f$ ab und ist damit nicht breitbandig, sondern nur für eine einzige Frequenz an das o. g. 50 Ω-Niveau des Fahrzeugbordnetzes anpassbar. Durch einen nachgeschalteten breitbandigen Verstärker kann die Bandbreite der Antenne in engen Grenzen erhöht werden. Solche Antennenverstärker werden in direkter Nähe zur Antennenstruktur, z. B. bei Stabantennen im Antennenfuß, verbaut. Die Spannungsversorgung der Verstärker erfolgt über eine separat verlegte Leitung oder aber über den Innenleiter der Antennenleitung vom Empfänger aus (sog. Phantomspeisung). Gleichung (8.1) verdeutlicht insbesondere die Notwendigkeit, für jeden Dienst nach ◘ Tab. 8.14 eine eigene Antenne ins Fahrzeug zu integrieren. So ist

**Tabelle 8.14** Im Fahrzeug empfangbare Dienste und ihre Frequenzen

| Dienst | Frequenzbereich |
|---|---|
| Langwelle (LW) | 153 … 279 kHz |
| Mittelwelle (MW) | 531 … 1611 kHz |
| DRM (Digital Radio Mondiale) | unterhalb 30 MHz |
| Ultrakurzwelle (UKW) | 87,5 … 108 MHz (76 … 90 MHz in Japan) |
| Fernsehen, analog (kaum noch gebräuchlich) oder digital (DVB-T: Digital Video Broadcast – terrestrial) | 48 … 68 MHz (Band I)<br>90 … 108 MHz (nur Japan)<br>174 … 230 MHz (Band III)<br>470 … 850 MHz (Band IV/V) |
| DAB (Digital Audio Broadcast) bzw. DAB+: digitaler Radioempfang in Europa | 174 … 240 MHz (Band III)<br>1452 … 1491 MHz (L-Band) |
| Funkfernbedienungen für Zentralverriegelung, Standheizung und/oder heimisches Garagentor<br>Aktive Sensoren zur Reifenfülldrucküberwachung | 315 MHz in Nordamerika<br>433 MHz in Europa oder<br>868 MHz, je nach OEM |
| Telefon | 698 … 862 MHz (LTE, div. Einzelbänder)<br>880 … 960 MHz (GSM900)<br>824 … 894 MHz (AMPS USA)<br>810 … 956 MHz (PDC Japan)<br>1427 … 1447 MHz (UMTS Japan)<br>1447 … 1510 MHz (LTE, div. Einzelbänder)<br>1710 … 1920 MHz (GSM1800, UMTS, LTE)<br>1850 … 1990 MHz (PCS USA/Japan)<br>1920 … 2170 MHz (UMTS, LTE)<br>2300 … 2400 MHz (UMTS, LTE)<br>2496 … 2690 MHz (LTE) |
| GPS (Global Positioning System) | 1575,42 MHz |
| GLONASS (Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema): Globales Satellitennavigationssystem | 1602,56 MHz … 1615,50 MHz |
| SDARS (Satellite Digital Audio Radio Services): digitales Satellitenradio in Nordamerika | 2320 … 2345 MHz |
| WLAN | 2400 … 2484 MHz<br>5150 … 5725 MHz |
| Bluetooth | 2402 … 2482 MHz |
| DSRC (Dedicated Short Range Communication), z. B. ETC (Electronic Toll Collect): elektronische Mauterfassung | 5,8 GHz (Europa)/5,9 GHz (USA) |

es nicht möglich, über eine einzige Antenne alle Dienste bei den verschiedensten Frequenzen zu empfangen.

Viele Störungen insbesondere im UKW- und TV-Empfang werden durch Mehrwegeausbreitung verursacht. Von der Fahrzeugantenne werden neben dem direkten Empfangspfad vom Sender zum Empfänger auch Reflektionen beispielsweise an Gebäuden, Bergen oder Bäumen empfangen, die sich dem Signal des direkten Pfades überlagern. Falls die zeitliche Verzögerung des „Umwegs" gegenüber dem direkten Pfad gerade einer halben Wellenlänge bei der Nutzfrequenz entspricht, interferieren die verschiedenen Pfade destruktiv und die Empfangsfeldstärke bricht ein. Diese Punkte minimaler Feldstärke sind örtlich sehr stark begrenzt. Durch

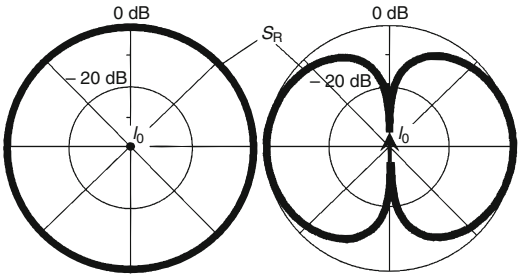



**Abb. 8.88** Richtdiagramm eines Hertz'schen Dipols

Verwendung mehrerer voneinander unabhängiger Antennen im Fahrzeug lässt sich die Qualität des Empfangssignals insbesondere in stark gestörten Umgebungen verbessern [127], da sich mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens eine Antenne außerhalb solch einer Mehrwegestörung befindet.

Dieses sog. Antennendiversity, das vorwiegend bei UKW-Rundfunk- und Fernsehempfang zum Einsatz kommt, lässt sich durch einen Schalter realisieren, der, sobald die Qualität des Empfangssignals unter eine definierte Grenze sinkt, eine andere Antenne zum Empfänger durchschaltet. Dabei sind Zeitkonstanten von 25 µs für die Erkennung der Störung und die Umschaltung der Antenne einzuhalten [127], um zu verhindern, dass die Mehrwegestörung im Audiosignal hörbar bzw. im Bildsignal sichtbar wird. Sinkt die Signalqualität erneut unter die definierte Grenze, wird auf die nächste Antenne umgeschaltet usw. Prinzipiell ist die Anzahl der Antennen bei diesem System nicht beschränkt, praktisch werden jedoch nicht mehr als vier Antennen im Fahrzeug integriert. Seit einigen Jahren kommen vermehrt sog. Phasendiversity-Systeme insbesondere bei UKW-Rundfunk zum Einsatz. Diese zunächst auf zwei Antennen beschränkten Systeme stellen jeder Antenne einen eigenen Empfänger zur Verfügung. Ein Signalprozessor verknüpft digital [128] die Empfangssignale beider Empfänger und kann so das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des resultierenden Signals auch außerhalb von Mehrwegeempfangsstörungen um bis zu 3 dB im Vergleich zur Einzelantenne steigern. Digitale Rundfunksysteme wie DAB (Digital Audio Broadcast) bzw. DAB+ oder DVB-T (Digital Video Broadcast terrestrial) können durch die speziellen Vorteile ihres digitalen Modulationsverfahrens COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [129] als sog. Gleichwellennetze aufgebaut werden. Alle Sender im Sendegebiet der jeweiligen Radiostation arbeiten bei derselben Frequenz. Es ist sogar vorteilhaft und gewünscht, dass am jeweiligen Empfangsort Signale von mehreren Sendern empfangen werden können und sich überlagern. Diese Systeme sind sehr unempfindlich gegen Störungen durch Mehrwegeempfang.

Neben den bereits erwähnten Stabantennen kommen für Radio-, Fernseh- und die Funkfernbedienungsanwendungen im Fahrzeug häufig integrierte Antennen zum Einsatz. Diese bieten den Vorteil, dass das Fahrzeugdesign nicht durch sichtbare Anbauteile eingeschränkt wird, und einen Schutz vor Vandalismus sowie einen Komfortgewinn z. B. in Waschanlagen oder Garagen mit niedriger Raumhöhe, da das Abmontieren eines Antennenstabes entfällt. Metallische Strukturen, die in dielektrische Teile der Karosserie integriert werden, dienen als passive Strahlerelemente. Als Dielektrikum wird vorwiegend Glas verwendet. Somit bieten sich alle nicht versenkbaren Scheiben als Träger für Antennenstrukturen an, die z. B. durch Silberdruck aufgebracht werden. Häufig verwendete Scheiben sind – falls vorhanden – Seitenscheiben im Bereich des Kofferraums oder auch die Windschutz- oder die Heckscheibe. In der Heckscheibe kann eine eigene Struktur als optische Erweiterung des Heizfeldes der Heckscheibenheizung oder aber das Heizfeld selbst sehr unauffällig als Antenne verwendet werden.

Abb. 8.89 zeigt das Heizfeld in einer geöffneten Heckklappe eines Kompaktklassefahrzeugs mit integrierter Antennenstruktur für Rundfunk und Fernsehen. Bei dieser Lösung deuten nur die senkrechten Leiter (s. Ellipsen) im Heizfeld, die zur Abstimmung der Antenne eingefügt wurden und keine Heizwirkung haben, darauf hin, dass hier Antennen in das Fahrzeug integriert worden sind. In der Maximalausstattung befinden sich je zwei Antennen für UKW und Fernsehen in der Heckscheibe. Zusätzlich befinden sich die o. g. Verstärker zur Verstärkung der empfangenen Signale und zur breitbandigen Anpassung der Impedanz an das Fahrzeugbordnetz nicht sichtbar hinter den Verkleidungselementen der Heckklappe. Wird wie in Abb. 8.89 das Heizfeld selbst als Antennenstruk-

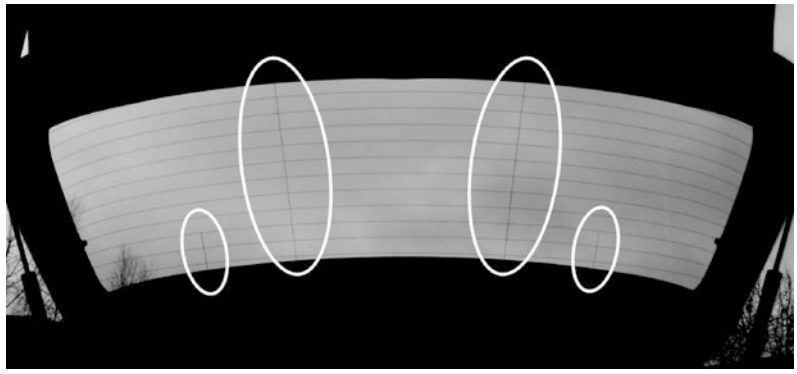


**Abb. 8.89** Blick auf die geöffnete Heckklappe eines Kompaktklassefahrzeugs mit integrierter AM/FM/TV-Antennenstruktur



tur verwendet, ist für einen einwandfreien Empfang durch geeignete elektrische Filter sicherzustellen, dass die empfangenen, hochfrequenten Ströme auf dem Heizfeld nicht über die Spannungsversorgung des Heizfeldes gegen die Fahrzeugmasse kurzgeschlossen werden, sondern in die Antennenleitung zum Empfänger eingekoppelt werden können. Die zweite Aufgabe der Filter besteht darin, hochfrequente Störungen im Empfangsfrequenzbereich der Antennen, die sich verursacht durch nicht vollständig entstörte Steuergeräte im Fahrzeug in den Bordnetzleitungen ausbreiten, von der Antennenstruktur zu entkoppeln.

Weitere mögliche Einbauorte für integrierte Antennen sind – falls im Fahrzeug vorhanden – Kunststoffkarosserieteile oder beispielsweise Kunststoffspoiler. Diese Integration kann z. B. durch Einclipsen von Drähten, die als Antennenstrukturen fungieren, erfolgen oder auch durch Verbau von Kunststofffolien, die mit Antennenstrukturen bedruckt sind. Insbesondere bei leichten Nutzfahrzeugen haben sich auch Außenspiegelgehäuse als geeigneter Bauraum für Antennen erwiesen. Dank der in dieser Fahrzeugklasse üblichen großen Abmessungen der Spiegel lassen sich hier große und damit empfindliche Antennenstrukturen integrieren.

Für Telefon- bzw. Datenanwendungen über WLAN oder Bluetooth haben sich kurze lineare Antennen in verschiedensten Ausführungsformen und Designs oder gedruckte Strukturen auf stehenden Platinen in passiven Dachantennen durchgesetzt. Je nach Anwendungsfall werden diese Antennen zur Versorgung der PKW-Insassen mit Bluetooth- oder WLAN-Verbindungen für das eigene Mobiltelefon oder den eigenen Laptop im Fahrzeuginneren z. B. innerhalb von Steuergeräten verbaut oder aber zur Anbindung des Fahrzeugs an ein externes Netz per WLAN beispielsweise in passiven Dachantennen. Alternativ lassen sich unter schwarz gefärbten Randbereichen von flach stehenden Scheiben, vorzugsweise Windschutz- oder Heckscheiben, Schlitzstrahler nicht sichtbar integrieren. Weitere Bauräume für integrierte Telefonantennen bieten ggf. vorhandene Kunststoffkarosserieteile oder auch die oben bereits erwähnten Außenspiegelgehäuse. Da die zur Verfügung stehenden Bauräume durch die Karosserie und das Fahrzeugdesign in ihren Abmessungen vorgegeben sind, können hier sog. Faltdipole [130] in verschiedensten fahrzeugmodellspezifischen Ausführungsformen zum Einsatz kommen. Der neueste Mobilfunkstandard LTE (LongTerm Evolution) ist aus Antennensicht besonders anspruchsvoll, da weltweit eine Vielzahl an Frequenzbändern verwendet wird und daher sehr breitbandige Antennen benötigt werden. Tab. 8.14 zeigt die weltweit verwendeten Frequenzbänder, wobei nicht jedes Frequenzband in jedem Land für LTE genutzt wird.

Während Rundfunk- und Telefonantennen vorwiegend auf Empfang in der horizontalen Ebene hin optimiert werden, wird von Empfangsantennen für die satellitenbasierten Systeme GPS, GLONARS und SDARS eine nahezu halbkugelförmige Richtcharakteristik gefordert. An jedem Ort der Welt sind immer mindestens 4 GPS-Satelliten empfang-

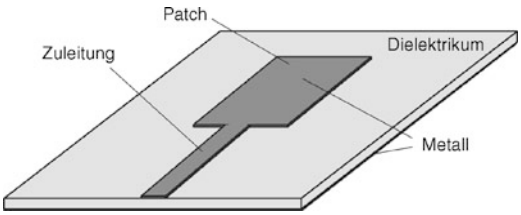



**Abb. 8.90** Schematische Darstellung einer Patch-Antenne

bar. Diese können relativ zum Fahrzeug unter beliebigen Azimut- und Elevationswinkeln am Himmel positioniert sein. Dahingegen lassen sich für den Empfang der Satellitensignale des SDARS Betreibers SiriusXM Satellite Radio aufgrund der Satellitenbahnen und des auf Nordamerika begrenzten Empfangsgebiets Vorzugselevationswinkel zwischen 50 und 70° gegen den Horizont angeben. Dennoch kann abhängig von der Fahrzeugausrichtung, dem Fahrzeugneigungswinkel und der jeweils aktuellen Satellitenposition auch Empfang aus allen anderen Elevationswinkeln notwendig sein. Hinzu kommt, dass insbesondere in urbanen Gebieten, wo durch bauliche Gegebenheiten die Wahrscheinlichkeit einer Abschattung der Satellitensignale sehr hoch ist, zusätzliche terrestrische Antennen zur Verbreitung des Programms eingesetzt werden. Die Signale dieser terrestrischen Antennen werden unter einem sehr kleinen Elevationswinkel von unter 10° zum Horizont empfangen. Solche nahezu halbkugelförmigen Richtdiagramme lassen sich mit Mikrostreifenantennen, sog. Patch-Antennen [125], realisieren.

Abb. 8.90 zeigt die schematische Darstellung einer Patch-Antenne. Eine durch seine Abmessungen auf die Arbeitsfrequenz abgestimmte metallische Fläche („Patch“) ist auf ein auf der Rückseite ebenfalls metallisiertes Dielektrikum, z. B. eine Keramik oder ein Platinenmaterial, aufgebracht. Die Kantenlänge des Patches entspricht in etwa einer halben Wellenlänge bei der Arbeitsfrequenz. Als Empfangsantenne verwendet ist es in der Lage, Signale aus nahezu allen Raumwinkeln oberhalb der Ebene des Dielektrikums zu empfangen. Das Patch wird z. B. über eine ebenfalls auf das Dielektrikum aufgebrachte Zuleitung wie im Bild oder über eine rückseitig angeschlossene Koaxialleitung kontaktiert. Antennen dieser Art werden meist in Dachantennen, vereinzelt auch unter Kunststoff oder Glas integriert. Durch die hohe Dämpfung auf der langen Übertragungsstrecke vom Satelliten zur Empfangsantenne sind die Empfangsfeldstärken an den Satellitenantennen sehr gering. Deshalb ist es notwendig, das Empfangssignal direkt an der Empfangsantenne mit sehr rauscharmen Vorverstärkern mit Rauschzahlen im Bereich von 0,5 bis 1,5 dB und hohen Verstärkungen von ca. 22 bis 30 dB zu verstärken, bevor es dem Empfänger zugeführt wird.

Mit steigendem Kommunikationsbedarf werden Daten und Signale nicht mehr nur zwischen Fahrzeug und einer externen Netzinfrastruktur ausgetauscht, sondern immer öfter auch innerhalb des Fahrzeuginnenraums z. B. mit den mobilen Geräten (Smartphones, etc.) der Fahrzeuginsassen. Daher müssen Antennen heute nicht mehr nur an der Fahrzeugaußenhaut, sondern immer mehr auch im Fahrzeuginnenraum positioniert werden. WLAN-Hotspots, die eine über das Mobilfunknetz hergestellte Internetverbindung per WLAN den mobilen Endgeräten der Fahrzeuginsassen zur Verfügung stellen, sind heute bereits in der Kompaktklasse erhältlich. Die Mobiltelefone nutzen diverse Bluetooth-Profile, um die Freisprecheinrichtung des Fahrzeugs zu nutzen, um Telefonbucheinträge mit dem Fahrzeuginfotainmentsystem zu synchronisieren oder Musik auf das Audiosystem des Fahrzeugs zu streamen, usw.

Am Beispiel der Telefonantenne wird deutlich, wie sich der steigende Kommunikationsbedarf auf die Bauraumsituation im Fahrzeug auswirkt: ein hoch ausgestattetes Fahrzeug benötigt heute diverse voneinander unabhängige Telefonantennen für die Hauptmobiltelefonanbindung, ein separates Telefon im Fond, den WLAN-Hotspot, die Internetanbindung für mobile Onlinedienste, das in Europa ab 2018 vorgeschriebene mobile Notrufsystem eCall und/oder ein Fahrzeugortungssystem. LTE-fähige Systeme verlangen zudem oft nach mehr als einer Telefonantenne, um eine hohe Empfangsqualität mit hoher Datenrate sicherstellen zu können. Dem Bedarf nach immer mehr Bauraum im Fahrzeug für Antennen kann z. B. durch eine immer höhere Integration von mehreren unabhängigen Antennen in einem Modul/Gehäuse entgegen gewirkt werden.

Bei der Positionsbestimmung wird der Ansatz verfolgt, mit nur einer Antenne mehrere Empfänger zu versorgen: das Positionssignal der Navigationsantenne, das für die Fahrzeugnavigation, das Notrufsystem oder auch ein automatisches Ortungssystem benötigt wird, wird von einem Empfänger dekodiert und über das Datennetzwerk (CAN, MOST, usw.) an alle beteiligten Steuergeräte verteilt, sofern nicht aus Sicherheitsgründen separate Antennen zwingend vorgeschrieben sind.

## 8.5.5 Fahrerassistenzsysteme



Bereits Ende der 1980er Jahre wurde im europäischen Forschungsprogramm PROMETHEUS (PROgraMme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unlimited Safety) die Vision für einen Straßenverkehr mit höchster Effizienz und mit höchstem Sicherheitsniveau entwickelt [131]. Allerdings waren damals die notwendigen Komponenten (wie z. B. Sensoren zur Umfelderfassung und kompakte Hochleistungsrechner) und Systeme nicht verfügbar. Heute sind sie da und rücken die Existenz des „sensitiven Fahrzeugs", das sein Umfeld erfasst und aus der Lage und der Relativgeschwindigkeit von Objekten zum eigenen Fahrzeug Warnungen und Fahrzeugeingriffe zur Vermeidung von Unfällen ableitet, immer näher. Seit der IAA 2013 wird die Vision vom autonomen Fahren weltweit intensiv diskutiert und alle namhaften Fahrzeughersteller führen sukzessive teilautomatische Systeme zur Unfallvermeidung ein. Ultraschall-Einparkhilfesysteme erfreuen sich hoher Kundenakzeptanz, ACC (Adaptive Cruise Control)-Systeme und videobasierte Systeme sind in Serie. Weitere Systeme befinden sich in einem raschen Entwicklungsprozess. Auf Basis einer immer besseren Sensorik und Sensordatenfusion werden immer neue Funktionen mit hoher Relevanz für Sicherheit und Komfort entwickelt.

Je früher die Systeme einen möglichen Autounfall erkennen, desto wirkungsvoller können sie ihre Aufgabe erfüllen. Durch frühzeitige Warnung des Fahrers kann eine Vorverlegung der Fahrerreaktion herbeigeführt werden. Bei „aktiven" Fahrerassistenzsystemen, bei denen vom Rechner in die Fahrzeugdynamik eingegriffen wird, erfolgt eine schnellere Fahrzeugreaktion als dies mit der normalen Reaktion des Fahrers auf einen erkannten Gefahrenzustand möglich wäre.

### 8.5.5.1 Unfallursachen und Fahrerassistenzsysteme zu ihrer Vermeidung

Nach einem ersten Programm zur Reduzierung der Unfalltoten in Europa, USA und Japan im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 haben aufgrund der immer noch hohen Anzahl der Verkehrstoten (in 2010 innerhalb der EU 31.000) zahlreiche Regierungen ihre Ziele verschärft, um die Sicherheit auf den Straßen weiter zu erhöhen. In Europa hat die EU-Kommission sich im Jahr 2010 das Ziel gesetzt, die Verkehrstoten bis 2020 nochmals zu halbieren.

Entscheidend bei der Entwicklung aktiver und passiver Fahrerassistenzsysteme ist die Fähigkeit des Fahrzeugs, seine Umgebung wahrzunehmen und zu interpretieren, gefährliche Situationen vorausschauend zu erkennen und den Fahrer bei seinen Fahrmanövern bestmöglich zu unterstützen. In kritischen Fahrsituationen entscheiden häufig lediglich Bruchteile von Sekunden, ob es zu einem Unfall kommt oder nicht. So haben frühere Studien von Enke [132] ergeben, dass rund 65 Prozent der Auffahrunfälle, fast ein Drittel der Frontalzusammenstöße und die Hälfte der Kreuzungsunfälle gar nicht passieren würden, wenn der Fahrer nur eine halbe Sekunde früher reagieren könnte.

Um Schwerpunkte bei der Entwicklung solcher Systeme setzen zu können, die das höchste Unfallvermeidungspotenzial besitzen, wurde und wird weiterhin die Unfallstatistik beobachtet, s. ◘ Abb. 8.91 [143].

Nach dieser nur wenig veränderten Statistik der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) aus dem Jahre 2004 sind etwa 30 % aller Unfälle durch Auffahren und Frontalzusammenstöße zurückzuführen.

Weitere 20 % werden durch Spurwechsel und durch unbeabsichtigtes Verlassen der Fahrspur verursacht. Spurverlassen-Unfälle haben sich außerorts zwischen 1991 und 2013 um 76 % verringert. Dies ist der zunehmenden Fahrzeugdurchdringung dieses Sicherheitssystems zu verdanken.

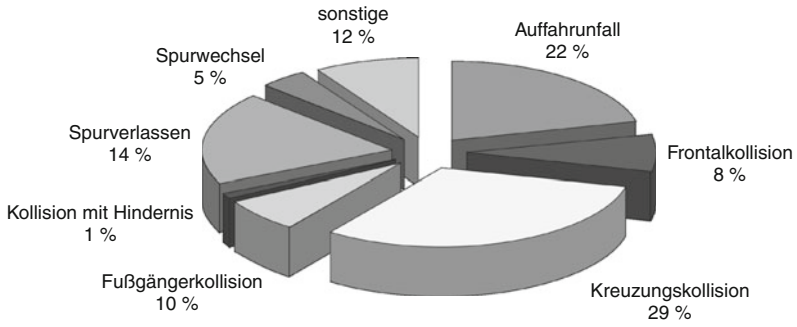



**Abb. 8.91** Unfälle in Deutschland innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften [143]

Bei den restlichen handelt es sich um relativ komplexe Unfallhergänge wie Kreuzungsunfälle und Kollisionen mit Fußgängern.

### 8.5.5.2 Fahrerassistenz

Was versteht man unter Fahrerassistenz? Fahrerassistenzsysteme sollen den Fahrer in allen Verkehrssituationen unterstützen und ihm ein entspanntes, stress- und unfallfreies Fahren ermöglichen. Der Begriff wird vielfach genutzt. Je nach Anwendung unterscheidet man:

- Fahrerinformationssysteme; Beispiele: Navigation, Verkehrszustandsmeldungen (TMC = Traffic Message Channel, DAB = Digital Audio Broadcast, das Mobilfunknetz GSM),
- Fahrzeugkommunikationssysteme; Beispiele: Systeme zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen,
- Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeugstabilisierung; Beispiele: ABS (Antiblockiersystem), ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm), ASR (Automatische Schlupfregelung), u. a.
- Prädiktive Fahrerassistenzsysteme, die mit Hilfe von Rundumsichtsensoren die Fahrzeugumgebung abtasten; Beispiele: Einparkhilfe, ACC (Adaptive Cruise Control), Spurverlassenswarner,
- Systeme zur Erkennung des Fahrerzustands zur adaptiven Gestaltung von Warnungen und Fahrzeugeingriffen.

Schon während des eingangs erwähnten PROMETHEUS-Programms wurde eine Struktur zur Fahrerassistenz entwickelt, s. Abb. 8.92 [131].

Je nach Situation erhält der Fahrer Informationen aus dem optischen, akustischen oder haptischen Sinneskanal. Situationsgerechte Fahrzeugeingriffe durch ein Fahrerassistenzsystem müssen für den Fahrer jederzeit transparent und nachvollziehbar sein, damit er nicht erschrickt und möglicherweise falsch reagiert. Die Bedienung von Assistenzsystemen sollte weitestgehend intuitiv und ohne lange Blickabwendungen möglich sein.

Durch die ständige Zunahme von Assistenzsystemen im Fahrzeug kommt der Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI = Human Machine Interface bzw. Interaction) hohe Bedeutung zu.

### 8.5.5.3 Fahrzeugkommunikationssysteme

Die rasche Verbreitung von Funksystemen im Heim- und Bürobereich (WLAN = Wireless LAN) macht solche Systeme auch für die Fahrzeugapplikation interessant. Für Fahrzeuganwendungen wurde der Frequenzbereich zwischen 5,8 und 5,9 GHz reserviert. Anwendungen liegen im Bereich der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (C2CC = Car to Car Communication) und der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen (C2IC). Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme sind neben dem Unterhaltungsbereich vor allem Sicherheitsanwendungen von hohem Interesse. Für telematische und sicherheitskritische Dienste wurde der IEEE802.11p-Standard definiert. Die C2CC-Anwendungen liegen im Bereich der Übermittlung von akuten Warnungen bei Unfällen und Staumeldungen. Im C2IC-Bereich wird an Kommunikation mit Ampeln, Verkehrsschildern oder Schranken gedacht,

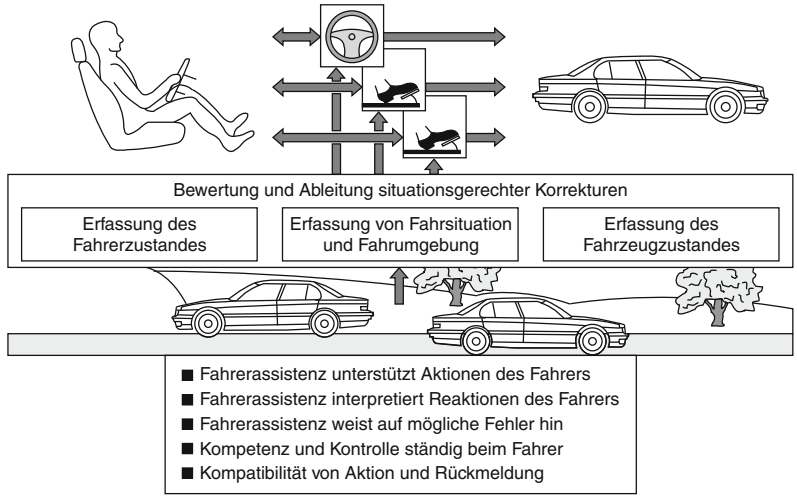



**Abb. 8.92** Konzept der Fahrerassistenz [131]

aber auch der Download von aktuellen Verkehrsinformationen ist vorgesehen [134].

Für den Datenaustausch werden zwischen den Fahrzeugen und den Infrastruktureinrichtungen hochdynamische ad-hoc-Netzwerke aufgebaut. Voraussetzung für die Schaffung eines solchen Systems ist zunächst ein Standard für die Kommunikation, der mittlerweile in einem Konsortium erarbeitet wurde, dem die großen deutschen Automobilhersteller und Zulieferer angehören. Ständige Verfügbarkeit des Netzes und die Sicherheit gegen das Eindringen von Hackern ist von großer Bedeutung.

### 8.5.5.4 Fahrerassistenzsysteme zur Fahrzeugstabilisierung

Ende 2001 wurde eine Erhebung des Statistischen Bundesamtes [133] veröffentlicht, aus der hervorgeht, dass die Häufigkeit für Schleuderunfälle bei Fahrzeugen, die mit dem Elektronischen Stabilitäts-Programm (ESP) ausgerüstet sind, signifikant gesunken ist. Diese, bisher einmalige Einführung eines Fahrerassistenzsystems zu einem definierten Zeitpunkt, erlaubte eine klare statistische Zuordnung und bestätigte damit die These, dass Fahrerassistenzsysteme ein hohes Unfallvermeidungspotenzial besitzen. Mittlerweile wurde aufgrund des großen Erfolgs dieses Systems von der EU die Einführung von ESP bei allen Neufahrzeugen ab 01.11.2014 vorgeschrieben.

Zusätzliche Verbesserungen werden z. B. von Systemen wie PRE-SAFE erreicht, s. ► Kap. 9. PRE-SAFE löst z. B. präventive Sicherheitsmaßnahmen aus, um die Fahrzeuginsassen und die Fahrzeugsysteme auf einen eventuell bevorstehenden Unfall vorzubereiten (reversible Gurtstraffer, Lehnen senkrecht stellen, Schiebedach schließen, Bremsdruck optimieren).

Das schon hohe Unfallvermeidungspotenzial ist in noch höherem Maße auf prädiktive Fahrerassistenzsysteme übertragbar, da diese vorausschauend auf eine gefährliche Situation reagieren können. Sie erweitern den Detektionshorizont des Fahrzeugs durch Einsatz von Umfeldsensoren. Damit können Objekte und Situationen im Umfeld des Fahrzeugs in die Berechnung von Unfall-vermeidenden und Unfallfolgen-mildernden Maßnahmen einbezogen werden.

### 8.5.5.5 Prädiktive Fahrerassistenzsysteme

Durch eine elektronische „Rundumsicht“ lassen sich zahlreiche Fahrerassistenzsysteme realisieren. Heute sind die für solche Systeme notwendigen elektronischen Komponenten – hochempfindliche Sensoren und Hochleistungs-Mikrorechner – verfügbar und werden ständig weiterentwickelt.

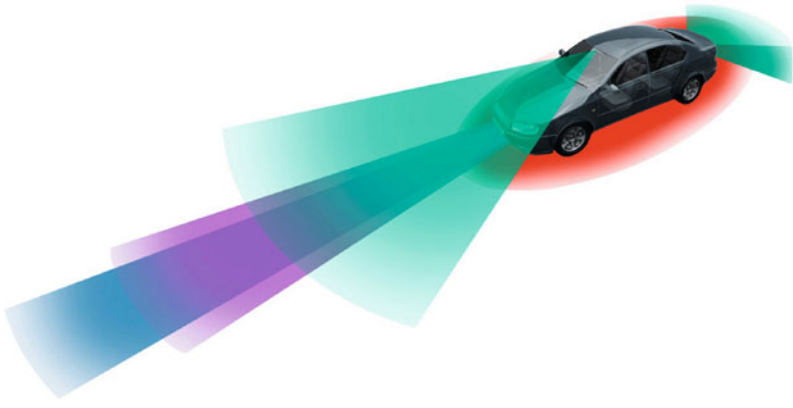



**Abb. 8.93** Erfassungsbereiche von Umfeldsensoren

#### 8.5.5.5.1 Sensoren für Fahrerassistenzsysteme

Für die Erkennung von Objekten im Fahrzeugumfeld ist eine Reihe von Sensoren erforderlich. Ultraschallsensoren befinden sich seit etwa 1993 für Einpark- und Manövrierhilfen im Einsatz, Radarsensoren für den „Intelligenten Tempomaten" seit 1999/2000. Die Videotechnik hat beim Nachtsichtassistenten Ende 2005 im Fahrzeug-Premiumsegment Einzug gehalten zeitgleich mit Mikrobolometer-Sensoren zur Erfassung von Wärmebildern. Weitere, neue Funktionen wurden durch Stereo-Kameras erschlossen. Mit all diesen Sensoren werden Objekte erfasst und ihre Position und Relativgeschwindigkeit zum eigenen Fahrzeug errechnet. Hieraus lassen sich Gefahrenzustände ermitteln. Die Detektionsbereiche sind in Abb. 8.93 dargestellt. Neuerdings werden Radarsensoren auch am Fahrzeugheck eingebaut. Sie erkennen sich schnell von hinten annähernde Fahrzeuge und warnen den Fahrer bei knappen Überholmanövern. Ebenso haben Short-Range Radarsensoren zur Absicherung des Nahbereiches im Fahrzeug Einzug gefunden.

#### 8.5.5.5.2 Ultranahbereichssensoren in Ultraschalltechnik

Heutige Einparkhilfen nutzen Ultranahbereichs-Sensoren in Ultraschalltechnik. Sie besitzen eine Reichweite von etwa 2,5 m. Die Sensoren werden im Stoßfänger angebracht. Beim Annähern an ein Hindernis erhält der Fahrer eine akustische und/oder optische Anzeige.

Abb. 8.94 zeigt einen Ultraschallsensor der 4. Generation mit unterschiedlichen Steckerabgängen. Die Ansteuerelektronik und die Signalauswertung sind im Sensor integriert [97, 135].

Diese Sensoren wurden baugleich mit einer noch höheren Reichweite von 4,5 m zum Einsatz in Parkassistenzsystemen weiterentwickelt.

#### 8.5.5.5.3 Fernbereichsradar 77 GHz

Der mehrzielfähige Fernbereichs-Sensor mit einer Reichweite von bis zu 250 m basiert auf dem Radarprinzip. Der Begriff Radar steht für Radio Detection and Ranging. Abb. 8.95 zeigt den Fernbereichs-Radarsensor der dritten Generation (Serienanlauf




**Abb. 8.94** Ultraschallsensor der 4. Generation



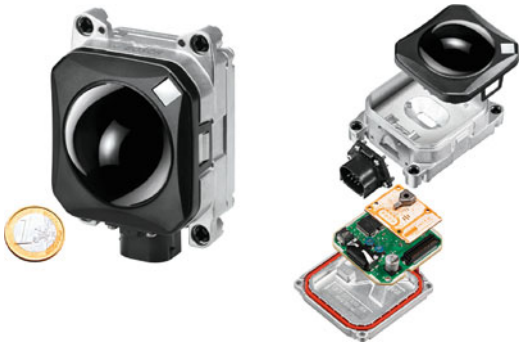


**Abb. 8.95** 77 GHz-Radar der dritten Generation mit integriertem Steuergerät. *Obere Platine*: HF-Teil, *untere Platine*: Steuergerät

2007). Er zeichnet sich gegenüber der 1. und 2. Generation durch einen größeren Öffnungswinkel der Radarkeule aus. Beim Bosch-Radar sind Hochfrequenzteil und Steuergerät in einem Gehäuse integriert Beim Hochfrequenzteil wurde die diskrete Gunn-Oszillator-Technik durch integrierte MMICs (Monolithic Microwave Integrated Circuits) in Si-Ge-Technologie ersetzt. Sie führt zur Reduktion der Kosten und zu einer Verbesserung der Detektionseigenschaften und der Qualität. Die Elektronik greift über CAN direkt auf Bremse und Motronic zu.

Die Radarkeule mit einem Öffnungswinkel von $\pm 16°$ tastet den Raum vor dem Fahrzeug ab und ermittelt den Abstand sowie die Relativgeschwindigkeit zu vorausfahrenden Fahrzeugen. Die Winkelinformation gewinnt der Radarsensor aus der Auswertung von vier Radarstrahlen. Die zur Vermeidung von Vereisung heizbare Linse am Vorderteil des Sensors dient zur Bündelung der Radarstrahlen auf den Öffnungswinkel [97, 135–137].

#### 8.5.5.5.4 Fernbereichslidar

Lidarsensoren für ACC-Anwendung sind in Japan seit vielen Jahren im Einsatz, wenngleich mit gegenüber Radar reduziertem Leistungsvermögen. Lidar (Light Detection and Ranging) benutzt elektromagnetische Wellen im infraroten Wellenlängenbereich zwischen 800 und 1000 nm. Lidarstrahlen werden durch Nebel und schlechte Sichtverhältnisse, vor allem Gischt, mitunter erheblich gedämpft, die Messreichweite wird dadurch entsprechend reduziert.

Bedeutung hat allerdings die hochwertige Lidarsensorik der Firma Velodyne in autonomen Fahrzeugen der Grand Challenge- und Urban Challenge-Wettbewerbe erlangt. Außerdem wurde dieser Sensor zur Digitalisierung von Straßennetzen durch die Frima Google eingesetzt.

#### 8.5.5.5.5 Nahbereichssensoren

Für den Nahbereich kommen neben Ultraschallsensoren mit erweitertem Entfernungsmessbereich (bis etwa 4,5 m) Short-Range-Radar-Sensoren auf Basis 24 GHz infrage. Sie können einen „virtuellen Sicherheitsgürtel" um das Fahrzeug bilden mit einer Reichweite bis zu 50 m.

Für das 24 GHz Ultra Wide Band (UWB) wurde Anfang 2005 eine EC-Richtlinie verabschiedet, die einen zeitlich begrenzten Einsatz regelt. Zum Schutz der etablierten Dienste (Radioastronomie, Erderkundungs-Satelliten-Service) darf eine Penetrationsrate von 7 % je europäisches Land nicht überschritten werden. Die Nachfolgefrequenz (79 GHz UWB) wurde bereits 2004 in Europa ohne Einschränkungen freigegeben, entsprechende Sensoren sind mittlerweile entwickelt und erlauben einen nahtlosen Übergang.

#### 8.5.5.5.6 Video-Sensor

Abb. 8.96 zeigt eine automobiltaugliche Videokamera, die speziell für Nahinfrarot-basierte Nachtsichtsysteme entwickelt wurde. Der Kamerakopf enthält den Bildaufnehmer-Chip (Imager) mit der Optik und einer Elektronik zur Ansteuerung der




**Abb. 8.96** CMOS-Kamera für Automobilanwendungen

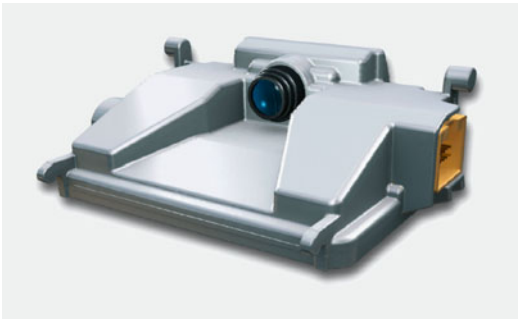


**Abb. 8.97** Multipurpose-Kamera für mehrere Funktionen gleichzeitig

Kamera. Die Bildverarbeitung erfolgt in einem separaten Hochleistungsrechner.

Da die Helligkeit von Bildszenen im automotiven Umfeld nicht kontrollierbar ist, reicht der Dynamikbereich herkömmlicher Bildsensoren (CCD) nicht aus. Es werden daher hochdynamische Imager benötigt. CMOS-Technologie mit nichtlinearer Luminanzkonversion deckt heute einen sehr großen Helligkeits-Dynamikbereich (bis max. 150 dB) ab und ist damit für die typischen Automobilanwendungen herkömmlichen CCD-Sensoren weit überlegen.

Da mit der Videotechnik auch andere, vor allem Tagfunktionen, realisiert werden, wurde diese Kamera zu einer für mehrere Funktionen gleichzeitig nutzbare „Multipurpose-Kamera" weiter entwickelt [156, 157]. Sie besitzt etwa die gleiche Baugröße wie die in Abb. 8.96 dargestellte Kamera, hat aber einen integrierten Hochleistungsrechner für die Bildauswertung und Bildverarbeitung. Abb. 8.97 zeigt diese Kamera.

### 8.5.5.6 Fahrerassistenzsysteme für Komfort und Sicherheit

Auf Basis der beschriebenen einzelnen Sensoren und deren Kombination (Sensordatenfusion) lässt sich eine Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen realisieren [157, 158].

#### 8.5.5.6.1 Einparkhilfe-Systeme

Durch konsequentes Windkanal-Design moderner Fahrzeugkarosserien ist die Sicht beim Rangieren mitunter stark eingeschränkt. Vorhandene Hindernisse rund um das Fahrzeug sind somit häufig nur schlecht oder überhaupt nicht erkennbar. So sieht der Durchschnittsfahrer beim Blick durch die Heckscheibe die Straßenoberfläche erst in einem Abstand von 8 bis 10 m. Auch direkt vor dem Fahrzeug befindliche Hindernisse entziehen sich dem Blick des Fahrers, da sie durch den Fahrzeugvorbau verdeckt werden.

Um die Sicht des Fahrers um eine „elektronische Sicht" zu erweitern, sind Einpark- und Manövrierhilfen auf Basis der in ▶ Abschn. 8.5.5.5.2 beschriebenen Ultraschallsensoren sehr gut geeignet. Sie haben mittlerweile hohe Akzeptanz beim Endkunden, dem Fahrzeugführer, gefunden.

Einparkhilfen überwachen einen Bereich von ca. 20–250 cm hinter oder vor dem Fahrzeug, s. Abb. 8.98. Andere Fahrzeuge und Hindernisse werden erkannt und durch optische und/oder akustische Mittel angezeigt.

Es gibt verschiedene Ausführungsformen der Einparkhilfe. Einfachere Systeme nutzen 3 bis 4 Sensoren am Fahrzeugheck, aufwändigere Lösungen nutzen bis zu 12 Sensoren am Fahrzeug (6 an der Fahrzeugfront, 6 am Fahrzeugheck). Hierbei kann durch Anbringung von Sensoren an den Fahrzeugecken auch eine wirkungsvolle Eckenabsicherung realisiert werden [97].

Neben den Ultraschallsensoren besteht das Gesamtsystem noch aus den Komponenten Steuergerät und Warnelement. Die Aktivierung des Systems erfolgt beim Einlegen des Rückwärtsgangs bzw. bei Systemen mit zusätzlicher Frontabsicherung mit

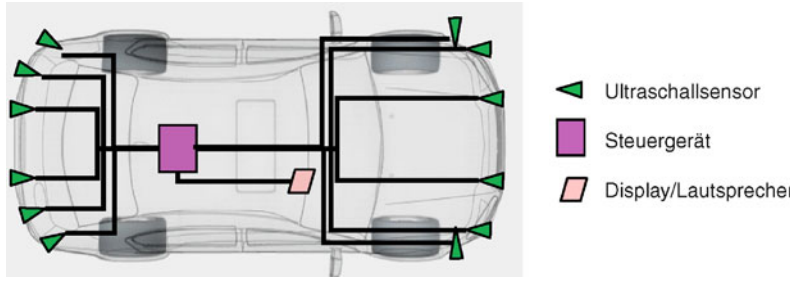



**Abb. 8.98** Einparkhilfesystem



dem Unterschreiten einer Geschwindigkeitsschwelle von ca. 15 km/h. Während des Betriebes gewährleistet die Selbsttestfunktionalität eine permanente Überwachung aller Systemkomponenten.

Die an der Fahrzeugfront seitlich angebrachten Sensoren eignen sich gleichzeitig für die Parklückenvermessung. Sie messen während des Vorbeifahrens an einer Parklücke deren Länge und Tiefe aus und geben dem Fahrer eine Information ob sie für das eigene Fahrzeug ausreichend groß ist. Hindernisse in der Parklücke werden erkannt und dem Fahrer signalisiert.

In einem zweiten Schritt errechnet das System aus den Signalen der beiden seitlich angebrachten Ultraschallsensoren eine optimale Einparktrajektorie. Der Fahrer erhält Hinweise zum optimalen Einparken über ein Display im Kombiinstrument.

Der dritte Schritt wurde mit sog. Aktiven Einparksystemen gegangen. Sie interagieren direkt mit dem Fahrzeug in der Art, dass das System das Fahrzeug in die Parklücke lenkt, während der Fahrer nur noch die Kontrolle über die Längsführung des Fahrzeugs übernehmen muss (Semiautomatischer Parkassistent).

Der vierte Schritt, die Weiterentwicklung zum vollautomatischen Einparkassistenten, ist klar vorgezeichnet: Auch die Längsführung (beschleunigen, Bremsen) wird dann vom System übernommen. Autonome Einparksysteme werden dann auch ein vollautomatisches Einparken erlauben, bei denen sich der Fahrer außerhalb des Fahrzeugs befindet [152].

Der fünfte Schritt wird schließlich durch das sog. „Valet Parking"-System gegangen. Der Fahrer stellt sein Fahrzeug auf einer Abstellfläche vor dem Parkhaus ab und startet mit einer Fernbedienung (Mobiltelefon oder intelligente Armbanduhr) den Einparkvorgang. Das Fahrzeug fährt in das Parkhaus und sucht sich selbständig einen Parkplatz. Mit der Fernbedienung kann der Fahrer das Fahrzeug wieder aus dem Parkhaus holen.

Systeme dieser Art gestatten völlig neue Konzepte für die Gestaltung „menschenloser" Parkhäuser mit reduzierter Geschoßhöhe und minimalen Abständen zwischen den Fahrzeugen.

Einen weiteren Nutzen kann die Ultraschallsensorik beim Rangieren erbringen. Der Rechner speichert während des Fahrens die Lage der Hindernisse rund um das Fahrzeug und warnt den Fahrer wenn z. B. die Gefahr besteht, dass er im Parkhaus beim Abbiegen mit einem seitlichen Hindernis kollidiert.

#### 8.5.5.6.2 Adaptive Cruise Control (ACC)

ACC in seiner ursprünglichen Ausprägung misst den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und regelt den Sicherheitsabstand zum Vordermann. Abb. 8.99 zeigt die prinzipielle Funktion des ACC.

Bei freier Fahrbahn fährt das Fahrzeug mit der vorgewählten Geschwindigkeit (Tempomat-Modus, Abb. 8.99, oben). Bei Erfassung eines vorausfahrenden Fahrzeugs passt ACC die Fahrgeschwindigkeit automatisch an und folgt im festgelegten Sicherheitsabstand (Abb. 8.99, Mitte).

Die gesetzte Wunschgeschwindigkeit und der Sicherheitsabstand werden durch Eingriff in Gas und Bremse eingehalten. Bei zu hoher Annäherungsgeschwindigkeit wird der Fahrer gewarnt.

Verlässt das langsamer vorausfahrende Fahrzeug die eigene Spur (Abb. 8.99, unten) so be-

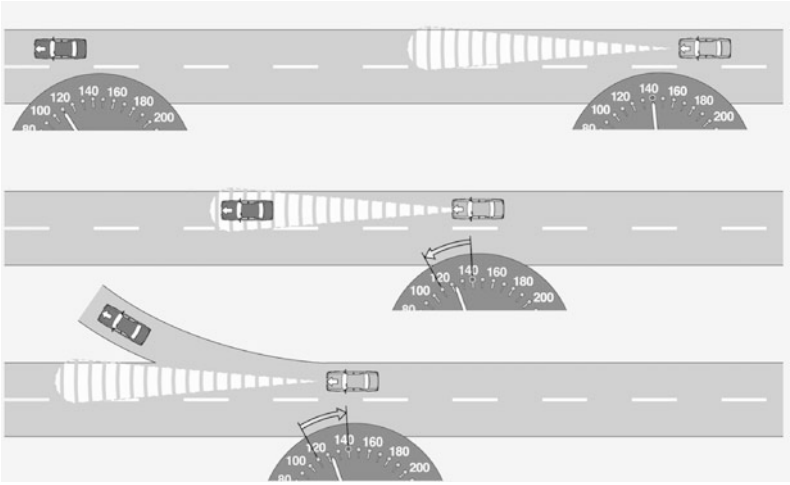



**Abb. 8.99** Funktionsweise des ACC-Systems

schleunigt das eigene Fahrzeug wieder auf die zuvor eingestellte Wunschgeschwindigkeit.

Um Kurvenfahrten mit zu hoher Geschwindigkeit auszuschließen, werden zusätzlich die Signale der ESP-Sensorik einbezogen. ACC reduziert dann automatisch die Geschwindigkeit. Das ACC-System kann vom Fahrer jederzeit durch Betätigung des Gaspedals überstimmt oder durch ein kurzes Antippen des Bremspedals abgeschaltet werden [138]. ACC in der heutigen Ausprägung funktioniert bei Geschwindigkeiten oberhalb 30 km/h bis etwa 200 km/h.

Die nächste Stufe der Funktionserweiterung ist mit der Funktion ACCplus in 2006 in Serie eingeführt. Diese Funktion erlaubt es, das Fahrzeug bis zum Stillstand abzubremsen.

Ein weiterer Entwicklungsschritt wurde mit der Funktionserweiterung Staufolgefahren (Low Speed Following, LSF) beschritten, bei der eine Fusion der Daten des Long Range Radar und eines Mittelbereichssensors oder eines Nahbereichssensors vorgenommen wurde. Die Überlappung der Bereiche der einzelnen Sensortypen gestattet eine Steigerung der Detektionszuverlässigkeit. Diese Funktion erlaubt es, das Fahrzeug bis zum Stillstand abzubremsen aber nach dem Abbremsen des Fahrzeugs in den Stillstand reicht es aus, beim wieder Anfahren das Gaspedal zu betätigen um ACC bei freier Fahrt wieder zu aktivieren.

In einem noch weiteren Entwicklungsschritt wurde der Funktionsumfang auf ACC FSR (Full Speed Range) erweitert. Nach dem Abbremsen des Fahrzeugs in den Stillstand fährt es innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls selbständig wieder an und nimmt damit dem Fahrer das lästige Stop- and Go-Fahren im Kolonnenverkehr ab. Durch Kombination von ACC FSR mit einer Videosensorik wird es dann wegen der Möglichkeit, Objekte zu klassifizieren, möglich sein, eine vollständige Längsführung in allen Geschwindigkeitsbereichen und auch im Stadtverkehr vorzunehmen.

#### 8.5.5.6.3 Prädiktive Sicherheitssysteme (Predictive Safety Systems, PSS)

Das heutige ACC ist als Komfortfunktion ausgelegt, die den Fahrer bei seiner Arbeit entlastet. Von 2005 an wurde ACC als Bestandteil des „Predictive Safety Systems" zum Sicherheitssystem erweitert.

Da in 68 % aller Auffahrunfälle Unachtsamkeit die Ursache für den Unfall ist, besitzt PSS ein hohes Unfallvermeidungspotenzial. In weiteren 11 % kommt zur Unaufmerksamkeit noch zu dichtes Auffahren hinzu, in 9 % aller Auffahrunfälle ist zu dichtes Auffahren die alleinige Ursa-

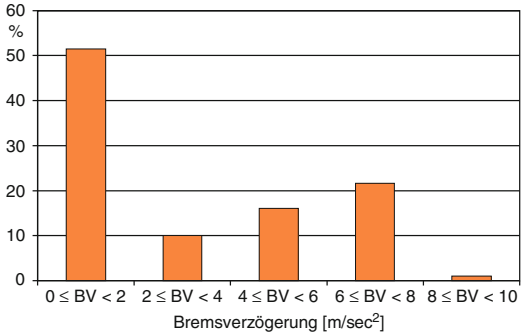



**Abb. 8.100** Bremsverhalten bei Unfällen



che [140]. Diesem hohen Anteil an Auffahrunfällen kann durch prädiktive Fahrerassistenzsysteme zur Längsführung entgegengewirkt werden, den beiden letztgenannten bereits durch die normale ACC-Funktion.

Abb. 8.100 zeigt eine Analyse des Bremsverhaltens bei Unfällen [141], die später durch eine Analyse auf Basis der GIDAS-Datenbank aktualisiert wurde [159].

Eine echte Notbremsung erfolgt nur in etwa 2 % aller Fahrzeug-Fahrzeug-Unfälle bzw. in 45 % der Unfälle, bei denen zu zaghaft gebremst wurde (Bremsverzögerung zwischen 2 und 8 $m/s^2$). In nahezu der Hälfte aller Kollisionen wird überhaupt nicht oder nur sehr zaghaft gebremst (Bremsverzögerung $< 2\,m/s^2$) gebremst. Diese Analyse bestätigt, dass prädiktive Fahrerassistenzsysteme einen hohen Beitrag zur Unfallvermeidung und Unfallfolgenmilderung leisten können, wenn es gelingt, mit ihnen das Bremsverhalten des Fahrers zu unterstützen, zu beschleunigen oder durch einen Rechnereingriff vornehmen zu lassen.

Für die Weiterentwicklung von prädiktiven Sicherheitssystemen wurde schrittweise vorgegangen:

- 1. Stufe: Unterstützung bei der optimalen Vollbremsung
  In der ersten Stufe bereitet das System die Bremsanlage auf eine mögliche Notbremsung vor. In unfallkritischen Situationen baut es dazu Bremsdruck auf, legt die Bremsbeläge unmerklich an die Scheiben an und passt den hydraulischen Bremsassistenten an. Der Fahrer gewinnt so wichtige Sekundenbruchteile bis die volle Bremswirkung eintritt. Macht er nun eine Notbremsung, erhält er die schnellstmögliche Bremsreaktion bei optimalen Verzögerungswerten und damit den kürzestmöglichen Anhalteweg. Kommt es zu einem Unfall, kann das System die Folgen mildern und dabei auch Leben retten.
  In ungefähr der Hälfte aller Kollisionen prallen die Fahrer nahezu ungebremst auf das Hindernis auf. Für diese Art von Unfällen wurden die zwei Folgegenerationen des Predictive Safety Systems entwickelt. Die Serieneinführung erfolgte in 2005.
- 2. Stufe: Warnung bei drohenden Auffahrunfällen
  Das Predictive Safety System der 2. Generation bereitet nicht nur die Bremsanlage vor, es warnt den Fahrer zudem rechtzeitig vor kritischen Verkehrssituationen und kann damit in vielen Fällen Unfälle verhindern. Dazu warnt das System optisch und akustisch und löst einen kurzen, starken Bremsruck aus, wenn der Fahrer nicht auf die Warnung reagiert hat. Wie Fahrerstudien gezeigt haben, lenkt eine solche kinästhetische Warnung die Aufmerksamkeit des Fahrers mit der kürzesten Reaktionszeit auf das Fahrgeschehen. Alternativ oder zusätzlich kann das System den Fahrer durch ein kurzes Anziehen der Sicherheitsgurte alarmieren. Durch diese Systemausprägung lassen sich somit zusätzlich zu den Unfallsituationen, in denen die 1. Stufe wirkt, auch die, in Abb. 8.100 dargestellten Fälle adressieren, bei denen hauptsächlich wegen Unaufmerksamkeit gar nicht oder nur mit geringer Bremsverzögerung gebremst wird. Die Serieneinführung ist Ende 2006 erfolgt.
- 3. Stufe: Bremsung und Notbremsung bei unvermeidbaren Kollisionen
  Hat der Fahrer auf diese Warnung immer noch nicht reagiert, so beginnt das System mit mittlerer Bremskraft zu bremsen. Bei immer noch ausbleibendem Eingriff des Fahrers in die Bremse verstärkt das System die Bremskraft weiter. Erst dann, wenn das System erkennt, dass eine Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug nicht mehr vermeidbar ist, wird eine automatische Notbremsung mit maximaler Fahrzeugverzögerung ausgelöst. Damit

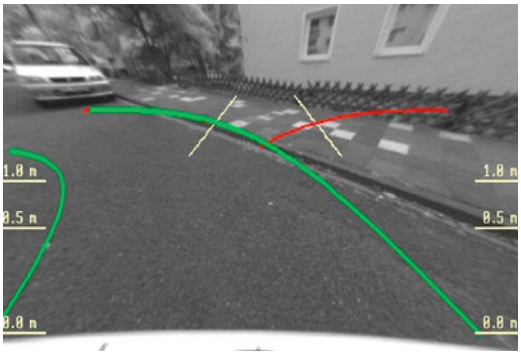



**Abb. 8.101** Bild einer Rückfahrkamera mit Hilfslinien und Entfernungsangaben

wird die Schwere des Unfalls reduziert. Die automatische Steuerung der Fahrzeugfunktion verlangt eine sehr hohe Sicherheit bei der Erkennung von Objekten und der Abschätzung des Unfallrisikos, beispielsweise durch Kombination der Radarsensorik mit Videosensoren zur Objektklassifizierung [139]. Das Wiener Weltabkommen von 1968, das heute den Einsatz solcher Systeme im öffentlichen Straßenverkehr untersagt, soll in 2015 neu gefasst werden. Rechnereingriffe sollen dann auch gegen den Fahrerwillen in Situationen zulässig sein, in denen der Fahrer aufgrund seiner eingeschränkten Reaktionsfähigkeit nicht mehr rechtzeitig reagieren kann um den Unfall zu vermeiden oder dessen Auswirkungen zu reduzieren. Systeme mit Fußgängererkennung und automatischer Notbremsung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis etwa 50 km/h befinden sich bereits in Serie da ihr hoher Nutzen außer Frage steht.

#### 8.5.5.6.4 Bildgebende Video Systeme

Die Videotechnik kam zunächst bei bildgebenden Assistenzsystemen zum Einsatz wurde dann aber rasch zu warnenden Systemen weiterentwickelt.

**Rückfahr- und Manövrierhilfen** Einfache Kameras für Rückfahr- und Rangiersysteme sind vor allem in japanischen Fahrzeugen schon seit geraumer Zeit zu finden. Solche Systeme zeigen dem Fahrer das Bild der Videokamera auf einem Bildschirm in der Mittelkonsole. Erste Systeme zeigen eine starke Bildverzerrung des Weitwinkel-Objektivs, was die Abschätzung zu Hindernissen stark erschwert hat. Mittlerweile werden die Kamerabilder entzerrt und z. T. wird auch Zusatzinformation, z. B. Entfernungsmarkierungen zum besseren Abschätzen der Entfernung oder die aus dem momentanen Lenkwinkel errechnete Trajektorie beim Zurücksetzen des Fahrzeugs dargestellt.

Abb. 8.101 zeigt ein Beispiel.

Seit kurzem werden von verschiedenen Fahrzeugherstellern auch videobasierte Manövrierhilfen angeboten. Ein System, der „Side-View-Assistent“, unterstützt den Fahrer beim Ausfahren aus engen Einfahrten. Eine Kamera ist hinter 2 um 45° gegen die Fahrzeugachse gekippte Spiegel angeordnet und gestattet den Blick nach rechts und nach links. Abb. 8.102 zeigt den Blick auf das Display [153]. In der Mitte unten ist der Blickbereich dargestellt.



**Abb. 8.102** Side-View-Assistent

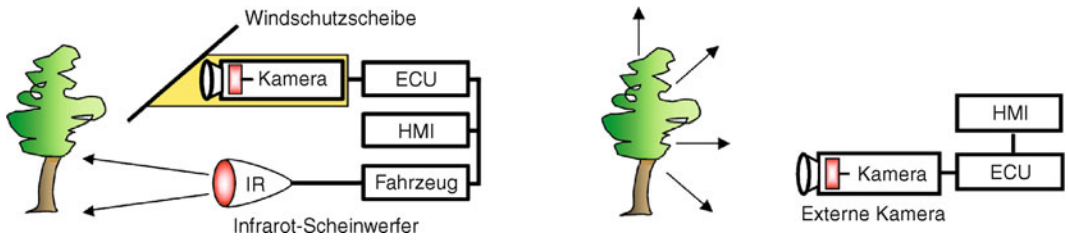



**Abb. 8.103** Nahinfrarotsystem (*links*) und Ferninfrarotsystem (*rechts*)

Das „Top-View-System" gestattet gar einen Blick auf das eigene Fahrzeug und die Umgebung aus der Vogelperspektive. Hierzu werden die Bilder von 4 Ultra-Weitwinkelkameras zu einem 360°-Rundumsichtbild verrechnet.

**Nachtsichtsysteme** Systeme zur Verbesserung der Nachtsicht können einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Unfällen leisten, da sich fast 50 % aller tödlichen Unfälle bei Nacht ereignen obwohl nur rund ein Fünftel aller Fahrten bei Nacht stattfinden [143]. Neben schlechten Wetterverhältnissen kommt beschränkte Sicht bei Nacht vor allem bei Gegenverkehr vor. Es sind bereits Scheinwerfer in Serie, die ihre Lichtverteilung an bestimmte Verkehrsverhältnisse anpassen können. Dieses sog. Pixel-Licht stellt automatisch die optimale Ausleuchtung der Fahrbahn ein, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. So können z. B. auch Fußgänger oder Tiere auf der Fahrbahn angeleuchtet werden.

Derzeit sind zwei verschiedene Verfahren zur Nachtsichtverbesserung in Serie, nämlich ferninfrarot (FIR)-basierte Systeme und nahinfrarot (NIR)-basierte Systeme. Abb. 8.103 zeigt den prinzipiellen Unterschied zwischen den beiden Verfahren [144].

- **Ferninfrarot (FIR) Systeme**
  FIR-Nachtsicht-Verbesserungssysteme empfangen Wärmestrahlung im sog. „fernen" Infrarot-Wellenlängenbereich zwischen 7 und 12 µm, die von Gegenständen ausgestrahlt wird. Es handelt sich um passive Systeme, die keine zusätzlichen Strahlungsquellen zur Beleuchtung der Objekte benötigen.
  Die pyroelektrische Wärmebildkamera oder Mikrobolometerkamera zur Aufnahme des Wärmebildes ist nur im oben angegebenen Wellenlängenbereich sensibel. Sie benötigen eine Temperaturregelung. Da Windschutzscheibenglas diese Wellenlängen nicht durchlässt, muss die Kamera im Außenbereich des Fahrzeugs verbaut werden. Die Auflösung aktuell verfügbarer Kameras reicht bis VGA (640 × 480 Bildpunkte). Die Signale der Kamera werden über ein Steuergerät (ECU) auf einem Display (HMI) zugeführt und dort als Bild dargestellt.
  Warme Gegenstände zeichnen sich im Bild als helle Konturen im dunklen (kälteren) Umfeld ab. Die Bilddarstellung ist jedoch für den Fahrer eher ungewohnt, da das Erscheinungsbild nicht dem eines normalen Reflexionsbildes entspricht. Nachteilig ist auch, dass sich Objekte, bei tiefen Außentemperaturen kontrastreich, bei warmem Umfeld hingegen nur noch schwach abzeichnen.
- **Nahinfrarot (NIR) Systeme**
  Nahinfrarotsysteme verwenden Infrarotstrahlung im nahen Spektralbereich zwischen 800 und 1000 nm, nahe dem sichtbaren Spektrum. Da Gegenstände keine Strahlung in diesem Wellenlängenbereich aussenden, müssen sie mit speziellen Scheinwerfern bestrahlt werden, damit sie von einer infrarotempfindlichen Videokamera aufgenommen werden können. Bildsensoren aus Silizium sind in diesem Wellenlängenbereich sensibel und damit für Taganwendungen ebenso geeignet wie für Nachtsichtsysteme.
  Halogenlampen für Automobilscheinwerfer besitzen einen hohen Infrarotanteil, der von der Grenze des sichtbaren Spektrums (380–780 nm) bis zu Wellenlängen jenseits 2000 nm




**Abb. 8.104** Erscheinungsbild eines NIR-Systems (*oben*) und eines FIR-Systems (*unten*)

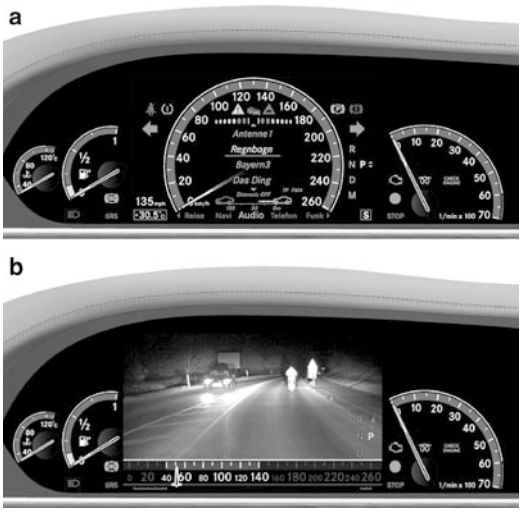



**Abb. 8.105** Betriebsmodi des Kombiinstruments, *oben*: Tachometer-Anzeige, *unten*: Nachtsicht-Modus

reicht, mit einem Maximum zwischen 900 und 1000 nm. In Praxis werden zur Realisierung des NIR-Systems zusätzliche IR-Leuchtmodule in die Frontscheinwerfer integriert. Durch die Nähe des NIR-Spektrums zum sichtbaren Spektrum reflektieren natürliche Objekte NIR ähnlich wie sichtbares Licht, d. h. das Bild gleicht weitgehend dem normalen Seheindruck bei Fernlicht und erscheint dem Fahrer vertraut.

Um ein kontrastreiches, brillantes Bild zu erhalten und um Objekte gut erkennen zu können, wird bei hochwertigen Systemen das Videobild nachbearbeitet. Damit können Fußgänger in einer Entfernung von bis zu 150 m sicher vom Fahrer erkannt werden.

Heute verfügbare Videosensoren haben eine Auflösung von 640 × 480 Bildpunkten und mehr.

Abb. 8.104 zeigt die Ansichten eines NIR-Systems (oben) und eines FIR-Systems (unten). Im oberen Bild ist deutlich zu erkennen, dass nur Objekte erkennbar sind, die von den IR-Scheinwerfern angestrahlt werden. Das Bild erscheint dem Betrachter so vertraut wie ein Schwarzweiß-Fernsehbild. Spurmarkierungen zeichnen sich im Bild deutlich ab.

Beim unteren FIR-Bild fällt vor allem die große Reichweite auf. Es werden alle Gegenstände erfasst, deren Temperatur höher als die Umgebungstemperatur ist. Spurmarkierungen sind hingegen nur andeutungsweise sichtbar. Ein Vergleich der Eigenschaften der beiden Systeme ist in [144–146] und [148, 149] zu finden und zeigt Vorteile für das NIR-System.

- **Darstellung von Nachtsichtinformation**
  Das Kamerabild kann an verschiedenen Orten im Fahrzeug platziert werden, nämlich in der Windschutzscheibe als Head-up Display (HUD), in der Mittelkonsole oder im Kombiinstrument. Wissenschaftler der Universitäten Berlin und Chemnitz haben in einer Studie [150] festgestellt, dass das Kombiinstrument vom Endverbraucher am besten akzeptiert wird. Dieser Einbauort wurde bei der S-Klasse (Einführung in 2005) gewählt.
  Abb. 8.105 zeigt die beiden Betriebsmodi.

Im Nachtsichtmodus wird die Geschwindigkeitsanzeige in Form eines horizontalen Balkens realisiert.

#### 8.5.5.6.5 Videosysteme mit Bildverarbeitung

Während die bisher vorgestellten videobasierten Systeme entweder eine direkte Bilddarstellung oder eine Bilddarstellung mit vorheriger Bildbearbeitung durchführen, benötigen anspruchsvollere Fahrerassistenzsysteme auf Basis der oben beschriebenen

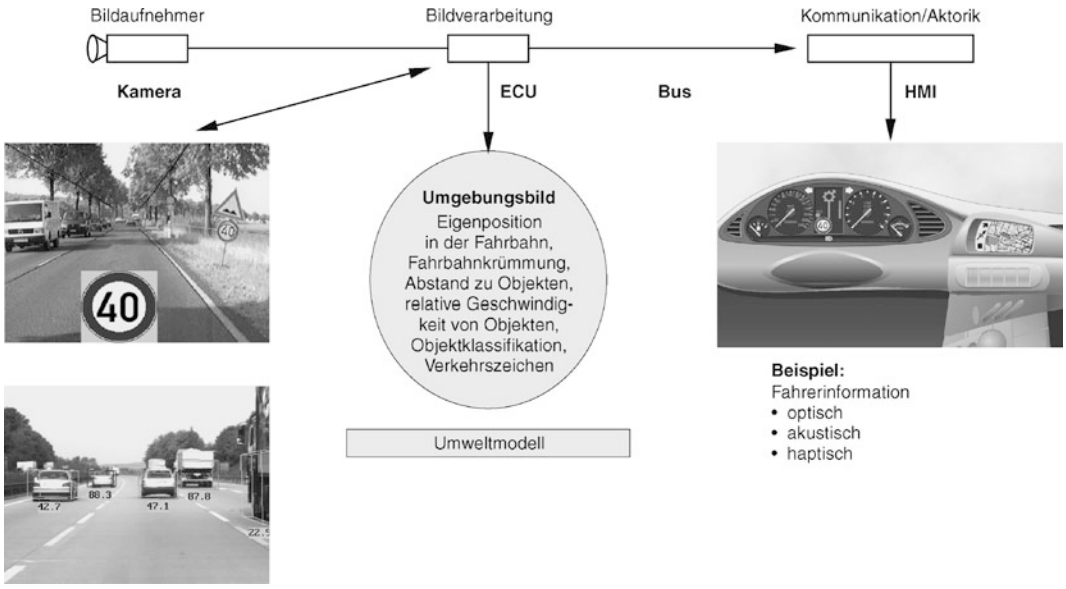



**Abb. 8.106** Prinzip eines Videosystems mit Funktionsbeispielen

Videotechnik einen leistungsfähigen Rechner zur Bildverarbeitung. Abb. 8.106 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Videosystems.

Die im Bild aufgelisteten Punkte zeigen beispielhaft auf, welche Informationen von einem Bildverarbeitungssystem extrahiert werden können. Das Videosystem ist i. a. multifunktional als Plattform ausgelegt, d. h. mit einer Kamera kann eine Vielzahl von warnenden und Fahrzeug eingreifenden Funktionen realisiert werden. Die extrahierten Bildmerkmale werden in Form von Objektlisten über einen Datenbus anderen Komponenten im Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Im gezeichneten Beispiel wird die vom Bildverarbeitungsrechner erkannte und als solches interpretierte Geschwindigkeitsbeschränkung vom Kombiinstrument übernommen und als Symbol im Graphikdisplay des Kombiinstruments angezeigt. Beachtet der Fahrer die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht, so warnt ihn das System zusätzlich akustisch oder haptisch, beispielsweise durch Erschweren der Gaspedalbetätigung [139].

Auf Basis dieser Komponenten und Informationen sind anzeigende, warnende und Fahrzeug eingreifende Funktionen möglich. Die Frontkamera kann neben einer rein anzeigenden Nachtsichtfunktion andere Funktionen wie z. B. Spurerkennung mit Spurverlassenswarnung oder eine Verkehrszeichenerkennung einschließen. Daneben kann sie, wie oben beschrieben, als Unterstützung des ACC-Sensors dienen, um neben der Entfernungsmessung eine Objekterkennung und -klassifikation durchzuführen.

**Nachtsichtsysteme der 2. Generation** In Weiterentwicklung dieser ersten Generation von Nachtsichtsystemen werden neuerdings Bildverarbeitungsverfahren für die Erkennung von Fußgängern eingesetzt. Der Fußgänger wird durch die typische Kopf-Schulterpartie sicher erkannt und der Fahrer wird situationsgerecht durch eine optische Anzeige und/oder einen Warnton gewarnt. Durch weitere Objektklassifizierungsalgorithmen kann die Warnung auch auf Tiere und andere Objekte erweitert werden. Für eine Warnung ist es dann natürlich wichtig zu wissen, ob sich das erkannte Objekt auf oder neben dem eigenen Fahrstreifen befindet, was die NIR-Technik wiederum überlegen macht. Solche Systemausprägungen beschleunigen die Erkennung relevanter Objekte und wirken einer eventuellen, längeren Blickabwendung zum Ablesen des Bildschirms entgegen.



**Abb. 8.107** Darstellung einer Warnung vor Fußgängern im Head-up Display [153]

In der oben genannten Studie [150] wurde festgestellt, dass die Einblendung eines Warnsymbols in der Windschutzscheibe auf hohe Akzeptanz bei den Testpersonen stößt. Abb. 8.107 zeigt ein Beispiel eines von BMW im Jahre 2008 eingeführten FIR-Systems.

**Spurverlassenswarner/Spurwechselassistent** Unbeabsichtigte Spurwechsel gehören zu den häufigsten Unfallursachen. Sie sind zumeist durch Müdigkeit (Sekundenschlaf) oder durch Ablenkung verursacht. Ein Spurwechselassistent wirkt dieser Unfallursache entgegen, indem er die voraus liegenden Fahrbahnbegrenzungen detektiert und den Fahrer warnt, wenn die Gefahr besteht, dass eine voraus liegende Begrenzungslinie überfahren wird, ohne dass der Blinker gesetzt wurde.

Systeme zur Spurverlassenswarnung (LDW = Lane Departure Warning) können sowohl in Mono- wie auch in Stereotechnik aufgebaut werden. Die Reichweite eines Monosystems liegt, bei VGA-Auflösung des Imagers, bei guten Wetterverhältnissen und guten Spurmarkierungen im Bereich knapp über 40 m, beim Stereosystem sind es etwa 10–20 % mehr. Bisher konnten sich nur Monosysteme am Markt etablieren. Abb. 8.108 zeigt das Prinzip der Fahrspurerkennung.

Wie dort dargestellt, sucht das Bildverarbeitungssystem nach Fahrspurmarkierungen vor dem Fahrzeug, indem Kontrastunterschiede zwischen Asphalt und Spurmarkierung ausgewertet werden. Lücken in den Spurmarkierungen werden durch Kalman-Filterung überbrückt. Das obere Bild zeigt das Kamera-Bild mit Suchlinien (siehe Detail im zweiten Bild von oben) und die Kreuze im oberen Bild markieren den Spurverlauf, der vom Bildverarbeitungsrechner berechnet wird. Um eine Linie zu detektieren, wird das Luminanzsignal innerhalb der Suchlinie analysiert. Durch Hochpassfilterung

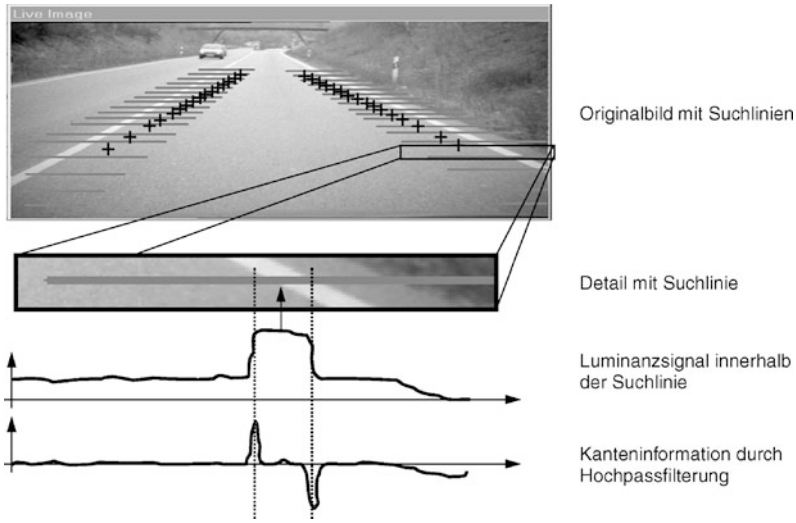



**Abb. 8.108** Details des Spurerkennungsalgorithmus

werden die Grenzen der Fahrspurmarkierung detektiert.

Aus diesen Signalen kann eine Warnung für den Fahrer abgeleitet werden wenn er die Fahrspur überfährt. Verschiedene Warnmodalitäten sind hierbei denkbar: Eine akustische Warnung in Form eines Warntons aus dem Fahrzeuglautsprecher (Stereoton vermittelt zusätzlich eine Richtung) oder ein sog. „Nagelbandrattern" haben sich als wirksame Warnung erwiesen. Zusätzlich kann man für die Warnung den haptischen Sinneskanal verwenden. Ein Vibrieren des Sitzes (mit Richtungsinformation) wurde Ende 2004 auf den Markt gebracht. Vibrieren des Lenkrads (Vorteil: direkte Assoziation mit der Lenkung) oder Beaufschlagung der Lenkung mit einem leichten Gegenmoment stellen weitere Systemausprägungen dar.



**Verkehrszeichenerkennung** Wie in ◘ Abb. 8.109 [154] dargestellt, kann ein Bildverarbeitungssystem auch Verkehrszeichen erkennen und interpretieren. Vorbedingung ist, dass die zu erkennenden Verkehrsschilder dem System zuvor eingelernt wurden. Während der Fahrt sucht der Rechner permanent nach Objekten, welche die Form von Verkehrsschildern haben.

Ist ein solches Objekt erkannt worden, wird es zunächst so lange verfolgt („getrackt") bis das Schild nahe genug ist, um es mit der dem Imager eigenen Auflösung lesen zu können. Dann kann die Geschwindigkeitsbegrenzung im Kombiinstrument angezeigt werden. Das Zeichen bleibt gespeichert so lange es aktuell ist und kann den Fahrer vor Bußgeldern bewahren wenn z. B. gerade seine Aufmerksamkeit in eine andere Blickrichtung gelenkt war.

### 8.5.5.7 Adaptive Systeme

Während konventionelle Fahrerassistenzsysteme wie ABS oder ESP den Fahrer in Situationen unterstützen, die sensoriell einfach zu ermitteln sind, müssen bei Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung Situationen interpretiert und als zutreffend angenommen werden. Während das System warnt oder automatisch agiert, überwacht der Mensch die Systemgrenzen.

Heutige Systeme arbeiten mit starren Algorithmen, die den Zustand des Fahrers außer acht lassen. Bekanntlich reagieren und handeln nicht alle Menschen gleich, da sie sich individuell unterscheiden und unterschiedliche Fahrpraxis besitzen. Das Reaktions- und Handlungsvermögen unterliegt zudem während einer Fahrt Schwankungen; der Mensch wird müde, wird abgelenkt oder unterliegt Stimmungsschwankungen, die seine Fähigkeiten zur Führung des Fahrzeugs beeinträchtigen und einschränken [160].




◘ **Abb. 8.109** Verkehrszeichenerkennung

Daher besteht die nächste Aufgabe darin, Fahrerassistenzsysteme adaptiv auszugestalten, d. h. die Warnung oder der Fahrzeugeingriff wird dem Fahrerzustand angepasst. Diese Adaptivität kann sich auf mehrere Parameter (z. B. Fahrpraxis, Reaktionsvermögen, Ermüdungszustand, Termindruck, Verkehrsdichte, u. a.) erstrecken. Als Eingangsgrößen zur Ermittlung dieser Parameter stehen Fahrzeugsignale (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Lenkverhalten, Bremsverhalten, …), Lenkzeiten, Lidschlagverhalten u. a. m. zur Verfügung.

Zunächst gilt es, Fahrertyp, Fahrerzustand und Fahrerabsicht zu erkennen. Dies lässt sich durch intelligente Verknüpfung der Größen: Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigungsverhalten, Bremsverhalten, Lenkverhalten etwa mithilfe eines neuronalen Netzes erreichen.

- Fahrertyp: Der unerfahrene oder ängstliche Fahrer kann z. B. durch niedrige gefahrene Durchschnittsgeschwindigkeit, durch zahlreiche Bremsmanöver und durch zaghaftes Beschleunigen ermittelt werden, der routinierte Fahrer durch zügige Fahrweise.

- Der Fahrerzustand ist vor allem durch das Lenk- und Beschleunigungsverhalten zu ermitteln. Ein müder Fahrer fährt zunächst Schlangenlinien, wenn er schließlich keine Lenkbewegungen mehr ausführt, so schläft er. Damit einher geht eine geringere Beschleunigungsdynamik. Daimler wendet diese Methode beim „Attention Assist"-System an, der den müden Fahrer nach längerer Lenkzeit und erkannter Müdigkeit zu einer Kaffeepause animiert indem das Symbol einer Kaffeetasse im Kombiinstrument erscheint.
- Auch die Fahrerabsicht lässt sich durch Verknüpfung von Lenk- und Beschleunigungsverhalten ermitteln. So wird in [155] aufgezeigt, dass eine Überholabsicht auch ohne gesetzten Blinker mit einer Signifikanz $> 90\,\%$ ermittelt werden kann. Auch für den Fahrerzustand werden in der Arbeit sehr gute Werte erreicht.

Sind diese Informationen gewonnen, lassen sich Warnungen, Dialoge und Fahrzeugeingriffe adaptiv gestalten, d. h. der jeweiligen Situation anpassen. Idealerweise geschieht das dann, wenn der Fahrer die Warnung oder den Eingriff erwartet und nicht dann, wenn er zu spät gewarnt wird oder wenn er gerade keine Warnung erhalten möchte. Hierzu einige Beispiele:

- Parklückenvermessung: Der unerfahrene Fahrer erwartet die Empfehlung einer längeren Parklücke als der routinierter Fahrer.
- ACC: Die Zeitlücke kann abhängig von der Verkehrsdichte eingestellt werden. Hiermit kommt das System dem Fahrerwunsch entgegen, kürzere Sicherheitsabstände einzuhalten um das Einscheren anderer Verkehrsteilnehmer zu verhindern. Umgekehrt kann bei entspannter Fahrweise oder bei schlechten Sichtverhältnissen eine größere Zeitlücke eingehalten werden und/oder eine Geschwindigkeitsbegrenzung erfolgen.
- Termindruck: Das ACC erkennt die Situation durch Analyse eines aggressiveren Fahrverhaltens, hält eine kurze Zeitlücke ein und unterdrückt Warnungen z. B. bei absichtlichem Überfahren einer durchgezogenen Fahrspurbegrenzung
- Müdigkeit: Mit zunehmender, vom System erkannten Müdigkeit des Fahrers kann die Warnung vor einer gefährlichen Situation früher und/oder intensiver (z. B. durch einen kurzen Bremsruck) erfolgen und somit der verlängerten Reaktionszeit des Fahrers angepasst werden.

Die Aufzählung zeigt eine Auswahl aus dem reichen Potenzial zur adaptiven Ausgestaltung von Fahrerassistenzsystemen.

#### 8.5.5.8 Zusammenfassung und Ausblick

Abb. 8.110 zeigt das vielfältige Einsatzgebiet von Fahrerassistenzsystemen auf dem Weg zum „Safety Vehicle" mit weitgehender Unfallvermeidung. Sie lassen sich untergliedern in:

- Komfortsysteme mit dem Fernziel „Autonomes Fahren" in mehreren Evolutionsschritten und in
- Sicherheitssysteme mit dem Ziel der Unfallvermeidung.

Fahrerunterstützende Systeme warnen den Fahrer vor Gefahren im Fahrzeugumfeld oder schlagen Fahrmanöver vor. Beispiele hierfür sind die Einparkhilfe oder Systeme zur Verbesserung der Nachtsicht. Auch Spurverlassenswarner und Systeme zur Detektion von Objekten im toten Winkel können einen hohen Beitrag zur Unfallvermeidung leisten.

Die Systeme zur Fahrzeugführung führen vom ACC-System bis zur vollständigen Längsführung auch in urbanen Bereichen und bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Hierbei geht man von einer komplexen Datenfusion von Radar- und Videodaten aus. Ergänzt man die Längsführung um ein – ebenfalls videobasiertes – System zur Querführung (Spurhalteassistent), ist eine autonome Fahrzeugführung möglich. Hoch automatisierte Systeme, bei denen das Fahrzeug die gesamte Fahraufgabe übernimmt, der Fahrer aber noch am Lenkrad sitzt, wurden schon mehrfach demonstriert, z. B. im Jahr 2013 bei der sog. „Bertha Benz-Gedächtnisfahrt" von Mannheim nach Pforzheim. Zum Test solcher Systeme wurden Ende 2014 vom Verkehrsministerium verschiedene Autobahnstrecken für hochautomatisiertes Fahren freigegeben.




**Abb. 8.110** Fahrerassistenzsysteme ebnen den Weg zum Unfall vermeidenden Fahrzeug

Passive Sicherheitssysteme beinhalten die vorausschauende Erkennung möglicher Crash-Situationen (Precrash) und die Funktionen zum Fußgängerschutz.

An die Funktionen der aktiven Sicherheit werden die höchsten Anforderungen bezüglich Funktionalität und Zuverlässigkeit gestellt. Sie reichen vom einfachen Parkstop, der das Fahrzeug beim Einparken vor einem Hindernis automatisch abbremst, bis hin zu den prädiktiven Sicherheitssystemen. An dieser Stelle geht die Perspektive bis hin zum Unfall vermeidenden Fahrzeug, mit rechnergestützter Durchführung von Fahrmanövern zur Kollisionsvermeidung.

Dennoch: Der Funktionalität der genannten Systeme sind heute noch Grenzen gesetzt, die im Wesentlichen durch Unzulänglichkeiten der Sensorik bedingt sind. Ein erster Schritt ist die Datenfusion, z. B. Radar mit Video. Radar erlaubt eine exzellente und schnelle Messung von Entfernung und Geschwindigkeit, kann aber nur sehr eingeschränkt eine Aussage über Größe und Art eines Hindernisses machen. Hier ergänzt die Videosensorik in idealer Weise. Sie ist in der Lage, eine Größenabschätzung des Hindernisses vorzunehmen. Kombiniert mit den Signalen des Radars ist eine recht gute Aussage über Art und Relevanz eines erkannten Objekts möglich. Weitere Entwicklungen, insbesondere im Bereich der Videotechnik und Bildverarbeitung werden immer weiter führende Aussagen über die Art der Objekte zulassen (Objektklassifikation). Eine Szeneninterpretation mit Vorhersage der Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer führt dann in den Bereich der komplexen Unfallvermeidung [142].

Die Anpassung von Warnschwellen und Eingriffen an die physischen und psychischen Eigenschaften des Fahrers kommt in Zukunft bei adaptiven Systemen den Erwartungen der Fahrer an die Performanz der Assistenzsysteme entgegen.

Auch komplexe Fahrerassistenzsysteme dürfen den Fahrer nicht dazu verleiten, die Kontrolle über das Fahrzeug vollkommen einem Rechner zu überlassen. Heutige Systeme sind so konzipiert, dass

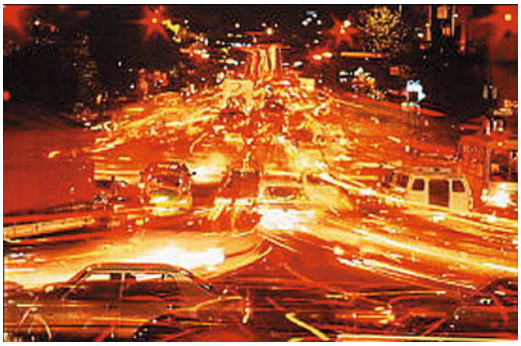


**Abb. 8.111** Städtisches Verkehrschaos bei Nacht

die Kontrolle und die Verantwortung über das Fahrzeug jederzeit beim Fahrer liegen. Der Fahrerwunsch hat immer Vorrang.

Trotz aller technischen Fortschritte wird der unfallfreie Straßenverkehr nach Einschätzung des Verfassers eine Vision bleiben. Aber es gibt zahlreiche Maßnahmen zur schrittweisen Einführung von Komfort- und Sicherheitssystemen, die maßgeblich zum entspannteren Fahren, zur Milderung von Unfallfolgen und zur Vermeidung von Unfällen beitragen können. Die EU hat mit dem e-Safety-Programm die richtige Initiative ergriffen. Fahrzeughersteller und Zulieferer haben die Aufgabe aufgegriffen und tragen ihren Beitrag zur Erreichung dieses Ziels bei.

## 8.5.6 Telematik

Um Mobilität nachhaltig zu sichern, bedarf es der Nutzung neuer Informations-, Kommunikations- und Leittechnologien im Verkehr. Die **Verkehrstelematik** bezeichnet als Zusammenfassung von Telekommunikation und Informatik den Einsatz modernster Technologien zur Effizienzsteigerung von Verkehrs- und Transportprozessen, zur Erhöhung der Sicherheit, des Reisekomforts sowie der Umweltschonung. Die rasante Entwicklung im Bereich der mobilen Kommunikation und die Möglichkeit, große Datenmengen sicher, zeitnah und kostengünstig zu übertragen, werden die Telematik in eine neue Dimension führen.

Ein wichtiger Baustein für europaweite Telematikanwendungen ist ein hochgenaues und zuverlässiges Ortungs- und Navigationssystem. Im Jahr 2003 hat die Europäische Union den Aufbau eines globalen, zivilen Satellitennavigationssystems einschließlich terrestrischer Infrastruktur beschlossen. GALILEO wird voraussichtlich ab 2018 einsatzbereit sein und steht in Konkurrenz zu den bereits verfügbaren Systemen GPS (USA) und Glonass (Russland) (Tab. 8.15, Abb. 8.111, Abb. 8.112).




**Abb. 8.112** Einsatz von Galileo

### 8.5.6.1 Grundlagen und Technologien der Verkehrstelematik

Die **zentrale Aufgabe** der Verkehrstelematik ist eine Verkehrsbeeinflussung durch Information, Kommunikation, Steuerung und Regelung, aber auch Überwachung mit dem Ziel einer Minderung der Negativwirkung des Verkehrs in allen seinen Teilbereichen.

Zum Einsatz kommen terrestrische und satellitengestützte mobile Kommunikationssysteme, zunehmend wird auch die Internet-Technologie in Fahrzeugen genutzt. Transportiert werden Daten zur Verkehrslage, zu Routenempfehlungen, zu Aufträgen und Ladungen. Das Informatik-Element beschreibt die Verarbeitung eingehender Verkehrs- oder Dispositionsdaten in Planungs- und Simulationstools. Die Ausgabedaten werden entweder betriebsintern verwendet oder im Rahmen von

**Tabelle 8.15** Galileo-Dienste

| Galileo Services | Open Service | Commercial Service | | Public Regulated Service | | Safety-of-Life Service |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Coverage | Global | Global | Local | Local | Global | Global |
| Accuracy | 15–30 m (single frequency) 5–10 m (dual frequency) | 5–10 m (dual frequency) | < 10 cm–1 m (local augmentation signals) | 1 m (local augmentation signals) | 4–6 m (local augmentation signals) | 4–6 m (local augmentation signals) |
| Availability | 99 % | 99 % | 99 % | 99–99 % | 99–99 % | 99–99 % |
| Integrity | Not generally required | Value-added services | | Mandatory requirement | | Yes |
| Alert Limit | – | 20–45 m | 2–3 m | 3–5 m | < 15 m | 15–20 m |
| Time to Alert | 10 s | 1 s | 1 s | 6 s | 6 s | |
| Integrity Risk | – | $2\times10^{-7}$/hour | $2\times10^{-7}$/hour | $2\times10^{-9}$/150 s | $3{,}5\times10^{-7}$/150 s | $2\times10^{-9}$/150 s |
| Continuity Risk | – | $10^{-4}$/hour | $10^{-4}$/hour | $< 10^{-5}$/15 s | $< 10^{-5}$/15 s | $8\times10^{-6}$/15 s |
| Certification and Service Guarantees | No | Guarantee of service possible | | Build for certification, guarantee of service possible | | Yes |

Mehrwertdiensten (z. B. Flottenmanagement) angeboten.

Die **Positionsbestimmung** mobiler Objekte ist ein zentrales Element der Verkehrstelematik, sie ermöglicht die Zielführung von Fahrzeugen und die Abbildung der Verkehrssituation durch z. B. Floating Cars.

An Verfahren stehen derzeit Map-Matching, die Koppel- und Satellitennavigation (GPS/DGPS/Galileo/Glonass) und die Ortung mit Hilfe der Mobilfunksysteme einzeln und in Kombination zur Verfügung.

**Intermodale Telematikansätze** versuchen, die verschiedenen Verkehrsträger in einem einheitlichen Konzept zu integrieren, um so z. B. die Verfolgung eines Containers während des Transports auf Schiene, Schiff oder Straße (besonders auch im grenzüberschreitenden Verkehr) zu ermöglichen, eine optimale Transportroute mittels verschiedener Verkehrsträger zu ermitteln oder einem Verkehrsteilnehmer Informationen über die Anschlussmöglichkeiten zu anderen Verkehrsmitteln zur Verfügung zu stellen.

Neben den technischen Aspekten beschäftigt sich die Verkehrstelematik auch mit den sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Verkehrssteuerung durch IuK (Informations- und Kommunikations-) Technologien. Dazu gehören die Verringerung der negativen Auswirkungen des Verkehrs auf die Umwelt, der Wandel des Mobilitätsverhaltens innerhalb der Gesellschaft und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Personen- und Güterverkehr durch die Optimierung der Kapazitätsauslastung der vorhandenen Transport- und Verkehrsinfrastruktur.

Vorteile, die Verkehrstelematikanwendungen für den **Umweltschutz** bieten, können in folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Energieeinsparung durch Stauvermeidung und verstärkte Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel,
- Verringerung der Abgasemissionen durch Verkürzung des Stop-and-Go-Verkehrs und Vermeidung von Umwegen,

- weniger Autofahrten durch zuverlässigere und damit attraktivere öffentliche Verkehrsmittel,
- Verringerung weiterer Straßenbaumaßnahmen und damit geringerer Landschaftsverbrauch.

Verkehrstelematikdienste sorgen für einen **besseren Ablauf des Verkehrs** und unterstützen die **Mobilität im Individual- und öffentlichen Verkehr** z. B. aufgrund folgender Wirkungen:

- Geringere Wartezeiten beim ÖPNV durch Fahrplanauskunftssysteme und sichere Anschlüsse,
- optimale Kombination öffentlicher und privater Verkehrsmittel,
- Beschleunigung des Bus-, Straßenbahn- und Zugverkehrs durch Betriebsleitsysteme,
- Verringerung der Irrfahrten in unbekannten Städten durch automatisierte, dynamische Zielführungs- und Parkleitsysteme,
- schnelleres Eintreffen der Rettungsdienste (e-call),
- Carsharing-Dienste, bei denen die Parkposition der nächsten verfügbaren Fahrzeuge vom Standort des Nutzers angegeben wird.

**Einsparungen**, die durch den Einsatz von Verkehrstelematikdiensten erreicht werden können, sind z. B.

- Weniger Leerfahrten durch Fracht- und Flottenmanagement,
- Verringerung der Fahrzeugbestände durch bessere Auslastungsquoten,
- weniger Kilometerleistung und Zeiteinsparung durch individuelle Zielführungssysteme, Umgehung von Staus,
- bessere Abstimmung der Verbindungen zwischen verschiedenen Verkehrsträgern (Modal Split),
- schnellere Abwicklung von Grenzformalitäten,
- geringere Lagerhaltungskosten (Just-In-Time-Steuerung).

Der Austausch von Informationen zwischen mobilen Objekten und Dienstleistungszentralen erfolgt derzeit mit Hilfe unterschiedlicher Telekommunikationsmittel. Dabei spielt der Ortsbezug für viele Dienste eine wichtige Rolle. Die „Location based services“ werden u. a. als Motor für die Einführung dieser Technologien in einem breiten Marktsegment gesehen. Die Navigationssysteme in Fahrzeugen sind schon weit verbreitet und werden durch neue Technologien zum mobilen Internet, dem Wireless World Wide Web, ausgebaut. Benötigte man vor Jahren noch verschiedenste Einheiten für die Aufgaben der Kommunikation, Ortung und Organisation der Abläufe, so haben sich diese Einheiten zu einem einzigen mobilen Endgerät weiterentwickelt, das diese und noch weitere Funktionen integriert und auch untereinander ergänzt. Spracheingaben, Nahfeld-Sensoren und Nahfeld-Kommunikation (WLAN, Bluetooth, NFC) werden unsere Welt verändern. Die Zeitabstände der technologischen Sprünge werden ständig verkürzt. Dieses ist bereits jetzt bei den Nutzern von Mobiltelefonen Realität, denn nach zwei Jahren nach Ende der normalen Vertragslaufzeit werden in der Regel die Geräte durch neue und weiterentwickelte Geräte ersetzt. Die Kunden haben sich bereits auf diese Marktentwicklung eingestellt. Dadurch werden Dienstleistungen möglich, die noch vor Jahren völlig utopisch waren. Auch das, was man heute als Telematik bezeichnet, wird hierin aufgehen.

Mit eCall gelangt zudem ab 2018 eine Technik in alle europäischen Neufahrzeuge, die als Wegbereiter für eine Vernetzung der Fahrzeuge verstanden werden kann. Zwar dient diese Technik zunächst dazu, bei Unfällen schnelle Hilfe zu leisten und damit die nach wie vor hohe Zahl an Unfalltoten auf europäischen Straßen weiter zu senken. Die zugrunde liegende Technik ist aber dieselbe, wie sie seit vielen Jahren von Telematikeinrichtungen im Fahrzeug genutzt wird. Durch die flächendeckende Einführung entsteht erstmals die Möglichkeit, Fahrzeuge in großem Umfang miteinander oder mit dem Internet zu vernetzen. Auch die parallel eingeführte Car-to-Car- bzw. Car-to-Infrasstructure-Kommunikation (C2C bzw. C2I) wird die verfügbare Informationsdichte weiter erhöhen.

#### 8.5.6.2 Endgeräte

Die eigentlichen Endgeräte werden sich dahingehend entwickeln, dass neue Technologien und neue Formen der sog. Mensch-Maschine-Schnittstelle völlig neuartige Gerätetypen auf den Markt bringen werden, die z. T. eigene Standards setzen. Die Kommunikationstechnologie und deren rasan-



**Abb. 8.113** Smartphone Anwendungen im Fahrzeugsystem (Quelle: Bosch SoftTec GmbH)

te Entwicklung in den letzten Jahren haben gezeigt, dass der Abstand der Quantensprünge innerhalb dieser Technologien immer kürzer wird. Das Mobiltelefon hat sich vom eigentlichen Gerät der Sprachkommunikation („Handy“) mehr und mehr zu einem Gerät der Datenkommunikation („Smartphone“) entwickelt. Die klassischen Bereiche, die gestern auch hardwaremäßig und softwaremäßig getrennt voneinander existierten, also die Ortung, die Kommunikation und die Datenverarbeitung, sind miteinander verschmolzen. Hierzu wird es neue Formen der Kommunikation zwischen dem Menschen und den Geräten bzw. den Geräten untereinander geben. Die Spracheingabe ist bereits ein wesentliches Element der Mensch-Maschine Schnittstelle. Alle modernen Smartphones haben eine Sprachein- und -ausgabeschnittstelle, die direkt mit den Suchmaschinen des Internets verbunden ist und Informationen kontextorientiert aufbereitet. WLAN, Bluetooth und neuerdings auch NFC haben die Kommunikation zwischen den Geräten revolutioniert. Die Hardwaretechnologie hat dazu geführt, dass Rechnersysteme und Kommunikationssysteme inklusive Ortungskomponenten in einem Gerät verschmelzen. Nicht nur die Berufswelt, sondern insbesondere unser tägliches Leben hat sich weiter entwickelt. Die früher als PDA („Persönlicher Digitaler Assistent“) bezeichnete Geräteklasse „Smartphone“ ist seit der Einführung des iPhone durch Apple im Jahre 2007 zu einem ständigen und unverzichtbaren Begleiter für viele Menschen geworden. Smartphones organisieren für uns wesentliche Aufgaben des täglichen Lebens. Sie stellen einfachste Kommunikationsverbindungen her, führen uns, wenn wir es wünschen, zu bestimmten Orten und organisieren unsere logistischen Probleme, geben uns Hilfestellung bei Navigationsaufgaben im Auto und im öffentlichen Verkehr, sie organisieren bei Notfällen schnell und zielgenau Hilfe und noch vieles mehr.

### 8.5.6.3 Dienstleistungen der Zukunft

Bei den Dienstleistungen der Zukunft im Bereich der Verkehrstelematik spielen zunächst alle Dinge eine große Rolle, die mit der Vernetzung der Verkehrsträger zu tun haben, Abb. 8.113. Dies ist die eigentliche zentrale Aufgabe, um einen Verkehrskollaps, wie er ja schon prognostiziert worden ist, für die Zukunft durch intelligente Systemlösungen in der Wirkung abzuschwächen. Die Mobilität der Bevölkerung wird mehr und mehr zunehmen und hierauf müssen sich auch die entsprechen-

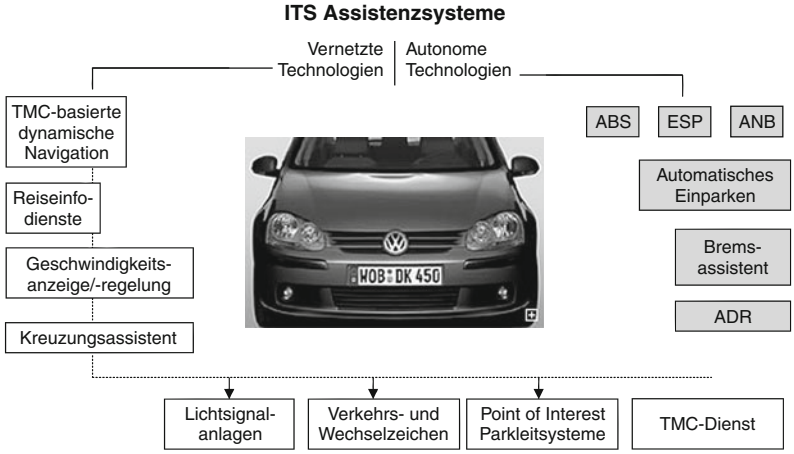



**Abb. 8.114** ITS Assistenzsysteme

den Dienstleister einstellen. Junge Menschen werden früher und ältere Menschen länger als heute individuell mobil sein. Die Zahl der Teilnehmer am Verkehrsgeschehen wird wachsen. Verkehrsströme werden sich verlagern, Berufsverkehr und Freizeitverkehr werden andere Gewichtungen erhalten. Auch in diesem Bereich wird die Ortung eine immer größere Rolle spielen, da z. B. Übergänge von einem Verkehrssystem auf das andere damit zusammenhängen, wo man sich befindet und wie lange man noch benötigt, um zu einem Verkehrsübergabepunkt zu gelangen.

Ein immer wieder diskutiertes Thema im Bereich der Verkehrstelematik ist die Gebührenerfassung. Die Einführung der Lkw-Maut wurde mit erheblicher Verzögerung im Jahr 2005 in Deutschland realisiert und hat im Jahr 2009 4,41 Milliarden Euro eingebracht. Mit der ab 2016 geplanten PKW-Maut werden erstmals in Deutschland alle Verkehrsteilnehmer (mit wenigen Ausnahmen) direkt zur Finanzierung des Straßennetzes beitragen. Der Aspekt des Datenschutzes und der Integrität der Datenerfassung muss dabei allerdings immer berücksichtigt werden. Heute ist es jedoch mehr ein politisches als ein technisches Problem. Die Dienstleistungen der Zukunft werden auch die Gebührenerfassung im Verkehrsgeschehen flexibel und mobil realisieren. Hierzu zählt nicht nur das Thema Autobahngebühren, hierzu zählt auch das Thema Electronic Ticketing, das sicherlich eine weitere interessante Ergänzung im Dienstleistungsbereich darstellen wird. Wir können bereits heute mit unserem mobilen Endgerät auch den Zahlungsverkehr nicht nur im Bereich ÖPNV oder anderer Verkehrsträger realisieren. Mit NFC gelangt seit einiger Zeit eine Technik in die Endgeräte, die sich zur sicheren Realisierung von Bezahlvorgängen eignet. Apple hat mit dem System „ApplePay“ im Jahr 2014 eine Technik eingeführt, die bereits jetzt in den USA von mehr als 60 % der Bezahlstellen im Handel akzeptiert wird.

Kraftfahrzeugbezogen bieten die neuen Technologien der Verkehrstelematik eine Reihe von Ansatzmöglichkeiten, um die Verkehrssicherheit zu verbessern. So sind sowohl elektronische Abstandswarnsysteme (Abb. 8.114), die Auffahrunfälle verhindern, als auch Systeme, die den Fahrer bei Abbiege- und Fahrstreifenwechselvorgängen unterstützen (optisch und/oder akustisch) oder auch in Kurven über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vor Staus warnen, entwickelt. Als weitere Telematikanwendungen werden von der Industrie derzeit für Kraftfahrzeuge fahrerunabhängige Hilfen zur automatischen Steuerung des Fahrzeugabstandes und der Geschwindigkeit bis hin zur Koppelung mehrerer Lkw im Konvoi entwickelt. Diese technischen Möglichkeiten, die eine Vielzahl von Rechtsfragen berühren, müssen frühzeitig im Dialog mit der Industrie unter ordnungs- und rechtspolitischen Gesichtspunkten abgeklärt werden, um den

Nutzen zu optimieren und Fehlentwicklungen zu vermeiden. Mit den autonom fahrenden Fahrzeugen, die derzeit von der Automobilindustrie, aber auch von neuen Playern im Automotive-Umfeld wie beispielsweise Google entwickelt werden, kommen weitere Anwednungsfälle für eine fahrzeugbezogene Kommunikation hinzu.

Mit dem europäischen zivilen Satellitennavigationssystem Galileo sollte die Unabhängigkeit von national kontrollierten Systemen und Anwendungsmöglichkeiten in sicherheitskritischen und hoheitlichen Anwendungsbereichen eröffnet werden. Die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie soll in zukunftsgerichteten Aufgabenfeldern gestärkt werden. Dazu gehören u. a. alle Bereiche, die eine präzise Ortsbestimmung und/oder Zeitangaben benötigen, wie Finanzdienstleistungen, Flottenmanagement, Frachtverfolgung, Geodäsie und Landwirtschaft sowie Anwendungsbereiche mit hohen Grundanforderungen nach Kontinuität, Integrität und Präzision der Systeme, wie z. B. vollautomatischer Präzisionsanflug im Luftfahrtbereich, Zugleit- und Überwachungssysteme im Schienenverkehr, weltweite Verfolgung von Containern oder Kollisionswarnsysteme in Flugzeugen. Die meisten Anwendungen von Galileo liegen im Verkehrsbereich. Deshalb wird das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen im Rahmen der Aktivitäten der Europäischen Kommission an diesem Projekt weiterhin mitarbeiten. Mit dem russischen System Glonass ist neben GPS inzwischen ein weiterer Mitbewerber am Markt. Schon heute unterstützen viele mobile Endgeräte neben GPS auch das Glonass-Satellitenortungssystem.

Die Altersstruktur der Bevölkerung wird dazu führen, dass der Bedarf an sicheren Informations- und Notrufsystemen wachsen wird. Dadurch wird eine deutliche Steigerung der Qualität, insbesondere auch für ältere Mitbewohner im Bereich der Mobilität erreicht werden. **Mobilität und Sicherheit** werden einen großen Bereich von zukünftigen Dienstleistungsangeboten darstellen.

In diesem Zusammenhang müssen eine Reihe erheblicher Schwierigkeiten überwunden werden, damit das europäische Verkehrssystem seiner Aufgabe, dem Mobilitätsbedarf der europäischen Wirtschaft und Gesellschaft zu entsprechen, in vollem Umfang gerecht werden kann:

- Rund 10 % des Straßennetzes gelten als überlastet, und die dadurch jährlich verursachten Kosten machen ca. 0,9–1,5 % des BIP der EU aus.
- 72 % der verkehrsbedingten $CO_2$-Emissionen entstehen im Straßenverkehr, der zwischen 1990 und 2005 um 32 % zugenommen hat.

Angesichts einer erwarteten Zunahme des Güterverkehrs um 38 % und des Personenverkehrs um 13 % zwischen 2015 und 2030 ist es umso dringender, sich diesen Herausforderungen zu stellen [166].

## 8.6 Mensch-Technik-Kooperation

Kraftfahrzeuge erhöhen die Mobilität unserer Gesellschaft. Sie bewegen Menschen und Güter von einem Ursprungs- zu einem Zielort und verbessern somit unsere Lebensbedingungen. Dies erreichen Kraftfahrzeuge allerdings nur in enger Wechselwirkung mit ihren Nutzern, d. h. den Fahrern, und mit der Umgebung (◘ Abb. 8.115). So wirkt der Fahrer mit Hilfe seiner Bedienhandlungen zur Längs- und Querführung (d. h. Beschleunigen, Bremsen, Spurwechsel) auf das Kraftfahrzeug ein (Pfeil 1 in ◘ Abb. 8.115), welches durch die Umsetzung der Steuerbefehle Einfluss auf seine Umgebung nehmen kann (Pfeil 2). Umgekehrt kann aber auch die Umgebung das Kraftfahrzeug beeinflussen (Pfeil 3): Ein Beispiel hierfür ist ein Fußgänger, der auf einer Fahrbahn steht und vom Night Vision System eines Kraftfahrzeugs erkannt wird. Das System weist seinen Fahrer auf diesen Fußgänger hin (Pfeil 4), so dass dieser adäquat reagieren kann (Pfeil 1). Erkennt aber tagsüber der Fahrer den Fußgänger direkt und winkt diesen zum Beispiel über die Fahrbahn, dann findet eine direkte Kommunikation zwischen Umgebung und Fahrer statt ohne, dass das Kraftfahrzeug moderierend eingreift (Pfeile 5 und 6).

Aufgrund dieser engen Wechselwirkungen zwischen Umgebung, Fahrer und Kraftfahrzeug haben Menschen einen essentiellen Einfluss auf die Qualität der Leistung des Kraftfahrzeugs. Umgekehrt ist

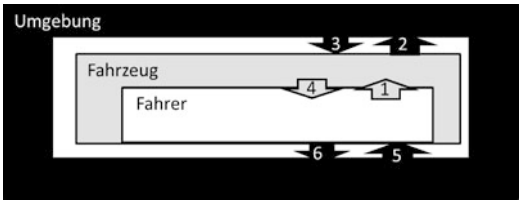



**Abb. 8.115** Wechselwirkungen zwischen Umgebung, Fahrzeug und Fahrer

es aber auch so, dass die Gestaltung der Technik den Menschen in seinem Umgang mit der Technik beeinflussen kann – positiv und negativ. Dieses Kapitel fokussiert auf genau diese Einflüsse: Es fasst zusammen, wie die Technik gestaltet sein muss, so dass der Mensch mit dieser umgehen kann und nicht zum kritischen Störfaktor wird. Im Vordergrund stehen dabei die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Kraftfahrzeug und Umgebung. Nicht betrachtet werden hingegen die Unterstützung von Entwicklungsprozessen bei Kraftfahrzeugen oder auch deren Wartung und Test, also Prozesse, bei denen ebenfalls Menschen involviert sind.

## 8.6.1 Wann ist die Mensch-Technik-Kooperation gut? Definition von Zielkriterien

Die Gestaltung der Technik für Automations- und Assistenzsystemen in Kraftfahrzeugen zielt darauf ab, Performanz, Sicherheit und Komfort zu maximieren. Weitere Kriterien sind

- die Sicherstellung des Situationsbewusstseins des Fahrers,
- die Optimierung der Beanspruchung,
- die Optimierung von Vertrauen und
- die Gewährleistung einer adäquaten Bedienbarkeit,

(z. B. [198, 218]). Alle diese Kriterien können die menschliche Leistung signifikant beeinflussen.

### 8.6.1.1 Performanz

Die Performanz des Fahrer-Fahrzeug-Systems wird von menschlicher und technischer Reliabilität bzw. Leistungsfähigkeit sowie deren Interaktion determiniert. Schon 1951 veröffentlichte Fitts die erste Liste, die die Stärken und Schwächen von Mensch und Technik gegenüberstellte. In seiner bahnbrechenden MABA-MABA (Men are better at – Machines are better at) Liste stellte Fitts [201] fest, dass Menschen besser darin sind, Muster zu erkennen, flexible Handlungsmuster durchzuführen, relevantes Wissen zur adäquaten Zeit aus dem Gedächtnis abzurufen oder mit Hilfe induktiver Prozesse Probleme zu lösen. Umgekehrt sind Maschinen gemäß Fitts [201] besser darin, Routineaufgaben durchzuführen, große Kraft mit hoher Präzision aufzuwenden und mehrere Prozesse gleichzeitig durchzuführen. Heute sind diese Listen nicht unumstritten (z. B. [191]). Stattdessen wird die Eintrittswahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers (z. B. überhöhte Geschwindigkeit) berechnet, indem

- die Aufgabe des Menschen (z. B. Fahren) in Einzelelemente zerlegt wird (z. B. Ablesen des Tachos),
- den Einzelelementen nominale Basisfehlerwahrscheinlichkeiten zugewiesen werden (z. B. Übersehen eines Warnsignals hat die Fehlerwahrscheinlichkeit 0,003 % gemäß [233]),
- Effekte von Einflussfaktoren auf die Basisfehlerwahrscheinlichkeiten bestimmt werden (z. B. zu geringer Kontrast im Display oder Müdigkeit erhöhen die Basisfehlerwahrscheinlichkeiten) und
- abschließend die Fehlerwahrscheinlichkeiten über die Einzelelemente hinweg aggregiert werden und Aussagen über die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit ermöglicht werden.

Dieses Grundprinzip wird zum Beispiel im Kontext von THERP (Technique for Human Error Rate Prediction nach [233]) oder CREAM (Cognitive Reliability Analysis Method nach [208]) konkretisiert. Vorteile dieser Methoden sind, dass diese Auskunft darüber geben, warum Menschen Fehler machen, so dass die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers durch ein geeignetes Design der Technik reduziert werden kann. So sollte zum Beispiel der Kontrast auf Displays groß genug sein, so dass der Mensch die Informationen ohne kognitive Anstrengung ablesen kann.

#### 8.6.1.2 Belastung und Beanspruchung

Über- aber auch Unterbeanspruchung führen langfristig zu menschlichen Fehlern (z. B. [195]), da sich dann die Aufmerksamkeitsspanne verkürzt, Entscheidungsfindungsprozesse fehlerbehaftet und langsam sind sowie Fehler bei der Handlungsausführung entstehen ([235]). Auch Monotonie hat eine Unterbeanspruchung zur Folge was wiederum unter anderem zu erhöhter Ablenkbarkeit führt. Beanspruchung ist gemäß DIN EN ISO 10075 die Reaktion auf Belastung. Belastung resultiert aus objektiven Faktoren, die auf den Fahrer einwirken (z. B. Witterungsverhältnisse, hohe Verkehrsdichte). Beanspruchung beschreibt hingegen die subjektive Reaktion auf die objektive Belastung. So kann zum Beispiel für einen Fahranfänger in einer unbekannten Umgebung eine recht niedrige Verkehrsdichte zu einer starken Beanspruchung führen und somit die Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung erhöhen.

Beanspruchung entsteht gemäß [235], durch die Beschränkung menschlicher Ressourcen zur Verarbeitung von Informationen. Konkret unterscheidet Wickens [235] drei Dimensionen: Verarbeitungsstufen, Modalitäten und Reaktionen:

- Die Verarbeitungsstufen beschreiben die Enkodierung von Informationen (z. B. Erkennen, dass die Ampel auf Rot umschaltet), die Verarbeitung von Informationen (z. B. Einschätzung, ob das Fahrzeug vor der Ampel zum Stehen gebracht werden kann) sowie die Durchführung einer Handlung (z. B. Bremsen).
- Die Modalitäten beschreiben die Sinneskanäle, mit deren Hilfe der Fahrer die Information aus der Umgebung wahrnimmt. Klassischerweise steht hierfür der visuelle Kanal im Fokus. Auditive (Warntöne) und haptische (Vibration) Kanäle sollten ebenfalls berücksichtigt werden, um den visuellen Kanal zu entlasten.
- Die Reaktionen sind im Fahrzeug typischerweise motorischer Natur (z. B. Bremsen, Lenken), können aber auch sprachlich sein (z. B. Spracheingabe beim Navigationsgerät).

Die Kapazitäten, die diesen Dimensionen zugrunde liegen, sind begrenzt. Sobald eine Kapazität überlastet wird, steigt für eine Person die Beanspruchung. Deswegen ist es zum Beispiel essentiell, nicht nur den visuellen Kanal zur Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug zu nutzen, sondern auch auf auditive und haptische Kanäle auszuweichen.

Die Messung von Beanspruchung erfolgt typischerweise mit Hilfe

- von Fragebögen wie zum Beispiel dem NASA-Task Load Index ([206]) oder dem SWAT (Subjective Workload Assessment Technique von [222]),
- der Interpretation von physiologischen Messwerten wie Hautwiderstand, Pupillenweite, Herzratenvariabilität oder EEG-basierten Indizes (z. B. [220]) oder
- der Leistung in einer Sekundäraufgabe, welche mit der Primäraufgabe interferiert (z. B. [235]).

#### 8.6.1.3 Situationsbewusstsein

Das Situationsbewusstsein beschreibt den Zustand des Menschen, seine Umgebung mit allen relevanten Parametern zu erfassen und deren Bedeutung zu realisieren. So sollte sich der Fahrer zum Beispiel über die geltenden Verkehrsregeln, über die Position auf der Straße, über Bremswege, über den umgebenden Verkehr, aber auch über den Zustand des eigenen Fahrzeugs bewusst sein. Dies ist die Voraussetzung für eine situationsangepasste und adäquate menschliche Reaktion in der jeweiligen Situation ([205]).

Situationsbewusstsein ist gemäß Chiappe und Kollegen situiert: Menschen bauen Situationsbewusstsein auf, indem diese mit ihrer Umgebung und mit technischen Systemen interagieren, relevante Informationen extrahieren und diese in minimale, interne Repräsentationen über die Situation integrieren ([188, 189]). So muss sich der Fahrer zum Beispiel nicht zu jedem Zeitpunkt den Stand der Tankanzeige vergegenwärtigen, sondern muss sich nur darüber bewusst sein, wo diese abgefragt werden kann. Im Gegensatz dazu beschreibt Endsley ([197]) in Ebenen, wie Situationsbewusstsein entsteht:

- Auf der ersten Ebene des Bewusstseins steht die Wahrnehmung relevanter Informationen aus der Umgebung (z. B. Anzeige des Tachometers).

- Auf der zweiten Ebene steht das Verständnis der Situation (z. B. Einschätzung, ob man derzeit zu schnell fährt).
- Auf der dritten Ebene steht die Projektion der momentanen Situation in die nahe Zukunft (z. B. Einschätzung, ob man in naher Zukunft auch noch zu schnell fährt).

Situationsbewusstsein auf der dritten Ebene ist die Voraussetzung für die Entscheidung für eine adäquate Handlung (z. B. Bremsen vs. Geschwindigkeit halten) und die Umsetzung dieser Handlung. Genau diese Prozesse können von technischen Systemen unterstützt werden, wenn diese beiden theoretischen Ansätze von Situationsbewusstsein verknüpft werden: So ermöglichen Sensorsysteme die Erweiterung menschlicher Wahrnehmungsgrenzen (z. B. durch Night Vision Systeme), und prädiktive Systeme oder auch künstliche Intelligenz ermöglichen die Ergänzung des menschlichen Verständnisses der Situation (z. B. bei Notbremsassistenten).

Situationsbewusstsein wird typischerweise mit Hilfe von

- relevanten Prozessindikatoren wie zum Beispiel die Erfassung und Interpretation der Blickbewegung als ein Maß für adäquate Wahrnehmung relevanter Informationen aus der Umgebung,
- Fragebögen wie zum Beispiel SPAM (Situation Present Assessment Method von [194]) oder SAGAT (Situation Awareness Global Assessment Technique, [196]) oder
- Verhaltensmaßen

gemessen.

Ein Sonderfall des Situationsbewusstseins ist das *Modusbewusstsein*. Ein Modus ist die Konfiguration eines technischen Systems (z. B. Automatisierungsgrad des Fahrzeugs – s. auch ► Abschn. 8.6.3). Das Modusbewusstsein beschreibt also die Fertigkeit des Nutzers, sich dessen Modus korrekt bewusst zu sein. Ist Modusbewusstsein nicht vorhanden, besteht die Gefahr von Modusfehlern ([226]) oder sogenannten *Automation Surprises* ([227]): Der Fahrer verhält sich so, als wäre das System in einem anderen Modus. Wäre das Fahrzeug in diesem Modus, wäre das Verhalten des Fahrers korrekt. Da das Fahrzeug aber nicht in diesem Modus ist, kann die Handlung zu katastrophalen Konsequenzen führen. Schaltet sich zum Beispiel ein ACC- und Spurhaltesystem ab und realisiert der Fahrer den Wechsel des Modus nicht, so greift der Fahrer nicht oder nur verzögert ein, da er davon ausgeht, dass die Technik noch die Kontrolle hat und entsprechend reagiert.

#### 8.6.1.4 Usability

Usability ist ein allgemein anerkannter Qualitätsaspekt für interaktive und kooperative Systeme. Die Usability beschreibt gemäß der DIN EN 9241-11 das „Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“:

- Die Effektivität beschreibt dabei die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der ein Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen kann. Gemessen wird die Effektivität zum Beispiel mit Hilfe der Anzahl der korrekt eingegebenen Sprachbefehle bei einem sprachgesteuerten Navigationssystem für Kraftfahrzeuge.
- Die Effizienz beschreibt den Aufwand, mit Hilfe dessen Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen können – im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit. Zum Beispiel ist die Dauer der Spracheingaben bei einem sprachgesteuerten Navigationssystem ein Maß für die Effizienz.
- Die Akzeptanz beschreibt die subjektive Einstellung von Benutzern, ein System auch tatsächlich nutzen zu wollen. Die Häufigkeit von Beschwerden oder das Verhältnis von positiven zu negativen Kommentaren sind Anzeichen für die Akzeptanz der Nutzung.

Sollte ein Nutzer sein Ziel nicht oder nur sehr beschwerlich mit dem System erreichen können, dann liegt ein sogenanntes *Usability-Problem* vor ([211]). Solche Probleme sind mit Hilfe eines geeigneten Systementwicklungsprozesses zu vermeiden. Konsequenzen können sonst erhebliche Imageverluste, verringerte menschliche Leistungsfähigkeit, Erhöhung der Beanspruchung und letztendlich Umsatzverlusten sein.

#### 8.6.1.5 Vertrauen

Mangelhaftes Vertrauen in Technik zeigt sich in Effekten wie Automation Disuse und Automation Misuse ([219]). *Automation Disuse* entsteht, wenn Menschen der Technik die Ausübung einer Aufgabe nicht zutrauen. Ein Beispiel hierfür ist das aktive Abschalten von sicherheitsrelevanten Funktionen im Kraftfahrzeug. *Automation Misuse* entsteht, wenn Menschen der Technik zu sehr vertrauen. Ein klassisches Beispiel für Automation Misuse ist das blinde Befolgen von Navigationsangaben – bis in Flüsse. Das Vertrauen des Fahrers in das Kraftfahrzeug sollte also optimal kalibriert werden (s. [212]), d. h. der Grad des Vertrauens und die Fähigkeit der Technik sollten übereinstimmen. Wenn also das Navigationsgerät in jeder Situation perfekt funktionieren würde, wäre ein blindes Vertrauen gerechtfertigt. Um ein optimal kalibriertes Vertrauen zu garantieren, muss der Mensch adäquat über die Fähigkeiten der Technik im Kraftfahrzeug informiert sein ([212]). Konkret ist es notwendig,

- die vergangene Leistung des Systems aufzuzeigen,
- die Situationsabhängigkeit der Leistung des Systems zu demonstrieren,
- die Funktionsweise des technischen Systems für den Nutzer verständlich aufzubereiten und
- den Verwendungszweck des technischen Systems adäquat darzulegen (s. [212]).

Gemessen werden kann das Vertrauen mit Hilfe von speziell entwickelten Fragebögen (z. B. [209]).

### 8.6.2 Der Mensch im System

Die Informationsverarbeitungsprozesse, die den Menschen im System charakterisieren, werden für gewöhnlich in vier Stufen eingeteilt (s. z. B. [198, 218]). Im Modell von Parasuraman et al. ([218]) beschreibt die erste Stufe die Informationsaufnahme aus der Umgebung. Hierzu zählen das Ausrichten der Sensoren (z. B. Augen) auf relevante Aspekte der Umgebung (z. B. Verkehrszeichen) sowie die Wahrnehmung und Vorverarbeitung der Informationen aus der Umgebung (z. B. Wahrnehmung eines umgedrehten weißen Dreiecks mit rotem Rand). Die zweite Stufe ist die kognitive Verarbeitung der Informationen, (z. B. Identifikation des Verkehrsschildes „Vorfahrt gewähren“). Die dritte Stufe ist die Entscheidungsfindung über potenzielle Handlungen (z. B. Bremsen), und die vierte Stufe ist die motorische Durchführung der Handlung (z. B. Bewegung des Fußes zur Bremse).

Die Stufen menschlicher Informationsverarbeitung müssen nicht immer sequentiell durchlaufen werden. So agieren Menschen auch, ohne auf Umgebungssignale zu reagieren. Außerdem beeinflussen Handlungsweisen, die durch Training geübt sind, die Verarbeitungstiefe der zweiten und dritten Stufe der menschlichen Informationsverarbeitung. So beschrieb Gibson ([203]) das Prinzip der direkten Wahrnehmung. Demnach nehmen Menschen sogenannte *Affordances* in der Umgebung wahr, ohne dass Informationen verarbeitet werden müssen. Affordances beschreiben Handlungsoptionen, die in der Umgebung umgesetzt werden können. Damit werden die zweite und dritte Stufe der menschlichen Informationsverarbeitung umgangen. Rasmussen ([221]) baut auf dieses Modell auf und unterscheidet drei Ebenen kognitiver Kontrolle:

- Bei wissensbasiertem Verhalten ist die kognitive Kontrolle hoch: Der Mensch nimmt Informationen im Sinne von Symbolen wahr, identifiziert diese, trifft basierend auf seinen Zielen eine Entscheidung und plant, wie diese umgesetzt wird (z. B. Wahrnehmung eines Parkleitsystems in einer fremden Stadt und Verknüpfung der Informationen mit dem eigenen Zielort zur Suche nach einem Parkplatz).
- Bei regelbasiertem Verhalten ist die kognitive Kontrolle geringer: Der Mensch nimmt Zeichen aus der Umgebung wahr, erkennt diese Zeichen wieder und verknüpft diese Zeichen mit der Aufgabe. Die im Gedächtnis gespeicherten Regeln werden dann abgerufen und umgesetzt (z. B. Bremsen bei der Wahrnehmung eines Stoppschildes).
- Bei fertigkeitsbasiertem Verhalten ist die kognitive Kontrolle am geringsten. Hier nimmt der Mensch Signale wahr, welche ein sensomotorisches Muster aktivieren, das sofort umgesetzt wird (z. B. Bremsen aufgrund eines plötzlichen Hindernisses auf der Straße vor dem eigenen Fahrzeug).

Welches Verhalten von welcher Situation aktiviert wird, hängt stark davon ab, wie trainiert der Mensch mit der Situation ist, d. h. in neuen Situationen werden eher Verhalten mit einer höheren kognitiven Kontrolle eingesetzt. Dass dies kritisch ist, zeigen schon Datenerhebungen von Brunswik ([186]): Eine kognitiv tiefe Verarbeitung von Informationen führt entweder zu einer beeindruckenden Präzision oder zu grotesken Fehlern. Eine Verarbeitung von Informationen mit einer niedrigen kognitiven Kontrolle führt hingegen zu einer größeren Fehlerwahrscheinlichkeit. Die Fehler, die entstehen, sind allerdings nicht so gravierend. Dieses Prinzip wurde als *Power of Perception* bekannt (s. z. B. auch [192]) und zeigt, dass vor allem im Rahmen von Assistenzsystemen darauf zu achten ist, dass diese mit möglichst einfachen, bekannten Darstellungsformen arbeiten, um ein fertigkeitsbasiertes Verhalten des Menschen zu aktivieren und den Menschen nicht dazu zwingen, eine höhere kognitive Kontrolle zu aktivieren.

## 8.6.3 Automations- und Assistenzsysteme für den Fahrer

### 8.6.3.1 Automationssysteme

Automationssysteme nehmen dem Menschen Aufgaben ab, die dieser sonst selbst realisieren müsste. Die Entscheidung darüber, welche Aufgaben automatisiert durchgeführt werden können/sollten und welche der Mensch nach wie vor manuell erledigt, wird vielfach unter den Begrifflichkeiten der Technikzentriertheit vs. Menschzentriertheit diskutiert ([183]). Bei der technikzentrierten Automatisierungsstrategie wird alles automatisiert, was technisch automatisiert werden kann – mit dem Ziel, dem Menschen möglichst alle aktiven Rollen an der Erfüllung der gemeinsamen Aufgabe abzunehmen ([183]). Der Vorteil dieser Strategie besteht darin, dass damit auch der Einfluss der menschlichen Leistungsfähigkeit auf die Aufgabenerfüllung minimiert wird. Der Nachteil ist allerdings, dass für gewöhnlich vom Menschen verlangt wird, dass dieser die Automatisierung überwacht und, falls notwendig, noch rechtzeitig und korrekt eingreift. Der Mensch, dessen Leistung sonst nicht vertraut wird, erhält also genau dann eine aktive Rolle, wenn die Situation besonders kritisch wird. Diese Aufgabe kann der Mensch allerdings selten erfüllen. Grund hierfür ist die sogenannte *Out-of-the-Loop-Unfamiliarity* (s. [183, 199, 227]). Hierunter zählen Phänomene wie das Sinken manueller Fertigkeiten zur Aufgabenerfüllung und Situationsbewusstsein sowie die Unvollständigkeit oder Fehlerbehaftung von mentalen Modellen über das technische System. Diese Faktoren entstehen aufgrund der passiven Rolle des Menschen und erhöhen die Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung signifikant, sollte eine aktive Handlung notwendig werden. Wie Bainbridge ([183]) korrekt anmerkte, ist dies eine Ironie, da genau in solchen Situationen, die kritisierte Variabilität des menschlichen Verhaltens eine noch bedeutsamere Rolle für die Erfüllung der Aufgabe spielt.

Bei der menschzentrierten Automatisierungsstrategie wird das automatisiert, was der Mensch gerne hätte. Gemäß Billings ([185]) gilt ein Automationssystem dann als menschzentriert, wenn u. a. folgende Kriterien eingehalten sind:

- Der Mensch übernimmt die Aufgabe, die diesem am besten liegt.
- Der Mensch ist an den Entscheidungen und an deren Umsetzung aktiv beteiligt (dies gilt nur für Aufgaben mit einer mittleren Bandbreite also nicht für eine Notbremsung).
- Das technische System macht das Leben der Menschen leichter, angenehmer und erfolgsversprechender.
- Die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers sollte reduziert werden.
- Die Variabilität menschlichen Verhaltens sollte reduziert werden.

Zur Bestimmung der optimalen Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Automatisierung ist es zunächst notwendig, die Aufgaben zu differenzieren. Exemplarisch wird dies im Folgenden am Beispiel der Fahrzeugführung betrachtet. Die primären Aufgaben der Fahrzeugführung spiegeln sich im Wesentlichen in den drei Kernaufgaben Navigation, Längsführung und Querführung wider:

- Im Rahmen der Navigation werden Aufgabenstellungen für das Fahren von einem Startpunkt zu einem Zielort gelöst. Relevant sind hier auch die planerischen Aufgaben der

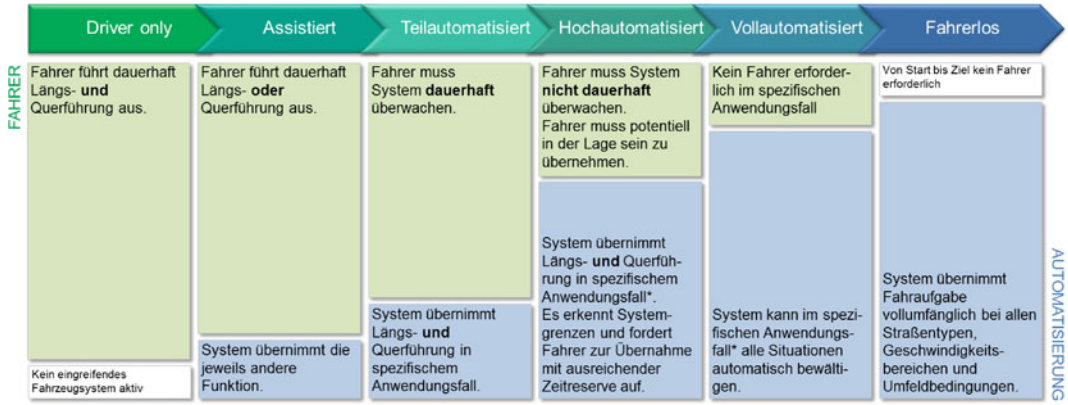



**Abb. 8.116** Spektrum vom Driver-Only zum vollautomatisierten Fahrzeug gemäß Nomenklatur vom VDA

8

Auswahl einer dedizierten Route, auf der das Ziel erreicht werden soll.

- Im Rahmen der Längsführung werden neben der Geschwindigkeitsregelung auch die Aufgaben der Abstandshaltung zum Vordermann im Kontext des Verkehrsflusses betrachtet.
- Im Rahmen der Querführung werden Aufgaben der Spurhaltung bzw. des Spurwechsels betrachtet.

Die Längs- und Querführung erfüllen stabilisierende Aufgaben, die in ihrer Kombination entsprechende Fahrmanöver ermöglichen. Insofern sollte die Gestaltung von Automationssystemen das Ziel haben, die Erfüllung dieser Primäraufgaben sicherzustellen.

Neben den Primäraufgaben müssen Sekundäraufgaben für eine sichere Fahrzeugführung gewährleistet sein. Zu den Sekundäraufgaben zählen zum Beispiel das Einschalten der Beleuchtung, die Betätigung des Scheibenwischers oder das Anzeigen der Änderung in der Fahrtrichtung. Auch die Unterstützung der Sekundäraufgaben ist für eine sichere und effiziente Fahrzeugführung von Vorteil.

Zur Definition der optimalen Verteilung von Aufgaben zwischen Mensch und Technik wurden Klassifikationsschemata entwickelt (z. B. [198, 218]). Die Bundesanstalt für Straßenwesen lieferte 2012 [187] eine Konkretisierung dieser Automatisierungsgrade im Fahrzeug (s. auch Abb. 8.116):

- Driver-Only: Der Fahrer allein führt während der gesamten Fahrt die Längs- und Querführung des Fahrzeugs aus. Die Längsführung bezeichnet das Beschleunigen und Bremsen. Die Querführung bezeichnet das Lenken.
- Assistiert: Der Fahrer führt während der gesamten Fahrt entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs aus. Die nicht manuell ausgeführte Aufgabe übernimmt das Fahrzeug. Hierbei muss der Fahrer die Ausführung der Aufgabe jedoch dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe bereit sein.
- Teilautomatisiert: Das Fahrzeug übernimmt die Längs- und Querführung für einen gewissen Zeitraum und/oder für gewisse Situationen. Auch hier muss der Fahrer die Ausführung der Fahraufgabe dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe bereit sein.
- Hochautomatisiert: Hier übernimmt das Fahrzeug die Längs- und Querführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System aber nicht überwachen. Sollte der Fahrer die Fahraufgabe übernehmen müssen, fordert das Fahrzeug den Fahrer hierzu auf – mit einer ausreichenden Zeitreserve. Das Fahrzeug ist dabei nicht in der Lage, aus jeder Situation heraus einen risikominimalen Zustand herbeizuführen.
- Vollautomatisiert: Auch hier übernimmt das Fahrzeug die Längs- und Querführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. Im Gegensatz zur Hochautomati-

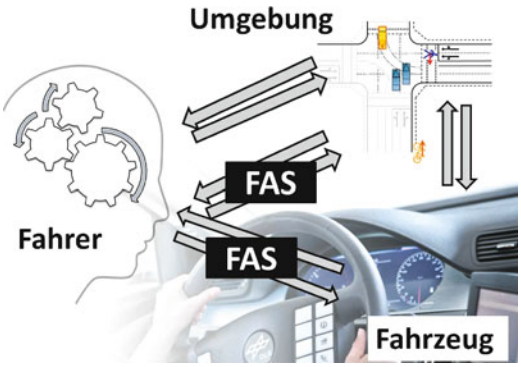



**Abb. 8.117** Eingriffsmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen (FAS)

sierung ist das Fahrzeug allerdings in der Lage, das Fahrzeug in allen Situationen in einen risikominimalen Zustand zu führen. Dies erfolgt, wenn der Fahrer bei einer Übernahmeaufforderung nicht rechtzeitig reagiert.

Wie der assistierte Fahrmodus schon zeigt, ist die Allokation von Aufgaben an die Automatisierung oder an den Fahrer nicht immer statisch, sondern kann adaptiv oder adaptierbar an die Situation oder an die Person angepasst werden: Bei adaptiver Automatisierung entscheidet das Kraftfahrzeug online über die Zuweisung von Aufgaben an sich selbst oder an den Fahrer (s. z. B. [204]). Kriterien für diese Zuweisung können besonders herausfordernde Situationen sein (z. B. [207]) oder auch Wissen über den aktuellen Fahrerzustand (z. B. durch die Interpretation physiologischer Daten wie bei [228]). Bei adaptierbarer Automatisierung entscheidet hingegen der Mensch über die Zuweisung von Aufgaben an die Automatisierung oder an sich selbst (z. B. [215]). Hier ist zum Beispiel denkbar, dass der Fahrer über ein spezielles Bedienfeld den Automatisierungsgrad auswählt, mit dem er gefahren werden will.

#### 8.6.3.2 Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei der Ausführung der Primär- und Sekundäraufgaben und ermöglichen ggf. auch die Erfüllung von Tertiäraufgaben. Hierfür setzen Fahrerassistenzsysteme an unterschiedlichen Stellen an (Abb. 8.117): Fahrerassistenzsysteme können dem Fahrer wertvolle Informationen über dessen Umgebung und den Zustand des Kraftfahrzeugs-über haptische, visuelle oder auditive Kanäle – zur Verfügung stellen. Weiter ermöglichen Fahrerassistenzsysteme Eingaben vom Fahrer, welche sowohl das Kraftfahrzeug als auch die Umgebung beeinflussen können. Die kognitiven Prozesse, die in Abb. 8.117 schematisch gekennzeichnet sind, sind die menschlichen Informationsverarbeitungsprozesse, welche in ▶ Abschn. 8.6.2 beschrieben sind.

Klassifizieren lassen sich Assistenzsysteme gemäß den Aspekten der Situationserfassung, der Situationsanalyse, der Aufgabenanalyse, des Fahrermonitorings und der Reaktion (Information, Unterstützung, Übernahme). Im Kontext der Situationserfassung und -analyse nimmt die Erfassung der Umgebungssituation eine besondere Stellung ein. Technische Sensorik kann nämlich die menschlichen Sinnesorgane sehr gut ergänzen (z. B. Sicht bei Nacht). Über eine kombinierte Wahrnehmung entsteht im Idealfall ein adäquates Situationsbewusstsein. Die entsprechende Situationsbewertung und die sich daraus ergebende situative Reaktion kann ebenfalls durch ein technisches System (z. B. Precrash-detection, Collision mitigation) erfolgen und somit die menschliche Bewertung ergänzen. Auch kann das System seine Sensorik nutzen, um wertvolle Informationen über den Fahrer zu erfassen, um so zum Beispiel sicherzustellen, dass dieser tatsächlich übernahmebereit ist, wenn dies gefordert wird. Bei der Aktionsausführung kann die Assistenz im Sinne einer sensomotorischen Unterstützung eine Kraftverstärkung (z. B. Servolenkung) umsetzen.

### 8.6.4 Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation

Zur optimalen Nutzung von Automations- und Assistenzsystemen im Kraftfahrzeug ist die Informationsvermittlung – sowohl vom Fahrzeug zum Fahrer als auch vom Fahrer zum Fahrzeug – essentiell (Pfeile 1 und 4 in Abb. 8.115). Generell zu beachten ist, dass die sogenannte Controlability und Observability der Technik sichergestellt ist (s. [190]). *Controlability* bezeichnet die Möglichkeit des Fahrers, die Erledigung der automatisierten Aufgaben zu beeinflussen (z. B. Wahl der Route). *Observa-*

*bility* bezeichnet die Fähigkeit des Fahrzeugs, den Fahrer über das Verhalten des Fahrzeugs zu informieren. Ähnliche Kriterien für den Dialog zwischen Mensch und Technik fasst die DIN-EN ISO 9241-110 zusammen:

- Aufgabenangemessenheit: Das Kraftfahrzeug kommuniziert so, dass dieses den Fahrer bei der Erfüllung seiner Aufgaben effektiv und effizient unterstützt. Die Darstellung von Informationen, welche für die Aufgabe irrelevant sind, soll also auf ein Minimum beschränkt sein.
- Selbstbeschränkungsfähigkeit: Das Kraftfahrzeug erläutert dem Fahrer seine Aktionen verständlich.
- Steuerbarkeit: Das Kraftfahrzeug ermöglicht dem Fahrer die Steuerung seiner Funktionalität. Dies entspricht dem Kriterium der Controlability.
- Erwartungskonformität: Die Kommunikation entspricht außerdem der Erwartung, dem Wissen und den Erfahrungen des Benutzers.
- Fehlertoleranz: Das Fahrzeug ermöglicht die einfache und schnelle Korrektur von Eingabefehlern des Fahrers.
- Individualisierbarkeit: Das Fahrzeug ermöglicht die individuelle Anpassung der Konfiguration an Fähigkeiten, Fertigkeiten oder Vorlieben des Fahrers (z. B. Wahl eines sportlichen oder verbrauchsorientierten Fahrstils).

Zur Vermittlung von Informationen vom Fahrzeug zum Fahrer werden zunächst einzelne, symbolische Anzeigen von Multifunktionsanzeigen unterschieden. Einzelne, symbolische Anzeigen werden zur Vermittlung spezifischer Informationen eingesetzt. Eine logische Selektion der einzelnen Anzeigen in einer koordinierenden Art und Weise erfolgt in den seltensten Fällen. Hier ist es wichtig, Anzeigen adäquat zu priorisieren und situationsspezifisch zu nutzen. Im Gegensatz dazu stellen Multifunktionsanzeigen auf der Basis von LCD-Anzeigen oder LED-Arrays Informationen über Uhrzeit, Außentemperatur, Verbrauch oder Reichweite dar. Für gewöhnlich sind diese Informationen in einer sequentiellen Folge abrufbar. Dieser Abruf erfolgt häufig über entsprechende Wippschalter, die in der Nähe des Lenkrades oder am Lenkrad selbst angebracht sind. Ebenso werden bestimmte Informationen für den Fahrer über diese Anzeigen besonders hervorgehoben. Dieses erfolgt durch Blinken der Anzeigen, zum Beispiel beim Unterschreiten einer bestimmten Temperaturgrenze. Gleichzeitig kann die Aufmerksamkeit des Fahrers durch einen akustischen Warnton auf diese Besonderheit gezogen werden. Zur Verfügung stehen ebenfalls Fahrerassistenzsysteme, die mit Hilfe von Vibrationsmotoren unter dem Fahrersitz den Fahrer zum Beispiel beim Verlassen der Spur warnen. Die Verwendung mehrere Modalitäten (auditiv, visuell, haptisch) hat den Vorteil, dass hiermit auf unterschiedliche kognitive Ressourcen zurückgegriffen wird, was die menschliche Informationsverarbeitung essentiell stützen kann (s. ► Abschn. 8.6.1.2).

Ein anderes Medium zur Anzeige von Informationen für den Fahrer ist das Head-up-Display. Hiermit werden bestimmte Informationen in die Frontscheibe eingeblendet, wobei die Information für den Fahrer virtuell vor dem Auto liegt. Dieses hat einmal den Vorteil, dass Ablenkungen vom Verkehrsgeschehen minimiert werden können. Weiter können Belastungen durch die kontinuierliche Änderung der Ausrichtung der Blickrichtung reduziert werden. Ein Nachteil ist allerdings, dass es im Einzelfall bei besonderen Sichtverhältnissen (z. B. Nebel) zu Ablenkungseffekten kommen kann.

Zur Vermittlung von Informationen vom Fahrer an das Fahrzeug können positionierte Druckschalter oder rastende Drehwähler verwendet werden. Die Möglichkeit, Eingaben über Touch-Screen Monitore im Fahrzeug zu realisieren, ist teilweise problematisch, da deren Bedienung eine stärker ablenkende Wirkung haben. So ist hier Blickkontakt notwendig. Neuere Systeme tragen durch die Simulation von Texturen als haptische Rückmeldung dem Problem Rechnung. Weiterhin werden Sprachsteuerung, Gesten- oder Mimiksteuerung als Alternativen zu klassischen Kommunikationswegen zwischen Mensch und Technik diskutiert. Hier ist jedoch eine hohe Erkennungsrate mit kurzen Reaktionszeiten für die Akzeptanz essentiell. Potenzielle Anwendungen sind „Information on demand“ oder kontextabhängige Unterstützungsfunktionen.

### 8.6.5 Evaluation

Im Rahmen von Evaluationen wird überprüft, ob die Zielkriterien mit Hilfe von geeigneten Automations- und/oder Assistenzsystemen tatsächlich erreicht werden. Evaluationen nutzen entweder Modelle oder Simulationen und sollten möglichst iterativ den Systementwicklungsprozess begleiten. Formative Evaluationen, d. h. Evaluationen die frühzeitig im Systementwicklungsprozess ggf. auch mit Hilfe von nicht-funktionalen Prototypen stattfinden, erlauben es, frühzeitig Feedback über die Systeme zu bekommen und somit, Fehlentwicklungen vorzubeugen (s. z. B. [229]). Summative Evaluationen, d. h. Evaluationen, die nach Fertigstellung des Systems durchgeführt werden, ermöglichen hingegen die Berechnung des Impacts des Systems.

#### 8.6.5.1 Modellierung

Modelle beschreiben in diesem Kontext das Zusammenwirken von Fahrer, Fahrzeug und Umgebung. Dieses Zusammenwirken kann auf verschiedenen Ebenen beschrieben werden (z. B. [193]). So konzentrieren sich regelungstechnische Modelle auf die Beschreibung des menschlichen Stabilisierungsverhaltens (z. B. Lenkbewegungen, Bremsverhalten). Sie modellieren zum Beispiel die Fähigkeit eines Fahrers, einem anderen Kraftfahrzeug zu folgen (z. B. [181]). Im Gegensatz dazu konzentrieren sich kognitive Modelle auf die informationstechnische Abbildung menschlicher Wahrnehmungs- und Informationsverarbeitungsprozesse (s. ► Abschn. 8.6.2). Kognitive Modelle basieren auf kognitiven Architekturen, welche grundlegende Prinzipien menschlicher Kognition beschreiben. Beispiele für solche Architekturen sind ACT-R (Adaptive Character of Thought-Rational nach [182]), SOAR (State, Operator Apply Result nach [210]), EPIC (Executive-Process Interactive Control nach [214]) und QN-MHP (Queueing Network-Model Human Processor nach [213]). Angewandt werden diese kognitiven Modelle hauptsächlich zur Beschreibung der Navigationsaufgaben (z. B. Selektion von Route und Zeitplan) und der Aufgaben der Kraftfahrzeugsteuerung (z. B. gewünschte Geschwindigkeit, gewünschte Trajektorie).

ACT-R wurde zum Beispiel von Salvucci ([224]) herangezogen, um das Spurwechselverhalten von Fahrern zu modellieren. Weitere Beispiele für kognitive Fahrermodelle sind Aasman ([180]), der SOAR heranzog, um das Verhalten an Kreuzungen zu modellieren oder Tsimhoni und Liu ([234]), die ein Modell auf QN-MHP aufbauten. Solche konkreten Instanzen von Modellen können in Simulationen integriert werden, um als eine Art virtueller Fahrer die Auswirkung von Assistenz und Automation zu testen ([224]).

#### 8.6.5.2 Studien

Studien sind ein bewährtes Mittel, um menschliche Informationsverarbeitungsprozesse zu untersuchen, um das Fahrverhalten in diversen Situationen zu analysieren, um die Potenziale von neuartigen Assistenz- und Automationskonzepten zu untersuchen und eine implementierte Instanz der Konzepte zu bewerten und zu verbessern. Zur Verfügung stehen hierfür vielfältige Methoden. Konkret können Naturalistic Driving Studies von Simulatorstudien und Prototypenstudien unterschieden werden.

Naturalistic Driving Studies ermöglichen die Analyse des menschlichen Umgangs mit Kraftfahrzeugen im Realverkehr und vor allem im natürlichen Fahrumfeld (z. B. [217]). Typischerweise werden hierfür private Kraftfahrzeuge von freiwilligen Probanden mit Messtechnik wie Kameras, Eyetracking, Radargeräten oder GPS-Empfängern ausgestattet. Die Probanden bekommen keine spezifischen Instruktionen, sondern verwenden wie gewöhnlich ihr Kraftfahrzeug in ihrem Alltag. Sie sollen ihr ausgestattetes Kraftfahrzeug möglichst authentisch über einen ausgedehnten Zeitraum nutzen. Im Anschluss an die Untersuchung werden dann die gespeicherten Daten ausgelesen und analysiert. Ziele sind v. a. die Ableitung von Aussagen zu Unterstützungsbedarf, kritischen Situationen oder auch der Nutzung von vorhandenen Fahrerassistenzsystemen. Das Ziel ist, mit Hilfe von Naturalistic Driving Studies Daten zu erheben, welche nicht durch die Anwesenheit eines Versuchsleiters, durch Instruktionen oder durch eine künstliche Umgebung beeinflusst sind. Der Vorteil dieser Methode ist also eine hohe externe Validität und insbesondere die hohe Generalisierbarkeit der Er-



**Abb. 8.118** Virtual Reality Labor am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt



**Abb. 8.119** Dynamischer Fahrsimulator am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt



gebnisse von der Datenerhebung in die reale Welt (z. B. [230]). Dieser Vorteil wird auf Kosten der internen Validität erreicht, denn aufgrund der Unkontrollierbarkeit von Störeinflüssen können Alternativerklärungen für die gefundenen Effekte nicht mehr ausgeschlossen werden (s. [230]).

Simulatorstudien finden in einer künstlichen Umgebung statt. Sie bieten ein hohes Maß an experimenteller Kontrolle und erreichen somit eine höhere interne Validität – auf Kosten der externen Validität. Auch hier kann eine große Vielfalt von Verhaltensdaten, physiologischen Daten und Fragebogendaten erhoben werden. Um die Realitätsnähe zu erhöhen, gibt es drei Mechanismen: Zunächst sollte eine möglichst breite Sicht – im Idealfall von 360° – vorhanden sein ([223]). Ein Beispiel für eine Simulationsumgebung mit einer solchen 360°-Sicht ist das sogenannte Virtual Reality Labor in Abb. 8.118.

Neben der Sicht ist die Bewegung ein weiterer Parameter, um eine hohe Realitätsnähe zu erreichen. Dynamische Simulatoren, wie in Abb. 8.119 gezeigt, vermitteln durch simulierte Beschleunigungs- und Neigungsbewegungen ein möglichst realitätsnahes Fahrgefühl (z. B. [216]). Bestimmte Eingriffe (z. B. Bremsruck) sind nur mit einer dynamischen Plattform darstellbar.

Zuletzt spielt das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer eine große Rolle, denn auch dieses sollte möglichst realistisch sein. Eine Option zur Umsetzung ist die Kopplung von Simulatoren, so dass mehrere Probanden gleichzeitig in der gleichen Simulationsumgebung fahren und, wie auch im Realverkehr, miteinander kooperieren (z. B. [232]).

Weit weniger realistische Simulatoren sind sogenannte *Sitzkisten*. Hier sitzt der Fahrer auf einem Stuhl vor einem Bildschirm und steuert mit Hilfe von Pedalen, die unter einem Tisch stehen und einem am Tisch montierten Lenkrad das simulierte Kraftfahrzeug (z. B. [200]). Noch einfacher sind die visuellen Darbietungen von Verkehrsszenarien, bei denen der Proband nicht mehr aktiv in das simulierte Verkehrsgeschehen eingreifen kann, sondern lediglich das Verkehrsgeschehen beobachtet (z. B. [202]). Die externe Validität ist bei solchen Studien erwartungsgemäß gering.

Im Rahmen von Prototypenstudien werden mehr oder weniger funktionale Prototypen aufgebaut, so dass Probanden mit Assistenz- und Automationsfunktionen konfrontiert werden können. Nicht-funktionale Prototypen werden zum Beispiel in Theatersystemen eingesetzt (s. Abb. 8.120). Hier wird den Probanden die Funktionsweise eines Assistenz- oder Automationssystems von einem Menschen „vorgespielt“ und gemessen, wie dieser auf die Funktion reagiert (s. auch Wizard-of-Oz Experimente wie von Bella & Hanington [184] beschrieben).

Sobald Funktionen in Prototypen umgesetzt sind, können diese mit Probanden im Rahmen



**Abb. 8.120** Theatersystem am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

von Operational Field Tests evaluiert werden (z. B. [225]). Die Probanden fahren dann unter der Leitung eines Versuchsleiters eine vorgegebene Strecke (z. B. im Realverkehr oder auf einer Teststrecke) mit einem Kraftfahrzeug mit eingebauten Prototypen ab. Die Prototypen haben die Probanden also lediglich während einer beschränkten Datenerhebungsphase zur Verfügung. Je weniger kontrolliert die Umgebung ist, desto stärker ist hier also die externe Validität – auf Kosten der internen Validität. Diese Methode stellt somit einen Kompromiss zwischen den Naturalistic Driving Studies und den Simulatorstudien dar.

Wie diese Beschreibung zeigte, hat jede Studienmethode ihre Vor- und Nachteile und eigene Charakteristika (s. Tab. 8.16), weswegen ggf. empfohlen werden kann, verschiedene Methoden miteinander zu kombinieren.

### 8.6.6 Zusammenfassung

Trotz steigender Automatisierung im Kraftfahrzeug wird der Mensch in Zukunft weiter eine essentielle Rolle für das sichere und effiziente Erreichen seines Ziels haben. Daher ist es wichtig, die Stärken und Schwächen des Menschen schon frühzeitig im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen und vor allem auch zeitnah zu überprüfen, ob dieser mit den technischen Entwicklungen so umgehen kann, wie dies von den Systementwicklern gewünscht wird. Nur dann kann sichergestellt werden, dass innovative Automations- und Assistenzsysteme in ihrer Kooperation mit dem Menschen unsere Mobilität besser, effizienter, sicherer und angenehmer gestalten.

## 8.7 Software

Wie im Mooreschen Gesetz vorhergesagt steigt nach wie vor die Leistungsfähigkeit der Halbleiter und der Steuergeräte bei konstanten Preisen exponentiell. Mit der billigeren und höheren Hardwareleistung können IT-Systeme wirtschaftlich sinnvoll in immer neue Anwendungsbereiche vordringen. Dies eröffnet immer weitere Möglichkeiten für den Einsatz von elektronik- und softwarebasierten Funktionen in Fahrzeugen.

Hinzu kommt die digitale Infrastruktur aus drahtlosen mobilen Verbindungen und dem Internet, die vernetzte Fahrzeuge ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund nimmt der Anteil an Software in Fahrzeugen durch die anhaltenden

**Tabelle 8.16** Vergleich der verschiedenen Datenerhebungsmethoden

| Kriterien | Naturalistic Driving Studies | Simulatorstudien | Prototypenstudien |
|---|---|---|---|
| Versuchsleiter | Nicht vorhanden | Vorhanden | Vorhanden |
| Strecke | Frei wählbar | Vorgegeben | Vorgegeben |
| Fahrzeug | Eigenes Fahrzeug | Fahrkabine | Fahrzeug der Institution |
| Zeitraum der Datenerhebung | Langfristig | Kurzfristig | Kurzfristig |
| Realitätsgrad | Hoch | Niedrig | Mittel |
| Kontrollierbarkeit | Niedrig | Hoch | Mittel |

Wünsche nach höherer und differenzierter Funktionalität schnell zu.

Die Folge ist eine immer umfassendere und komfortablere Funktionalität, die erhebliche Beiträge zur Beherrschbarkeit der Fahrzeuge, zur Unfallsicherheit sowie zum Komfort leistet. Gerade die Anbindung durch vernetzte Dienste ist ein aktuelles Thema. Die Kehrseite ist aber auch eine erhebliche Zunahme der Komplexität der Softwaresysteme in den Fahrzeugen. Dies führt auf zahlreiche Herausforderungen in Hinblick auf Beherrschbarkeit der Entwicklung und des Einsatzes von Software (◘ Abb. 8.121).



## 8.7.1 Vorbemerkungen zum Thema Software

Mit Software kommt ein technisches Konzept in die Fahrzeuge, das sich radikal von den hergebrachten Denkweisen und Konzepten des Maschinenbaues unterscheidet und entsprechend grundlegend andere Entwicklungs- und Logistikmethoden erfordert. Software benötigt zwar zur Ausführung Hardware. Die Software selbst aber ist immateriell. Sie besteht aus Programmen („Algorithmen“) und Daten, die auf der Hardware ausgeführt werden. Die Hardware besteht aus programmierbaren integrierten Schaltungen (Sensoren, Aktuatoren, Prozessoren und Steuergeräte und deren Vernetzung), auf die die Software geladen und zur Ausführung gebracht wird.

Hardware ist dabei meist uniform, weitgehend anwendungsunspezifisch und folglich für unterschiedliche Anwendungen einsetzbar. Die Software bestimmt in der Regel die eigentliche Verhaltensweise (die „Funktionalität“) eines Hardware-/Softwaresystems. Die Hardware ist charakterisiert durch ihre Leistung wie Verarbeitungsgeschwindigkeit und ihr Speicherplatzvolumen und bestimmt damit die Performanz, mit der die Software ausgeführt wird, die Software wird durch ihre Funktionalität und ihr Ressourcenbedarf gekennzeichnet.

Software benötigt im Gegensatz zu den Erzeugnissen des Maschinenbaus keine eigentliche Produktion. In der Produktion eines Fahrzeuges muss die Software lediglich in die Steuergeräte eingebracht werden, soweit das nicht bereits durch den Zulieferer erfolgt, der für das Steuergerät verantwortlich ist. Damit ergeben sich für Software völlig andere Entwicklungs- und Kostenstrukturen. Hauptkostenfaktor sind die Entwicklungskosten und Kosten für die Wartung. Hinzu kommen noch Folgekosten für Gewährleistung und Betriebsrisiken.

Die Unterschiede zwischen Software, elektronischer Hardware und klassischer Mechanik des Maschinenbaus erfordern bei der schnell wachsenden Bedeutung von Software neue Fachkompetenzen in der Automobilindustrie. Das schnelle Umsetzen ganz neuer innovativer Funktionen im Automobil, basierend auf Software, verspricht hohes Potential, erfordert aber Lernprozesse und birgt naturgemäß Risiken. Entwicklungs- und Wartungsprozesse müssen auf die schnell wachsende Bedeutung von Software ausgerichtet werden. Gleiches gilt für die Organisation und Personalstruktur der Unternehmen.



- *Fahrwerk*
- *Antrieb*
- *Fahrerassistenzsysteme*
- *Infotainment*
- *Karosserie- und Komfortfunktionen*
- *Man Machine Interface*
- *IT System Services*

- *Modellbildung*
- *Architektur*
- *Qualitätssicherung*
- *Prozess*
- *Entkopplung von Infrastrukturen*
- *Produktlinien*

◘ **Abb. 8.121** Überblick Software im Automobil

## 8.7.2 Softwareentwicklungsprozess

Die Entwicklung von Software erfordert darauf gezielt zugeschnittene Entwicklungsprozesse. Der Entwicklungsprozess erfolgt meist nach dem Stan-

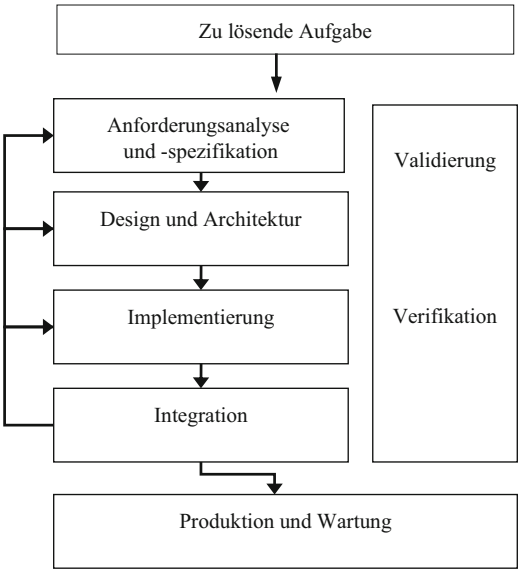



**Abb. 8.122** Entwicklungsphasen

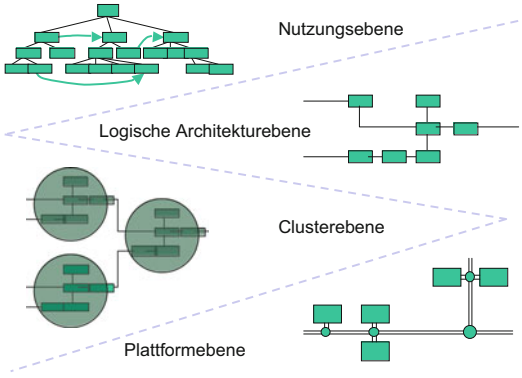



**Abb. 8.123** Abstraktionsebenen im Entwicklungsprozess

dard V-Modell, das die Entwicklung nach wie vor dominiert, und wird typischerweise in Phasen aufgeteilt (Abb. 8.122). In jeder Phase werden spezifische Zwischenergebnisse erarbeitet, die in den folgenden Phasen genutzt werden. Nachstehend werden die Phasen grob beschrieben.

Dabei ist zu beachten, dass die Entwicklung von Softwaresystemen für Fahrzeuge in aller Regel verteilt und arbeitsteilig erfolgt. Neben dem Automobilhersteller, der vornehmlich für die frühen Phasen zuständig ist, sind Zulieferer für den Entwurf und die Implementierung der Software, oft auch für eine Teilintegration in Baugruppen zuständig. Die Integration ins Fahrzeug als Gesamtsystem erfolgt dann in der Regel wieder durch den Automobilhersteller. Diese Arbeitsteilung erfordert eine besonders systematische Festlegung der Anforderungen einschließlich deren Validierung und den Entwurf der Architektur, da beides für die Beherrschung der Integrationsphase entscheidend ist.

Gleichzeitig wächst das Bedürfnis die Softwareentwicklungsprozesse stärker agil zu gestalten. Dies umfasst insbesondere Ansätze wie iteratives Vorgehen etwa in Sprints. Hilfreich ist das Konzept „Continuous Integration and Deployment“, bei dem die Software in kleinen Schritten so entwickelt wird, so dass zu jedem Zeitpunkt ein lauffähiges Softwaresystem vorliegt.

### 8.7.2.1 Einbettung in den Systementwicklungsprozess

Da die Softwarefunktionen eng in die unterschiedlichsten Funktionen eines Fahrzeugs eingreifen und damit das Verhalten und die Charakteristik entscheidend mitprägen, ist die Softwareentwicklung von der Entwicklung des Gesamtsystems Fahrzeug nicht zu trennen. Das „Software Engineering“ ist somit in das „Systems Engineering“ zu integrieren.

Besonders bedeutsam ist diese Verzahnung in der Anforderungsfestlegung. Im Systems Engineering werden die Fahrzeugfunktionen festgeschrieben. Auf dieser Grundlage werden dann die softwarebasierten Funktionen spezifiziert. Dabei ist zu beachten, dass keine andere Technik so viel Freiheitsgrade für Spezifikation und Entwurf und damit für die Ausgestaltung der Funktionalität bietet wie Software.

Die Entwicklung softwarebasierter Systeme im Fahrzeug verläuft, wie in Abb. 8.123 schematisch dargestellt, von der Festlegung der Anforderungen und Funktionen (Nutzungsebene) über die logische Architektur und die Clusterebene, in der logische Komponenten zu Softwareeinheiten zusammengefasst werden, die dann in Steuergeräten abgebildet werden können, bis hin zur Plattformebene, die aus der Hardwarearchitektur mit der Laufzeitumgebung wie Betriebssystem, Bus- und Gerätetreibern besteht.

### 8.7.2.2 Anforderungsanalyse und –spezifikation

Eine gerade in Hinblick auf die Neuartigkeit vieler Funktionen und die verteilte Entwicklung in ihrer Bedeutung oft unterschätzte Phase der Softwareentwicklung ist die Anforderungsphase. Dabei wird zunächst in einer Analysephase die zu lösende Aufgabe analysiert. Auf Basis dieser Analyse werden dann die Anforderungen an das System spezifiziert. Dabei sind im Wesentlichen zwei Schwierigkeiten zu bewältigen. Es ist bei einer Vielzahl konkurrierender Zielvorgaben zu ermitteln, welche funktionalen und Qualitätsanforderungen an das Zielsystem tatsächlich bestehen bleiben. Funktionale Anforderungen richten sich auf das Verhalten eines Softwaresystems, Qualitätsanforderungen betreffen Eigenschaften wie Bedienbarkeit, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Performanz oder Wartbarkeit. Weitere Anforderungen betreffen den Entwicklungsprozesses. Ferner sind die Anforderungen unmissverständlich zu dokumentieren, so dass sie als verbindliche Vorgaben für die weitere Entwicklung dienen können.

Die Festlegung der Anforderungen ist weniger einfach, als es im ersten Moment klingen mag, da Softwaresysteme große Entscheidungsspielräume für die Festlegung ihres Verhaltens lassen. Hinzu kommt, dass das Verhalten der zu erstellenden Systeme in allen Konsequenzen zum Zeitpunkt der Anforderungsspezifikation nur schwer vorstellbar ist. Ferner ist die unmissverständliche, präzise Beschreibung von Anforderungen ein nicht zu unterschätzendes Problem. Besonders kritisch sind die Vielzahl von Gesichtspunkten und die große Zahl unterschiedlicher Interessengruppen, die alle bei der Erstellung einer Anforderung zu berücksichtigen sind.

Dabei sollte eine Anforderungsfestlegung weitgehend unabhängig von der späteren Realisierung erfolgen. Generell sollte die Anforderungserhebung ohne Rücksicht die später stattfindende Partitionierung in Hard- und Software erfolgen, um Entwurfsentscheidungen nicht zu früh festzulegen.

### 8.7.2.3 Design und Architektur

In der Architektur eines Softwaresystems wird die Untergliederung eines Systems in seine Bestandteile („Softwarekomponenten“) festgelegt. Die Architektur ist für die arbeitsteilige Entwicklung eines Systems von entscheidender Bedeutung und erfordert deshalb besondere Sorgfalt in der Festlegung. Hier sind Methoden des Top-Down-Entwurfs, bei dem ein System ausgehend von einer Nutzungssicht schrittweise in Teilsysteme zerlegt wird, mit Methoden des Bottom-Up-Entwurfs zu kombinieren, wobei aus bestehenden Systemkomponenten schrittweise das Gesamtsystem aufgebaut wird. Hier kann sich insbesondere der Einsatz von Modellen (siehe ► Abschn. 8.7.3.1) vorteilhaft auswirken, die die Funktionsweise der Komponenten über ihre Systemgrenzen (die „Schnittstellen“) unmissverständlich beschreiben.

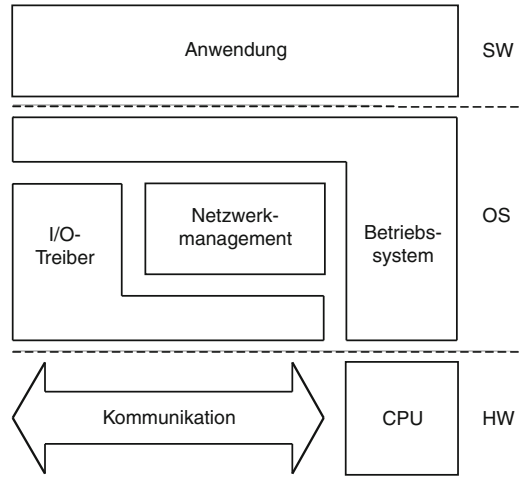



**Abb. 8.124** Systemarchitektur

Für die Architektur der E/E-System in Fahrzeugen unterscheiden wir zwischen der Hardwarearchitektur und der Softwarearchitektur. Für die Software ist dabei die eigentliche Anwendungssoftware von der Systemsoftware, insbesondere dem Betriebssystem, zu unterscheiden (Abb. 8.124), die Teil der Ausführungsplattform ist. Das Betriebssystem setzt auf dem Steuergerät („CPU“) auf.

Die Hardwarearchitektur besteht aus den Hardwarekomponenten wie Prozessoren (Steuergeräte, CPU), Sensoren, Aktuatoren sowie den sie verbindenden Netzwerken. Die Softwarearchitektur besteht in der Regel aus Betriebssystemanteilen sowie Systemdiensten und den sich darauf abstützenden

Anwendungsprogrammen. Diese können zweckmäßigerweise in Schichten aufgebaut sein.

Ein gemeinsames Ziel der Automobilhersteller und der Zulieferer ist eine Vereinheitlichung der Ausführungsplattform. Dies ist ein Anliegen von AUTOSAR (siehe ◘ Abb. 8.125, http://www.autosar.org/, J. Schäuffele, Th. Zurawka).

Neben der Ausführungsarchitektur betrachtet man die Softwarearchitektur, in der die Software für die Anwendung strukturiert wird.

#### 8.7.2.4 Implementierung und Modultest

In der Implementierung werden die in der Softwarearchitektur festgelegten Bestandteile durch Programme realisiert. Wir sprechen von Codierung. Dies kann händisch durch die Programmierer erfolgen oder durch Generierung des Codes durch ein Werkzeug aus Modellen. Letzteres setzt voraus, dass das Verhalten so präzise in Modellen erfasst wird dass der Code daraus automatisch abgeleitet werden kann.

Ein wesentlicher Bestandteil der Codierung ist die Qualitätssicherung durch Maßnahmen der Verifikation wie etwa Codeinspektion und Modultest. Nur wenn die Softwaremodule weitgehend fehlerfrei sind, ist die Voraussetzung für eine Beherrschung der Integration gegeben.

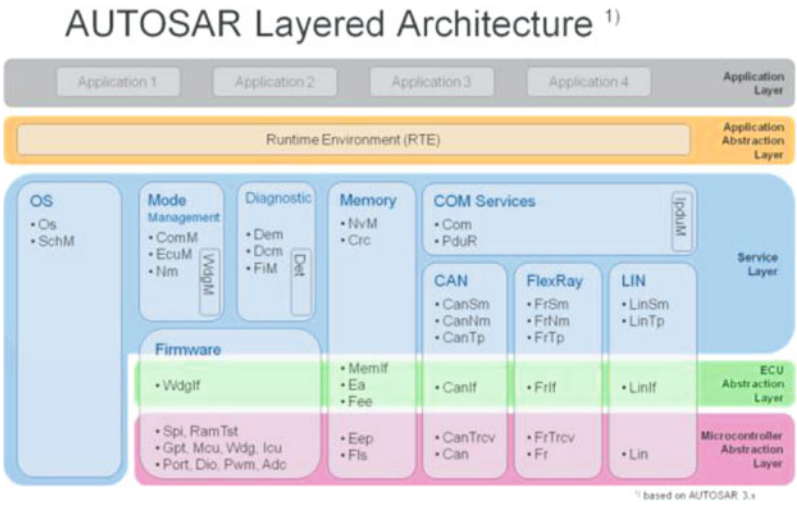
#### 8.7.2.5 Integration

Die realisierten Programme sind in der Regel in Module gegliedert. Diese werden in der Integration schrittweise zu größeren Softwareeinheiten zusammengefügt.

Die Software ist schließlich in die Zielhardware einzubringen und mit ihrer technischen Umgebung zu integrieren. Dann ist aus den so entstehenden Systemteilen in Schritten („inkrementell“) das Gesamtsystem aufzubauen. Kritisch ist bei der Integration die Sicherstellung des korrekten Zusammenspiels der Systemteile und unterschiedlicher Teilfunktionen. Um dieses zu gewährleisten, sind umfangreiche Tests erforderlich. Im ungünstigen Fall werden Fehler im Architekturkonzept oder in der Realisierung der Module erst zu diesem Zeitpunkt entdeckt.

#### 8.7.2.6 Validierung und Verifikation

Validierung hat zum Ziel zu überprüfen, ob die Formulierungen den tatsächlichen Anforderungen („das richtige System wird entwickelt“) entsprechen. Verifikation beschreibt die Konsistenzsicherung zwischen Artefakten der Entwicklung („das System wird korrekt gemäß den formulierten Anforderungen entwickelt“). Beides ist wesentlicher Teil der Qualitätssicherung.




◘ **Abb. 8.125** AUTOSAR Schichtenarchitektur

Die Durchführung der Implementierung und Integration erfordert eine sorgfältige Qualitätssicherung. Ziel ist der Nachweis, dass die realisierte Software den Anforderungen genügt. Dazu bieten sich Techniken des Reviews, der Inspektion, des Testens und auch der maschinengestützten Modellprüfung oder logischen Verifikation an.

Dabei ist darauf zu achten, dass durch Validierung und Verifikation die in jeder Phase der Entwicklung unvermeidlich auftretenden Fehler möglichst früh entdeckt und beseitigt werden. Verschleppte Fehler bergen enorme Risiken, verursachen in den späteren Entwicklungsphasen und erst recht im Feld überproportionale Kosten und Zeitverzögerungen.



#### 8.7.2.7 Produktion und Wartung

In der Fahrzeugproduktion ist die Software in die Hardware des Fahrzeugs einzubringen. Im Laufe der Nutzung des Fahrzeuges werden neue verbesserte („Update“) oder in Hinblick auf die Funktion erweiterte („Upgrade“) Versionen der Software erzeugt und nachgeladen.

Besonders kritisch wird dadurch die Wartung von Software im Fahrzeug, da neue Versionen kompatibel in die Hardware im Fahrzeug eingebracht werden müssen. Dies erfordert sorgfältige logistische Überlegungen in Hinsicht auf Kompatibilität, Konfiguration und Versionsbildung.

### 8.7.3 Erfolgsfaktoren

Der enorme Zuwachs von Software im Fahrzeug an Umfang und Funktionalität stellt die Automobilindustrie vor neue Herausforderungen. Besonderes Augenmerk kommt der Komplexitätsbewältigung in Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Software zu und der Erhöhung der Produktivität in Hinblick auf die dramatisch steigenden Aufwände bei der Entwicklung der Software.

Hier ist die Avionik mit der Zuverlässigkeit von Software in Verkehrsflugzeugen weiter. Moderne Verkehrsflugzeuge fliegen „by-Wire“. Die Zuverlässigkeit ist beeindruckend hoch. Allerdings sind die Kostenmodelle unterschiedlich zu denen in der Fahrzeugentwicklung.

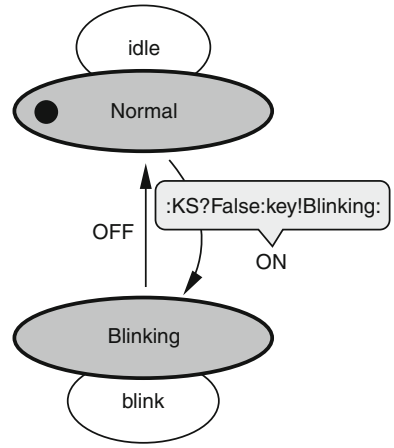



**Abb. 8.126** Zustandsübergangsdiagramm

#### 8.7.3.1 Modellbildung

Wie kaum ein anderes Gebiet ist die Softwaretechnik auf angemessene Techniken zur Modellbildung angewiesen. Eine besondere Rolle spielt bei der Software im Fahrzeug das Thema Reaktivität und Echtzeit. Die Software muss auf Ereignisse aus der Umgebung angemessen werden und zur richtigen Zeit reagieren.

Da Software immateriell ist und dabei komplexe dynamische Vorgänge mit statischen Mitteln beschreibt und bis ins letzte Detail festlegt, kommt Techniken, die es erlauben, das Verhalten der Software nachvollziehbar und überprüfbar zu beschreiben, eine besondere Bedeutung zu.

Die Informatik hat eine ganze Reihe von Modellen entwickelt, um Software zu beschreiben und anschaulich darzustellen. Inzwischen existieren auch Modellierungssprachen und Werkzeuge, die das Erstellen von Modellen unterstützen. Reaktionen von Systemen lassen sich anschaulich durch Zustandsübergangsdiagramme darstellen (siehe Abb. 8.126).

Die Bildung von Modellen für Software schafft die Möglichkeit, frühzeitig ohne die Betrachtung störender technischer Details, die Softwarefunktionalität fachlich unmissverständlich festzulegen und zu überprüfen. Dies führt auf den modellgetriebenen Ansatz der Softwareentwicklung.

### 8.7.3.2 MMI

Die auf Basis von Software geschaffene umfangreiche, neuartige Funktionalität in Fahrzeugen erfordert neue Konzepte, um diese Funktionalität dem Fahrer und Nutzer in angemessener Weise zur Verfügung zu stellen. Allein die hohe Zahl der Funktionen und Schwierigkeit, ihre Wirkungsweise unmissverständlich zu verstehen, führt auf große Herausforderungen. Wir sprechen bei der Aufgabe, den Nutzern (Fahrer, Beifahrer, aber auch Wartung) die elektronisch basierten Funktionen durch Dialog mit der Maschine transparent für den Zugriff zur Verfügung zu stellen, von der Mensch-Maschine-Interaktion (kurz MMI, für Einzelheiten siehe den Beitrag von Prof. Lemmer und Frau Dr. Jipp).

Durch die Softwaresysteme können Fahrzeuge in einer völlig neuen Weise auf die Bedürfnisse eines Fahrers zugeschnitten werden. Wir sprechen von „Personalisierung". Dazu ist es jedoch erforderlich, dass dem Fahrer entsprechende Möglichkeiten der Einstellung gegeben werden. Die bisher im Fahrzeug vorherrschenden Techniken durch Schieber, Knöpfe und Anzeigeinstrumente kommen dabei schnell an ihre Grenzen. Neue Bedien- und Anzeigekonzepte sind gefragt, die einfach und selbsterklärend sind und trotzdem dem Fahrer die volle Verfügung über alle vorhandenen Funktionen geben und ihm auch die entsprechenden Informationen über den Zustand seines Fahrzeugs zurückspiegeln. Neuartige Konzepte der Interaktion zwischen Nutzern und Fahrzeug kombinieren akustische Signale, Sprache und visuelle sowie taktile Möglichkeiten bis hin zur Steuerung der Systeme durch Gesten. Es entsteht eine multimodale Mensch-Maschine-Interaktion

Dabei ist bemerkenswert, dass auch die Mensch-Maschine-Schnittstelle durch Software selbst flexibel und programmierbar wird. Die Nutzung von Anzeigeinstrumenten aus der Computertechnik, also von Bildschirmen und programmierbaren Anzeigen (wie „Menue"-Techniken, etc.), erlaubt es, eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepten im gleichen Fahrzeug zu realisieren. Die angemessene Gestaltung und Nutzung dieser Möglichkeiten ist eine der großen Herausforderungen der Zukunft.

Besondere Bedeutung kommt der MMI im Zusammenhang mit der wachsenden Zahl adaptiver Systeme und Funktionen im Fahrzeug zu, die sich einer geänderten Situation automatisch anpassen. Man spricht auch von „Feature Interaction". Auch assistiertes, pilotiertes und automatisches Fahren bringt besondere Herausforderungen für die MMI mit.

### 8.7.3.3 Qualitätssicherung

Die enorme Komplexität der Software in Fahrzeugen stellt die Entwicklung vor große Herausforderungen. Durch die hohe Kombinatorik des Systemverhaltens sowie die Vernetzung und dadurch oft bedingten verdeckten logischen Abhängigkeiten gibt es viele Fehlerquellen, wie beispielsweise logische Fehler der Software und auch Integrationsfehler, die oft nur schwer zu ermitteln sind. Auch Fehler in der Infrastruktur können zu erheblichen Störungen führen. Besonders kritisch ist, dass das Auftreten unerwarteter Fehler oft Folgefehler verursacht, die folgenschwere Beeinträchtigungen der Funktionen nach sich ziehen, aber auch schwer zu diagnostizieren sind.

Entscheidend ist es, die Fehler vor Anlaufen der Produktion zu finden und zu beseitigen. Dazu sind umfangreiche Inspektionen, Reviews, Tests und Erprobungen erforderlich. Spontane Ausfälle der Fahrzeugsoftware („transiente" Fehler) im Feld rühren dagegen immer von der Hardware her, Softwarefehler sind hingegen stets systematische, logische Fehler, also Versäumnisse in der Entwicklung. In Hinblick auf Hardwarefehler kann Software jedoch mit geeigneten Methoden fehlertolerant gestaltet werden. Dies führt jedoch in der Regel auf höhere Kosten.

Da die Funktionen immer stärker vernetzt werden, aber gleichzeitig im Baukastenprinzip unterschiedliche Teile des Fahrzeugs und damit auch Funktionen von unterschiedlichen Herstellern geschaffen werden, kommt der Integration und der Integrationsfähigkeit im Zusammenhang mit Software im Fahrzeug eine herausragende Bedeutung zu. So müssen die Softwaresysteme, die von Zulieferern geschaffen werden und Schnittstellen zu anderen Softwaresystemen im Fahrzeug haben, in

Hinblick auf ihre Schnittstellen genau beschrieben werden, so dass sie dann in einen Integrationsrahmen, der durch die Softwarearchitektur gegeben ist, eingepasst werden können (siehe ▶ Abschn. 8.1 zum Thema Dienstleister und Zulieferer).

Zur Bewältigung der angesprochenen Probleme wird es in Zukunft erforderlich sein, die Softwaresysteme im Fahrzeug viel stärker aus einer Gesamtsystemsicht zu sehen und zu entwickeln. Frühzeitig ist eine Funktions- und Softwarearchitektur festzulegen mit genau abgegrenzten Schnittstellen, wie das in der Softwaretechnik üblich ist. Auf dieser Basis ergibt sich ein systematisches Top-Down-Vorgehen, in das sich realisierte Softwaresysteme mit ihrer Vernetzung systematisch einfügen müssen.



### 8.7.4 Entkopplung von Infrastruktur und Plattformen

Die Software wird auf der Hardware des Fahrzeugs ausgeführt. Da die Hardware (Steuergeräte) starke Unterschiede aufweist, ist es für die Übertragbarkeit der Software zwischen unterschiedlichen Hardwareplattformen sinnvoll, einheitliche Softwarestrukturen („Softwareplattform“) zu verwenden, auf denen dann die Anwendungssoftware aufsetzen kann. Wichtigster Bestandteil ist dabei das Betriebssystem.

Langfristig ist zu erwarten, dass einheitliche Plattformen, zumindest bei den einzelnen Herstellern, entstehen, die es erlauben, Lösungen von Fahrzeugreihen auf andere Fahrzeugreihen zu übertragen und auch innerhalb der einzelnen Fahrzeugreihen unterschiedliche Hardwarelösungen einzusetzen, ohne dass die Software massiv dafür geändert werden muss. Dies ist eines der wesentlichen Ziele von AUTOSAR, eines gemeinsamen Projektes von Automobilherstellern und Zulieferern zur Vereinheitlichung und Standardisierung der Plattformen im Fahrzeug.

### 8.7.5 Produktlinien

Typischerweise sind in den Fahrzeugen immer wieder ähnliche Funktionen durch Software realisiert.

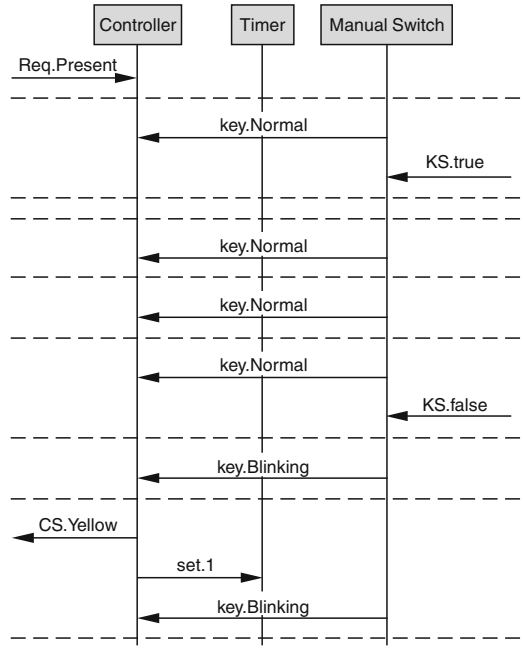



**Abb. 8.127** Interaktionsdiagramm

Deshalb empfiehlt sich der Produktlinienansatz, der der systematischen Entwicklung immer wieder neuen Versionen eines Produkts Rechnung trägt.

Der Produktlinienansatz ist ein inzwischen in vielen Details beschriebener Ansatz für die Entwicklung von Softwaresystemen mit immer wieder ähnlichen Funktionsmerkmalen. Wichtigster Bestandteil des Produktlinienansatzes sind das so genannte Domänenmodell und auch die Domänenarchitektur, in der die Funktionen eines Fahrzeuges strukturiert dargestellt werden („Featurebaum“). Dieser kann am günstigsten nach dem Prinzip der Nutzungsfälle (modelliert durch Szenarien; Abb. 8.127) aufgebaut werden, in denen dargestellt wird, für welche Aufgaben die einzelnen Softwaresysteme und im Überblick das gesamte Softwaresystem im Fahrzeug gedacht ist. Zweiter wesentlicher Bestandteil der Produktlinien ist es dann, eine Komponentenarchitektur (Abb. 8.128) für das Fahrzeug zu entwerfen, auch Systemarchitektur oder logische Architektur genannt, in der zur Realisierung der Funktionen das Softwaresystem in einzelne Komponenten zergliedert wird. Aus dieser Architektur wird dann schließlich die Softwarear-

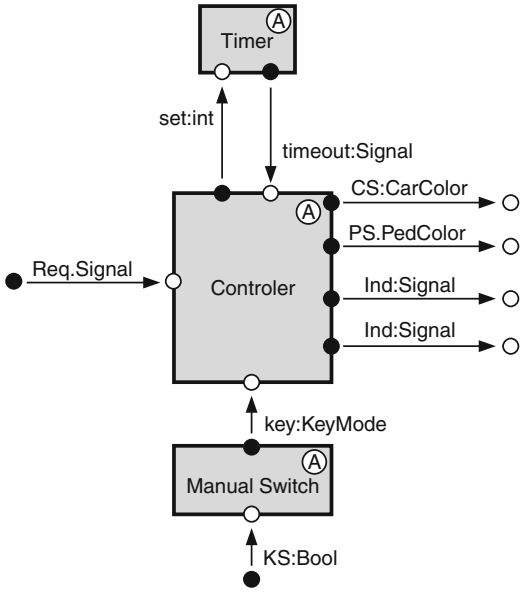



**Abb. 8.128** Strukturdiagramm zur Darstellung einer Komponentenarchitektur

chitektur gewonnen, die zeigt, wie die Bestandteile der Software sich gliedern, und ferner die Hardwarearchitektur, die die Bestandteile des Hardwaresystems umfasst. Die Idee des Produktlinienansatzes ist es, alle diese Architekturen in verallgemeinerter Form zu entwickeln, so dass aus ihnen durch Spezialisierung die Lösungen für die einzelnen Baureihen abgeleitet werden können.

## 8.7.6 Anwendungsfelder

Die Anwendungsfelder der Software in Fahrzeugen werden immer vielfältiger. Die Software erlaubt es, umfangreich differenzierte Funktionen ins Fahrzeug einzubringen.

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Gründen für die Implementierung von Funktionen im Fahrzeug durch Steuergeräte und Software unterscheiden. Zum einen wird diese Technik eingesetzt, um neuartige Funktionen im Fahrzeug zu realisieren. Typisches Beispiel ist die elektronisch unterstützte Fahrstabilität, die in ihrer ausgeprägten Form ohne Steuergeräte und zugeschnittene Software nicht denkbar wäre. Weitere Beispiele sind Navigationsgeräte oder Formen der Personalisierung im Fahrzeug durch die Einstellung von Komfortfunktionen und Fahrzeugcharakteristika auf die Bedürfnisse einzelner Fahrer.

Ein zweiter wichtiger Komplex der Anwendung von Software ist die Realisierung bekannter Funktionen, die bisher mechanisch und hydraulisch durch elektronische und elektrische Bauteile realisiert worden sind. Das wichtigste Gebiet in diesem Zusammenhang ist wohl das Gebiet des „Drive by Wire“. Dabei werden klassische Funktionen des Fahrzeugs, wie etwa Bremsen durch Hydraulik oder Lenkung mit Lenkgestänge, durch Elektromotoren und Steuergeräte sowie Software ersetzt. Man verspricht sich dabei Vorteile im Hinblick auf das Packaging, auf kostengünstigere Produktionslösungen, aber auch im Hinblick auf neuartige Funktionalität, die Potential für weitere Innovationen aufweist.

Damit treffen sich beim „Drive by Wire“ beide Beweggründe für den Einsatz von Software im Fahrzeug. Zunächst werden herkömmliche Funktionen durch Hardware-/Softwarerealisierungen ersetzt, was Vorteile für die technische Realisierung – die Kosten der Produktion oder das Packaging – hat. Durch den Umstand, dass nun diese Funktionen elektronisch angesteuert werden, ist es möglich, im Fahrzeug zusätzlich Funktionalitäten zu schaffen und dem Fahrer zur Verfügung zu stellen.

Allerdings erfordert der Einsatz umfassender „By-Wire“-Lösungen in den Fahrzeugen eine deutliche Erhöhung der Zuverlässigkeit der Systeme. Gerade in sicherheitskritischen Anwendungen ist ein Einsatz nur dann zu verantworten.

### 8.7.6.1 Fahrerassistenzsysteme

Ein wichtiges Anwendungsfeld von Software sind Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer unterstützen, seine Aufgaben vereinfachen, ihn warnen und zusätzliche Informationen geben (siehe auch ► Abschn. 8.5). Auch auf diesem Gebiet sind die technischen Möglichkeiten bei weitem nicht ausgeschöpft. Bisher werden schon heute verfügbare Techniken kaum genutzt, durch Beobachtungen des Fahrers und seiner Aktivitäten, Informationen über seine Befindlichkeiten, Absichten und seine Ziele zu sammeln und daraus Schlussfolgerungen zu ziehen, wie das Fahrzeug stärker auf die Bedürfnisse

des Fahrers eingestellt werden kann und zusätzliche Hilfen und Informationsdienste zur Verfügung gestellt werden können. Nur langsam klären sich in diesem Bereich die Fragen, welche Form der Unterstützung der Fahrer benötigt und wünscht, wie man sicherstellen kann, dass man den Fahrer nicht entmündigt, dass er sich über das Potential seines Fahrzeuges noch bewusst ist und dieses realistisch einschätzen kann und wie man den Fahrer in die Lage versetzt, die Charakteristika seines Fahrzeugs so weit wie möglich seinen eigenen Vorstellungen zu bestimmen.

#### 8.7.6.2 Automatisches Fahren

Seit wenigen Jahren steigt das Interesse an automatischem (auch autonomem oder pilotiertem) Fahren, bei dem das Fahrzeug selbstständig ohne Interaktion durch den Fahrer fährt. Dazu sind leistungsstarke Sensoren erforderlich und Software, die in der Lage ist, die Situation zu erfassen. Gesteuert durch Software wird dann festgelegt, welcher Plan bei der Steuerung des Fahrzeugs im Verkehr verfolgt wird, welche Manöver ausgeführt werden sollen und wie die konkrete Längs- und Querführung („Fahrtrajektorien") zu wählen ist.

#### 8.7.6.3 Infotainment

Neben der Unterstützung der primären Funktionen im Fahrzeug steigt der Bedarf an Information und Unterhaltung im Fahrzeug. Über längst verbreitete Funktionen hinaus, wie dem Autoradio, sind drahtlose Telefone, Fernsehen, Navigationsgeräte und die Einbindung typischer Informatiktechnologie bis hin zu Spielen und Informationsdiensten verstärkt in Fahrzeugen zu finden. Gerade die drahtlose Kommunikation eröffnet eine Vielzahl neuer Möglichkeiten.

Nahezu grenzenlose Möglichkeiten bietet die Integration von übergreifenden Verkehrsleitsystemen und Kommunikationssystemen zwischen den Fahrzeugen mit dem Fahrzeug selbst. Dadurch wird es beispielsweise möglich, dass hintereinander fahrende oder in eine Kreuzung einfahrende Fahrzeuge Informationen austauschen. So kann beispielsweise auf eine Vollbremsung des Vordermannes elektronisch reagiert werden. Weiter wird es auch möglich, Informationen aus den Fahrzeugen zu sammeln und die an zentrale Verkehrsleitstände zu geben. Somit wäre eine zuverlässige Gewinnung von Daten über die Verkehrssituation gegeben. Gleichzeitig könnten spezifische Daten in die Fahrzeuge zurück übertragen werden.

Diese Beispiele zeigen bereits auf, wie umfangreich die Möglichkeiten durch die Vernetzung von Kommunikation und Software im Fahrzeug bereits heute sind. Nur langsam klären sich die Geschäftsmodelle, nach denen diese Möglichkeiten genutzt werden, aber auch die Wünsche der Kunden und ihre Akzeptanz gegenüber entsprechenden Lösungen.

#### 8.7.6.4 Vernetzung nach Außen

Aufgrund der Fortschritte in der Nachrichtentechnik und der Vernetzungsinfrastruktur wie mobile Funknetze und dem Internet wachsen auch die Möglichketen der Vernetzung von Fahrzeugen untereinander („Peer-to-Peer") und mit Infrastruktur und digitalen Diensten. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für Funktionen im Fahrzeug, schafft aber auch neue Gefahren durch Angriffe auf die Netze. Damit wird das Thema der Informationssicherheit („Cybersecurity") schnell relevant.

#### 8.7.6.5 Karosserie- und Komfortfunktionen

Die Funktionen in und um den Innenraum bieten eine Fülle von Möglichkeiten für eine Unterstützung von Fahrern und Passagieren. Beispiele sind Schließung, Steuerung der Fenster, der Spiegel, des Lichts, der Scheibenwischer, Klimatisierung, Sitze und vieles mehr. Gerade hier kann ein hoher Komfort durch eine starke Personalisierung erreicht werden.

#### 8.7.6.6 Sicherheitsfunktionen

Eine Fülle von Möglichkeiten bieten Funktionen zur passiven und aktiven Sicherheit in Hinblick auf Unfälle. Dies beginnt mit Funktionen zur Unfallvermeidung („aktive Sicherheit") bis hin zum Eingriff in die Reaktionen des Fahrers. Dies führt auf kritische technische und konzeptionelle Fragen für die Mensch-Maschineschnittstelle. Auch schwierige rechtliche Fragen sind hierbei zu klären.

Im Falle eines Unfalls können Systeme der passiven Sicherheit die Insassen oder Unfallgegner vor schweren Verletzungen schützen. Beispiele sind Gurtstraffer, adaptive Airbagsteuerung und vielfäl-

tige Precrashfunktionen, durch die ein Fahrzeug auf einen als unvermeidlich erkannten Unfall so vorbereitet wird, dass das Verletzungsrisiko gemindert wird.

## 8.7.7 Technische Herausforderungen zur Software im Fahrzeug

Besondere Probleme der Software ergeben sich aus der Festlegung der Anforderungen, der Beherrschung der Komplexität der Realisierung und der Qualität und der Softwarelogistik (Wartung und Fehlerbeseitigung). Kritisch sind auch der ständig steigende Entwicklungsaufwand und die Beherrschung der Entwicklungsprozesse.

### 8.7.7.1 Zuverlässigkeit

Unter der Zuverlässigkeit von Software verstehen wir die Fehlerfreiheit, Verfügbarkeit und angemessene Reaktion auch in Grenzsituationen im Sinne der Anforderungen. In bestimmten Anwendungsfeldern ist die garantierte Zuverlässigkeit der Software absolutes Muss. Beispiele sind Softwaresysteme, deren Zuverlässigkeit für die Unfallvermeidung, die Fahrzeugfunktionen oder die Verhinderung von technischen Defekten zwingend Voraussetzung ist.

Allerdings unterscheiden sich die Methoden zur Messung, Steigerung und Sicherung der Zuverlässigkeit von Software stark von denen der Ermittlung und Bewertung der Zuverlässigkeit mechanischer Systeme. Für Software gibt es keinerlei Schwierigkeiten in Hinblick auf Fragen wie etwa Materialermüdung. Software kann aber logische Fehler durch eine inkorrekte Realisierung oder Konzeptfehler in Folge einer fehlerhaften Festlegung der Anforderungen aufweisen.

Die Zuverlässigkeit softwarebasierter Funktionen im Fahrzeug hat noch nicht den hohen Standard erreicht, wie er in der zivilen Luftfahrt heute anzutreffen ist. Die Gründe dafür sind vielfältig. Die unterschiedlichen Stückzahlen und Stückkosten erlauben für viele bewährte Ansätze der zivilen Luftfahrt, wie der redundanten Auslegung von Steuergeräten, ein Übertragen auf den Automobilbereich nicht. Auch sind die Vorschriften und Zulassungsprozesse in der zivilen Luftfahrt rigider. Im Automobilbereich sind die Verfahren des TÜV noch zu wenig auf die Besonderheiten softwareintensiver Systeme zugeschnitten.

Problematisch sind nicht zuletzt die rechtlichen Gesichtspunkte bei der Freigabe innovativer Systeme. Greifen Systeme stark in die Autonomie des Fahrers ein, indem sie seine Fahrmanöver korrigieren, sind bisher ungelöste Haftungsfragen zu klären (siehe VDI/VW Gemeinschaftstagung „Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme“). Dies führt dazu, dass bestimmte Funktionen, die durchaus im statistischen Mittel einer Unfallvermeidung dienen könnten, nicht zum Einsatz kommen.

### 8.7.7.2 Diagnose und Wartung

In den Software- und Elektroniksystemen können Fehler auftreten. Um diese Fehler frühzeitig zu erfassen und gezielt beheben zu kennen, werden die Systeme im Fahrzeug durch dafür vorgesehene Software überwacht. Auftretende erkannte Fehler werden in sogenannte Fehlerspeicher geschrieben und falls erforderlich, wird der Fahrer über den Ausfall von Funktionalität informiert. Gegebenenfalls werden auch fehlermildernde Maßnahmen ergriffen („Fail Silent“, „Fail Safe“, „Fail Operational“).

Durch die Fehlerspeicher wird die Reparatur der Fahrzeuge erleichtert. Diagnosesysteme werden in den Werkstätten an die Fahrzeuge angeschlossen, unterstützen die Fehlersuche und Fehlerbeseitigung sowie den Austausch von Software („Flashen eines Fahrzeugs mit Software“).

Allerdings führt dies auf besondere Herausforderungen für den Kundendienst. Die Softwareintensität in den Fahrzeugen erfordert in Kundendienst und Wartung Neue Kompetenzen in den Werkstätten. Gerade, wenn wir oftmals komplexen Diagnosesysteme nicht die gewünschten Fehlerbeseitigenden erbringen, führt das zu oft schwierigen und langwierigen Abstimmungsprozessen. Hinzu kommt, dass die Diagnosesysteme im Fahrzeug, die dazu dienen Benutzern den Ausfall wichtiger Systeme anzuzeigen, bisher oft nicht erforderte Zuverlässigkeit aufweisen. Probleme mit der Sensorik und der Logik der Diagnosesysteme führen im negativen Fall zu verwirrenden Anzeigen für den Fahrer, oft verbunden mit der Unsicherheit, ob tatsächlich die Funktion gestört ist oder nur die Anzeige unzutreffend ist. Hier gibt es noch viel Potenzi-

al zur Verbesserung sowohl im Hinblick auf die Zuverlässigkeit wie auf die Gestaltung der Nutzerschnittstelle bei der Anzeige von Problemen und der Anleitung das Fahrers bei deren Beachtung und Behebung.

### 8.7.7.3 Softwarewartung und -logistik

Nicht nur die Erstellung der Software, auch die Einbringung der Software in die Fahrzeuge während der Produktion, die Wartung der Software und das Ersetzen der Software im Fahrzeug durch neue Softwarestände bringen eine Vielzahl von Schwierigkeiten mit sich. Insbesondere ist Software in diesem Zusammenhang kaum mit den üblichen Prozessen der Automobilindustrie angemessen zu behandeln.



Eine Schwierigkeit ist dabei beispielsweise, dass, bedingt durch die großen Unterschiede bei den Sonderausstattungen, kaum ein Softwaresystem in einem Fahrzeug einer Baureihe einem anderen gleicht.

Zugleich werden die Softwaremodule im Rahmen von Fehlerkorrektur, Funktionserweiterung und Anpassung an neue Hardware weiterentwickelt. Es entstehen unterschiedliche Versionen der Softwaremodule. Dieses Problem der Versionierung von Softwaresystemen erfordert eine hohe Modularität und weitgehende Kompatibilität der Software.

Heute wird bei der Wartung von Fahrzeugen mit so genannten Softwareständen gearbeitet. Ein Softwarestand definiert eine Konfiguration, die sich aus einer Familie von untereinander verträglichen Softwareversionen zusammensetzt.

Macht man sich klar, dass für die Software immer wieder neue, verbesserte Softwarestände produziert und freigegeben werden, so ist eine der großen Schwierigkeiten, in den individuellen Fahrzeugen die genaue Information über den aktuellen Softwarestand zu haben und über die Möglichkeiten, diesen Softwarestand insgesamt oder in Teilen zu verändern.

Die Inkompatibilität zwischen unterschiedlichen Softwareteilen und die Inkompatibilität zwischen gewissen Hardware- und Softwarekomponenten führen letztlich auf schwer beherrschbare Probleme. Werkstätten müssen den aktuellen Softwarestand eines Fahrzeugs feststellen können und bei Wartungs- und Reparaturarbeiten darauf achten, das wieder konsistente Softwarestände im Fahrzeug sichergestellt sind.

Im Gegensatz zu der üblichen Schnelllebigkeit in der Computerindustrie, wo typischerweise Hardware nach drei bis fünf Jahren ausgemustert wird, müssen wir im Automobil Voraussetzungen dafür schaffen, dass Fahrzeuge zwanzig Jahre und länger im Markt sind. Sie müssen über diese ganze Zeit auch im Hinblick auf ihre Softwarestände gepflegt und gewartet werden. Dies bringt völlig neue Herausforderungen mit sich.

### 8.7.7.4 Vernetzung im Fahrzeug

Waren die ersten Softwaresysteme in Fahrzeugen im Wesentlichen bestimmt von regelungstechnischen Aspekten und liefen diese Systeme weitgehend isoliert, ohne mit anderen Funktionen in Interaktion zu treten, so beobachten wir heute eine immer stärkere Vernetzung der einzelnen Funktionen. Traditionell funktional völlig unabhängige Bestandteile des Fahrzeugs werden durch die Vernetzung ihrer Steuergeräte plötzlich voneinander abhängig. Beispiele sind Fahrstabilitätssysteme oder die komfortable elektronische Feststellbremse. Durch angepasste Bremsanlagen werden heute funktionale Abhängigkeiten zwischen Fahrzeugteilen, wie Motor, Bremsen und Fahrwerk geschaffen, die bisher nicht vorhanden waren.

Diese Abhängigkeiten sind typischerweise „Bottom up“ entstanden. Dies heißt, dass unsystematisch die Vernetzung einzelner Funktionen stattgefunden hat. Inzwischen sind die funktionalen Abhängigkeiten so vielfältig, dass im Entwicklungsprozess leicht die Übersicht verloren geht. Dies führt dazu, dass gelegentlich überraschende, unbeabsichtigte Abhängigkeiten auftauchen, die in ungewollten fehlerhaften Verhalten resultieren („Feature Interactions“). Dieses Phänomen, das aus Softwaresystemen, beispielsweise der Telekommunikation, wohl bekannt ist, erzwingt, dass in Zukunft der Entwurf der Funktionen im Fahrzeug viel stärker systematisch „Top down“ erfolgt und dass das Fahrzeug und seine Softwaresysteme grundsätzlich von vornherein als Gesamtsystem gesehen werden.

#### 8.7.7.5 Multiplexing, Zeitbeherrschung und Determinismus

Die Hardwarestrukturen werden aus Kostengründen gemeinsam für unterschiedliche Funktionen genutzt. So laufen auf den Steuergeräten Programme zeitlich versetzt ab, die die unterschiedlichen Funktionen realisieren. Wir sprechen von Multiplexing. Die Festlegung, welche Funktion wann zur Ausführung kommt, wird durch das „Scheduling" bestimmt. Auch auf den Bussystemen werden Nachrichten und Signal für unterschiedliche Anwendungen zeitlich versetzt übertragen.

Die zeitliche verschränkte Ausführung führt dazu, dass die Reaktionszeiten bei den einzelnen Funktionen nicht nur durch die Geschwindigkeit der Steuergeräte, sondern auch durch die Reihenfolge der Ausführung bestimmt werden. Durch zufällige Verdrängung der Ausführung einzelner Funktionen können unerwartete Verzögerungen auftreten, wenn die Steuerung der Steuergeräte und der Bussysteme jeweils auf die auftretenden Ereignisse reagiert. Bei dieser Vorgehensweise spricht man von Ereignissteuerung. Das zeitliche Verhalten einzelner Funktion erscheint dann nicht vorhersagbar und nichtdeterministisch.

Dieser Nichtdeterminismus ist für sicherheits- und zeitkritische Anwendungen nicht akzeptabel. Abhilfe schaffen Methoden der Zeitsteuerung, bei denen das Scheduling auf Steuergeräten und Bussen nicht über Ereignisse, sondern über fest vergebene Zeitintervalle erfolgt. Flexray ist ein Bussystem, das das Konzept der Zeitsteuerung unterstützt und bereits in zahlreichen Serienfahrzeugen umgesetzt aber aufgrund des extremen Konfigurationsaufwandes schon wieder in Frage gestellt.

#### 8.7.7.6 Funktionale Sicherheit

Funktionale Sicherheit adressiert die Eigenschaft eines Systems, das von ihm für seine Nutzer bei ordnungsgemäßem Betrieb keine Gefahren ausgehen. Da Software basierte Funktionen in vielerlei Hinsicht in Fahrfunktionen eingreifen, ist das Thema der funktionalen Sicherheit für die Software im Fahrzeug von herausragender Bedeutung. Hierzu findet sich ein bemerkenswerter Unterschied in der Behandlung von Software im Verhältnis zu mechanischen oder elektrischen Systemen. Software kennt grundsätzlich den Begriff des Defektes nicht. Für Software gibt es keine Materialermüdung, im Grunde genommen auch keine Fehler in der Fertigung. Fehler in der Software sind grundsätzlicher, systematischer Natur. Dies stellt das Thema „Funktionale Sicherheit" vor ganz neue Herausforderungen. Mit der ISO 26262 ist eine Norm zum Thema „Funktionale Sicherheit" verfügbar, die umfassende Vorgaben für die Entwicklung Software basierter Funktionen im Automobil im Hinblick auf funktionale Sicherheit macht.

Gemäß dieser Norm ist für Software basierte Funktionen im Automobil eine Sicherheitseinstufung vorzunehmen und abhängig von der Sicherheitseinstufung sind eine Reihe von Regeln in der Entwicklung von Software zu beachten. Erhält Software die höchste Sicherheitseinstufung, so ist in umfassender Weise durch Maßnahmen sicherzustellen, dass das Auftreten von Fehlverhalten mit entsprechend hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen ist. Eingesetzt werden dabei Techniken der Fehlerbaumanalyse und der Abschätzung der Auswirkungen von Fehlern (siehe ISO 26262).

#### 8.7.7.7 IT-Security

Die Vernetzung der Fahrzeuge nach innen und außen schafft Anforderungen in Hinblick auf die IT-Sicherheit (engl. Security) der Informationen und Funktionen im Fahrzeug. Hinzu kommen wichtige Fragen der so genannten Privacy, das heißt, der Sicherstellung, dass vertrauliche Daten über den Fahrer nicht unzulässig gesammelt und unbefugt genutzt werden.

Insgesamt nimmt das ganze Thema der IT-Zugriffssicherheit (engl. Security im Fahrzeug) einen immer höheren Stellenwert ein. Die Sicherung der Informationen im Fahrzeug gegen unbefugte Nutzung und Manipulation wird eines der kritischen Fragestellungen für moderne Hardware-/Softwaresysteme in Fahrzeugen.

### 8.7.8 Potenzial durch innovative Software

Software bietet enormes Potenzial für Kraftfahrzeuge. Sie erweist sich als der dominante Innovationstreiber.

Wie bereits erwähnt, wird auf das Thema „Drive by Wire“ in der Automobilindustrie mit besonderen Erwartungen geblickt. Bisher gibt es zwar nur vereinzelt Lösungen in dieser Hinsicht (siehe ► Kap. 5 und ► Kap. 7), aber langfristig erwarten sich die Automobilhersteller umfassende Lösungen, bei denen beispielsweise die Lenkung eines Fahrzeugs völlig durch Elektronik ersetzt wird. Realisierungen dazu existieren bereits. Dies erfordert Stellmotoren zur Steuerung der Räder und gleichzeitig Aktuatoren und Sensoren in der Lenkung, mit denen die Lenkbewegungen des Fahrers erfasst werden. Damit der Fahrer auch noch das Gefühl für die Straße hat, ist dabei ein so genanntes haptisches Feedback erforderlich. Die auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte werden so ebenfalls auf elektronischem Weg auf die Lenkung des Fahrers rückübertragen.

Drive by Wire bedingt hohe Anforderungen im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Systeme. Insbesondere die Frage, wie man die Systeme ausfallsicher macht, sobald keine mechanischen Notsysteme mehr vorhanden sind, steht hierbei im Vordergrund.

Durch „Steer by Wire“ sind die Möglichkeiten für weitere Innovationen nahezu unbeschränkt. Beispielsweise ist keine Notwendigkeit mehr für ein Lenkrad gegeben. Das Fahrzeug kann möglicherweise ebenso gut durch einen „Joystick“ gelenkt werden, wobei die damit verbundenen ergonomischen Fragen noch zu klären sind (siehe auch ► Abschn. 6.4.1). Dies erlaubt wiederum völlig andere Lösungen im Bereich der Armaturen und der Gestaltung des Fahrgastraums. Sind die Steuersignale der Lenkung erst mal elektronisch erfasst, so gibt es vielfältige Möglichkeiten, zusätzliche Funktionen aufzusetzen. Dies geht von der automatischen Einparkfunktion über die Korrektur der Lenkvorgänge bei Instabilitäten bis hin zu Fragen einer dynamisch beeinflussten Lenkung, bei der der Lenkeinschlag geschwindigkeitsabhängig gewählt wird.

Das Beispiel „Drive by Wire“ zeigt das riesige Potential von Softwarelösungen im Fahrzeug, aber gleichzeitig die bisher nicht vollständig bewältigten Herausforderungen für die Entwicklungsingenieure.

## 8.7.9 Organisatorische Herausforderungen

Die starke Zunahme von Software in Fahrzeugen hat nicht nur tiefgreifende technische Auswirkungen auf das Fahrzeug und seine Entwicklung, sondern auch tiefwirkende organisatorische Auswirkungen auf Automobilunternehmen und die Zulieferindustrie. Zum einen müssen Kompetenzen in dieser Hinsicht aufgebaut werden, des Weiteren müssen die Prozesse auf die neuen Techniken zugeschnitten werden.

Eine Vielzahl fortgeschrittener Prozesse and Verfahren der Informatik findet in der Praxis der Softwareentwicklung für Automobile noch nicht hinreichend Berücksichtigung. Eine Erhöhung ihres Softwarereifegrads ist für viele Hersteller und Zulieferer deshalb ein Ziel hoher Priorität. Dazu werden standardisierte Verfahren zur Bewertung des Softwarereifegrades von Unternehmen verwendet wie CMMI und SPICE.

### 8.7.9.1 Prozesse

Besonders gravierend wirkt sich dabei aus, dass die Lebenszyklen in der Softwareindustrie typischerweise deutlich kürzer sind als üblicherweise im Automobilbereich. Ein eindringliches Beispiel in diesem Zusammenhang sind die mobilen Telefone in Fahrzeugen. Neue Generationen mobiler Telefone erscheinen in der Regel alle ein- bis eineinhalb Jahre. Eine neue Fahrzeuggeneration wird alle sechs bis acht Jahre angegangen. Diese Unterschiede zeigen schon, dass bei konsequentem Einbau aktueller Technologie in Fahrzeuge in einem Serienmodell alle ein- bis eineinhalb Jahre neue Telefontypen eingebaut werden sollten, was bedeutet, dass während der Lebensdauer der Fahrzeugproduktion drei- bis viermal das Konzept des mobilen Telefons erneuert werden muss. Diese unterschiedlichen Zyklen, auch bei der Entwicklung von Software vor Anlauf der Produktion, sind auf die klassischen Automobilprozesse heute völlig unzureichend abgestimmt.

Langfristig stellt sich auch die Frage, ob im Gegensatz zur heutigen Situation Software im Automobilumfeld nicht immer stärker auch ein eigen-

ständiges Produkt wird. Heute werden Softwarelösungen in der Regel verkapselt in Hardwarelösungen vertrieben. So produzieren Zulieferer die mechanischen Geräte wie Bremsen, die dazugehörigen Sensoren und Aktuatoren, die Stellmotoren, die Steuergeräte und schließlich die Software in der Regel in einem Bauteil. Mittel- bis längerfristig ist jedoch zu erwarten, dass die Anzahl der Prozessoren in den Fahrzeugen eher wieder abnimmt und dass eine Vielzahl von Funktionen auf einzelnen Prozessoren und Steuergeräten zusammengefasst wird. Dies bedeutet, dass die Software für unterschiedliche Funktionen nicht mehr in den entsprechenden Geräten verkapselt in dafür gewidmeten Steuergeräten läuft, sondern, wie in klassischen Informatiksystemen, in Multiplexbetrieb auf einen Prozessor. Dies führt unweigerlich dazu, dass die Software getrennt von den Geräten gesehen und integriert werden muss. Der nächste Schritt liegt auf der Hand. Damit kann die Software auch unabhängig von der Mechanik der Sensorik und Aktuatorik erstellt werden.

Damit sind langfristig neue Formen der Zuliefer- und Softwareindustrie zu erwarten, die die Bedürfnisse der Automobilindustrie in dieser Hinsicht befriedigen. Software wird auch im Fahrzeug zum eigenständigen Teilprodukt. Letztlich kann Software auch nachträglich den Funktionsumfang eines Fahrzeugs erweitern.

#### 8.7.9.2 Impakt und langfristige Perspektiven

Software im Fahrzeug stellt schon heute, aber stärker noch für die Zukunft, eine der Herausforderungen schlechthin für die Automobilindustrie dar. Dramatische Änderungen im Produkt, in den Entwicklungs-, aber auch Produktionsprozessen in den Geschäftsmodellen und im Markt sind zu erwarten.

Softwarebasierte Funktionen sind für die Zukunft entscheidende Innovationstreiber. Das Thema zeigt damit hohes Potential, aber auch Risiken. Alle beteiligten Unternehmen der Automobilindustrie sind heutzutage organisatorisch, personell und technisch auf diese Herausforderungen noch nicht hinreichend eingestellt. Die Fähigkeit, sich schnell und flexibel auf die angesprochenen Themen auszurichten und einzustellen, diese zu bewältigen und beherrschen, und dabei die Marktführerschaft zu behalten, wird eine der entscheidenden Fähigkeiten im Wettbewerb der Zukunft sein.

## 8.8 Moderne Methoden der Regelungstechnik

Moderne Regelsysteme sind eine wichtige Grundlage für die Innovationen im Automobil der vergangenen Jahre und werden zukünftig für weitere wesentliche Veränderungen im Bereich der individuellen Mobilität verantwortlich zeichnen. Die eingesetzten Regelungsverfahren sind für die Leistungsfähigkeit moderner Fahrerassistenz-, Antriebs- und Sicherheitssysteme im Kraftfahrzeug von großer Bedeutung.

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die modernen Methoden der Regelungstechnik gegeben und eine Bewertung der einzelnen Verfahren vorgenommen. Dieses Instrumentarium kann unterstützend für die Auswahl eines passenden Entwurfsverfahrens für die jeweils vorliegende Regelungsaufgabe herangezogen werden.

### 8.8.1 Anforderungen an Regelsysteme im Kraftfahrzeug

Trotz der unterschiedlichen übergeordneten Ziele (Sicherheit, Umweltschutz, etc.) lassen sich die Anforderungen an Regelungssysteme im Kraftfahrzeug zusammenfassen zu:

- Der Regler muss das System stabilisieren.
- Das System hat im geregelten Zustand neben der Stabilität zusätzliche definierte Güteeigenschaften zu erfüllen (z. B. schnelles Einschwingen und Einhalten einer max. zulässigen Abweichung vom Sollwert).
- Das für den Reglerentwurf oftmals benötigte Modell des Systems kann resultierend aus Abweichungen zwischen System- und Modellverhalten Unsicherheiten besitzen, die im Entwurf berücksichtigt werden müssen.
- Stabilität und Güteeigenschaften müssen erfüllt werden, auch wenn das zu regelnde System während der Laufzeit Parameterschwankungen unterliegt, die nicht genauer

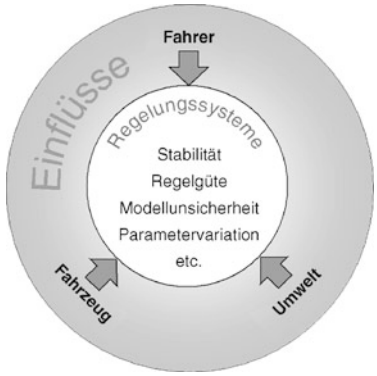



**Abb. 8.129** Anforderungen an moderne Regelungsverfahren im Kraftfahrzeug-Umfeld



ermittelt werden können (z. B. Reifengriffigkeit oder Zuladung).

Da Regelungssysteme zunehmend in sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt werden, müssen diese unter den gegebenen Randbedingungen einer kritischen Fahrsituation sicher und zuverlässig funktionieren. Andernfalls könnten kostenintensive und imageschädigende Rückrufaktionen die Folge sein.

Entsprechend Abb. 8.129 müssen moderne Regelungen ausreichende Robustheit gegenüber Modellunsicherheiten und Parametervariationen aufweisen, um Stabilität und Güteeigenschaften auch unter realen Einsatzbedingungen erfüllen zu können. Hierzu müssen Modellunsicherheiten, verrauschte Signale und Parameterschwankungen bereits während des Entwurfs berücksichtigt werden. Dafür sind sehr gute Kenntnisse der klassischen Regelungstechnik und ein intensives Verständnis des zu regelnden Prozesses notwendig. Werden diese Anforderungen bereits im Entwurf des Regelungssystems eingebracht, so können hervorragende Robustheits- und Performance-Eigenschaften erzielt werden.

## 8.8.2 Moderne Reglerentwurfsverfahren

Die im Fahrzeugsektor am weitesten verbreitete PID-Regelung [264] umfasst die einfachste, vom

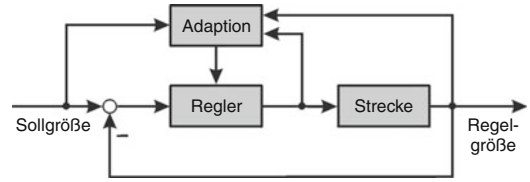



**Abb. 8.130** Struktur einer adaptiven Regelung

Aufwand/Nutzen-Verhältnis allerdings sehr attraktive Klasse von Reglern. Der Regelfehler wird proportional, integral und differenzial gewichtet. Sämtliche Kombinationen dieser Gewichtung sind möglich. Viele Anwender besitzen grundlegende Kenntnisse der PID-Regelung, da diese Regelungen Bestandteil der überwiegenden Anzahl technisch-orientierter Ausbildungskurse sind. Brauchbare Regler können für viele Anwendungen ohne explizites Modellwissen durch einfaches Anpassen der Parameter oder durch automatisierte Parametrierung erzielt werden. Aussagen bzgl. Robustheit sind jedoch nicht explizit möglich, weshalb dieses Verfahren für eine Vielzahl anspruchsvoller Anwendungen nicht ausreichend ist.

Nachfolgend wird eine Auswahl von modernen Reglerentwurfsverfahren unter anwendungsorientierten Gesichtspunkten erörtert. Es kann keine generelle Aussage darüber getroffen werden welches der Verfahren zu favorisieren ist, da die verfahrenspezifischen Vor- und Nachteile mit den aus dem jeweils individuell vorliegenden Anwendungsfall resultierenden Anforderungen abzugleichen sind.

### 8.8.2.1 Adaptive Regelung

Mit adaptiven Reglern können Systeme mit Modellunsicherheiten bzw. mit zeitlich veränderlicher Dynamik gehandhabt werden. Veränderungen im Verhalten der Regelstrecke werden detektiert und der Regler in Folge dessen an das geänderte Übertragunsverhalten angepasst (Abb. 8.130). Die Adaption kann sowohl offline als auch online durchgeführt werden. Voraussetzung für den Einsatz adaptiver Regelungssysteme sind solide Kenntnisse in klassischer Regelungstechnik, nichtlinearen und digitalen Systemen sowie im Bereich der Systemidentifikation. Ein Derivat adaptiver Regler sind selbst-

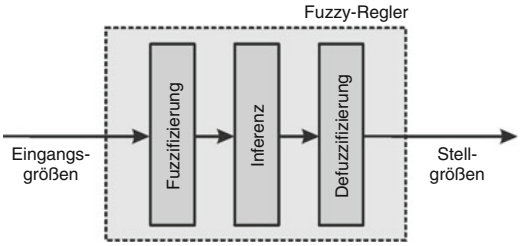



**Abb. 8.131** Struktur eines Fuzzy-Reglers

einstellende Regler, vorzugsweise PID-Regler [277]. Sie sind industriell beliebt, da sie sich per Knopfdruck selbst einstellen. Populär ist das sogenannte Gain- oder auch Parameter-Scheduling. Die Reglerparameter werden vorab für verschiedene Betriebspunkte, zwischen denen während des laufenden Betriebes umgeschaltet wird, ausgelegt und häufig in Kennlinien oder Kennfeldern abgelegt. Bei der höchstwertigen Form der adaptiven Regler, den modellbasierten adaptiven Reglern, werden die Parameter kontinuierlich aufgrund des aktuellen Streckenverhaltens nachgeführt [262]. Im Kfz-Bereich werden adaptive Regelungen z. B. bei der adaptiven Dämpferregelung eingesetzt, mit der unterschiedliche Fahrwerkscharakteristiken bei einem Fahrzeug realisiert werden können.

### 8.8.2.2 Fuzzy-Regelung

Bei Fuzzy-Regelungen wird das Regelgesetz intuitiv mit vorhandenem Wissen über die Prozessregelung in sprachlich formulierten Wenn-Dann-Regeln aufgestellt. Die Einbettung dieser sogenannten Inferenz in die Reglerstruktur ist in Abb. 8.131 dargestellt. Zum Design einer Fuzzy-Regelung ist kein mathematisches Modell der Regelstrecke und damit auch keine Linearisierung notwendig. Soll der Reglerentwurf von einer Simulation begleitet werden, so wird dieser Vorteil hinfällig, da für Simulationszwecke zwangsläufig ein Modell der Regelstrecke vorliegen muss. Wichtigste Voraussetzung zum Entwurf einer Fuzzy-Regelung ist das Vorhandensein von Wissen über die Regelung des Prozesses. Mit einfachem Verständnis der Fuzzy-Entwurfsmethodik können schnell brauchbare Regler realisiert werden. Höherwertige Fuzzy-Regler gestalten sich aufgrund der extrem hohen Anzahl an verfügbaren Parametern als aufwändig. Für gute Lösungen ist eine solide Kenntnis der Fuzzy-Theorie unumgänglich. Bei der schnell unüberschaubar werdenden Anzahl an potenziellen Regeln wirkt sich eine fehlende Systematik zur Erstellung des Regelwerks nachteilig aus. Außerdem gibt es keine Möglichkeit sich widersprechende Regeln zu erkennen. Nichtlinearitäten können bei Fuzzy-Reglern einfach integriert werden. Häufig wird durch das intuitive Vorgehen gute Robustheit erzielt, im Entwurf kann dies aber nicht quantitativ berücksichtigt werden [265]. Eine exemplarische Anwendung ist ein Fuzzy-ABS-System, bei dem sowohl der eigentliche Regler als auch eine Schätzung der Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes auf Methoden der Fuzzy-Logik beruht [272].

### 8.8.2.3 $\Gamma$-Synthese

Die $\Gamma$-Synthese kann als konsequente Weiterentwicklung des klassischen Polvorgabe-Entwurfs mit einer Erweiterung auf unsichere Regelstrecken verstanden werden. Die Lage sämtlicher Eigenwerte des geschlossenen Kreises soll trotz Anwesenheit von Unsicherheiten auf ein definiertes Polgebiet beschränkt werden [261]. Das Verfahren beschränkt sich im Wesentlichen auf die Modellierung von Unsicherheiten in physikalischen Parametern, also strukturierte Unsicherheiten. Nicht nachgebildetes dynamisches Verhalten oder Modellvereinfachungen können nicht über unstrukturierte Unsicherheiten berücksichtigt werden. Die Modellierung der Unsicherheiten, wie auch alle weiteren Betrachtungen im Rahmen der $\Gamma$-Synthese, erfolgen ausschließlich anhand des charakteristischen Polynoms des geschlossenen Kreises. Mit dieser Fokussierung wird zwar a priori das Potenzial vergeben, auch Zeit- und Frequenzbereichs-Einflüsse von Nullstellen in den Reglerentwurf zu integrieren, dafür kann aber auf das gesamte Wissen der klassischen Regelungstechnik aufgebaut werden. Die $\Gamma$-Synthese bietet ein breites Spektrum an Hilfsmitteln zum Reglerentwurf – aber es ist auch ein intensives Verständnis der Regelstrecke notwendig.

Die Performance-Anforderungen werden über Polgebiete formuliert (Abb. 8.132): Zeitbereichs-Anforderungen wie Einschwingzeit (a) oder Dämpfung (b), aber auch Frequenzbereichs-Anforderungen wie Beschränkung der Bandbreite (c) oder eine

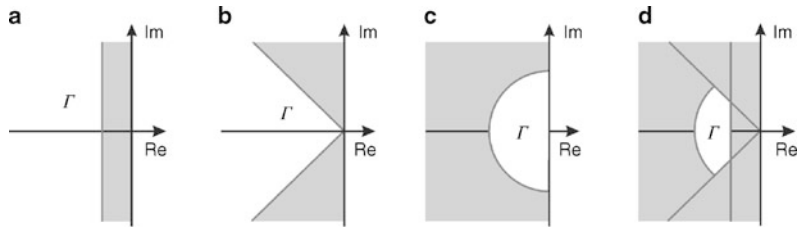



**Abb. 8.132** Polgebiete zur Performance-Spezifikation

Kombination mehrerer Anforderungen (d) können so vorgegeben werden. Das aus einfachen geometrischen Elementen zusammengesetzte zulässige Polgebiet wird als $\Gamma$-Gebiet bezeichnet. Liegen alle Eigenwerte des mit Unsicherheiten behafteten geschlossenen Kreises in dem gewünschten Gebiet $\Gamma$, so wird dies in der $\Gamma$-Synthese als robuste Performance bezeichnet. Darüber hinaus müssen wichtige Vorgaben wie z. B. die Struktur des gewünschten Reglers vor Beginn des Entwurfs vom Anwender festgelegt werden. Die $\Gamma$-Synthese zeigt dann in grafischer Form die zulässigen Koeffizientenbereiche auf, aus denen der Entwurfsingenieur nach eigenem Ermessen die günstigsten auswählen kann. Diese Reglerentwurfsmethodik wurde bei der Stabilisierungsfunktion der BMW-Aktivlenkung, die sich heute in den Baureihen 3, 5 und 6 im Serieneinsatz befindet, angewendet [263].

### 8.8.2.4 Neuronale Regelung

Als Vorbild für künstliche neuronale Netze dient das biologische Nervensystem. Ein neuronales Netz wird darauf trainiert, eine bestimmte Funktion auszuführen. Aufgrund dieser Eigenschaft werden neuronale Netze für adaptive Regler und schwerpunktmäßig zur Systemidentifikation, teilweise auch für prädiktive Regelungen eingesetzt. Neuronale Netze können aber auch als Regler verwendet werden [274]. Der Ansatz der Verhaltensnachbildung verbindet die neuronalen Regelungen mit den Fuzzy-Regelungen. Beide werden häufig unter dem Begriff Soft Computing zusammengefasst. Für neuronale Regelungen muss sich der Anwender intensiv mit der spezifischen Funktionsweise neuronaler Netze auseinandersetzen und gute Kenntnisse in der Systemidentifikation besitzen. Allgemeine regelungstechnische Kenntnisse sind

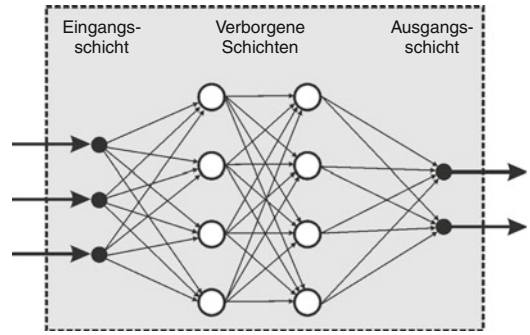



**Abb. 8.133** Struktur eines neuronalen Netzes

sekundär. Da neuronale Netze erst ihre eigentliche Funktion antrainiert bekommen müssen, sind umfangreiche Lerndaten erforderlich. In Fällen von schwierig durchzuführender Modellbildung können so Messdaten über das Systemverhalten aufgenommen und als Lerndaten zur Systemidentifikation mittels neuronaler Netze verwendet werden. Neuronale Netze werden aber auch als Modellfolgeregler verwendet. Die Komplexität eines neuronalen Netzes bestimmt der Anwender durch die Vorgabe der Anzahl an Knoten und Schichten des Netzes (Abb. 8.133). Transparenz ist bei neuronalen Netzen aufgrund der Black Box Struktur nicht gegeben. Typisches Einsatzgebiet neuronaler Netze ist z. B. das momentenbasierte Motormanagement [269].

### 8.8.2.5 Norm-optimale Regelung

Bei den norm-optimalen Entwurfsverfahren handelt es sich um sehr junge Verfahren bei denen zum ersten Mal die Definition einer Norm für regelungstechnische Fragestellungen herangezogen wird. Diese Entwurfsverfahren sind eine konse-

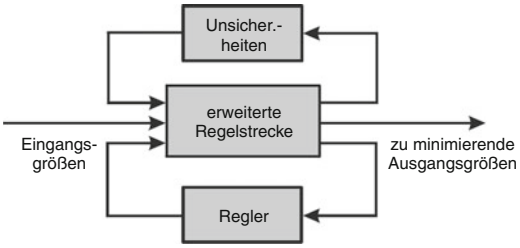



**Abb. 8.134** Struktur einer norm-optimalen Regelung

quente Fortentwicklung der optimalen Zustandsregelung kombiniert mit einem optimalen Beobachter. Zu den norm-optimalen Entwurfsverfahren zählen die $H_2$- und $H_\infty$-Regelung [276], die $\mu$-Synthese [278] sowie die lediglich im diskreten lösbare $L_1$-optimale Regelung [275].

In den Reglerentwurf können bereits Modellunsicherheiten integriert werden (Abb. 8.134). Für die Modellierung von Unsicherheiten werden zumeist frequenzabhängige Wichtungsfunktionen verwendet. Mit ihnen kann abgestimmt nach Frequenzbereichen eine prozentuale (multiplikative Unsicherheit) oder absolute Abweichung (additive Unsicherheit) vom nominellen Modell beschrieben werden. Die Performance-Anforderungen werden ebenfalls anhand von Wichtungsfunktionen formuliert. Die gebräuchlichste Struktur mit drei Wichtungsfunktionen ist der Mixed-Sensitivity-Entwurf, der die gezielte Modellierung frequenzabhängiger Eigenschaften ermöglicht. Während der Reglersynthese wird ein Gütefunktional minimiert, woraus ein für die gestellten Anforderungen optimaler Regler resultiert. Eine Analyse im Anschluss an den Entwurfsvorgang ist nicht erforderlich, da der resultierende Regler die geforderten Robustheitseigenschaften garantiert einhält.

Da die Reglerübertragungsfunktion Ergebnis eines automatisch ablaufenden Iterationsprozesses ist, muss der Regler als Black Box betrachtet werden – aus welchen Komponenten sich der Regler zusammensetzt, kann nicht transparent nachvollzogen werden. Damit besteht auch keinerlei Möglichkeit einer nachträglichen „manuellen Optimierung". Ein mögliches Anwendungsgebiet norm-optimaler Regler im Kfz-Bereich sind Spurführungsassistenten [271].

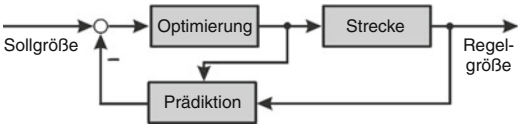



**Abb. 8.135** Struktur einer prädiktiven Regelung

### 8.8.2.6 Prädiktive Regelung

Regelungen, die auf Basis eines Streckenmodells das zukünftige Verhalten der Regelstrecke über einen definierten Zeithorizont berücksichtigen und anhand einer Optimierung in die Stellgrößenberechnung integrieren, werden als prädiktive Regelungen bezeichnet (Abb. 8.135). Anwender prädiktiver Regelungen benötigen allgemeine Kenntnisse in digitaler Regelung und Handhabung von Gütekriterien. Der Zeitaufwand für den Entwurf konzentriert sich vor allem auf die Erstellung eines ausreichend genauen Streckenmodells. Der Entwurf eines ersten Reglers ist relativ einfach, beim Entwurf höherwertiger Regler besteht die größte Schwierigkeit in der hohen Anzahl an zu berechnenden Parameter. Das Umsetzen von Anforderungen in die Syntax des Verfahrens über individuell definierbare Gütekriterien ist gut realisierbar. Stabilität ist bei prädiktiven Reglern nicht garantierbar, dafür können Stellgrößenbegrenzungen berücksichtigt werden und eine Erweiterung auf nichtlineare Prozesse ist möglich [273]. Prädiktive Regler werden z. B. bei der Gierratenregelung eingesetzt, um einem Über- bzw. Untersteuern des Fahrzeugs frühzeitig entgegenzuwirken.

### 8.8.2.7 Quantitative Feedback Theory (QFT)

Der Entwurf für robuste Regelungen mit der Quantitative Feedback Theory (QFT) ist ein Verfahren im Frequenzbereich und ist anwendbar auf ein breites Spektrum von Systemen: zeitinvariant und zeitvariant, linear und nichtlinear, kontinuierlich und zeitdiskret, Ein- und Mehrgrößensysteme [276]. Ziel der QFT-Synthese ist es, einen Regler mit möglichst niedriger Ordnung und minimaler Bandbreite zu entwerfen, der trotz Unsicherheiten in der Regelstrecke sowohl robuste Stabilität als auch robuste Performance gewährleistet. Als roter Faden entlang des gesamten Entwurfsprozesses zieht sich

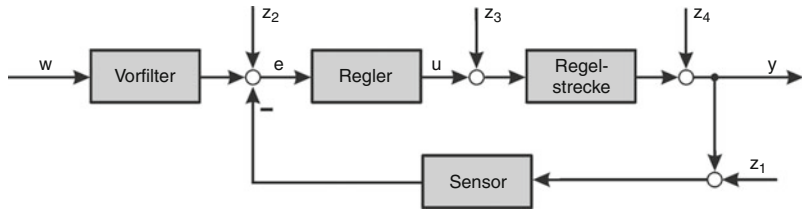



**Abb. 8.136** Regelkreisstruktur für QFT-Entwurf ($w$ – Sollgröße, $y$ – Regelgröße, $z_1$ bis $z_4$ – Störgrößen, $e$ – Regelabweichung, $u$ – Stellgröße)

dabei das gezielte Nutzfrequenzbereichs-orientierte Formulieren von sowohl den Unsicherheiten als auch den Performance-Anforderungen. Als grafisches Hilfsmittel wird das Nicholsdiagramm verwendet, das die Vorteile von Bode-Diagramm und Polardarstellung in sich vereint. Die strukturierten Unsicherheiten werden mit den in die Übertragungsfunktion eingehenden Parameterintervallen festgelegt. Die unstrukturierten Unsicherheiten können am einfachsten auf die gleiche Art und Weise beschrieben oder bei der Beschreibung der Performance-Anforderungen in den Entwurf integriert werden.

Zur Formulierung der Performance-Anforderungen steht dem Anwender ein breites Spektrum an Möglichkeiten zur Verfügung: Sowohl im Zeitbereich mit Toleranzschläuchen als auch im Frequenzbereich mit Begrenzungsfunktionen können Anforderungen an jede im System auftretende Übertragungsfunktion formuliert werden (Abb. 8.136). Anforderungen an die Performance des geschlossenen Kreises können damit äußerst flexibel und gleichzeitig sehr gezielt in den Entwurf eingebracht werden.

Der Entwurfsvorgang besteht darin, durch das gezielte Ergänzen von Reglerelementen den Phasen- und Betragsverlauf des Frequenzganges so zu verändern, dass die über die Grenzkurven definierten Anforderungen nicht verletzt werden. In diesem Loop Shaping stehen dem Anwender alle bekannten Übertragungsfunktionselemente zur Verfügung. Mit wie vielen bzw. wie wenigen Elementen im Regler die Anforderungen erfüllt werden, hängt wesentlich vom Know-How des Entwurfsingenieurs ab. Mit solider Erfahrung in der klassischen Regelungstechnik können auf einfache Art und Weise robuste Regler mit sehr niedriger Ordnung und geringer Bandbreite erzeugt werden. Bei weniger Erfahrung besteht die Gefahr, dass durch das Hinzufügen zu vieler Elemente Regler mit zu hoher Ordnung erzeugt werden. Seine Leistungsfähigkeit hat das QFT-Entwurfsverfahren z. B. bei der automatischen Spurführung von Pkw unter Beweis gestellt [268].

### 8.8.3 Evaluierung moderner Regelungsverfahren

Nachdem die grundlegenden modernen Reglerentwurfsverfahren mit ihren spezifischen Eigenschaften erläutert wurden, die Entwurfsmethoden und die synthetisierten Regler je nach Betrachtungsweise jedoch große Unterschiede aufweisen, wird nun eine Evaluierung der vorgestellten Verfahren vorgenommen. Zur Bewertung der Reglerentwurfsverfahren wurden praxisorientierte Gesichtspunkte entsprechend den Kategorien *Entwurfsvorgang* und *Entwurfsergebnis* ausgewählt. Anhand von 7 Kriterien wird die Leistungsfähigkeit der Reglerentwurfsverfahren beurteilt und eingestuft. Dies entspricht dem Versuch einer objektiven und transparenten Bewertung der betrachteten Entwurfsverfahren für moderne Regler in dem sonst aufgrund heterogener Vorgehensweisen und verfahrensspezifischer Nomenklaturen schwer zu vergleichenden Feld. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird bei dieser Übersicht nicht erhoben.

In der ersten Kategorie wird der Entwurfsvorgang bewertet. Die Reglertypen werden an Fragen gemessen, welcher Anspruch von dem Verfahren an den notwendigen regelungstechnischen Verständnisgrad gestellt wird und welcher Engineering-Aufwand mit dem Entwurf verbunden ist. Außerdem

**Tabelle 8.17** Reglerentwurfsverfahren im Vergleich

| | Entwurfsvorgang | | | | Entwurfsergebnis | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | notw. regelungstechnischer Verständnisgrad[1] | Entwurfsaufwand[2] | Umsetzung von Anforderungen in Entwurfsmethodik | Toolunterstützung | Performance | Robustheit | Transparenz |
| Adaptive Regelung | − | − | − | 0 | + | + | + |
| Fuzzy-Regelung | + | + | − | + | 0 | 0 | + |
| $\Gamma$-Synthese | − | − − | 0 | + | + | + | + |
| Neuronale Regelung | − | − − | − − | + | − | 0 | − − |
| Norm-optimale Regelung | − − | − | + | + | + | ++ | − − |
| Prädiktive Regelung | − | 0 | + | + | + | − | 0 |
| QFT | − − | − | ++ | + | + | ++ | ++ |

[1] +: niedriger Verständnisgrad, −: hoher Verständnisgrad
[2] +: wenig Aufwand, −: hoher Aufwand

wird bewertet, wie die gestellten Anforderungen im Rahmen des Entwurfs eingebracht werden können und inwieweit eine Toolunterstützung notwendig und gegeben ist.

Die zweite Kategorie beurteilt die Leistungsfähigkeit des entstandenen Reglers. Kriterien wie die erzielbare Performance und die Robustheit der synthetisierten Regler werden ebenso analysiert wie deren Transparenz.

Ziel dieser Evaluierung ist es, dem Anwender ein Instrumentarium zur zielsicheren Auswahl geeigneter Regelungssysteme für effiziente Anwendungen bereitzustellen. Die in Tab. 8.17 zusammengefassten Beurteilungen können allerdings nur als Anhalt für den jeweiligen Reglertyp gewertet werden. Für eine detailliertere Bewertung ist eine intensive Analyse der einzelnen Entwurfsverfahren für die jeweiligen Reglertypen unerlässlich.

### 8.8.4 Anwendungsbeispiel Fahrdynamikregelung

Heutige Fahrroboter (Abb. 8.137) mit ihren hochwertigen Fahrdynamikregelungen sind ein hervorragendes Beispiel für die Leistungsfähigkeit und den praktischen Nutzen moderner Regelungsverfahren. Bei der Entwicklung und objektiven Beurteilung moderner Kfz-Assistenzsysteme kommt es zunehmend auf die reproduzierbare Einhaltung enger Vorgaben teils mehrerer Größen wie z. B. Geschwindigkeit, Verzögerung, Kurs oder Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern an. Fahrroboter ermöglichen bei diesen Versuchen das gleichzeitige Einhalten der verschiedenen Anforderungen.

Aus regelungstechnischer Sicht stellt diese Umgebung eine ganz besondere Herausforderung für die Fahrroboter dar. Von Kleinstwagen über Sport-



**Abb. 8.137** Fahrroboter (Quelle: VEHICO GmbH)



wagen bis zu Oberklasselimousinen oder sogar LKW sollen die Versuchsszenarien mit gleich hoher Güte durchgeführt werden können. Charakteristische Kennwerte wie Gewicht, Radstand, Reifentyp oder Motorleistung des Versuchsfahrzeugs sind beim Entwurf der Regelsysteme noch nicht bekannt, können aber mit den oben beschriebenen Methoden als Unsicherheiten beschrieben und in den Entwurf einbracht werden.

Abb. 8.138 zeigt exemplarisch die Leistungsfähigkeit der automatischen Querführung eines modernen Lenkroboters. Der doppelte Spurwechsel wurde mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bis hinein in den Grenzbereich mehrmals hintereinander gefahren und die Ergebnisse in einem $xy$-Plot übereinandergelegt. Deutlich zu erkennen ist die beeindruckende Wiederholgenauigkeit, die ein Unterscheiden der einzelnen Versuche nahezu unmöglich macht. Diese Genauigkeit und Robustheit der Regelsysteme in Fahrrobotern wird erst durch die in diesem Kapitel beschriebenen modernen und leistungsfähigen Reglerentwurfsverfahren erzielt. Für die Versuchsabteilungen der OEMs und Prüfinstitutionen eröffnet sich damit die Möglichkeit zur Objektivierung einer Vielzahl von Fahrversuchen z. B. aus den Bereichen EuroNACP AEB/LSS, FMVSS oder ADAS [267].

## 8.8.5 Ausblick

Moderne Reglerentwurfsverfahren setzen sich verstärkt insbesondere in anspruchsvollen und sicherheitsrelevanten Bereichen auch in der Kraftfahrzeugtechnik durch. Die dargestellten modernen Entwurfsverfahren bringen zahlreiche Vorteile und eine erhebliche Leistungssteigerung gegenüber den üblichen klassischen Regelungen mit sich. Allerdings können bei Systemen mit hochgradig nichtlinearem Verhalten, wie beispielsweise der Fahrzeuglängsführung, selbst diese Verfahren nicht die gestellten Anforderungen erfüllen. Für derartige Anwendungsfälle kann auf nichtlineare Regelungen, bei denen das Verhalten der Regelstrecke mit einem nichtlinearen Modell ab-

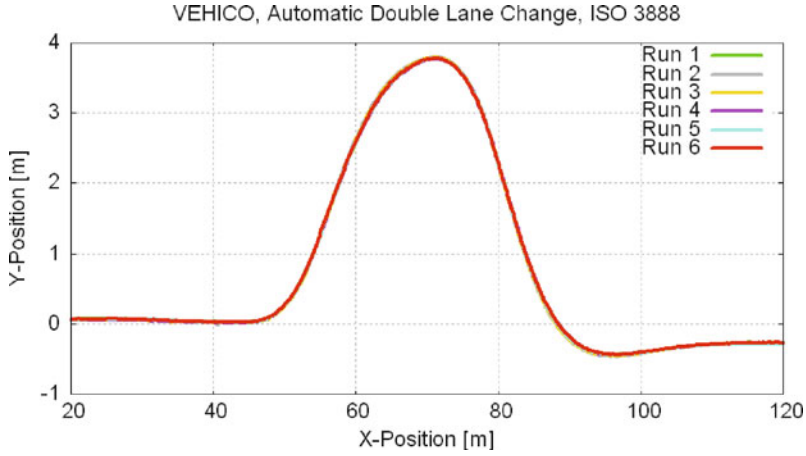



**Abb. 8.138** Automatisch gefahrener doppelter Spurwechsel (Quelle: VEHICO GmbH)

gebildet wird, zurückgegriffen werden [266]. Eine Linearisierung des Modells entfällt hierbei komplett. Spezifika nichtlinearer Systeme sind mehrere mögliche Gleichgewichtspunkte und das Auftreten von Grenzzyklen. Der Entwurf von Regelungen für nichtlineare Systeme ist stark mathematikorientiert [270], was fundierte Kenntnisse in Mathematik für den Anwender unabdingbar macht. Die Modellierung dynamischer Prozesse in nichtlinearer Form ist in den meisten Fällen realitätsnaher als eine linearisierte und damit nur für einen begrenzten Bereich um einen Arbeitspunkt herum gültige Betrachtungsweise. Inwieweit sich dieser Vorteil lohnt, muss aufgrund des extrem hohen Aufwandes für den Entwurf im Einzelfall abgeschätzt werden.

## Literatur

**Literatur zu Abschn. 8.1**

1. Automotive Open System Architecture. www.AUTOSAR.org
2. Denner, V.: Automobilelektronik der Zukunft, Euroforum Kongress Elektronik Systeme im Automobil, München 2005
3. Ehlers, T.: Verfahren zur Sicherstellung der Systemintegrität in Fahrzeugen mit vernetzten Steuergeräten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektrische Messtechnik, Braunschweig (2003)
4. Etschberger, K.: CAN Controller Area Network Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen. Hanser, München, Wien (1994)
5. Fischer, P.: Moore's Law, die rasante Entwicklung der Technologie. Vorlesungsunterlagen Digitale Schaltungstechnik, Universität Mannheim, Institut für Technische Informatik, Mannheim (2004)
6. Fleischmann, A., Geisberger, E., Pister, M.: Herausforderungen für das Requirements Engineering eingebetteter Systeme, TUM-INFO-09. Technische Universität München, München (2004)
7. INCOSE: Systems Engineering Handbook v2a. www.incose.org (2004)
8. Isaac, R.: Influence of Technology Directions on System Architecture, Presentation IBM, IBM Research Division (2004)
9. JD Power IQS ratings: defects per 100 vehicles, October 2003, Summe von Features and Controls, Sound System, HVAC, Quelle: JD Power & Associates; McKinsey and Company
10. Klein, T.: Modellbasierte Entwicklung von Fahrzeugsoftware in der Automobilindustrie, Vorlesung Institut Software Systems Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig (2004)
11. Klein, T., Fey, I., Grochtmann, M., Conrad, C.: Modellbasierte Entwicklung eingebetteter Fahrzeugsoftware bei DaimlerChrysler. In: Rumpe, B., Hesse, W. (Hrsg.) Proceedings Modellierung. GI-Edition Lecture Notes In Informatics. Marburg (2004)
12. Kurzweil, R.: The Age of Spiritual Machines: When Computers Exceed Human Intelligence. Penguin, USA (2001)
13. Mercer Management Consulting: Technologische Veränderungen und deren Konsequenzen für die Automobilzulieferer und -ausrüster Industrie bis 2010, Studie. Mercer Management Consulting, München (2001)
14. Moore, G.: No exponential is forever, International Solid State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, 2003
15. Otterbach, R., Schütte, F.: Effiziente Funktions- und Software-Entwicklung für mechatronische Systeme im Automobil, Workshop Intelligente, mechatronische Systeme, Paderborn, 2004
16. Reichart, G.: Systems Engineering – ein neues Entwicklungsparadigma für die Automobilindustrie? 9. EUROFORUM Tagung Elektronik-Systeme im Automobil, München, 2005
17. Scharnhorst, T.: Management of the E/E complexity by introducing a software development process and the Open System Architecture, 6th Braunschweig Conference AAET, Braunschweig, 2005
18. Schleuter, W.: Herausforderungen der Automobil-Elektronik. IKB Unternehmerforum, Köln (2002)
19. Manifesto for Agile Software Development. http://www.agilemanifesto.org/
20. Scrum Guides. http://www.scrumguides.org
21. Stroop, J., Köhl, S., Lamberg, K., Otterbach, R.: Simulation, Implementierung und Test vernetzter, zeitgesteuerter Fahrzeugsysteme. 4. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen. Berlin (2003)
22. Fennel, H., et al.: Achievements and exploitation of the AUTOSAR development partnership Convergence 2006. Detroit (2006)
23. Fürst, S., et al.: AUTOSAR – A Worldwide Standard is on the Road. 14. Internationaler VDI Kongress Elektronik im Fahrzeug. Baden-Baden (2009)
24. Bunzel, S.,Fürst, S. et al.: Safety- and Security-related features in AUTOSAR. Automotive-Safety & Security. Stuttgart (2010)
25. David J. Anderson: Kanban: Successful Evolutionary Change for Your Technology Business. Blue Hole Press (2010)
26. ATZelektronik, AUTOSAR, 10 Years of AUTOSAR. Springer Vieweg (2013)
27. Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 3. Aufl. Springer Vieweg (2015)
28. ATZelektronik, Jubiläumsausgabe 10 Jahre ATZelektronik. 10. Jg. Springer Vieweg (2015)
29. Schernikau, J.: Gestaltung von mechatronikgerechten Organisationen in der Produktentwicklung. Dissertation, Lehrstuhl für Produktionssystematik des

Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen. Shaker, Aachen (2001)
30. Schleuter, W.: Herausforderungen der Automobil-Elektronik, IKB Unternehmerforum, Köln, 2002
31. Scott, S.: Designing for the high end, 10th International Symposium on High Performance Computer Architecture, Madrid, 2004
32. Schwab, G.: Untersuchungen zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Der Andere Verlag (2003)
33. Stroop, J., Köhl, S., Lamberg, K., Otterbach, R.: Simulation, Implementierung und Test vernetzter, zeitgesteuerter Fahrzeugsysteme. 4. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen, Berlin, 2003
34. Scharnhorst, T., et al.: AUTOSAR – Challenges and achievements 2005. VDI Konferenz Elektronik im Fahrzeug, Baden Baden, 2005
35. Fennel, H., et al.: Achievements and exploitation of the AUTOSAR development partnership Convergence 2006. Detroit (2006)
36. Fürst, S., et al.: AUTOSAR – A Worldwide Standard is on the Road. 14. Internationaler VDI Kongress Elektronik im Fahrzeug, Baden-Baden, 2009
37. Bunzel, S., Fürst, S. et al.: Safety- and security-related features in AUTOSAR. Automotive-Safety & Security, Stuttgart 2010
38. AUTOSAR: http://www.autosar.org/publications

**Ergänzende Literatur zum Thema Bordnetz**

39. WIELAND-WERKE: Wieland-Buch Kupferwerkstoffe. 5. Aufl. Wieland-Werke AG, Ulm (1986)
40. Leohold, J.: Auslegung und Optimierung von Fahrzeug-Bordnetzen. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. Bd. 1287. Düsseldorf (1996)
41. Döring, M. et al.: Methoden zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Komponenten und deren Verkabelung im Kfz bei gegebener Zuverlässigkeit und Topologie. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik: Elektronik im Kraftfahrzeug. Bd. 1646. Düsseldorf (2001)
42. Gemmerich, R. et al: Ein ganzheitlicher Ansatz zur Generierung und Optimierung von Fahrzeugbordnetzen. 14. Internationaler Kongress „Elektronik im Kraftfahrzeug". VDI, Baden-Baden (2005)
43. Scheele, O.: Entwicklung von EE-Architekturen: Vom Entwurf bis zur Konzepteinführung in der Serie. EE-Systems, Nürtingen (2008)
44. Ginsberg, T., Brand, R., Baus, A., Eckel, M.: Sichere Leistungsübertragung in Hochspannungsbordnetzen. 4. VDI Tagung Baden Baden Spezial (2010)
45. Kalb, H.: Bordnetz und Kabel im Umfeld der Elektromobilität. 4. VDI Tagung Baden Baden Spezial (2010)
46. Knorr, R.; Gilch, M.; Auer, J.; Wieser, C.: Stabilisierung des 12 V Bordnetzes, Ultrakondensatoren in Start-Stopp-Systemen. ATZ Elektronik 05/2010, 48–53 (2010)
47. Niknejad, A., Oborowski, P., Ayeb, M., Brabetz, L.: Systematische Beurteilung von Architekturen für Hochleistungsbordnetze. Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement. München, April 2012
48. Dörsam, T., Kehl, S., Klinkig, A., Radon, A., Sirch, O., et al.: Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug. ATZ Elektronik 01/2012, 20–25 (2012)
49. Brabetz, L., Ayeb, M., Jilwan, G., Graebel, P., Kerner, T.: A New Approach to the Test, Assessment and Optimization of Robust Electrical Distribution Systems. SAE Congress, April 2013
50. Babiel, G.,: Bordnetze und Powermanagement. Springer Vieweg (2013)
51. Graf, A., Kositza, J., Raithel, T.: Architekturstudie zur Leistungsverteilung im KFZ. ATZ Elektronik 03/2013, 194–197 (2013)
52. Brabetz, L., Ayeb, M.: A Statistical Analysis of the Thermal Behavior of Electrical Distribution Systems. SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. **7**(1), 119–124 (2014)
53. Nalbach, M.: Bordnetztopologie, Weichenstellung für 2025. ATZ Elektronik 07/2015, 30–35–53 (2015)

**Literatur zu Abschn. 8.3**

54. Zimmermann, W., Schmidgall, R.: Bussysteme in der Fahrzeugtechnik, Protokolle, Standards und Softwarearchitektur. 5. Aufl. Springer Vieweg (2014)
55. Lawrenz, W., Obermöller, N.: CAN Controller Area Network. 5. Aufl. VDE Verlag (2011)
56. ISO 11898
57. Grzemba A., von der Wense, H.-C.: LIN-Bus. 1. Aufl. Franzis Verlag (2005)
58. Rausch, M.: FlexRay Grundlagen, Funktionsweise, Anwendung. 1. Aufl. Hanser Verlag (2007)
59. Grzemba, A.: MOST – The Automotive Multimedia Network. 2. Aufl. Franzis Verlag (2011)
60. Rech, J.: Ethernet: Technologien und Protokolle für die Computervernetzung. 3. akt. Aufl. dpunkt Verlag (2014)
61. Metcalfe, R., Correa, C., Kozierok, C., Boatright, R., Quesnelle, J.: Automotive Ethernet – The Definitive Guide. Intrepid Control Systems (2014)
62. Matheus, K., Königseder, T.: Automotive Ethernet. Cambridge University Press (2014)
63. Hagen, S., Marzohl, S.: IPv6. Grundlagen, Funktionalität, Integration. 2. Aufl. Sunny Edition (2009)
64. Alexon, J.: USB Complete: The Developer's Guide. 5. Aufl. Lakeview Res (2015)
65. OPEN Alliance, Presserelease: Automotive Ethernet Hits the Road in Wide Range of New Vehicles. Oktober 2015
66. IEEE: IEEE 1722: Standard for Layer 2 Transport Protocol for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks. IEEE SA (2011)

67. IEEE: IEEE 802.3-2012. IEEE Standard for Ethernet. IEEE SA (2012)
68. IEEE: IEEE 802.1Q-2011. Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks. IEEE SA (2011)
69. IEEE: IEEE 802.11-2012. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE SA (2012)
70. IEEE: IEEE 802.15.1-2005. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN). IEEE SA (2005)
71. IEEE: IEEE 802.1AS-2011. Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks. IEEE SA (2011)
72. ISO: ISO 15031-2005 Road Vehicles – Diagnostic Systems – Requirements for Interchange of Digital Informations. ISO (2005)
73. ISO: ISO 9141-1989 Road Vehicles – Diagnostic Systems – Requirements for interchange of digital information. ISO (1989)
74. ISO: ISO 13400-2010 Road Vehicles – Communication between test euipment and vehicles over Internet Protocol. ISO (2010)
75. ISO: ISO 14229-2005 Road Vehicles – Unified diagnostic systems (UDS)

**Weitere Informationen**

76. LIN: http://www.lin-subbus.org/
77. CAN: http://www.can-cia.org/
78. TTCAN: http://www.can-cia.org/
79. USB: http://www.usb.org/home
80. MOST: http://www.mostcooperation.com
81. BYTEFLYGHT: http://www.byteflight.com
82. FLEXRAY: http://www.flexray.com
83. INFRAROT: http://www.irda.org/
84. ZIGBEE: http://www.zigbee.org/
85. BLUETOOTH: https://www.bluetooth.org/
86. UWB: http://www.palowireless.com/uwb/tutorials.asp
87. IEEE: http://www.ieee.org

**Literatur zu Abschn. 8.4**

88. Gonschorek, K.-H., Neu, H. (Hrsg.): Die elektromagnetische Umwelt des Kraftfahrzeugs, FAT-Bericht Nr. 101 (1993)
89. Lindl, B., Scheyhing, J.: EMV – die Entstörung von Kraftfahrzeugen. ATZ , 292–301 (1999)
90. Pfaff, W.R., Bauer, H.: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Funkentstörung. In: Reif (Hrsg.) Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. S. 542–555. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
91. Pfaff, W.R.: Bewertung von EMV-Prüfkonzepten für Kraftfahrzeuge, EMV'94, Karlsruhe (1994)
92. Ludwig, A., Ehrhard, R., Mäurer, C.: Einsatz der numerischen Feldsimulation in der EMV. In: GMM-Fachbericht Elektromagnetische Verträglichkeit, S. 85–92. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach (2002)
93. Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC) Rybak, Terence, Steffka, Mark, 2004

**Literatur zu Abschn. 8.5**

94. Europäische Gemeinschaft Richtlinie E 76/756 EWG
95. NHTSA, FMVSS 108
96. Bockelmann, W.: Auge – Brille – Auto. Springer, Berlin (1987)
97. Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
98. SAE conference, jährliche Vorträge auch zu lichttechnischen Themen
99. Lachmayer, R., et al.: Intelligente Frontbeleuchtung. ATZ (1996)
100. Hella KGaA, Automotive Lighting, Valeo, Visteon Firmenschriften und Internet
101. Bosch, Veröffentlichungen des früheren K2-Bereiches
102. Philips, Forschungsberichte
103. Osram, Firmenschriften
104. Lachmayer, et al.: Synergien von Licht und Mechatronik, Elektronik im Kfz, Baden-Baden, 1998
105. Abel, B., Labahn, N., Pietzonka, S.: Systementwurf für situationsgerechte Innenbeleuchtung, SIP 2000
106. Hendrischk, W., Lachmayer, R.: Bi-Xenon. VDI (2000)
107. Hendrischk, W., Grimm, M., Kalze, F.-J.: Adaptive Scheinwerfer. ATZ **11**, 2–3 (2002)
108. Thiemann, M., Seuss, J., Bertram, T., Opgen-Rhein, P.: Mechatronik im Scheinwerfer. ATZ **01**, 70–76 (2002)
109. Kesseler, W., Kleinkes, M., Könnig, T.: Nachtsichtsysteme kurz vor der Serienreife. ATZ **107**, 20–25 (2005)
110. Kalze, F.-J.: Lichttechnik in Kraftfahrzeugscheinwerfern. ATZ **12**, 362–368 (2008)
111. Schug, J., Mutschler, J.-M.: LED-Scheinwerfer und HiPerVision-Lampen. ATZelektronik **04**, 62–67 (2009)
112. Wördenweber, B., Wallaschek, J., Boyce, P.: Automotive Lighting and Human Vision. Springer, Berlin (2007)
113. Amsel, C., Pietzonka, S., et al.: Die nächste Generation Lichtbasierter Fahrerassistenz. ATZ **112**, 758–763 (2010)
114. Neumann, R., et al.: LED-Vollscheinwerfer mit adaptivem Fernlicht. ATZ **113**, 20–25 (2011)
115. Hamm, M.: Innovative Lichtquellen für Fahrzeuge. ATZ **113**, 8–15 (2011)
116. Weber, M., Päger, B., Roppel, M., Abel, H.-B.: Industrialising IPS-technologies for automotive applications, SiD-ME Chapter, Fall Meeting 2010, Automotive Displays – Applications, Chances and Challenges, Sindelfingen, Germany, 23.–24. September
117. Richter, P.: Head-up Display und Nachtsicht, Fachkongress Innenraum, 6. Fachkongress Fortschritte im Automobil, Der Fahrzeuginnenraum: Von der Idee zur Realisierung, Ludwigsburg, 6.–7. November 2007

118. Richter, P.: Anforderungen an die Beleuchtung für Head-up Display, Opto-NET, Join-Workshop, Moderne Beleuchtungskonzepte, Jena, 31. Januar 2008
119. Abel, H.-B., Meier-Arendt, G., Willnauer, B.: Ergonomische Bedienelemente für elektronische Fahrzeugsysteme. ATZ **107**, 5 (2005)
120. Hautnah am Geschehen – Automobil Produktion, Sonderheft Innenraum, März 2003
121. Jungmann, T.: Auto erkennt Handschrift des Fahrers. http://www.all4engineers.com. 12. September 2003
122. Layer, David: Digital Radio Takes to the Road, http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/jul01/dig.html
123. Susen, A.: Spracherkennung. VDE-Verlag (1999)
124. Labiod, H., Afifi, H., de Santis, C.: Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and WiMax. Springer (2010)
125. Bächtold, W.: Mikrowellentechnik. Vieweg, Wiesbaden (1999)
126. Pozar, D.M.: Microwave and RF Design of Wireless Systems. Wiley (2000)
127. Lindenmeier, H.K., Reiter, L.M., Hopf, J.F., Schwab, A.J.: Multiple FM window antenna system for scanning diversity with an integrated processor. 40th IEEE VTC, S. 1–6, Mai 1990
128. Litva, J., Lo, T.K.-Y.: Digital Beamforming in Wireless Communications. Mobile Communications Series. Artech House Publishers (1996)
129. Scott, J.H.: The how and why of COFDM. EBU Technical Review (Winter 1998) (1998)
130. Meinke, H., Gundlach, FW.: Komponenten, 5., überarb. Aufl. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Bd. 2. Springer (2008)
131. Braess, H.H.: Das intelligente Auto auf der intelligenten Straße – Was hat PROMETHEUS gebracht?, 5. Stuttgarter Symposium Kraftfahrzeuge und Verbrennungsmotoren, 18.–20. Februar 2003
132. Enke, K.: Possibilities for improving safety within the driver vehicle environment loop, 7th Intl. Technical Conf. on Experimental Safety Vehicle, Paris, 1979
133. Anonymisierte Stichproben aus Unfalldaten des Statistischen Bundesamtes (1998–2001)
134. Lübke, L.: Car-to-Car Communication – Technologische Herausforderungen. In: Tagungsband VDE-Kongress, 18.–20. Oktober 2004. Berlin (2004)
135. Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Sicherheits- und Komfortsysteme. Vieweg, Wiesbaden (2004)
136. Kühnle, G., et al.: Low-Cost Long-Range-Radar für zukünftige Fahrerassistenzsysteme, 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2002
137. Olbrich, H., et al.: A small, light radar sensor and control unit for adaptive cruise control. SAE Technical Paper Series **980607** (1998)
138. Winner, H., et al.: Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC, Bosch Technische Unterrichtung, 1. Aufl. Bosch (2002)
139. Knoll, P.M.: Vorausschauende Sicherheitssysteme – die Schritte zur Unfallvermeidung, VDA Technischer Kongress, Rüsselsheim (2004)
140. NHTSA–Report (2001)
141. Langwieder: Analyse des Bremsverhaltens bei Verkehrsunfällen. Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (2001)
142. Frank, R.: Sensing in the Ultimate Vehicle, Proceedings Convergence 2004/21/0055, 2004
143. Unfallstatistik Deutschland des Statistischen Bundesamts (2002)
144. Knoll, P.M.: Nachtsichtsysteme im Kraftfahrzeug – Status und Entwicklungstrends, VDI-Tagung Optische Technologien, 2010
145. Frost & Sullivan: Marktstudie Fahrerassistenzsysteme FAS 2005-15 in Europa (09/2005)
146. Tauner, A.: Ansätze zur Fahrbahnerkennung in Wärmebildern bei der Orientierung in einem passiven NightVision-Bild. VDI-Berichte, Bd. 1907. VDI (2005)
147. Tsimoni, O., et al.: Pedestrian Detection with Night Vision Systems Enhanced by Automatic Warnings, Studie der University of Michigan, UMTRI-2005-23 (2005)
148. Knoll, P.M.: Nachtsichtverbesserung im Kraftfahrzeug. ATZ **01** (2006)
149. Locher, J.: Mensch-Maschine Interaktion in der automobilen Displaytechnik, Vortrag Lichttechnik-Tage in Karlsruhe (LTiK), 08. November 2005
150. Mahlke, S., et al.: Evaluation of six night vision enhancement systems: Qualitative and quantitative support for intelligent image processing. Human Factors **49**(3), 518–531 (2007)
151. Seiffert, U., et al.: Automotive Safety Handbook, 2. Aufl. SAE Intl., Warrendale
152. Oertel, K.: Garagenparker von BMW (Garage Parking Device). Hanser automotive (5), 6 (2006)
153. Homepage der BMW AG, Side-View-Assist, Top-View, Night Vision. www.bmw.de
154. Daimler Media-Center 04/2009
155. Schmitz, C.: Adaptiver Spurverlassenswarner – Entwicklung eines Systems mit fahrerabsichts- und fahrerzustandsabhängiger Warnstrategie. Dissertation, Universität Karlsruhe. Shaker (2004)
156. Pirkl, B.: Ganzheitliche Vernetzung von Systemen und Sensoren – ein smarter Ansatz zur effizienten Unfallvermeidung, 13. Euroforum-Jahrestagung Elektronik-Systeme im Automobil, 10.–12. Februar 2009
157. Knoll, P.M.: Video-Sensorik – erste Erfahrungen und Ausblick, VDA-Technischer Kongress 2007
158. Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
159. Bosch: Analyse des Bremsverhaltens bei Unfällen auf Basis der GIDAS-Datenbank, Interne Studie (2008)
160. Holzmann, F.: Adaptive Cooperation between Driver and Assistant System. Springer, Berlin (2007)
161. BMBF: Delphi '98-Umfrage. Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Karlsruhe (1998)

162. BMVBW: Telematik im Verkehr – Entwicklungen und Erfolge in Deutschland, Stand: August 2004
163. Kasties, G.: Vortrag Euroforum – 8. Jahrestagung Elektronik Systeme im Automobil, Fachtag Umsetzung von Telematik und Multimedia im Automobil, Februar 2004
164. Kasties, Günther: Vortrag Euroforum – 9. Jahrestagung Elektronik Systeme im Automobil, Fachtag Telematik und Multimedia im Automobil Februar 2005
165. Evers, H.-H., Kasties, G.: Kompendium der Verkehrstelematik. TÜV-Verlag
166. Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme in Europa, KOM (2008) 886
167. Fischer, B.: Ein Ansatz zur Realisierung eines hochauflösenden und mechanikfreien, adaptiven Frontscheinwerfers. In: Nederlandse Stichting Voor Verlichtungskunde (Hrsg.): Licht 2014 – Tagungsband, 108–114 (2014)
168. Willeke, B., Niemann, F.: Laser basierte Lichtquellen in der Automobilbeleuchtung – Erzeugung einer weißen Hinterleuchtung durch RGB Laserdioden. In: Nederlandse Stichting Voor Verlichtungskunde (Hrsg.): Licht 2014 – Tagungsband, 93–100 (2014)
169. Roth, J., Wallaschek, J., Kloppenburg, G., Lachmayer, R., Meyer, B., Thomschke, S.: RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection. Proceedings of the International Symposium on Automotive Lighting (ISAL) (2015)
170. Jürgens, C.: Der konstrastadaptive Scheinwerfer. PZH Verlag TEWISS (2015)
171. Lachmayer, R., Wolf, A., Danov, R., Kloppenburg, G.: Reflektorbasierte Laser-Lichtmodule als Zusatzfernlicht für die Fahrzeugbeleuchtung. In: Nederlandse Stichting Voor Verlichtungskunde (Hrsg.): Licht 2014 – Tagungsband, 16–24 (2014)
172. Blume, H.-J., Haas, H.: 111 Years of Speedometers – History and Future of Driver Information. Continental Automotive GmbH, Regensburg/Schwalbach (2013)
173. Spoelder, E., Abel, H: Die Evolution der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Richtung automatisiertes Fahren. 7. VDI-Tagung, Braunschweig. Der Fahrer im 21. Jahrhundert. 05. und 06. November 2013
174. Abel, H., Fleckenstein, S.: Evolution of the Human Machine Interface towards Automated Driving. JSAE Annual Congress, 21. Mai 2014
175. Grünweg, T.: Augmented Reality im Auto: Die Scheibe für mehr Durchblick. Spiegel Online Auto, 21.07.2014
176. Blechner, N.: Automobilelektronik, Virtuelle Revolution auf der Windschutzscheibe. VDI Nachrichten **15** (2015)
177. Meier-Arendt, G., Brüninghaus, A.: Innovatives Funktionsmanagement per Touchpad. ATZ 10/2013
178. Domhardt, M., Tunca, E, Zoller, I., Lotz, P., Schmidt, L.: Evaluation eines haptischen Touchpads für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. (2013)
179. Posch, T.: Hypervisor Technologie im Cockpit. Sichere Integration heterogener Software-Welten. Automobil Elektronik, März 2014

**Literatur zu Abschn. 8.6**

180. Aasman, J.: Modelling driver behaviour in SOAR. KPN Research, Leidschendam (1995)
181. Andersen, G.J., Sauer, C.W.: Optical information for car following: The DVA model. Human Factors **49**, 878–896 (2007)
182. Anderson, J.R., Lebiere, C.L.: The Newell test for a theory of cognition. Behavioral & Brain Science **26**, 587–637 (2003)
183. Baxter, G., Rooksby, J., Wang, Y., Khajeh-Hosseini, A.: The ironies of automation. Still strong at 30? Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics, 30, 65–71 (2012)
184. Bella, M., Hanington, B.: Universal methods of design. Rockport, Beverly (2012)
185. Billings, C. E.: Aviation automation: The search for a human-centred approach. Lawrence Erlbaum, Mahwah, NJ (1997)
186. Brunswik, E.: Representative design and probabilistic theory in a functional psychology. Psychological Review **63**(3), 193–217 (1955)
187. Bundesanstalt für Straßenwesen: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach (2012)
188. Chiappe, D.L., Rorie, R.C., Moran, C.A., Vu, K.-P.: A situated approach to the acquisition of shared SA in team contexts. Theoretical Issues in Ergonomics Science **15**, 69–87 (2014)
189. Chiappe, D.L., Vu, K.-P., Strybel, T.Z.: Situation awareness in the NextGen air traffic management system. International Journal of Human-Computer Interaction **28**, 140–151 (2012)
190. Christoffersen, K., Woods, D.D.: How to make automated systems team players. In: E. Salas (Hrsg.) Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research Bd. 2, S. 1–12. Elsevier, St. Louis, MO (2002)
191. Dekker, S.W., Woods, D.D.: MABA-MABA or Abracadabra? Progress on human-automation coordination. Cognition Technology, Work 4, 240–244 (2002)
192. Dreyfus, H.L., Dreyfus, S.E.: Minds over machine: The power of human intuition and expertise in the era of the computer. Basil Blackwell, Oxford (1986)
193. Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, S. 15–23. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
194. Durso, F.T., Hackworth, C.A., Truitt, T., Crutchfield, J., Nikolic, D., Manning, C.: Situation awareness as a predictor of performance for en route air traffic controllers. Air Traffic Control Association Institute (1998)
195. Eggemeier, F. T.: Properties of workload assessment techniques. In: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Hrsg.): Human mental workload (S. 41–62). North-Holland, Amsterdam (1988)
196. Endsley, M.R.: Measurement of situation awareness in dynamic systems. Human Factors **37**, 65–84 (1995)

197. Endsley, M.R.: Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Human Factors **37**, 32–64 (1995)
198. Endsley, M.R., Kaber, D.B.: Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. Ergonomics, **42**(3), 462–492 (1999)
199. Endsley, M.R., Kiris, E.O. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. Human Factors **37**, 381–394 (1995)
200. Fischer, M., Barkley, R.A., Smallish, L., Fletcher, K.: Hyperactive children as young adults: Driving abilities, safe driving behavior, and adverse driving outcomes. Accident Analysis & Prevention **39**(1), 94–105 (2007)
201. Fitts, P.M. (Hrsg.): Human engineering for an effective air navigation and traffic control system. National Research Council, Washington, DC. (1951)
202. Galpin, A., Underwood, G., Crundall, D.: Change blindness in driving scenes. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, **12**(2), 179–185 (2009)
203. Gibson, J.J.: The ecological approach to visual perception. Taylor & Francis, New York (2015)
204. Hancock, P.A., Verwey, W.B.: Fatigue, workload and adaptive driver systems. Accident Analysis and Prevention **4**, 495–506 (1997)
205. Harbluk, J.L., Noy, Y.I., Trbovich, P.L., Eizenman, M.: An on-road assessment of cognitive distraction: Impacts on drivers' visual behavior and braking performance. Accident Analysis & Prevention **39**, 372–379 (2007)
206. Hart, S.G.: Nasa-Task Load Index (NASA_TLX): 20 Years Later. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 50, 904–908
207. Hilburn, B., Molloy, R., Wong, D., Parasuraman, R.: Operator versus computer control of adaptive automation. Proceedings of the International Symposium on Aviation Psychology **7**, 161–166 (1993)
208. Hollnagel, E.: Cognitive reliability and error analysis method (CREAM). Elsevier Science, Oxford (1998)
209. Jian, J., Bisantz, A.M., Drury, C.G.: Foundations for an empirically determined scale of trust in automated systems. International Journal of Cognitive Ergonomics **4**(1), 53–71 (2000)
210. Laird, J.E.: The Soar Cognitive Architecture. MIT Press, Cambridge, MA
211. Lavery, D., Cockton, G.: Representing predicted and actual usability problems. In: Johnson, P., O'Neill, E. (Hrsg.) Proceedings of the International Workshop on Representations in Interactive Software Development, London, S. 97–108 (1997)
212. Lee, J.D., See, K.A.: Trust in automation: Designing for appropriate reliance. Human Factors **46**, 50–80 (2004)
213. Liu, Y., Feyen, R., Tsimhoni, O.: Queuing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A computational architecture for multi-task performance in human-machine systems. ACM Transactions on Computer-Human Interaction (2005)
214. Kieras, D., Meyer, D.E.: An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. Human-Computer Interaction. **12**, 391–438 (1997)
215. Miller, C.A., Parasuraman, R. Designing for flexible interaction between humans and automation: Delegation interfaces for supervisory control. Human Factors **49**(1), 57–75 (2007)
216. Moser, N.-H., Lethaus, F., Kaul, R., Drewitz, U., Jipp, M.: Verzögerungsverhalten an urbanen Kreuzungen beim Rechtsabbiegen als Indikator für die Zielgerichtetheit der Aufmerksamkeit beim Autofahren. 57th Conference of Experimental Psychologists 174 (2015)
217. Noyer, U., Schmidt, E.A., Utesch, F., Waigand, D., Köster, F.: Betrachtungen zur systematischen Durchführung von Naturalistic Driving Studies. Der Fahrer im 21.Jahrhundert – Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit. S. 287–298 (2013)
218. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., Wickens, C.D.: A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, **30**(3), 286–296 (2000)
219. Parasuraman, R., Riley, V.A. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human Factors **39**, 230–253 (1997)
220. Pope, A.T., Bogart, E.H., Bartolome, D.S.: Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task. Biological Psychology **40**, 187–195 (1995)
221. Rasmussen, J., Pejtersen, A.M., Goodstein, L.P.: Cognitive systems engineering. Wiley, New York (1994)
222. Reid, G.B., Nygren, T.E.: The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload. In: Hancock, P.A. Meshkati, N. (Hrsg.) Human mental workload, S. 185–218. Elsevier, Amsterdam (1988)
223. Richter, A., Friedl, H.: Parametrisierte Stadtmodelle für Fahrsimulatoren. GIS Talk 2015, 19.–21. Mai 2015, Unterschleißheim (2015)
224. Salvucci, D.D.: Modeling driver behavior in a cognitive architecture. Human Factors **48**, 362–380 (2006)
225. Santos, J., Merat, N., Mouta, S., Brookhuis, K., de Waard, D.: The interaction between driving and in-vehicle information Systems: Comparison of results from laboratory, Simulator and real-world studies. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, **8**(2), 135–146 (2005)
226. Sarter, N.B., Woods, D.D.: How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. Human Factors **37**(1), 5–20 (1995)
227. Sarter, N.B., Woods, D.D., Billings, C.E. Automation surprises. In: Salvendy, G. (Hrsg.) Handbook of Human Factors & Ergonomics. Wiley, New York, NY (1997)
228. Scerbo, M.W., Freeman, F.G., Mikulka, P.J.: A brain-based system for adaptive automation. Theoretical Issues in Ergonomic Science **4**, 200–219 (2003)
229. Scriven, M.: Evaluation. Thesaurus. Sage (1991)
230. Shadish, W.R., Cook, T.D., Campbell, D.T.: Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference. Cengage Learning (2001)

231. Sheridan, T.B.: Supervisory control. In: Salvendy, G. (Hrsg.) Handbook of human factors. S. 1295–1327. Wiley, New York (1997)
232. Stemmler, E., Oeltze, K., Schießl, C.: Is driving assisted behaviour infectious? Using spectral analysis to understand car following behaviour of naive drivers. 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2015) **1**(7), 357–358 (2015)
233. Swain, A.D.: Human reliability analysis: Need, status, trends, and limitations. Reliability Engineering & System Safety **29**, 301–313 (1990)
234. Tsimhoni, O., Liu, Y.: Modeling steering using the queueing network – Model Human Processor (QN-MHP). Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting **47**, 1875–1879 (2003)
235. Wickens, C.D.: Multiple resources and mental workload. Human Factors **50**, 449–455 (2008)

**Literatur zu Abschn. 8.7**

236. Bauer, A., Broy, M., Romberg, J., Schätz, B., Braun, P., Freund, U., Mata, N., Sandner, R., Ziegenbein, D.: Auto-MoDe – Notations, Methods, and Tools for Model-Based Development of Automotive Software. In: Proceedings of the SAE 2005 World Congress, Detroit, MI, Apr. 2005. Society of Automotive Engineers
237. Broy, M.: Challenges in Automotive Software Engineering. Key Note 28th International Conference on Software Engineering (ICSE 2006)
238. Broy, M.: The ‚Grand Challenge' in Informatics: Engineering Software-Intensive Systems. IEEE Computer Oktober 2006, 72–80 (2006)
239. Broy, M., Pretschner, A., Salzmann, C., Stauner, T.: Software-intensive systems in the automotive domain: challenges for research and education. In: Proceedings of the SAE 2006 World Congress, Detroit, MI, Apr. 2006. Society of Automotive Engineers
240. Broy, M., Rausch, A.: Das neue V-Modell XT – Ein anpassbares Vorgehensmodell für Software und System Engineering. Informatik Spectrum, Juni 2005
241. Bühne, S., Lauenroth, K., Pohl, K., Weber, M.: „Modeling Features for Multi-Criteria Product-Lines in the Automotive Industry", Proc. 1st Intl. Workshop of Software Engineering for Automotive Systems, S. 9–16 (2004)
242. Decomsys: „Designer Pro", http://www.decomsys.com/htm/frs/3_flexraydesign_pro.htm, 2006
243. Douglass, B.P.: Real-Time UML – Developing Efficient Objects for Embedded Systems. Addison-Wesley (1999)
244. Clements, P., Northrop, L.M.: Software Product Lines – Practices and Patterns. Addison-Wesley (2001)
245. Kneuper, R.: CMMI – Verbesserung von Softwareprozessen mit Capability Maturity Model Integration. dpunkt.verlag (2002)
246. Hardung, B., Kölzow, T., Krüger, A.: „Reuse of Software in Distributed Embedded Automotive Systems". In: Proc. EMSOFT'04, S. 203–210 (2004)
247. ISO 26262: Road vehicles – Functional Safety
248. Hindel, B., Hörmann, K., Müller, M., Schmied, J.: Basiswissen Software-Projektmanagement – Aus- und Weiterbildung zum Certified Project Manager nach dem iSQI-Standard. iSQI-Reihe. dpunkt.verlag
249. Jackson, M.A.: Software Requirements & Specifications – a lexicon of practice, principles and prejudices. Addison-Wesley Press (1995)
250. Liggesmeyer, P.: Software-Qualität. Spektrum Verlag (2002)
251. Leveson, N.G.: Safeware – System Safety and Computers. Addison-Wesley (1995)
252. Mores, R., Hay, G., Belschner, R., Berwanger, J., Ebner, C., Fluhrer, S., Fuchs, E., Hedenetz, B., Kuffner, W., Krüger, A., Lormann, P., Millinger, D., Peller, M., Ruh, J., Schedl, A., Sprachmann, M.: „FlexRay – The Communication System for Advanced Automotive Control Systems". Doc. No. SAE 2001-01-0676. SAE (2001)
253. Peled, D.A.: Software Reliability. Springer (2001)
254. Scharnhorst, T.: Systementwurf für Elektronikarchitekturen im Fahrzeug. 4. Braunschweiger Symposium Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel. VDI Reihe 12, 525 (2003)
255. Schäuffele, J., Zurawka, T.: Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen. Springer Vieweg (2013)
256. Sommerville, I.: Software Engineering. Addison-Wesley (2001)
257. Spillner, A., Linz, T.: Basiswissen Softwaretest: Aus- und Weiterbildung zum Certified-Tester. dpunkt-Verlag (2003)
258. Weber, M., Weisbrod, J.: „Requirements engineering in automotive development: Experiences and challenges". IEEE Software **20**, 16–24 (2003)
259. X-by-Wire Consortium: „X-by-wire – Safety related fault tolerant systems in vehicles – final report". Project BE95/1329, Contract BRPR-CT95-0032 (1998)
260. VDI/VW Gemeinschaftstagung „Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme", Wolfsburg, 12.–13. Okt. 2006

**Literatur zu Abschn. 8.8**

261. Ackermann, J.: Robust Control – The Parameter Space Approach, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg (2002)
262. Åström, K.J., Wittenmark, B.: Adaptive Control. 2. Aufl. Dover Publications, Mineola (2008)
263. Bünte, T., Schweiger, C., Odenthal, D., Baumgarten, G.: Modellierung, Regelung, Simulation und Bewertung der Fahrdynamik. Erster Verkehrstechnischer Tag, Braunschweig (2004)
264. Dorf, R.C., Bishop, R.H.: Modern Control Systems, 12. Aufl. Prentice-Hall, Upper Saddle River (2010)
265. Driankov, D., Hellendoorn, H., Reinfrank, M.: An Introduction to Fuzzy Control, 2. Aufl. Springer, New York (1996)
266. Ganzelmeier, L.: Nichtlineare $H_\infty$-Regelung der Fahrzeuglängsdynamik. Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Bd. 1069. VDI, Düsseldorf (2005)

267. Helbig, J.: Modulares Fahrrobotersystem für zukunftssichere Objektiverprobung. 3. SafetyAssist, 19.–21. Mai 2015, Aschaffenburg
268. Helbig, J.: Robuste Regelungsstrategien am Beispiel der PKW-Spurführung. Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Bd. 1025. Düsseldorf (2004)
269. Isermann, R., Hafner, M., Schüler, M.: Einsatz schneller neuronaler Netze zur modellbasierten Optimierung von Verbrennungsmotoren. MTZ Motortechnische Zeitschrift **61**, 704–711 (2000)
270. Isidori, A.: Nonlinear control systems. Springer, Berlin (1996)
271. Jaschke, K.P.: Lenkregler für Fahrzeuge mit hoher Schwerpunktlage. Dissertation, TU Braunschweig (2002)
272. Kiencke, U., Nielsen, L.: Automotive Control Systems. 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2005)
273. Levine, W.S.: The Control Handbook. 2. Aufl. CRC-Press, Boca Raton (2010)
274. Liu, G.P.: Nonlinear Identification and Control: A Neural Network Approach. Springer, London (2001)
275. Müller, K.: L1-optimale Abtastregelungen mit minimaler Stellgröße. Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Bd. 844. Düsseldorf (2000)
276. Sidi, M.: Design of Robust Control Systems. Krieger Publishing, Malabar (2001)
277. Yu, C.-Cn.: Autotuning of PID Controllers. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1999)
278. Zhou, K., Doyle, J.C.: Essentials of Robust Control. Prentice-Hall, London (1998)

# Fahrzeugsicherheit

*Prof. Dr.-Ing. Mark Gonter, Dipl.-Ing. Andre Leschke und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*

9.1 Allgemein – 1106

9.2 Gebiete der Fahrzeugsicherheit – 1106

9.3 Ergebnisse aus der Unfallforschung – 1108

9.4 Unfallvermeidende Sicherheit – 1113

9.5 Biomechanik und Schutzkriterien – 1117

9.6 Quasistatische Anforderungen an die Karosserie und Komponenten – 1123

9.7 Dynamische Fahrzeugkollision – 1124

9.8 Insassenschutz – 1129

9.9 Integrale Sicherheit – 1142

9.10 Sicherheit von elektrischen Fahrzeugen – 1157

9.11 Zusammenfassung – 1158

Literatur – 1158

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_9

## 9.1 Allgemein

Die Sicherheit des Transports für Menschen und Güter hat weltweit einen hohen Stellenwert. Obwohl in den Industrieländern erhebliche Fortschritte erzielt wurden, waren 2013 ca. 1,24 Millionen Verkehrstote zu verzeichnen, mehr als 20 Millionen wurden verletzt [1]. 80 % der tödlichen Verkehrsunfälle geschahen dabei in „middle-income Countries". In der Prognose von [2] würden die Verkehrsunfälle nach Herzkrankheiten und Depressionen an die dritte Stelle der Todes- und Erwerbsunfähigkeitsgründe rücken. Zahlreiche Organisationen wie die UN, Regierungen, Forschungseinrichtungen und Industrie haben Programme initiiert um diesen Trend umzukehren.

In den Industrieländern wurden die Erfolge durch Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur, der Verkehrsinformation, der Ausbildung der Verkehrsteilnehmer und deutliche Fortschritte bei Fahrzeugen erreicht. In den Entwicklungsländern spielt in diesem Zusammenhang die Verkehrsinfrastruktur eine besonders große Rolle. Die Vernetzung des Fahrzeugs mit den übrigen Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur sowie das automatisierte Fahren werden weitere Fortschritte auf diesem Gebiet ermöglichen. Zunehmend wird auch die Automotive Security, d. h. der Schutz des Insassen und des Fahrzeugs sowie seiner Teile und Funktionen vor Angriffen wie Diebstahl, unberechtigtem Zugriff und Manipulation wichtiger.

Nicht nur der Gesetzgeber, sondern auch die Wissenschaft und Industrie sowie Verbraucherschutzorganisationen sind aktiv [3]. Personen der 1. Stunde waren z. B. Prof. Koeßler, TU Braunschweig mit der Definition: „Fahrzeuge müssen so konstruiert und gebaut werden, dass der Transport von A nach B möglichst schnell, sicher und komfortabel ist"; der Entwickler Barenyi mit seinem grundlegenden Patent „Das Prinzip des gestaltfesten Fahrerraums" aus dem Jahr 1952 [4] und der Verbraucheranwalt Ralph Nader, der in den USA Mitte der 60er Jahre wesentlich dazu beitrug, dass die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) schnell mit der Sicherheitsgesetzgebung voranschritt. Inzwischen gibt es weltweit Sicherheitsgesetze, die durch Verbraucherinformationen und Produkthaftung ergänzt werden. Die Verbraucherinformation wird durch Gesetzgeber, inzwischen auch für unfallvorbeugende Systeme, Versicherungen, Verbraucherschutzorganisationen und Automobilfachzeitschriften erarbeitet.

Der Impuls der Produkthaftung ist immens. Der Hersteller übernimmt die Verantwortung für einwandfreie Technik und stellt sicher, dass das Fahrzeug mindestens dem Stand der Sicherheitstechnik entspricht. Ein sicherheitstechnisch positiv bewertetes Fahrzeug ist ein wesentliches Kaufargument. Inzwischen gibt es kaum ein Fahrzeugteil, welches nicht durch Vorschriften beeinflusst wird. Details dazu sind in ▶ Abschn. 2.2.1 bis ▶ Abschn. 2.2.5 zu finden. In keinem anderen Gebiet ist die Kooperation der Fahrzeughersteller so groß wie die ESV-Experimentiersicherheitskonferenzen [5], die Aktivitäten zur Biomechanik wie zum Beispiel das Forschungsnetzwerk Trauma-Biomechanik (www.hs-regensburg.de) oder die Unfallforschung zeigen.

## 9.2 Gebiete der Fahrzeugsicherheit

Die Fahrzeugsicherheit lässt sich in die in ◘ Abb. 9.1 dargestellten Bereiche unterteilen. Erste grundlegende Definitionen wurden von Wilfert und Seiffert erarbeitet [6, 7].

Zeitgerecht sind folgende Begriffe:

- integrale Sicherheit: Kombination aus Unfallvorbeugung und Unfallfolgenmilderung,
- Unfallvorbeugung: alle Maßnahmen mit dem Zweck Unfälle zu verhindern,
- Unfallfolgenmilderung: alle Maßnahmen zur Reduzierung der Unfallfolgen,
- PreCrash – Der Unfall ist unvermeidbar, Eingriff von reversiblen und irreversiblen Maßnahmen zur Verminderung der Unfallfolgen.

Hauptverursacher von Unfällen ist nach wie vor der Mensch. Allerdings ist die Schwankungsbreite der Ursachenzuordnung sehr groß. Der gleiche Fahrer kann bei unterschiedlichen Fahrzeug-Modellen auch ein unterschiedliches Unfallverhalten zeigen. Alkohol- und drogenfreies Fahren, guter Komfort und Ergonomie, ausreichende Beleuchtung und gute Sicht, zahlreiche Assistenzsysteme speziell im

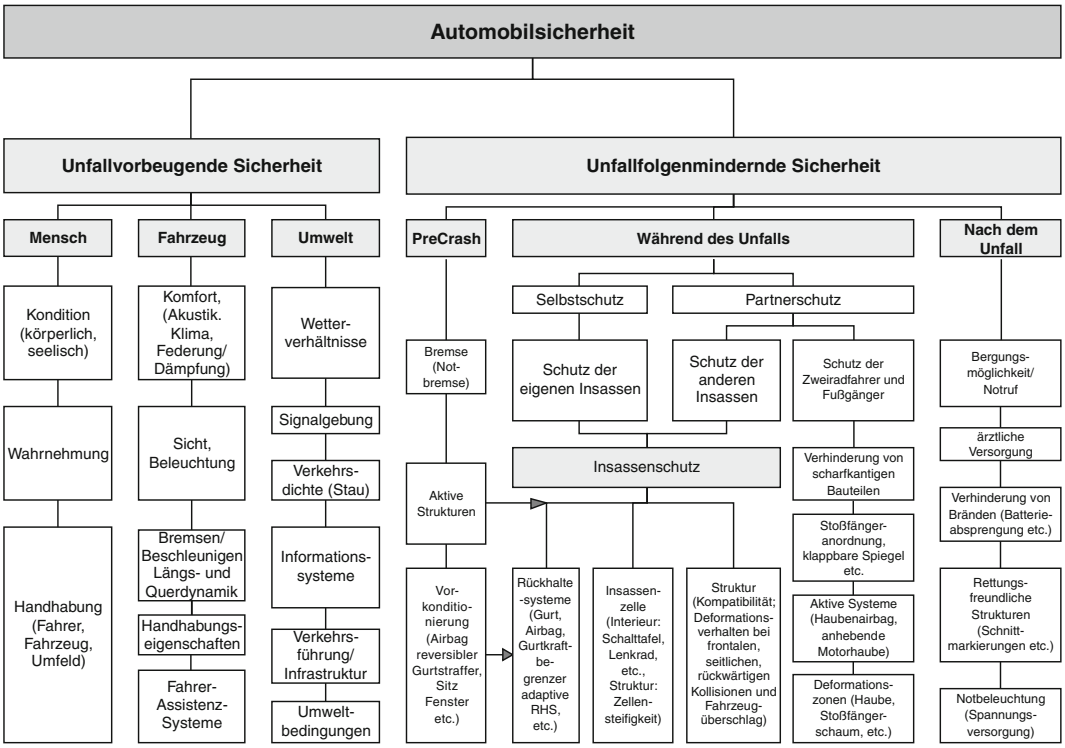



**Abb. 9.1** Gebiete der Fahrzeugsicherheit

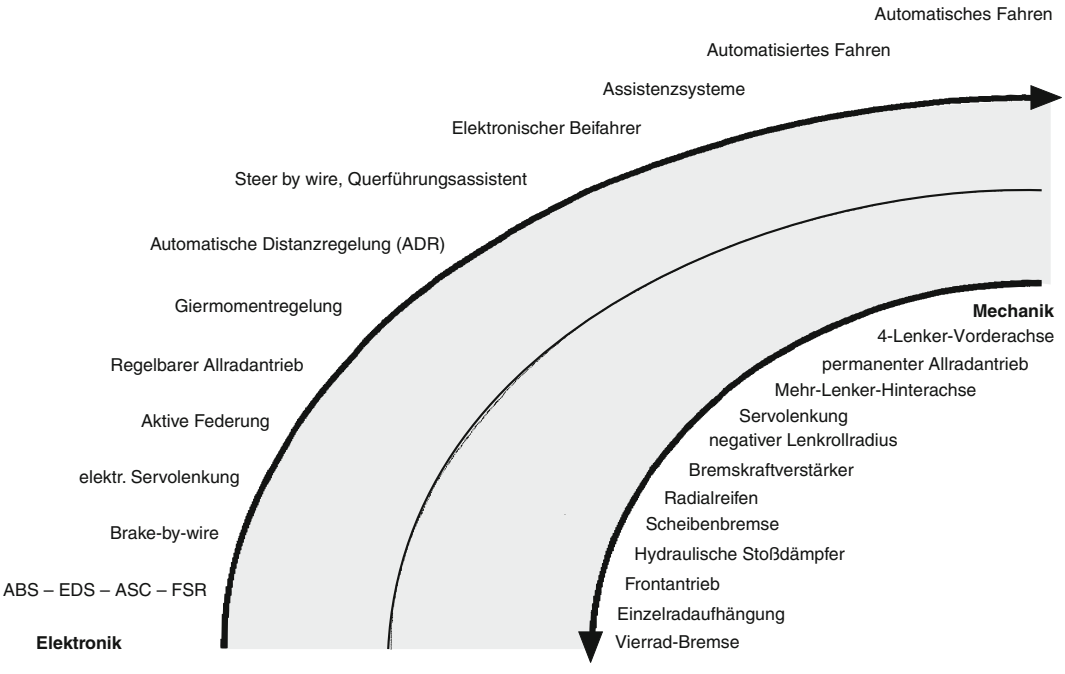



**Abb. 9.2** Maßnahmen zur Unfallvorbeugung im Bereich Fahrdynamik

Bereich des Fahrverhaltens (Bremsen, Antriebe, ABS, Giermomentregelung, Bremsassistenten, siehe ▶ Kap. 7), hohe Fahrstabilität, Windunempfindlichkeit, Informations- und Kommunikationssysteme und Einrichtungen zum automatisierten Fahren werden die Unfallhäufigkeit weiter reduzieren. ◘ Abb. 9.2 zeigt den Weg der Veränderung auf einem Teilgebiet der Unfallvorbeugung [7].

## 9.3 Ergebnisse aus der Unfallforschung

### 9.3.1 Einleitung

Durch die kontinuierliche Entwicklung der Fahrzeugsicherheit wurde in der Vergangenheit bereits ein erheblicher Beitrag zur Verbesserung der Verkehrssicherheit geleistet. Viele konstruktive Beispiele die dazu beitrugen, werden in diesem Buch beschrieben. Nachweisen lässt sich diese Verbesserung auch anhand der Verkehrsunfallzahlen der vergangenen Jahre. Im Jahr 2013 gab es 50,9 Mio. zugelassene Kraftfahrzeuge in der Bundesrepublik. Davon waren 43,4 Mio. Personenkraftwagen [9, 10]. Mit steigendem Bestand nimmt auch die Gesamtfahrleistung dieser Fahrzeuge zu. Erfreulicherweise ist die Anzahl der Verkehrsunfälle nicht im gleichen Maße gestiegen.

◘ Abb. 9.3 gibt einen Überblick über die Entwicklung des Pkw-Unfallgeschehens in der Bundesrepublik Deutschland. Die Zahl der im Straßenverkehr getöteten Pkw-Insassen war von 1980 bis 1985 rückläufig und blieb dann bis 1989 etwa gleich hoch. Einen starken Einfluss hatte dabei 1984 die Einführung des Bußgeldes bei nicht Einhalten der bereits seit 1976 bestehenden Gurtanlegepflicht. Der kurzzeitige Anstieg von 1989 bis 1991 resultiert aus dem Hinzukommen der Pkw-Fahrer aus den neuen Bundesländern und deren Fahrleistungen. Seit 1991 reduziert sich die Zahl der getöteten Verkehrsteilnehmer in Pkw wieder. Der seit 1980 festzustellende Trend setzt sich fort. Die Zahl der verletzten Pkw-Insassen ist in den letzten fünf Jahren leicht rückläufig. Das Risiko, in Deutschland bei einem Straßenverkehrsunfall getötet oder verletzt zu werden, ist trotz der gestiegenen Fahrleistungen deutlich gesunken.

Der Rückgang des Risikos ist auf die Verbesserung des Straßenwesens, des Rettungswesens und der Notfallmedizin, aber auch auf die Maßnahmen der Fahrzeughersteller zur Erhöhung der Automobilsicherheit zurückzuführen. Dabei wurden in den vergangenen Jahren die größten Fortschritte im Bereich der unfallfolgenmildernden Sicherheit erreicht [11]. Ein Beispiel dafür ist die kontinuierliche Entwicklung der Rückhaltesysteme vom einfachen Sicherheitsgurt zu aufwendigen Mehrkomponentensystemen mit Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer und vielfältigen Airbagsystemen. Dies war nur durch die konsequente Nutzung der Erkenntnisse der Unfallforschung möglich. Der Nachweis über die erreichten Verbesserungen und insbesondere die Identifikation weiterer möglicher Verbesserungsbereiche erfordert die Unfallforschung.

### 9.3.2 Amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik

Das Statistische Bundesamt erfasst alle Straßenverkehrsunfälle von der die Polizei Kenntnis erhält. Von den Beamten werden an der Unfallstelle Daten zum Unfallort, Unfallhergang und personenbezogene Daten der Beteiligten in der Verkehrsunfallanzeige erfasst und den statistischen Landesämtern zugeführt. Dabei entsteht eine recht große Datenmenge die ein relativ gutes Bild der Verkehrsunfallsituation in Deutschland gibt. Der Polizei sind jedoch längst nicht alle Straßenverkehrsunfälle bekannt, so dass man insbesondere bei den Bagatellunfällen von einer hohen Dunkelziffer ausgehen muss. Des Weiteren sind die Genauigkeit und die Datentiefe dieser Erhebungen begrenzt. Beispielsweise werden viele für die Unfallforschung sehr wichtige Merkmale wie z. B. Gurtbenutzung, Sitzpositionen, Fahrzeugdeformationen, Verletzungen nicht oder ungenau erfasst [12].

Die in der amtlichen Statistik der europäischen Länder, den USA und weiteren Ländern aufgenommenen Daten werden in der International Road Traffic and Accident Database (IRTAD) zusammen-

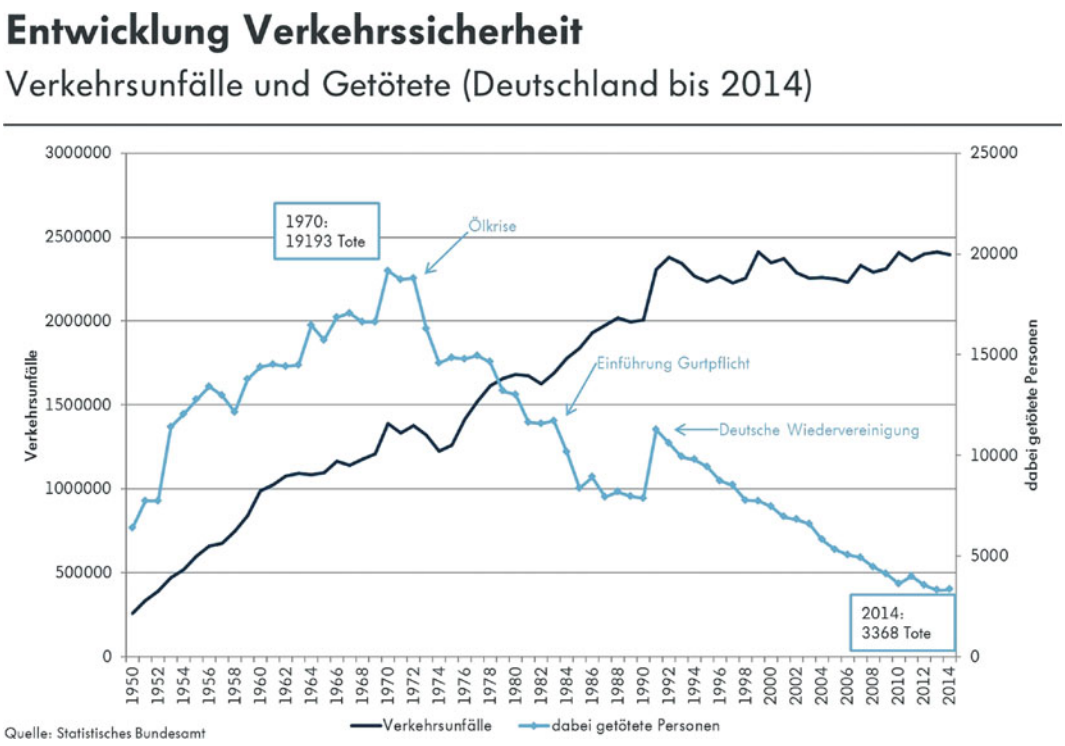



**Abb. 9.3** Verkehrsunfälle und getötete Verkehrsteilnehmer in der Bundesrepublik Deutschland [9]

gefasst [10]. Mit dieser Datenbasis lässt sich das Unfallgeschehen der Länder vergleichen.

### 9.3.3 Verkehrsunfalldaten der Versicherungen

Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) erfasst die Verkehrsunfalldaten aus den Versicherungsakten der in diesem Verein zusammengeschlossenen Einzelversicherungen. Aus den Gerichtsakten, Obduktionsberichten, Sachverständigen-Gutachten und den Versicherungsfragebögen werden nachträglich bis zu 500 Einzelparameter je Unfall erhoben.

Durch die große Fallzahl dieser Datenbank und die größere Datentiefe gegenüber der amtlichen Statistik lassen sich mit diesen Daten detailliertere Auswertungen erstellen (z. B. Einzelverletzungen, technischer Zustand der Fahrzeuge, Gurtbenutzung).

Mit vielen Untersuchungen auf der Basis dieser Unfalldaten haben Danner und Langwieder vom GDV in Deutschland zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit beigetragen (z. B. [13]). In [14] wird der hohe Nutzen von Fahrdynamikregelsystemen prognostiziert. Langwieder zeigt den großen Anteil der „Risikosituation Schleudern in der PreCrash-Phase“. Insbesondere in diesen kritischen Situationen unterstützen Fahrdynamikregelsysteme, wie ESC, den Fahrer bei der Fahrzeugstabilisierung und reduzieren die Unfallhäufigkeit oder mindern die Unfallschwere.

### 9.3.4 „In-Depth“ Unfallerhebungen

Der sicherlich größte Wissenszuwachs lässt sich durch die sogenannten „In-Depth“ Verkehrsunfalldatenerhebungen erzielen. Bereits 1973 wurde an der Medizinischen Hochschule Hannover in Kooperation mit der Technischen Universität Berlin

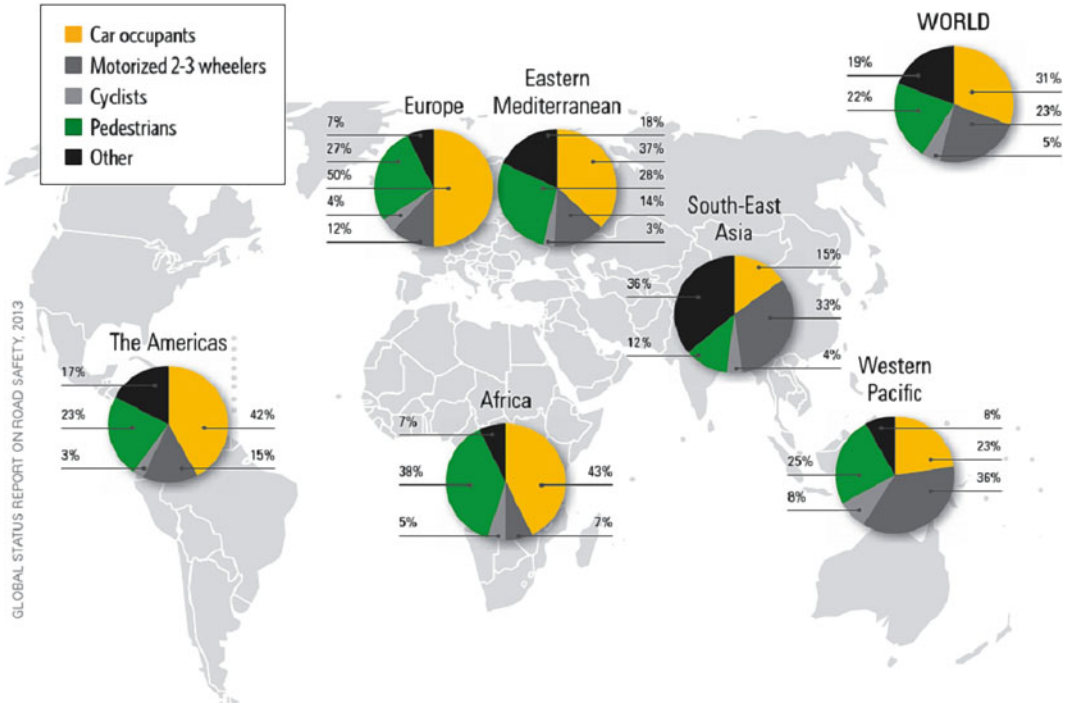



**Abb. 9.4** Status Report on Global Road Safety 2013 [1]

ein unabhängig arbeitendes Team, bestehend aus Ingenieuren und Medizinern, zur detaillierten Unfalldatenerhebung im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen installiert. 1984 wurden die Erhebungsziele und ein Erhebungsgebiet im Großraum Hannover langfristig definiert um eine repräsentative Datenbasis zu erfassen. Seitdem nimmt man in Hannover ca. 1000 Verkehrsunfälle pro Jahr mit bis 3000 Parametern auf. 1999 wurde diese Erhebung zum Gemeinschaftsprojekt GIDAS (German In-Depth Accident Study) zwischen der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) und der BASt erweitert. Dabei wurde ein zweites Erhebungsteam an der TU Dresden (TUD) aufgebaut, das nach dem gleichen Schema wie an der MHH ebenfalls ca. 1000 Unfälle jährlich erhebt [15, 16]. Das Projekt wird durch einen Lenkungsausschuss mit Vertretern von BASt und FAT koordiniert und weiterentwickelt.

Die Erhebungsteams werden von Polizei, Rettungsdiensten und Feuerwehr über die Unfälle im Erhebungsgebiet informiert und wählen nach einem festgelegten Zufallsverfahren Unfälle aus. Die Erhebungskriterien sind:

- Straßenverkehrsunfall,
- Unfall im Großraum Hannover bzw. Dresden,
- mindestens eine verletzte Person, unabhängig von der Verletzungsschwere.

Durch die Unfallaufnahme vor Ort lassen sich detaillierte Informationen zum Unfallort, den Umweltbedingungen sowie den beteiligten Fahrzeugen erheben, die nachträglich eine genaue Rekonstruktion des Unfalls ermöglichen. Informationen, die am Unfallort nicht erhoben werden können, werden nachträglich ermittelt, wie z. B. genaue Vermessung der Fahrzeugdeformationen, weitere Behandlung, Art und Schwere der Verletzungen der Unfallbeteiligten [17].

Ergänzt werden diese „In-Depth"-Unfallerhebungen durch eigene Unfallerhebungen verschiedener Fahrzeughersteller, die sich in der Regel auf Un-

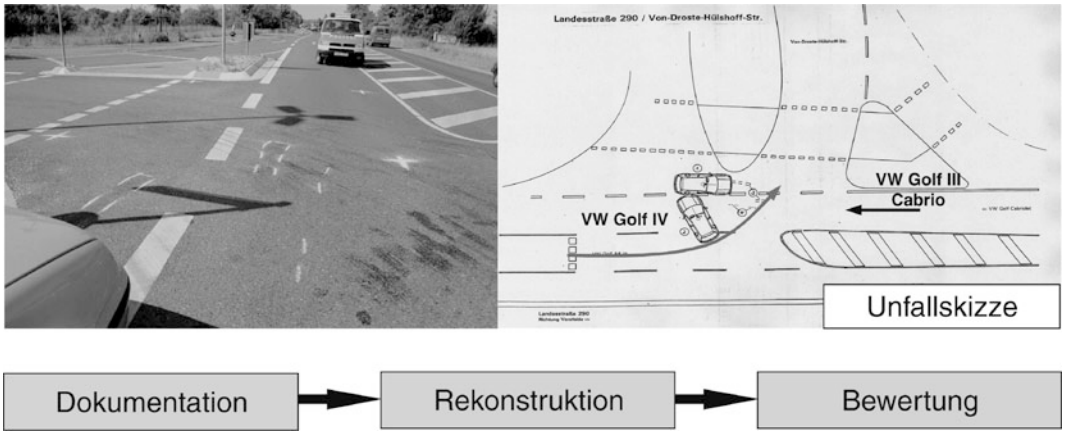



**Abb. 9.5** Prinzipielle Vorgehensweise der VW Unfallforschung [18]

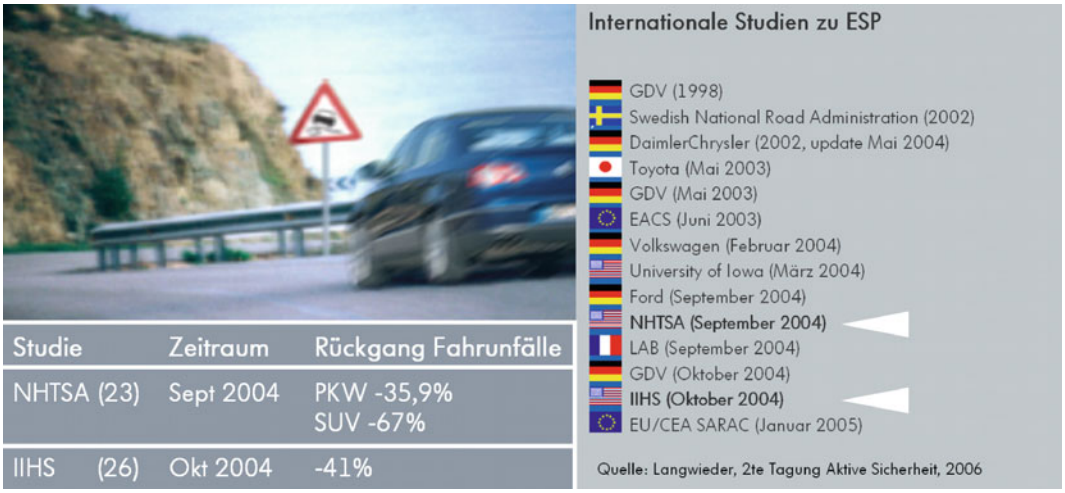



**Abb. 9.6** Internationale Studien zu ESP zeigen hohe Effektivität [19]

fälle mit beteiligten Fahrzeugen der aktuellen, eigenen Produktion beschränken (Audi, BMW, Daimler, Volkswagen).

Abb. 9.5 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise bei der Volkswagen Unfallforschung. Durch diese zusätzlichen Erhebungen ist es möglich, schneller Informationen über das Verhalten neuer Fahrzeuge im realen Unfallgeschehen zu gewinnen, bereits bevor diese in ausreichender Zahl den Gesamtmarkt durchdrungen haben.

In Abb. 9.6 ist der Nutzen des Elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP, bzw. ESC: Electronic Stability Control) anhand verschiedener internationaler Studien belegt [19]. Systeme der Unfallschwereminderung lassen den größten Sicherheitsgewinn für die Zukunft erwarten. Dabei ist jedoch eine Unterscheidung zwischen dem Nutzen von Systemen der Unfallfolgenmilderung und der Unfallschwereminderung schwierig, da diese Systeme zunehmend verschmelzen. Zurückblickend kann man feststellen, dass der größte Nutzen durch den Sicherheitsgurt erzielt wurde, gefolgt von Strukturmaßnahmen an der Fahrgastzelle, dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESC) und den Airbagsystemen (vgl. auch [20]).

Vergleichbar zu GIDAS in Deutschland gibt es ähnliche „In-Depth"-Unfallerhebungsprojekte auch in anderen Ländern (z. B. Frankreich, Groß-

britannien, Schweden, USA, Japan, China). Derzeit ist es jedoch noch nicht gelungen eine identische Datenstruktur aufzubauen um einen Vergleich dieser Daten untereinander zu ermöglichen. Europäische Forschungsprojekte widmen sich dieser Problematik.

Um das Sicherheitsniveau von Fahrzeugen überprüfen und miteinander vergleichen zu können, werden von verschiedenen Organisationen eine Vielzahl von Tests durchgeführt. Ziel ist es, mit diesen Tests einen möglichst großen Teil des realen Unfallgeschehens abzudecken, und durch die Auslegung der Fahrzeugsicherheitssysteme auf diese Bedingungen einen möglichst optimalen und effektiven Schutz der Insassen, aber auch der äußeren Verkehrsteilnehmer zu erreichen. Die durchgeführten gesetzlichen Crashtests (die einen gewissen Mindeststandard an Sicherheit gewährleisten) und die Verbraucherinformationstests versuchen diesen Schutz zu gewährleisten und unterliegen deshalb auch einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess [22].

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine alleinige Auslegung auf solche Labortests bestimmte Möglichkeiten der unfallvermeidenden Sicherheit ausblendet. Darüber hinaus muss überprüft werden, ob eine Verbesserung der Testergebnisse auch zu einer Verbesserung im realen Unfallgeschehen führt. Das sinkende Verletzungsrisiko durch verbesserte Strukturmaßnahmen und neuartige Rückhaltesysteme mit Hilfe von Daten des GIDAS-Projektes ist in [23] dargestellt.

Auf Basis der Unfallzahlen kann auch eine Bewertung der Effektivität von Sicherheitssystemen vorgenommen werden. Eine Reihung verschiedener Fahrerassistenzsysteme und Systeme der unfallfolgenmildernden Sicherheit nach erwarteter oder auch bereits erwiesener Effektivität zeigt ◘ Abb. 9.6 [19]. Eine Analyse wurde von Charles Kahane [96], ehemals NHTSA, veröffentlicht. Nach seiner Bewertung konnten allein in den USA von 1969 bis 2012 über 600.000 Menschenleben durch die Einführung von Sicherheitsmaßnahmen gerettet werden.

Diese Überprüfung der Nachbildung der realen Unfallwelt durch Testverfahren und die Findung von neuen Möglichkeiten zur Verbesserung der Sicherheit der Fahrzeuge ist ein ständiger Prozess. Dazu ist es permanent nötig, die Unfallwelt in Form von Datenbanken aufzunehmen und auszuwerten. Des Weiteren unterliegt die Unfalldatenaufnahme selbst ständigen Veränderungen. Durch die Einführung von neuen Sicherheitssystemen, wie z. B. ABS, wird die Analyse und Bewertung von Verzögerungsspuren in der Pre-Kollisions-Phase immer schwieriger. Die Entwicklung von unfallvermeidenden Sicherheitssystemen ist auf Informationen zur Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrerreaktion angewiesen. Diese Daten könnten durch einen Unfalldatenspeicher, der die wichtigsten Daten wie Fahrzeuggeschwindigkeit, -verzögerung usw. aufzeichnet, gewonnen werden. Dadurch könnten für die Unfallforschung zusätzliche Informationen gewonnen werden und damit zu einem besseren Verständnis des Unfallablaufes und letztlich zu einer Weiterentwicklung unfallvermeidender Systeme führen [18].

- Sicherheitsgurte und Gurtvorspannung für die Vordersitze
- Sicherheitsgurte für die Hintersitze und Kindersitze
- Gestaltfeste Fahrgastzelle
- ESC
- Spurhaltung, automatische Bremsung, Müdigkeitswarnung
- Fahrerairbag
- ABS, Bremsassistent
- Beifahrerairbag
- Spurwechselassistent
- Seiten- und Knieairbags
- Nachtsicht, Aktives Frontlicht
- Presafe

◘ **Abb. 9.7** Reihung verschiedener Sicherheitssysteme

Der in ◘ Abb. 9.7 vorgelegte Katalog zeigt eine Reihung von Sicherheitsmaßnahmen. Man wird annehmen können, dass in Ländern, die eine mit Deutschland vergleichbare Motorisierung haben, ähnliche Verhältnisse herrschen und die Ergebnisse aus der Unfallanalyse damit übertragbar sind. Bereits für die östlichen Mitgliedsstaaten der EU stellt sich aber die Frage, ob eine für Deutschland abgeleitete Priorisierung übertragbar ist. In diesen Ländern gibt es eine andere Durchmischung des Verkehrs mit Pkw, Lkw, Zweirädern und Fußgängern.

Es gibt einen höheren Anteil von Führerscheinneulingen und es gibt eine andere Verteilung des Verkehrs auf Landstraßen, Autobahnen und Stadtverkehr.

Erhebliche Unterschiede ergeben sich, wenn man in die sich entwickelnden Staaten schaut, wie z. B. China. Dort stehen Maßnahmen zur Erhöhung der Gurtanlegequote, Verkehrserziehung und Durchsetzung der Verkehrsregeln durch Bußgelder ganz oben in der Priorisierung. Die Entwicklung der Infrastruktur besitzt dort eine sehr hohe Priorität, damit sie mit dem allgemeinen Wachstum des Wohlstandes Schritt hält. Erst wenn z. B. eine Gurtanlegung durchgesetzt worden ist, ergeben die klassischen Maßnahmen der passiven Sicherheit: Steife Zelle und Airbag einen nennenswerten Nutzen. Ein Autofahrer, der hauptsächlich im Stadtverkehr fährt, hat andere Anforderungen an sein Fahrzeug als ein Autofahrer, der auf kurvenreichen Außerortsstraßen einem höheren Schleuderrisiko ausgesetzt ist.

Ein wichtiges Ergebnis der vergleichenden internationalen Unfallforschung ist, dass es die eine weltweit überall effiziente Sicherheitsmaßnahme nicht gibt, sondern dass den regionalen Unterschieden Rechnung getragen werden muss. Die von Volkswagen initiierte Unfallforschung in Shanghai/China, die heute von einem größeren Konsortium von Herstellern getragen wird, hat bereits Erfolge gezeigt.

## 9.4 Unfallvermeidende Sicherheit

Zur unfallvermeidenden Sicherheit tragen neben den nachfolgenden beschriebenen Assistenzsystemen grundlegend auch die komfortsteigernden Maßnahmen bei, die einen positiven Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Fahrers ausüben. Dazu zählen beispielsweise Klimaanlagen, eine gute Sichtbarkeit und Ausleuchtung durch Licht, die Verbesserung der eigene Sicht (Spiegel, Scheiben) oder auch ein ausgewogenes Fahrwerk.

Den aktuellen Entwicklungsstand der aktiven und passiven Systeme und deren Schutzpotenzial zeigt ◘ Abb. 9.8. Die aktive Sicherheit lässt sich dabei in Fahrzeugassistenz (Fühlen: Sensoren detektieren den Fahrzeugzustand), Fahrerassistenz (Sehen: Umfelderkennung) und vernetzte Assistenz (Kommunizieren) unterteilen. Während sich die Fahrzeugassistenz auf assistierende Systeme der Fahrzeugebene beziehen (s. ► Abschn. 9.4.1), lassen sich die Systeme der Fahrerassistenz mit einer Umfelderkennung in Systeme der Längsführung, der Querführung und der Nachtassistenz unterteilen (s. ► Abschn. 9.4.2).

Die Analogie der menschlichen Sinne wird zukünftig mit der Kommunikation der Fahrzeuge untereinander komplettiert. Dadurch wird sich das Schutzpotenzial weiter erhöhen. Durch die innovative Weiterentwicklung der Elektronik und die integrale Vernetzung der Sicherheitssysteme (Integrale Sicherheit) rückt die Vision vom unfallfreien Fahren näher.

### 9.4.1 Assistenzsysteme der Fahrzeugebene

Zu den wesentlichen Assistenzsystemen der Fahrzeugebene (vgl. ◘ Abb. 9.8) gehört das Antiblockiersystem (ABS). Das ABS verhindert, innerhalb seiner Systemgrenzen, bei einer Vollbremsung oder bei glatter Fahrbahn das Blockieren der Räder und erhält die Lenkfähigkeit des Fahrzeugs, da blockierende Räder keine Seitenführungskräfte mehr übertragen können, das Fahrzeug wird unkontrollierbar.

Der Bremsassistent (BAS) unterstützt den Fahrer bei einer Not- oder Panikbremsung. Es erkennt anhand der Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals, ob der Fahrer eine Vollbremsung wünscht und erhöht den Bremsdruck automatisch bis in den ABS-Regelbereich, solange der Fahrer das Bremspedal betätigt. Das elektronische Stabilisierungsprogramm (ESC) erkennt kritische Fahrsituationen, zum Beispiel Schleudergefahr, und beugt einem Ausbrechen des Fahrzeuges gezielt vor.

Die Xenon-Scheinwerfer mit dynamischem und statischem Kurvenfahrlicht sorgen für eine um bis zu 90 % verbesserte Ausleuchtung von Kurven beziehungsweise des Abbiegebereichs (◘ Abb. 9.9). Die Lichtverteilung wird dabei stets an die Geschwindigkeit angepasst. Beim dynamischen Kurvenfahrlicht folgen die Lichtkegel ab einer Fahrgeschwindigkeit von mehr als 10 km/h dem Lenk-

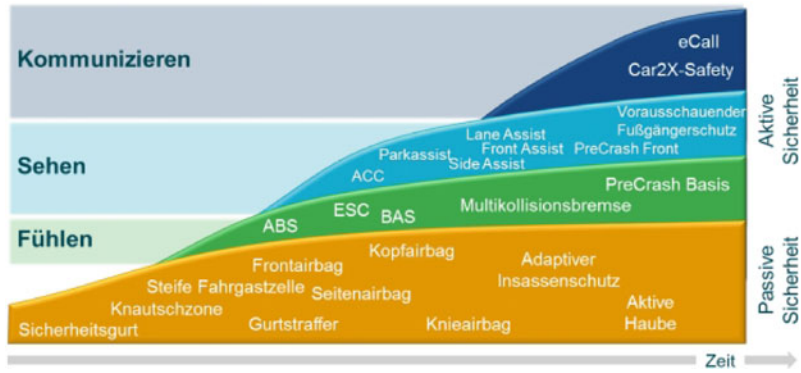



**Abb. 9.8** Schutzpotenzial Integrale Fahrzeugsicherheit [91]

radeinschlag. Auf diese Weise sind der Kurvenverlauf sowie Hindernisse, Personen oder Tiere bei einer Kurvenfahrt für den Fahrer früher wahrnehmbar. Der Fahrer gewinnt zusätzliche Reaktionszeit, das Unfallrisiko sinkt erheblich. Weitergehende Informationen sind ▶ Abschn. 8.5.5 Fahrerassistenzsysteme zu entnehmen.

## 9.4.2 Assistenzsysteme mit Umfeldsensorik

Die Komfortfunktion ACC wird mittlerweile durch Elemente der Fahrzeugsicherheit ergänzt. Wenn durch das Umfeldbeobachtungssystem eine kritische Annäherungssituation erkannt wird, dann wird das Fahrzeug durch das Vorbefüllen der Bremsen (PreFill) und durch die Sensibilisierung des hydraulischen Bremsassistenten auf eine bevorstehende Fahrernotbremsung vorkonditioniert. Beides erhöht die Wirksamkeit einer Fahrerbremsung.

### 9.4.2.1 Systeme der Längsführung

Möchte ein Fahrer derzeit entspannt fahren, so nutzt er in den neueren Fahrzeugmodellen das Adaptive-Cruise-Control (ACC). Mit diesem radarbasierten System ist es dem Fahrer bis zu einem bestimmten Grad möglich, in dem fließenden Verkehr mitzuschwimmen, ohne manuelle Geschwindigkeitsanpassungen durchführen zu müssen. Nach Auswahl einer Geschwindigkeit und Zeitlücke, die zu einem möglich Vorausfahrenden gewünscht wird, passt sich das Fahrzeug, automatisch daran an.

Zusätzlich wird eine 2-stufige Warnung ausgegeben, bestehend aus einer optisch-akustischen

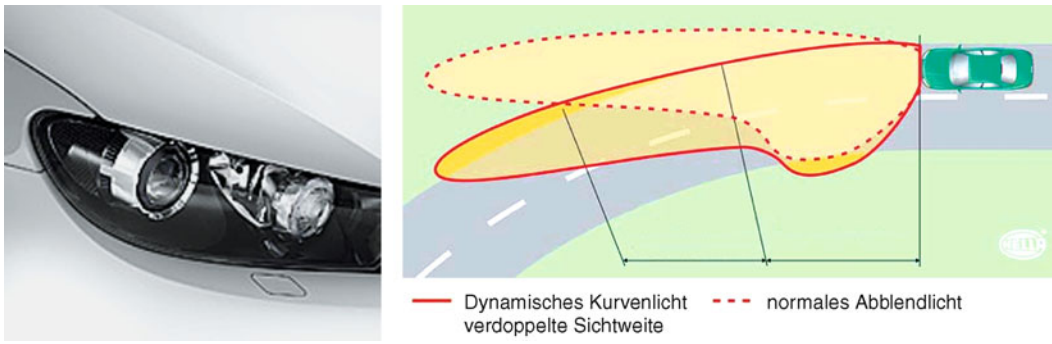



**Abb. 9.9** Kurvenlicht [25, 26]



**Abb. 9.10** Side Assist [27]

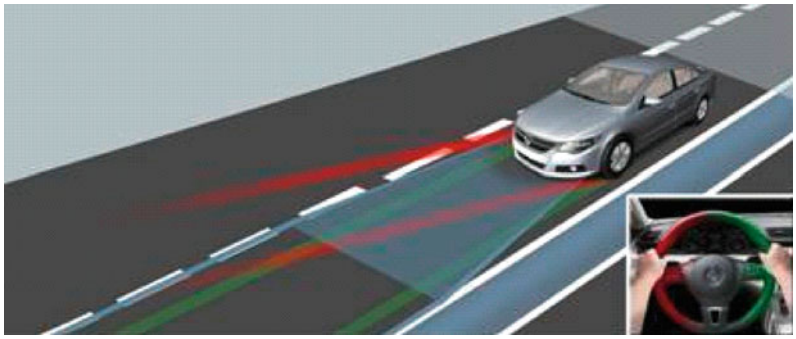


**Abb. 9.11** Lane Assist [28]

Warnung und einem Bremsruck. In eindeutig erkannten Situationen, in denen der Fahrer nicht eingreift, wird dann eine automatische Notbremsung eingeleitet. Die Fahrzeug-Eingriffe sollen dabei, je nach Situation, einen Unfall aktiv vermeiden bzw. die Folgen einer Kollision mildern. Ergänzende Details sind ▶ Abschn. 8.5.5 zu entnehmen.

### 9.4.2.2 Systeme der Querführung

Der Side Assist, unterstützt den Fahrer, indem er ihn vor oder bei einem Spurwechsel auf sich nähernde Fahrzeuge aufmerksam macht. Eine intuitiv verständliche Rückmeldung über Warnlampen in den Außenspiegeln informiert oder warnt den Fahrer innerhalb der Systemgrenzen vor Fahrzeugen in einem Bereich von 50 m hinter dem eigenen Fahrzeug und im toten Winkel. So können Fahrsituationen besser eingeschätzt und eine Gefährdung vermieden werden.

Ein weiteres System zur Erhöhung der Sicherheit ist der Spurhalteassistent (Lane Assist, Abb. 9.11) das auf Wunsch des Fahrers aktiviert werden kann. Gerade bei langen eintönigen Fahrten kann die Konzentration des Fahrers nachlassen. Ein Abkommen von der Fahrbahn kann die Folge sein. Durch einen leichten korrigierenden Lenkeingriff des Lane Assist kann das vermieden werden. Grundlage dafür ist die über Kamerasensorik erfasste Fahrbahnmarkierung. Sollte diese erkennbar sein und sich die Geschwindigkeit oberhalb von 65 km/h befinden, so ist das System aktiv und wird dem Fahrer im Kombiinstrument angezeigt. Weicht der Wagen nun von seiner Spur ab, lenkt der Spurhalteassistent leicht gegen. Dass ein Fahrer bei aktivem System die Hände vom Lenkrad nimmt, ist aufgrund des Aufmerksamkeitverlustes des Fahrers nicht wünschenswert. In diesem Fall gibt das Fahrzeug eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer und schaltet sich ab. Weitergehende Informationen



**Abb. 9.12** Emergency Assist [89]



sind ▶ Abschn. 8.5.5 Fahrerassistenzsysteme zu entnehmen.

### 9.4.2.3 Systeme der Quer- und Längsführung

Durch die Kombination der Systeme der Längs- und Querführung ist es möglich, auf besondere Notsituationen des Fahrers z. B. Bewusstlosigkeit oder Schwindel zu reagieren. In diesem Fall kann der „Emergency Assist" die Fahrzeug-Teilsteuerung übernehmen. Er wird aktiv, wenn der Spurhalteassistent keine Lenkeingriffe seitens des Fahrers feststellt und trotz Warnung keine Reaktion erfolgt, Abb. 9.12.

Dann versucht das System, durch Bremsrucke, Warntöne, Warnblinken und Pendeln in der eigenen Spur sowohl den Fahrer zu reaktivieren, als auch die Mitfahrer und andere Verkehrsteilnehmer zu warnen. Findet immer noch keine Übernahme der Fahrzeugsteuerung statt, wird das Fahrzeug kontrolliert zum Stillstand gebracht. Ein Unfall soll so im Rahmen der Systemgrenzen verhindert werden.

### 9.4.2.4 Nachtassistenz

Bei Nachtassistenzsystemen, unterscheidet man zwischen Systemen, die das Fahrzeugvorfeld in einem Display anzeigen (Nightvision), und Fernlicht-Assistenzsystemen. Diese passen die Lichtverteilung so an, dass immer maximale Sicht für den Fahrer bei gleichzeitig minimierter Blendung entsteht.

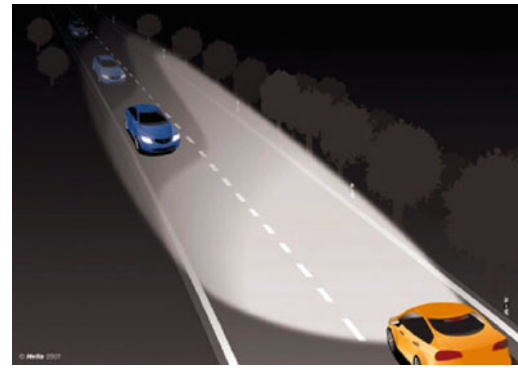


**Abb. 9.13** Gleitende Leuchtweitenregulierung [30]

Die Nightvision-Systeme erfassen den Bereich vor dem Fahrzeug mit einer Kamera. Derzeit sind zwei verschiedene Verfahren zur Nachtsichtverbesserung in Serie, nämlich ferninfrarot (FIR)-basierte Systeme und nahinfrarot (NIR)-basierte Systeme. Details dazu können ▶ Abschn. 8.5.5 entnommen werden.

Das frühzeitige Erkennen von relevanten Objekten kann auch durch die Fernlicht-Assistenzsysteme unterstützt werden. Diese beobachten, mit Hilfe einer Kamera, den entgegenkommenden und vorausfahrenden Verkehr, und passen die Lichtverteilung der Scheinwerfer dementsprechend an. Die einfachste Variante ist der Fernlichtassistent (FLA), bei dem das Fernlicht im Falle entgegenkommender oder vorausfahrender Fahrzeuge abgeschaltet



**Abb. 9.14** Blendfreies Fernlicht [31, 32]



**Abb. 9.15** Kamera für Fernlichtassistenz

wird. Ist das Vorfeld wieder frei, wird es automatisch reaktiviert [29].

Eine Weiterentwicklung des FLA ist die gleitende Leuchtweitenregulierung, Abb. 9.13. Hier wird nicht nur bestimmt ob, sondern auch in welcher Position sich andere Fahrzeuge im Vorfeld befinden. Mit diesen Informationen ist es nun möglich, die Hell-Dunkel-Grenze (HDG) der Frontscheinwerfer stufenlos zwischen Abblend- und Fernlichtverteilung zu adaptieren, je nach Entfernung der entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeuge.

Eine weitere Entwicklungsstufe stellt das blendfreie Fernlicht, auch Dynamic Light Assist, Abb. 9.14 und Abb. 9.15 genannt, dar. Hier wird die Lichtverteilung nicht nur in vertikaler Richtung adaptiert, sondern kann auch horizontal geschwenkt werden. Das ermöglicht ein Aussparen der anderen Verkehrsteilnehmer im Fernlicht und maximiert somit die Sicht des Fahrers, da nur dort das Licht abgeschattet wird, wo es entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge blenden würde.

## 9.5 Biomechanik und Schutzkriterien

### 9.5.1 Biomechanik

#### 9.5.1.1 Grundlagen

Beginnend in den USA, später in Europa und dem Rest der Welt wird die Biomechanik verstärkt erforscht. Wesentlichen Anteil an der Untersuchung der menschlichen Widerstandsfähigkeit gegen stoßartige Belastungen hatte der amerikanische Colonel Stapp, der im Selbstversuch als erster Mensch aus einer Geschwindigkeit von 632 mph (rd. 1000 km/h) in 1,4 s bis zum Stillstand verzögert wurde. Eine Würdigung findet man in [33].

Neben den Stapp-Conferences sind IRCOBI [34] (International Research Council on the Biomechanics of Impacts) und das EEVC (European Experimental Vehicle Commitee) weitere wichtige Institutionen zur Erarbeitung und zum Austausch biomechanischer Forschungsergebnisse. Für die Fahrzeugsicherheit ist die Biomechanik ein Mittel zur Beschreibung der Verletzungsmechanismen und ein Instrument zur Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit des menschlichen Körpers. Die Resultate der biomechanischen Forschung führen zur Festlegung von Belastungsgrenzen. Daraus werden die Schutzkriterien abgeleitet, die als physikalische Größen mit Versuchseinrichtungen gemes-

sen werden und deren direkter Messwert oder daraus abgeleitete Grenzen nicht überschritten werden dürfen.

#### 9.5.1.2 Belastungsgrenzen

Die Belastungsgrenzen beschreiben u. a. Knochenbrüche, Organschädigungen und andere Verletzungen. Eine Klassifizierung wird durch den „Abbreviated Injury Scale" (AIS) bzw. „Overall Abbreviated Injury Scale" (OAIS) vorgenommen. AIS und OAIS beurteilen eine Einzel- bzw. die Gesamtverletzungen und reichen von 0 bis 6 [35, 36] (◘ Tab. 9.1).

Die Belastungsgrenzen werden beeinflusst durch das Alter, Geschlecht, Anthropometrie, Masse und Masseverteilung. Deshalb ist es schwierig, in Unfallsimulationsversuchen alle vom Unfall Betroffenen (Fahrzeuginsassen, Fußgänger) darzustellen. Mit Hilfe von Versuchspuppen soll ein möglichst großes Spektrum erfasst werden.

Im Folgenden werden einige Belastungswerte für den Menschen näher beschrieben.

**Äußere Verletzungen** Schnittverletzungen im Gesicht und am Hals konnten bei früheren Fahrzeugkonstruktionen durch Aufschlag gegen die Windschutzscheibe entstehen. Eine Bewertung dieser Verletzungen ist von Prof. Patrick, Wayne State University, USA, vorgenommen worden. Die eingeklebte Verbundglasscheibe hat ganz wesentlich zur Reduzierung von Schnittverletzungen beigetragen und hält den Fahrer- und Beifahrer-Airbag zurück. Schädelbrüche durch das Aufschlagen auf Teile des Fahrzeuginnenraums werden nach Swearingen [37] wie folgt begrenzt: Die Verzögerung an der Schädelpartie, multipliziert mit der Kopfmasse, ergibt eine Kraft, die ein Brechen der Schädelpartie bei flächenhafter Lasteinleitung hervorruft. Beschleunigungsgrenzwerte betragen z. B. für die Stirn 200 g, die Nase 30 g und das Kinn 40 g. Brustverletzungen können durch das Aufschlagen auf Lenkrad und Armaturenbrett entstehen. Deshalb soll die Aufprallreaktionskraft möglichst kleiner als 8000 N sein. Die Brustdeformation sollte 5 cm nicht überschreiten.

Ein Bruch des Oberschenkels kann bei Längskräften von mehr als 11.000 N eintreten. Nachdem Kopf und Körper inzwischen gut geschützt sind, rücken Verletzungen der unteren Extremitäten (Fußgelenke) stärker in den Vordergrund.

◘ **Tabelle 9.1** AIS-Skala (Abbreviated Injury Scale)

| AIS-Stufe | Verletzungsschwere |
|---|---|
| 1 | Leichte Verletzung, z. B.<br>– Schürf- und Schnittwunden,<br>– Prellungen |
| 2 | Mittelschwere Verletzung, z. B.<br>– tiefe Fleischwunden,<br>– Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit (unter 15 min) |
| 3 | Schwere Verletzung, z. B.<br>– Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit (unter 1 h),<br>– Zwerchfellriss,<br>– Verlust eines Auges |
| 4 | Sehr schwere Verletzung (lebensgefährlich), z. B.<br>– Hirnquetschung mit Bewusstlosigkeit (unter 24 h),<br>– Magenriss,<br>– Beinverlust, oberhalb des Knies |
| 5 | Sehr schwere Verletzung (niedrige Überlebenschance), z. B.<br>– Hirnquetschung mit Bewusstlosigkeit (über 24 h),<br>– Herzmuskelriss,<br>– Rückenmarksverletzung mit Querschnittslähmung, |
| 6 | Sehr schwere Verletzung (sehr niedrige Überlebenschance, nicht behandelbar), z. B.<br>– Schädelzertrümmerung,<br>– Brustkorbzerquetschung,<br>– Abriss des Rückenmarks in Höhe des 3. Halswirbels oder darüber, |

**Innere Verletzungen** Sehr viel schwieriger sind die inneren Verletzungen des Menschen zu erfassen. Die größten Probleme sind zweifelsohne die Beanspruchung des Gehirns und der Halswirbelsäule. Für den Kopf gilt die Aussage, dass in anteriorposterior-Richtung eine Beschleunigung von 80 g über einen Zeitraum von 3 ms nicht überschritten werden soll. Bewusstlosigkeit und schwere Beschädigungen des Gehirns werden nach der Patrick Kurve [38] beurteilt, ◘ Abb. 9.16 Sie zeigt den

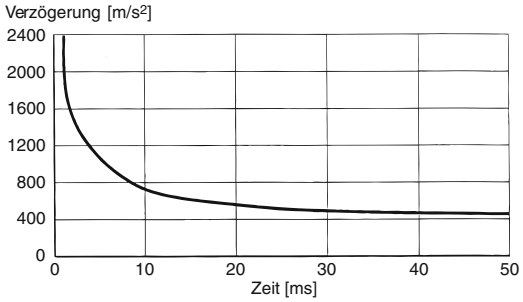



**Abb. 9.16** Patrick-Kurve (Maßstab zur Beurteilung der Belastungen des menschlichen Gehirns)

Zusammenhang zwischen Verzögerungshöhe und Einwirkdauer. Aus der Patrick-Kurve wurde auch das Head Injury Criterion (HIC) abgeleitet.

Über die Grenzbelastung durch die Rotationsbeschleunigung gibt Fiala in [39] Auskunft. Er hat bei einer Gehirnmasse von 1300 g eine Drehbeschleunigung von weniger als 7500 rad/s$^2$ als zulässig ermittelt.

Ebenso kritisch wie der Kopf ist der Hals. Als verbindendes Element zwischen Rumpf und Kopf wird er bei allen Unfällen einer mehr oder weniger großen Belastung ausgesetzt. Das betrifft insbesondere den aus sieben Halswirbeln bestehenden Nacken, der bei einer relativen Vorwärtsbewegung des Kopfes zum Rumpf (Flexion) und bei einer relativen Rückwärtsbewegung zum Rumpf (Extension) hoch belastet ist. Bei diesen Bewegungen entstehen Zug-, Druck- und Scherkräfte sowie Drehmomente. Je nach Muskulatur und Verhaltensweise des Insassen können dabei schwere Verletzungen auftreten. Besonders kritisch kann ein zu hohes Moment am okzipitalen Condylus (Hinterhauptgelenkknochen) sein.

Verletzungen der Halswirbelsäule rücken zunehmend in den Vordergrund, nachdem durch den Sicherheitsgurt und Airbag Kopf und Körper schon gut geschützt sind. Der Airbag hat insbesondere die Kopfverletzung, der Gurtkraftbegrenzer die Brustverletzung reduziert. Für die unterschiedlichen Fahrzeuginsassen ist ein adaptiver Insassenschutz erforderlich [40].

## 9.5.2 Schutzkriterien

Da man Versuche bei denen Verletzungen auftreten können, nicht mit lebenden Personen durchführen kann, stehen Nachbildungen von Körperteilen z. B. Kopfformen oder Ganzkörperversuchspuppen zur Verfügung. Im Gegensatz zu den biomechanischen Grenzwerten benötigt man auf diese Versuchseinrichtungen bezogene Grenzwerte. Logischerweise sind sie auch von der Art der eingesetzten Versuchspuppe abhängig.

Für den Frontalaufprall gelten die in Abb. 9.16 dargestellten Werte, wobei sich die länderspezifischen Anforderungen zum Teil vermischen. Das HIC (head injury criteria), bzw. HPC (head protection criteria) ist wie folgt definiert:

$$\text{HIC} \leq 1000, \text{ bzw. } 700$$
$$\approx \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{\text{res}}\, \mathrm{d}t\right]^{2{,}5} (t_2 - t_1)\,.$$

Die betrachteten Zeitabschnitte betragen 15 bzw. 36 ms. Die meisten Grenzwerte sind aus Tab. 9.2 und Abb. 9.17 ersichtlich, einige sollen noch näher erläutert werden:

- Oberschenkelkraft $< 9{,}07$ kN bei 0 ms und $<$ 7,56 kN nach 10 ms,
- Schienbeinindex := Tibiaindex, gemessen oben und unten, soll $\leq 1{,}3$ sein.

Der Tibia-Index ergibt sich mit $M_x$ = Biegemoment um die $x$-Achse, $M_y$ = Biegemoment um die $y$-Achse, $(M_C)_R$ = Kritisches Biegemoment $<$ 225 Nm, $(F_C)_Z$ = Kritische Kompressionskraft in $z$-Richtung mit $< 35{,}9$ kN:

$$\text{TI} = |M_R/(M_C)_R + |F_Z|/(F_C)_Z|$$

Nacken:

Das Nackenverletzungskriterium Neck Injury Criteria (NIC) darf die Zug- und Scherkräfte (KN als $f(t)$) nicht überschreiten. Das Biegemoment um die $y$-Achse bei der Rückwärtsbewegung soll $< 57$ Nm sein, bei der Vorwärtsbewegung $<$ 190 Nm.

**Tabelle 9.2** Gesetzliche Grenzwerte für Schutzkriterien beim Frontalaufprall [80]

| Konfiguration | Kriterium | Starre Barriere In-Position | | | Deformierbare Barriere In-Position | | Out of Position | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Anforderung | | CMVSS 208 (alt), ADR 69/00, FMVSS 208 (alt) | FMVSS 208 CMVSS 208 | | UN R94, ADR 73/00, FMVSS 208 (alt) | FMVSS 208 CMVSS 208 | FMVSS 208 CMVSS 208 | | | |
| Dummy | | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | Hybrid III | CRABI |
| Größe | | 50% male | 50% male | 5 % female | 50% male | 5 % female | 5 % female | 6 year | 3 year | 1 year |
| Kopf | $HIC_{36}$ /$HPC_{36}$ [-] | 1000 (FMVSS, ADR) | | | 1000 | | | | | |
| | $HIC_{15}$ [-] | 700 (CMVSS) | 700 | 700 | | 700 | 700 | 700 | 570 | 390 |
| | $a_{3ms}$ [g] | | | | 80 | | | | | |
| Hals | $N_{ij}$ [-] | | 1,0 (4 Werte) | 1,0 (4 Werte) | | 1,0 (4 Werte) | 1,0 (4 Werte) | 1,0 (4 Werte) | 1,0 (4 Werte) | 1,0 (4 Werte) |
| | $F_{x,shear}$ [kN] | | | | 3,1 @ 0 ms<br>1,5 @ 25-35 ms<br>1,1 @ ≥ 45 ms | | | | | |
| | $F_{z,tension}$ [kN] | | 4,17 | 2,62 | 3,3 @ 0 ms<br>2,9 @ 35 ms<br>1,1 @ ≥ 60 ms | 2,62 | 2,07 | 1,49 | 1,13 | 0,78 |
| | $F_{z,compr.}$ [kN] | | 4,0 | 2,52 | | 2,52 | 2,52 | 1,82 | 1,38 | 0,96 |
| | $M_y$ [Nm] | | | | 57 | | | | | |
| Brust | $a_{3ms}$ [g] | 60 g | 60 | 60 | | 60 | 60 | 60 | 55 | 50 |
| | Eindrückung [mm] | 76,2 (FMVSS, ADR)<br>50 (CMVSS) | 63 | 52 | 50 | 52 | 52 | 40 | 34 | 30*<br>* zur Zeit keine Messung möglich |
| | VC [m/s] | | | | 1,0 | | | | | |
| Oberschenkel | Axialkraft [kN] | 10 | 10 | 6,805 | 9,07 @ 0 ms<br>7,58 @ > 10 ms | 6,805 | 6,8 | | | |
| Knie | Verschiebung [mm] | | | | 15 | | | | | |
| Unterschenkel | TI [-] | | | | 1,3 (4 Werte) | | | | | |
| | $Axialkraft_{compr.}$ [kN] | | | | 8,0 | | | | | |

SafetyWissen by cams

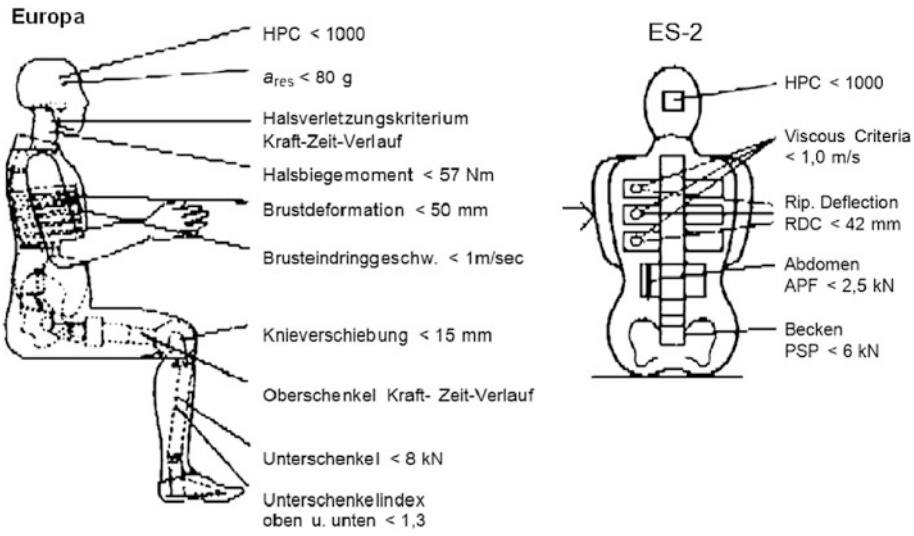



**Abb. 9.17** Gesetzliche Grenzwerte für Schutzkriterien beim Frontal- und Seitenaufprall in Europa [78]

Weitere Forderungen: Nach wie vor gilt, dass die Lenkradverlagerung der Lenkradmitte < 80 mm vertikal und < 100 mm horizontal (rückwärts) beim Frontalcrash sein soll. Bezüglich der möglichen Fußverletzungen gibt es noch keine präzisen Kriterien. Auf jeden Fall soll eine zu große Drehung und ein direkter Bauteilkontakt vermieden werden.

Für den Seitenaufprall gelten die in Abb. 9.17 dargestellten Werte, dabei ist zu berücksichtigen, dass der Euro SID 2 auch für den amerikanischen Test eingesetzt werden kann.

Die Bezeichnungen bedeuten:

**RDC** – Rip Deflection Criteria,
**APF** – Abdomen Belastung,
**PSP** – Schambeinfugenbelastung.

Bei der Auslegung der Fahrzeuge und Rückhaltesysteme muss man die Toleranzen des gesamten Systems berücksichtigen. D. h., um gesichert mit allen Fahrzeugen z. B. einen Grenzwert für das HIC von 1000 zu unterschreiten, muss das Entwicklungsziel deutlich niedriger sein. Bei der Entwicklung der Fahrzeuge sollte in jedem Fall der neueste Stand der Gesetzgebung und der NCAP-Festlegung zu Grunde gelegt werden.

## 9.5.3 Simulationseinrichtungen

### 9.5.3.1 Kopf

Der Kopf wird für mehrere Tests simuliert. Der nach J921 [42] spezifizierte Kopf hat eine reduzierte Pendelmasse von 6,8 kg. Er kann Beschleunigungen und Flächenpressungen (Folie) bewerten. Zusätzlich wird für den „containment test" ein Linearimpaktor mit 18 kg und für den Fußgängertest eine Kinderkopfform mit 3,5 kg und eine Erwachsenenkopfform mit 4,5 kg eingesetzt.

### 9.5.3.2 Bein, Hüfte

Für den Fußgängerschutz sind in der europäischen Gesetzgebung Bein- und Hüftaufprallsimulatoren spezifiziert.

### 9.5.3.3 Rumpf

Für das Messen der Kraft in horizontaler Richtung beim Aufprall auf die Lenkanlage wurde als Belas-

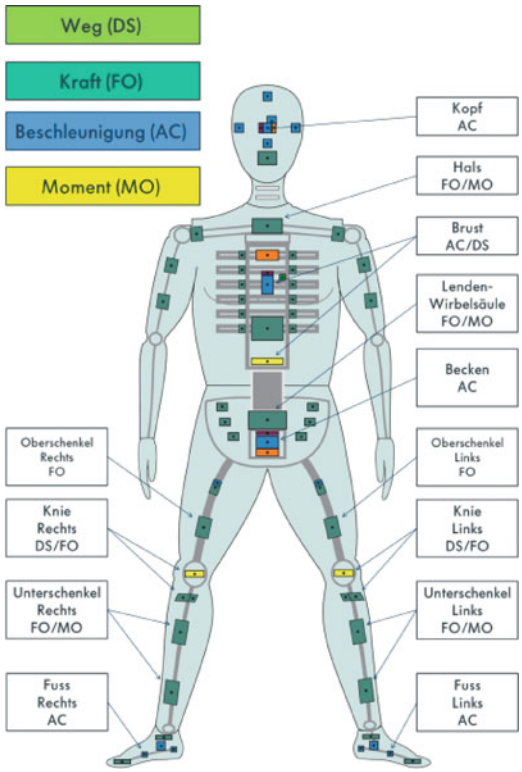



**Abb. 9.18** Standard Instrumentierung H3 50 % nach Iso [85]

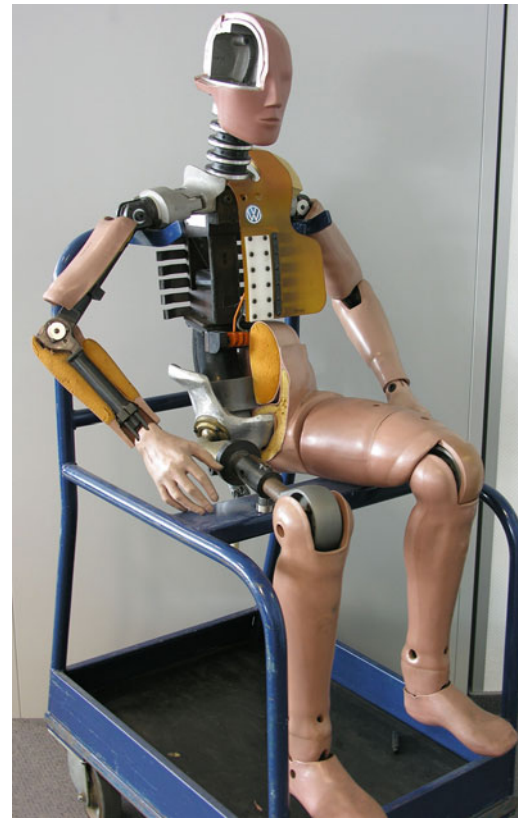


**Abb. 9.19** Hybrid III 50 %-Mann Versuchspuppe [43]

tung ein Körperblock nach SAE 944a verwendet. Dieser Körperblock repräsentiert den Rumpf eines 50 %-Mannes und wiegt 36 kg. Allerdings wird der Rumpf nach der Installation von Airbags und Dreipunktgurten nicht mehr als Entwicklungstool eingesetzt.

### 9.5.3.4 Gesamtkörper

Für die Simulation des gesamten Körpers gibt es zahlreiche Versuchspuppen. Sie reichen von Kinderpuppen (verschiedene Altersstufen) über die 5 % Frau, den 50 % Mann bis zum 95 % Mann. Die Prozentangabe schließt immer den entsprechenden Größenbereich ein. Für die Unfallsimulationstests, inklusive der Überprüfung der gesetzlichen Vorschriften werden die 5 % Frau, der 50 % Mann (Abb. 9.19) und der 95 % Mann sowie die Kinderversuchspuppen verwandt. Bei allen Versuchspuppen sind Messwertaufnehmer im Kopf, Nacken, Brust, Becken und Beinen installiert (vgl. Abb. 9.18, Abb. 9.19).

Für die Seitenaufprallsimulation sind zahlreiche unterschiedliche Versuchspuppen im Einsatz. So wird für den US-Seitenaufprall nach FMVSS 214 der ES-2re auf den Vordersitzen und der SDlis auf den Hintersitzen verwendet, für Europa der ES-2 auf den Vordersitzen und für den europäischen NCAP-Test der World-SID. Die Abb. 9.20 zeigt den Unterschied zwischen dem ES-2re und dem US-SIDIIs.



**Abb. 9.20** Unterschiede von den Versuchspuppen im Seitenaufprall (*links*, World SID, *rechts* Euro SID 2re)

## 9.6 Quasistatische Anforderungen an die Karosserie und Komponenten

### 9.6.1 Sitz- und Sicherheitsgurtverankerungspunkttests

Für den Fall, dass das innenliegende Sicherheitsgurtschloss am Sitz befestigt ist, werden Sitz und Verankerungspunkte gleichzeitig geprüft. Über Körperblöcke wird mit Zugbändern die Kraft gleichmäßig entsprechend FMVSS 210 aufgebracht. Je Körperblock müssen mehr als 14.000 N Widerstand geleistet werden. Die Verstärkung im Bereich der oberen Befestigungspunkte in den B-Säulen muss so ausgeführt sein, dass ein Einreißen der B-Säule infolge zu großer örtlicher Steifigkeit vermieden wird.

Die Sitze selbst können im Regelfall die am Gurtverankerungspunkt auftretenden Kräfte nicht aufnehmen, da der Sitz nur das 20fache seines Eigengewichts als Kraft über einen Zeitraum von 30 ms aushalten muss. Für den innenliegenden Verankerungspunkt bedient man sich des steifen Fahrzeugmitteltunnels, an dem eine zackenförmige Sitzführungsschiene befestigt ist. Bei einer Belastung durch einen entsprechend schweren Unfall rastet der Verankerungspunkt fest ein. Sitze, an denen auch der obere Gurtverankerungspunkt angebracht ist, müssen über die Lehne die Kräfte und Momente abstützen und sind wegen der notwendigen Steifigkeit relativ schwer gebaut.

Neben diesen Versuchen sind noch zahlreiche weitere Prüfungen an der Karosserie und an Komponenten wie Sitzen und Kopfstützen (FMVSS 202a, UN R17, R21 und R25), Gurten (UN R14 und R21), Lenkanlagen (FMVSS 203, UN R12), Ex- und Interior (FMVSS 201U, UN R21 und R42) und Kindersitzverankerungen (Isofix nach FMVSS 225) durchzuführen.

### 9.6.2 Dachfestigkeit

Zur Überprüfung der Dachfestigkeit entsprechend des FMVSS 216a wird für Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von bis zu 2722 kg eine quasistatische Prüfkraft entsprechend dem 3-fachen Fahrzeuggewicht aufgebracht. Diese Gesetzverschärfung wurde ab dem Jahr 2012 stufenweise in den USA eingeführt und ist seit dem 01.09.2015 für alle produzierten Fahrzeuge gültig. Die maximale Eindrücktiefe darf dabei 127 mm nicht überschreiten.

Zusätzlich wurde ab 01.09.2016 ein neuer Test für Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse von 2723 kg bis 4536 kg mit einer quasistatischen Prüfkraft entsprechend dem 1,5fachen Fahrzeuggewicht eingeführt.

### 9.6.3 Seitenstruktur

Neben den Erprobungen durch dynamische Versuche, gibt es nach FMVSS 214S auch einen quasistatischen Test. Bei diesem Versuch wird ein Zylinder senkrecht zur Fahrzeuglängsachse in die Tür gedrückt. Die Unterkante des Zylinders ist dabei 5 inches (12,7 cm) über dem untersten Punkt der Tür. Der Prüfkörper hat einen Durchmesser von 12 inches (30,5 cm). Seine Höhe muss mindestens so bemessen sein, dass er die Unterkante des Fens-

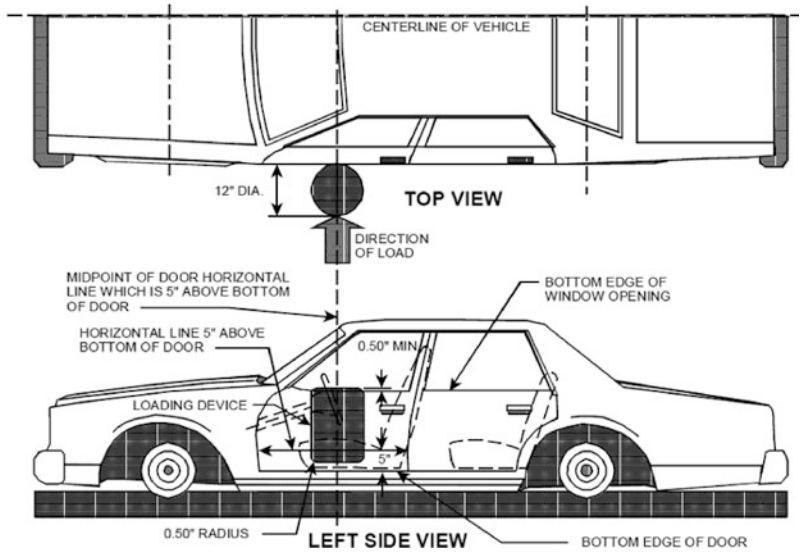



**Abb. 9.21** Testaufbau nach FMVSS214S [84]

terausschnittes um mindestens 1/2 inch (1,27 cm) überragt (Abb. 9.21).

## 9.7 Dynamische Fahrzeugkollision

### 9.7.1 Frontale Kollision

Zur Überprüfung einer eventuellen Beschädigung der Scheinwerfer, Leuchten und weiterer, für die Sicherheit wichtiger Bauteile (z. B. bewegliche Fahrwerksteile) werden Aufprallversuche mit niedriger Geschwindigkeit gegen eine feste Wand und Pendelaufschlagversuche gegen den Stoßfänger durchgeführt. Während es in den USA hierzu ein Gesetz gibt, ist in Europa diese Anforderung nur in einigen Ländern zwingend. Der Schadenumfang am Fahrzeug bei niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten wird indirekt über die Einstufung in die Kfz-Versicherungsklassen abgedeckt, wodurch weniger die Sicherheit, sondern vielmehr die Reparaturkosten berücksichtigt werden. Bis zu Aufprallgeschwindigkeiten von 8 km/h sollen keine bleibenden Beschädigungen auftreten. Für die Beurteilung von Reparaturschäden wird bis zu 16 km/h Aufprallgeschwindigkeit geprüft.

Bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten muss die Bewegungsenergie der Kollisionspartner zum größten Teil durch die Deformation von Fahrzeugbauteilen abgebaut werden. bei einer Frontalkollision gegen ein festes Hindernis, das 90° zur Fahrzeuglängsrichtung steht, ergeben sich die in Abb. 9.22 dargestellten Verzögerungs-, Geschwindigkeits- und Deformations-Zeit-Verläufe. Der Rückprall, erkenntlich an der negativen Geschwindigkeit, zeigt, dass auch für diesen Fall ein elastischer Anteil des Fahrzeugs von rd. 10 % vorhanden ist, so dass beim Aufprall gegen eine feste Wand mit 50 km/h die gesamte Geschwindigkeitsänderung rd. 55 km/h beträgt. Die von dem aufprallenden Fahrzeug auf die Barriere übertragenen Kräfte erreichen bis zu 300 kN bei einem Aufprall mit 50 km/h eines 1000 kg schweren Fahrzeugs gegen eine feste Barriere.

In Abb. 9.23 sind die Anteile eines Fahrzeugvorderbaus während des Frontcrashes bezüglich der Energieabsorption dargestellt. Der Aufprall gegen eine feste Wand lässt sich unter Annahme eines plastischen Stoßes mit folgenden Größen beschreiben:

$\ddot{s}_{FZ}$ – Verzögerung des Fahrzeuges während des Aufpralles als $f(t)$,

$\dot{s}_{FZ}$ – Geschwindigkeit des Fahrzeuges während des Aufpralles als $f(t)$,

$s_{FZ}$ – Weg des Fahrzeuges während des Aufpralles als $f(t)$,

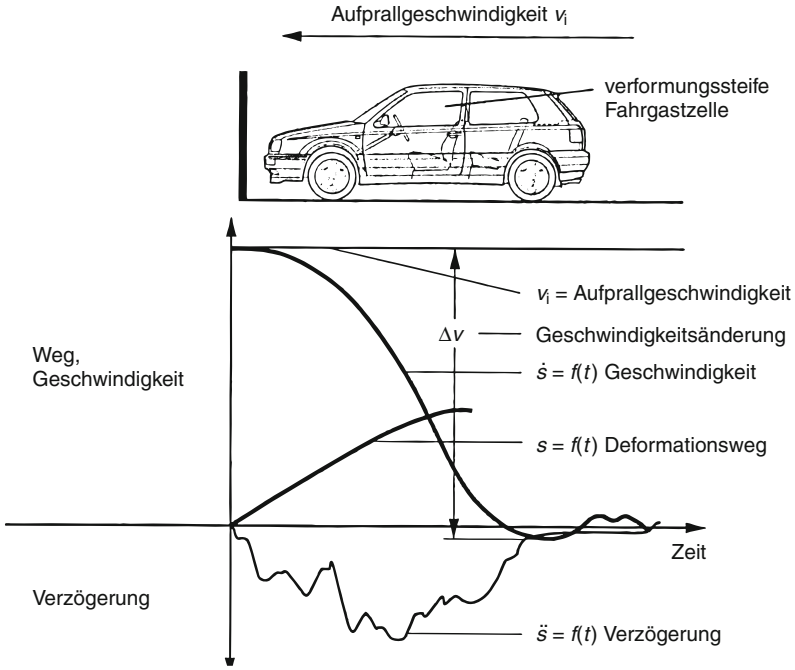



**Abb. 9.22** Prinzipielle Verläufe von Verzögerung, Geschwindigkeit und Deformationsweg bei einem Frontalaufprall

$F$, $\bar{F}$ – Deformationskraft, mittlere Deformationskraft,

$v_i$ – Aufprallgeschwindigkeit, $\Delta v$ Geschwindigkeitsänderung.

Nimmt man an, dass die Deformationskraft konstant ist, und

$$\ddot{S}_{\mathrm{FZ}} = -a, \quad \dot{s}_{\mathrm{FZ}(t=0)} = v_i,$$
$$s_{\mathrm{FZ}\,(t=0)} = 0,$$
$$\ddot{s}_{\mathrm{FZ}(t)} = -a$$

und

$$\frac{m_{\mathrm{FZ}}}{2}\left(v_i^2 - \dot{s}^2\right) = \int_0^s F \cdot \mathrm{d}s = \bar{F} \cdot s_{\mathrm{FZ}},$$
$$\dot{s}_{\mathrm{FZ}(t)} = -a \cdot t + v_i,$$
$$s_{\mathrm{FZ}(t)} = -\frac{a \cdot t^2}{2} + v_i \cdot t,$$
$$s_{\mathrm{FZ}(s)} = \frac{v_i^2 - \dot{s}^2}{2a}.$$

$\dot{s}$ – momentane Geschwindigkeit.

Ersetzt man die mittlere Deformationskraft durch

$$\bar{F} = m_{\mathrm{FZ}} \cdot a \quad \text{oder} \quad v_i^2 = 2a \cdot s_{\mathrm{FZ}},$$

dann ergibt sich:

$$\frac{m_{\mathrm{FZ}}}{2} \cdot v_i^2 = m_{\mathrm{FZ}} \cdot a \cdot s_{\mathrm{FZ}}$$

oder

$$v_i^2 = 2a \cdot s_{\mathrm{FZ}}.$$

Daraus folgt, dass sich beim frontalen Aufprall die Deformationskräfte unterscheiden können. Je Wert $F = m \cdot a$. Es gilt aber auch, dass wegen der Insassenbeanspruchung – gleiche Verzögerung vorausgesetzt – die Deformationswege beim Aufprall gegen ein festes Hindernis aufprallgeschwindigkeits- und nicht masseabhängig sind. Bei einer Aufprallgeschwindigkeit von ca. 50 km/h hat der Großteil der Fahrzeuge Deformationswege von 450 bis 750 mm. Diese steigen bei Aufprallgeschwindigkeiten von 35 mph (56 km/h) um rd. 100 bis 150 mm.

Das Verhalten beim 30°-Aufprall ähnelt sehr stark einem frontalen Fahrzeug-Fahrzeug-Zusammenstoß. Durch die Abgleitphase im Vergleich zum Frontalaufprall führt dies eher zu einer schwächeren Belastung der Insassen. Im Gegensatz dazu ist

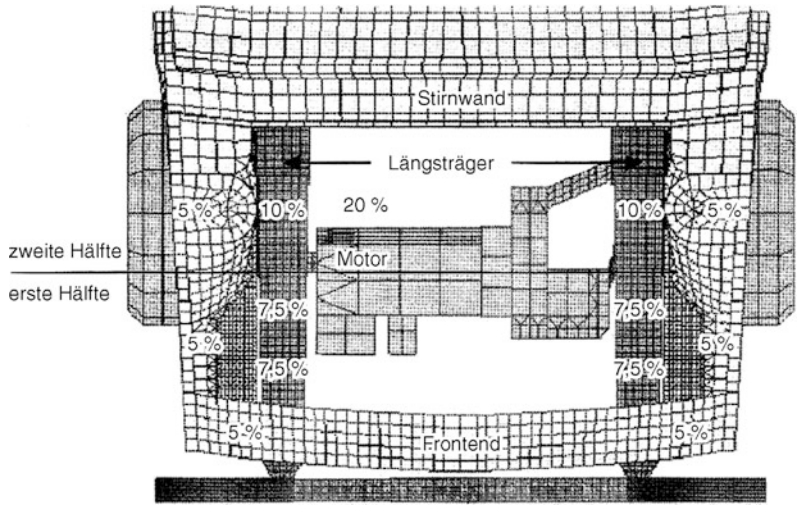



**Abb. 9.23** Energieabsorptionsverteilung beim Frontalaufprall [44]



der Offset-Aufprall eine extrem starke Beanspruchung für die Fahrzeugstruktur. Der größte Teil der zu absorbierenden Energie muss von einer Fahrzeugseite aufgenommen werden. Die jeweiligen Geschwindigkeitsänderungen (im Schwerpunkt) $\Delta v_x$ und $\Delta v_y$ betragen, auf die Fahrzeugmitte bezogen,

30°-Aufprall

$$v_i \approx 50\Delta v_x \approx 57{,}6\Delta v_y \approx 14{,}4\,\text{km/h},$$

40 %-Offset-Aufprall

$$v_i \approx 50\Delta v_x \approx 52{,}2\Delta v_y \approx 13{,}7\,\text{km/h}.$$

Beim frontalen Zusammenstoß zweier Fahrzeuge mit den Massen $m_1$ und $m_2$ gelten folgende Zusammenhänge:

$$\frac{m_1 \cdot v_{i2}^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_{i2}^2}{2} = \frac{1}{2}(m_1 + m_2) \cdot u^2 + F \cdot (\Delta s_1 + \Delta s_2)$$

$u$ ist die gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoß:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_{i1} + m_2 \cdot v_{i2}}{m_1 + m_2}\,.$$

Beim Einsetzen der Anfangsrelativgeschwindigkeit

$$v_r = v_{i1} - v_{i2}$$

beider Fahrzeuge ergibt sich:

$$v_r^2 = 2F \cdot (\Delta s_1 + \Delta s_2) \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}\,.$$

Damit sind die Geschwindigkeitsänderungen für die Fahrzeuge 1 und 2:

$$\Delta v_1 = v_{i1} - u = (v_{i1} - v_{i2}) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} = v_r \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}\,,$$

$$\Delta v_2 = v_{i2} - u = (v_{i2} - v_{i1}) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2} = v_r \cdot \frac{m_1}{m_1 + m_2}\,.$$

Für die häufig diskutierte Frage, welche Geschwindigkeiten bei einem Frontalaufprall gegen eine feste Wand gewählt werden muss, um eine frontale Kollision zweier identischer Fahrzeuge mit jeweils gleichen Anfangsgeschwindigkeiten $v_{i1} = v_{i2}$ zu simulieren, gilt, dass dann auch die Geschwindigkeitsänderung der betrachteten Fahrzeuge gleich

sein muss, also $\Delta v_{1B}$ beim Aufprall gegen eine feste Barriere gleich $\Delta v_{1FZ}$ bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision. Für den plastischen Stoß ergeben sich dann folgende Zusammenhänge:

**Fall I.** Aufprall gegen eine feste Barriere

$$\Delta v_{1B} = (v_{i1} - v_{i2}) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

mit $m_2 = \text{Barriere} = \infty$ und $v_{i2} = \text{Barriere} = 0$

$$\Delta v_{1B} = v_{i1} .$$

**Fall II.** Aufprall gegen ein zweites Fahrzeug

$$\Delta v_{1FZ} = (v_{i1} - v_{i2}) \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

mit $m_2 = m_1 = m$ und $v_{i2} = -v_{i1}$

$$\Delta v_{1FZ} = v_{i1} .$$

Somit entspricht der Barriere-Aufprall eines Fahrzeuges mit $v_{i1}$ einem Fahrzeug-Fahrzeug Aufprall, bei dem jedes Fahrzeug eine Geschwindigkeit von $v_{i1}$, allerdings entgegengesetzt hat, oder dem Aufprall eines Fahrzeuges mit $2 \cdot v_{i1}$ auf ein stehendes Fahrzeug. Ein 50-km/h-Aufprall gegen eine feste Barriere hat damit, einen plastischen Stoß vorausgesetzt, die gleichen Folgen wie ein Zusammenstoß zweier Fahrzeuge gleicher Masse bei einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/h. Berücksichtigt man jedoch die Tatsache, dass das elastische Verhalten bei einem Barrieren Aufprall ausgeprägter ist, dann entspricht dies einer Geschwindigkeit von rd. 110 km/h. Bei der normalerweise eintretenden Rebound Phase durch die Teilelastizität ist die äquivalente Testgeschwindigkeit beim Aufprall gegen eine feste Barriere ca. 10 % niedriger als im echten Unfallgeschehen.

Die Sicherheitsuntersuchungen des Frontalaufpralls sind sehr zahlreich, allein für USA gelten die in. ◘ Abb. 9.24 dargestellten Anforderungen.

## 9.7.2 Seitliche Kollisionen

Auch für seitliche Kollisionen sind über die Gesetzgebung und die Verbrauchertests zahlreiche Simulationstests im Einsatz, z. B.:

- Der FMVSS 214, hier fährt eine Barriere mit 1368 kg Masse im „Krebsgang“ mit 54 km/h in die Seite des zu prüfenden Fahrzeugs, als Versuchspuppe werden der ES-2re oder der SID IIs verwendet.
- Für Europa, die ECE R95 und Euro-NCAP sowie US-IIHS fährt eine Barriere mit 950 kg (IIHS 1500 kg) unter 90° Aufprallwinkel mit 50 km/h in die Seite des zu prüfenden Fahrzeugs.
- Für Euro- und US-NCAP, den FMVSS 201 und den FMVSS 214 gibt es außerdem einen Pfahlseitenaufprall Pfahl (Durchmesser 254 mm) mit Aufprallgeschwindigkeiten von 29 km/h bzw. 32 km/h. Je nach Testverfahren sind der ES-2, SID-H3, ES- 2re und SID IIs im Einsatz.

## 9.7.3 Heckkollision

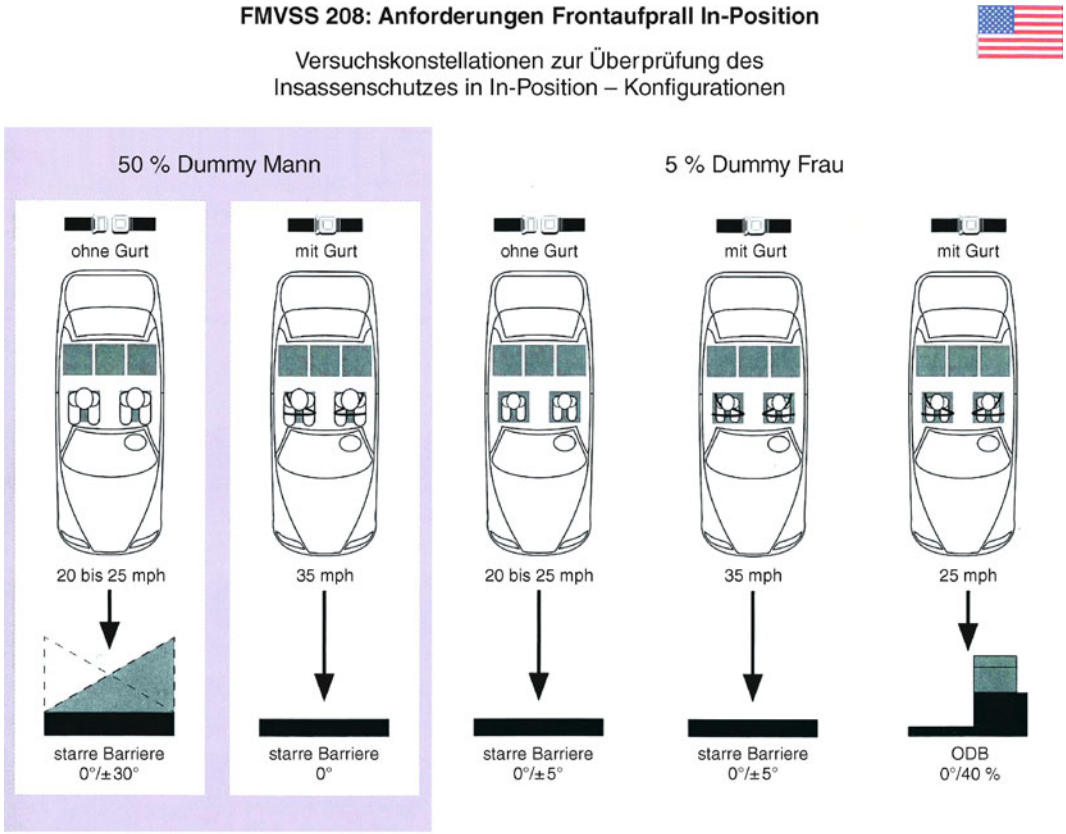
Die Simulation der Heckkollision dient im Wesentlichen zwei Aufgaben:

- Die Beurteilung von Sitzen und Kopfstützen bei Heckkollisionen und
- die Sicherstellung der Dichtigkeit der gesamten Kraftstoffanlage.

Als Simulationstools sind die verschiedenen beweglichen Barrieren (s. Seitenaufprall) im Einsatz. Neu ist der Offset-Aufprall der 1368 kg schweren deformier baren Barriere mit 80 km/h auf das Heck des zu prüfenden Fahrzeugs (FMVSS 301) [46].

## 9.7.4 Fahrzeugüberschlag

Der Fahrzeugüberschlag rückt speziell in den USA wieder stärker in den Vordergrund. Folgende Testverfahren sind relevant: Fish-Hook-Test (NHTSA) zur Kippsicherheit, ▶ Abschn. 7.5. Die Dichtheit der Kraftstoffanlage wird mittels eines „Rhönrades“ vor und nach der frontalen, seitlichen und Heckkollision durch das Drehen des Fahrzeuges in 90°-Schritten getestet (Verweildauer in jeder Position: 5 min). Gegen das Auslaufen des Kraftstoffes sind Schwerkraftventile in der Leitung zwischen Kraftstofftank und Aktivkohlebehälter eingebaut, die bereits bei Schräglage sperren (▶ Abschn. 5.10).




**FMVSS 208: Anforderungen Frontaufprall Out of Position**

| Vordersitz | Dummy | Testkonfiguration |
|---|---|---|
| Fahrerseite | HIII 5 % female | Kinn auf Airbagmodul im Lenkrad<br>Kinn am Lenkradkreuz oben |
| Beifahrerseite | 1 jähriger Kinderdummy | in 23 definierten Kindersitzen/Positionen |
| | 3-jähriger CRABI-Dummy | Brust auf Instrumententafel<br>Kopf an Instrumententafel |
| | 6-jähriger CRABI-Dummy | Brust auf Instrumententafel<br>Kopf an Instrumententafel |

**Abb. 9.24** Beispiele für Frontalaufprallsimulation für den US-Standard FMVSS 208 [45]

Im Zusammenhang mit der Überprüfung des Insassenverhaltens wird das gesamte Fahrzeug einem dynamischen Überschlagtest unterzogen. Hierzu wird das Fahrzeug unter 23° auf einen Schlitten gestellt, der mittels einer genau definierten Verzögerung aus einer Geschwindigkeit von 30 mph (48,3 km/h) abgebremst wird. Das Fahrzeug führt dann mehrfache Rotationsbewegung aus, wie in Abb. 9.25 dargestellt. Interessant sind die im Vergleich zur frontalen und seitlichen Kollision zeitlich viel längeren Abläufe von bis zu mehreren Sekunden. Sie garantieren den angegurteten Insassen eine höhere Überlebenschance ohne große Verletzungen, wenn der Überlebungsraum erhalten bleibt.

Aufgrund der Situation in den USA hat die NHTSA eine Verschärfung verschiedener existierender Gesetze vorgenommen, z. B. die FMVSS 206,

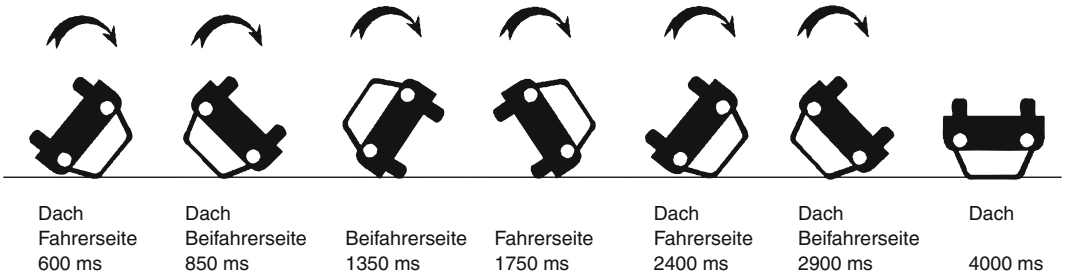



**Abb. 9.25** Bewegungsablauf eines Fahrzeuges im Überschlagtest

214 und 216. Neu definiert ist ein „containment-Test", welcher unter dem Standard FMVSS 226 zu finden ist. Hier wird definiert, dass eine Kopfform von 18 kg mit 24 km/h seitlich gegen Seitenairbag und Scheiben geschossen wird, begrenzt ist der Auspendelweg [47].

## 9.8 Insassenschutz

### 9.8.1 Fahrzeuginnenraum

Neben den klassischen Rückhaltesystemen (Sicherheitsgurte) unterliegt der gesamte Fahrzeuginnenraum speziellen Anforderungen. Es darf z. B. in möglichen Kopfaufschlagsbereichen (Prüfung mit einer Kugel von 165 mm Durchmesser) ein Bauteilradius von 2,5 bis 3,2 mm (je nach Lage) nicht unterschritten werden.

Die FMVSS 201 erfordert bei zahlreichen Aufschlaggebieten im Fahrzeuginnenraum mit einer Kopfform die Unterschreitung eines vorgegebenen Beschleunigungsniveaus. Einen besonderen Schwerpunkt bilden auch die Lenksäulen mit den Airbag-Lenkrädern. Im Zusammenwirken mit dem Sicherheitsgurt und Sitz sind sie ein wesentliches Element für den Insassenschutz. Damit die Lenksäule mit Lenkrad nicht zu weit in den Innenraum eindringt, obwohl durch den FMVSS 208 technisch überholt, ist auch bei einem Aufprall mit ca. 50 km/h das Eindringen der Lenkradmitte in horizontaler und vertikaler Richtung begrenzt. Die definierte Bewegung des Lenkgetriebes erlaubt ein teleskopartiges Zusammenschieben der Lenksäule. Auch beim „steer-by-wire" wird das Lenkrad den Airbag aufnehmen, zumal der Einsatz der Joystick-Lenkung im Pkw sehr unsicher ist. Einen Überblick über Sicherheitslenkungen findet man in [48, 49].

Ebenso darf das Fußhebelwerk während einer Frontalkollision nicht zu weit in den Innenraum eindringen und scharfkantig splittern. Auch alle übrigen Fahrzeuginnenteile haben direkt oder indirekt etwas mit der Fahrzeugsicherheit zu tun. Speziell für den Seitenschutz ist die Gestaltung der Türinnenseite von Bedeutung, da sie dazu beitragen kann, die Belastungen des Insassen abzubauen.

### 9.8.2 Rückhaltesysteme

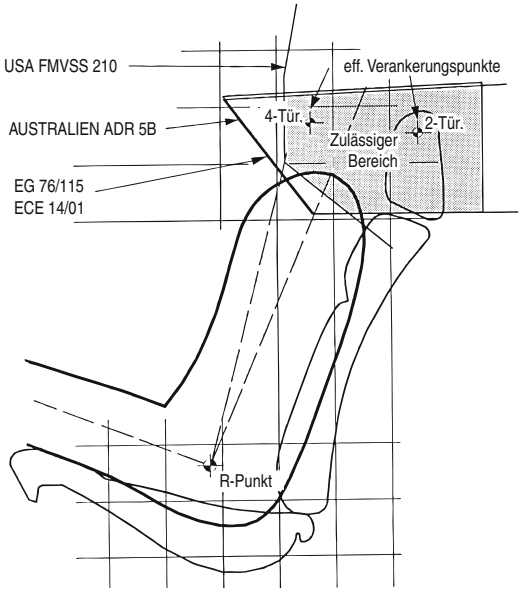
Bei den Rückhaltesystemen wird unterschieden zwischen Einrichtungen, die aktiviert werden müssen damit ihre Schutzwirkung erreicht wird (Sicherheitsgurt anlegen oder Kinderrückhaltesysteme sind hierfür gute Beispiele), und Einrichtungen, deren Schutzwirkung ohne Zutun der Insassen automatisch beim Unfall aktiviert wird, z. B. Gurtwegbegrenzung, Gurtstrammer, Airbag.

Moderne Gurtsysteme besonders in Kombination mit dem Airbag sind äußerst leistungsfähig und garantieren den Insassen einen hervorragenden Schutz im Kollisionsfall. Ein entscheidendes Kriterium für die Güte und Wirksamkeit eines Gurtrückhaltesystems ist die Abstimmung der Einzelkomponenten aufeinander, d. h. nur das perfekte Zusammenspiel von Fahrzeugstruktur, Lenkradbewegung, Sitzverhalten, Innenraumgestaltung, Gurtcharakteristik und Airbagverhalten garantiert einen optimalen Insassenschutz. Adaptive Rückhaltesysteme können dabei in Abhängigkeit der unterschiedlichen Unfallschwere und Insassen angesteuert werden [50].

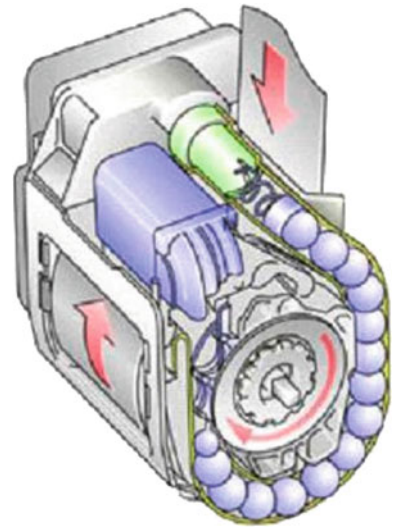
### 9.8.2.1 Sicherheitsgurte

Weltweit hat sich der Dreipunktgurt mit Aufrollautomatik durchgesetzt. Der Dreipunktgurt ist mittlerweile bei fast allen Fahrzeugen auf allen Sitzplätzen eingebaut. Das Schloss ist bei verstellbaren Sitzen direkt am Sitz befestigt, die außen liegende Seite des Gurtes an der B- oder C-Säule.

Das zulässige Feld der Gurtverankerungspunkte ist durch gesetzliche Regelungen exakt vorgeschrieben, ◘ Abb. 9.26. Der außen obenliegende Punkt ist bei den meisten Fahrzeugen höhenverstellbar. Das Komfortempfinden des Menschen für die Lage des Gurtes und dessen Schutzwirkung gehen konform. Für das Sperren der Gurte beim Unfall sorgen zwei voneinander unabhängige mechanische Systeme. Ein System nutzt die Fahrzeugbeschleunigung oder -verzögerung (Pendelprinzip). Bei einem Impuls von mehr als 0,7 g wird die Sperrung ausgelöst. Eine zweite Sperre reagiert auf die Gurtauszugsbeschleunigung, wobei oberhalb eines festgelegten Wertes gesperrt wird, d. h. bei Auszugsbeschleunigungen von mehr als 1 g tritt die Sperrung innerhalb von 20 mm Auszugslänge ein. Für das optimale Zusammenwirken von Sicherheitsgurten und der Fahrzeugstruktur hat sich der Einsatz der pyrotechnischen Gurtstraffer und teilweise von zusätzlichen Kraftbegrenzern durchgesetzt.




◘ **Abb. 9.26** Gesetzlich vorgeschriebene Bereiche für die geometrische Lage des oberen Gurtverankerungspunktes



◘ **Abb. 9.27** Ausführung eines pyrotechnischen Gurtstraffers [51]

◘ Abb. 9.27 zeigt eine Ausführung eines pyrotechnischen Gurtstraffers. Beim pyrotechnischen Gurtstraffer wird in Abhängigkeit von der Unfallschwere, sensorgesteuert nach Überschreiten einer Verzögerungsschwelle das Gurtband gestrafft. Innerhalb von 20 ms wird der Gurt bei einem entsprechend schweren Unfall dynamisch bis 2 kN vorgespannt (bleibend 500 N).

Bei PreCrash-Systemen werden die Gurte durch elektrische Stellmotoren vor dem Unfall gestrafft. Es gibt zusätzlich noch eine Reihe von Kraftbegrenzern, damit der Brustkorb nicht über Gebühr belastet wird. Welche Art der Zusatzeinrichtung verwendet wird ist abhängig vom Zusammenwirken aller für den Unfallablauf wichtigen Komponenten: Fahrzeugdeformationscharakteristik, Sitz, Rückhaltesysteme und geometrische Anordnung.

Für die Bereitschaft zum Anlegen des Gurtes ist der Komfort ebenfalls eine wichtige Größe. Die Anordnung des Gurtschlosses am Sitz und die Gurthöhenverstellung haben hierzu bereits sehr positive Beiträge geleistet. Eine weitere Maßnahme zur Minimierung der Gurtlose beim Dreipunktgurt ist die




**Abb. 9.28** Kindersitze für unterschiedliche Alters- und Entwicklungsstufen [53]

Optimierung der Rückzugskraft durch den Gurtautomaten, um ein einwandfreies Aufrollen zu garantieren, ohne dass im angelegten Bereich die Kraft übermäßig hoch ist. Teilweise werden auch zwei Automaten pro Gurt angeboten, um den Komfort auch im Beckengurt zu steigern. Bei einigen Systemen mit elektrischen Stellmotoren werden diese auch verwendet um vor Fahrtantritt die Gurtlose automatisiert zu reduzieren.

### 9.8.2.2 Kinderrückhaltesysteme

Es gibt kein singuläres Kinderrückhaltesystem, das allen Alters- und Entwicklungsstufen gerecht werden kann. Bei der Auslegung von Kinderrückhaltesystemen muss insbesondere die im Vergleich zu Erwachsenen unterschiedliche Massenverteilung heranwachsender Menschen berücksichtigt werden.

Einige Hersteller bieten Kindersitze an, die auch für die Befestigung im Fahrzeug optimal ausgelegt sind. Innerhalb der Europäischen Union sind mit der ECE-Regelung ECE-R44 die Anforderungen definiert [52].

- Klasse 0 für Kinder mit einem Körpergewicht von weniger als 10 kg;
- Klasse 0C für Kinder mit einem Körpergewicht kleiner 13 kg,
- Klasse I für Kinder mit einem Körpergewicht von 9 kg bis 18 kg,
- Klasse II für Kinder mit einem Körpergewicht von 15 kg bis 25 kg,
- Klasse III für Kinder mit einem Körpergewicht von 22 kg bis 36 kg.

Dies gilt auch für ISOFIX-Kinderrückhaltesysteme bei denen die Befestigung im Fahrzeug vorgesehen ist. Der ISOFIX Tether Kindersitz hat darüber hinaus noch eine obere Befestigung. Die Fahrzeughersteller haben zusätzlich zu den Zubehörlieferanten reagiert und bieten, wie Abb. 9.28 zeigt eine komplette Palette von Kinderrückhaltesystemen an.

Für den Einbau gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten: Rückwärts gerichtete Kindersitzsysteme und in Fahrtrichtung eingesetzte Systeme. Beim Rebound-System sitzt das Kind entgegen der Fahrtrichtung. Diese Anordnung ist für Babys und Kleinkinder besonders empfehlenswert, da diese Position die Gefahr schwerer Halswirbelverletzungen besonders bei Frontkollisionen minimiert. Gerade in dieser Altersklasse ist der Kopf, bezogen auf die entwickelte Halsmuskulatur, zu schwer. Bei Fahrzeugen mit Beifahrerairbag wird derselbe beim Einbau des Kindersitzes auf dem

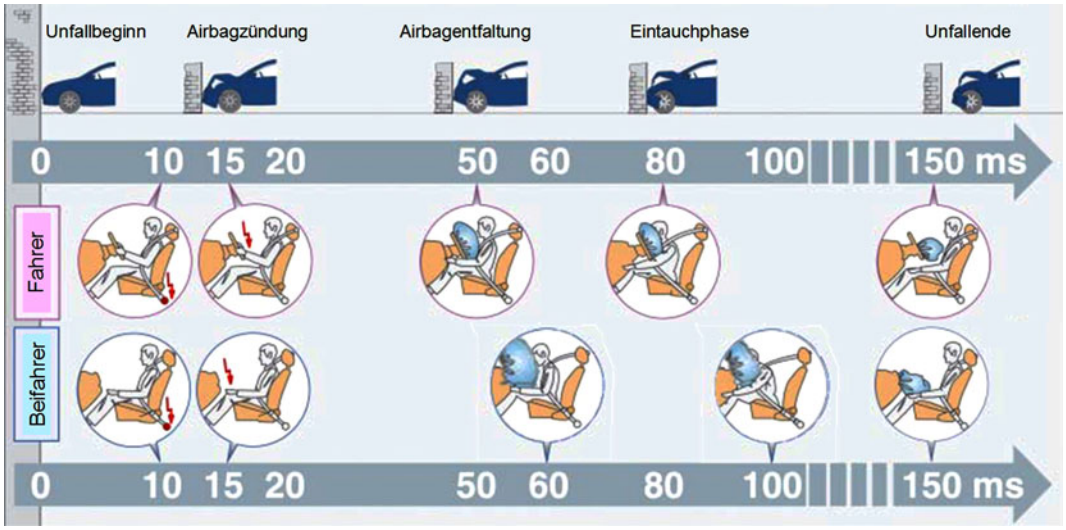



**Abb. 9.29** Zeitlicher Ablauf und Schutzwirkung eines Rückhaltesystems aus Dreipunktgurt und Airbag im Frontalaufprall (Fahrer und Beifahrerseite)

Beifahrersitz deaktiviert. Ältere Kinder mit entsprechend entwickelter Halsmuskulatur können ohne Bedenken Kindersitze benutzen, die in Fahrtrichtung angebracht sind [54].

### 9.8.2.3 Airbag-Systeme

Auch beim Airbag gibt es teilweise unterschiedliche Ausführungen, was auf die amerikanische Gesetzgebung zurückzuführen ist. Durch die in den USA erhobene, nicht ganz glückliche Forderung nach „passive restraints" ergibt sich bei den Airbag-Kunden eine sinkende Bereitschaft, die Gurte anzulegen. Das ist aber geradezu eine Pervertierung des Sicherheitsgedankens. Das Airbag-System sollte und darf nur eine Ergänzung zum Gurt sein. Die unterschiedliche Insassenkinematik, angegurtet oder nicht angegurtet, erfordert unterschiedliche Airbag-Systeme, die jeweils optimal auf das gleichzeitig eingebaute Rückhaltesystem abgestimmt sein müssen.

Bei Systemen mit Dreipunktgurt bewegt sich der Insasse zunächst relativ zum Fahrzeug nach vorn, bis der Gurt sperrt. Danach setzt sich die Relativbewegung verzögert nach vorn fort. Diese wird durch den Beckengurt in Verbindung mit einer Sitzrampe mit einer vertikalen Kraft nach unten beeinflusst. In der Schlussphase des Aufpralls entsteht eine stärkere Kopfrotation, die durch die zusätzlichen Fahrer- und Beifahrer-Airbag-Systeme deutlich reduziert werden kann.

Die Airbag-Systeme bestehen aus kompakten Einheiten. Ein bzw. mehrere Sensoren bewerten den Verzögerungs-Zeit-Verlauf, also die Unfallschwere. Hat der Sensor ausgelöst, wird ein Zünder in einem pyrotechnischen Behälter aktiviert, der seinerseits die Verbrennung des pyrotechnischen Materials auslöst. Mit dem erzeugten Gas wird der Bag gefüllt. Die Sensorauslösezeit bei einem 50 km/h Wandaufprall beträgt bis zu 30 ms, die Zeit für das anschließende Aufblasen des Bags rund 25 ms. Der zunächst herrschende Bag-Innendruck beträgt etwa 1,3 bis 1,8 bar. Der prinzipielle Ablauf nach der Sensorauslösung ist für Fahrer- und Beifahrerseite in Abb. 9.29 dargestellt.

In den Ländern mit geringer Sicherheitsgurtanlegequote, z. B. in den USA, müssen die zulässigen Insassenbelastungswerte auch mit Systemen ohne Sicherheitsgurte erreicht werden. Das erfordert eine entsprechende Gestaltung des Bereiches unterhalb des Armaturenbrettes, z. B. durch den Einbau eines energieabsorbierenden Kniepolsters, ähnlich wie in Fahrzeugen mit einem passiven Gurtsystem. Das Sensorsystem muss bei dieser Auslegung (Airbag als einziges Rückhaltesystem) wesentlich präziser arbeiten und auch bei schräger Stoßrichtung (−30° zur Fahrzeuglängsrichtung) noch sicher auslösen.

Das System ist so ausgelegt, dass es allein die gesamte Rückhaltefunktion des Insassen übernehmen kann. Das Fahrerbagvolumen beträgt bei solchen Systemen rd. 80 l, das Beifahrervolumen rd. 150 l.

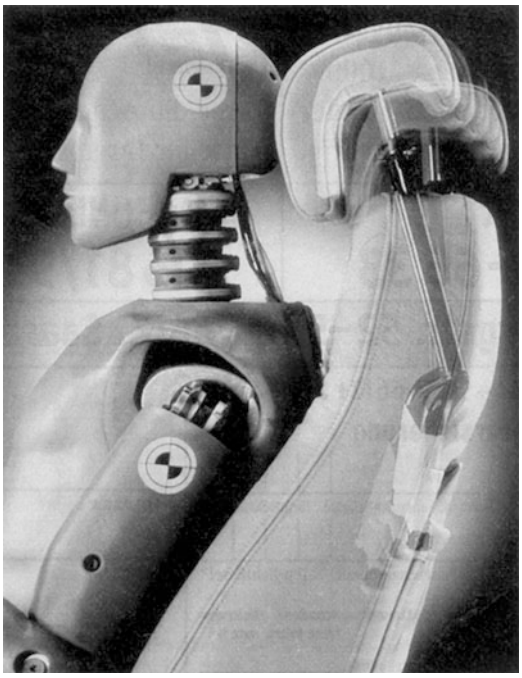
Die Abstimmung des Bags darf nicht nur für den 50 %-Mann vorgenommen werden. Sie muss auch kleine Personen (im Extremfall vor dem Armaturenbrett stehende Kinder) und sehr große und schwere Insassen berücksichtigen. Öffnungen im Bag sorgen für ein gesteuertes Kraft-Weg-Verhalten. Durch das schnelle Aufblasen des Airbags wird entsprechend der Unfallsituation und der Größe des Insassen und der Sitzposition gezündet und in ihrem Aufblasdruck-Zeitverlauf variiert. In der Anfangsphase des Airbageinsatzes wurden in den USA mehr als 100 Personen tödlich verletzt [55] und das Gesetz musste komplett überarbeitet werden, um zum Beispiel „out of position" und Insassen unterschiedlicher Größe zu berücksichtigen [56]. ◘ Abb. 9.24 zeigt eine Übersicht über diese Forderungen.

Auch die Anforderungen an die „Advanced Airbags" wurden für die USA-Fahrzeuge in zwei Stufen (die erste bis 2007 und die zweite bis 2009) eingeführt. Die Stufe zwei erhöht die Aufprallgeschwindigkeit für die angegurteten Insassen frontal gegen die Barriere von 48 auf 56 km/h.

Airbag-Systeme werden inzwischen auch für andere Sitzpositionen und Unfallarten, z. B. für Fondpassagiere und für den Seitenschutz, eingesetzt. Dabei stellt sich beim Seitenaufprall das Erkennen eines schweren Unfalls als besonders schwierig heraus. Die Zeit für das Erkennen des Unfalles und für das Aufblasen eines Airbags muss sehr kurz sein, da der Insasse bei einem 50 km/h Seitenaufprall nach rund 25 ms bereits Kontakt mit der Türinnenseite haben kann. Für den Seitenschutz wurden zunächst Airbags angeboten, die den Brust- und Beckenbereich schützen. Bei zahlreichen Fahrzeugen wurde dies in Richtung Kopfairbag für beide Fahrzeuginnenseiten erweitert. Diese Kopfairbags können bei entsprechender Sensorik auch für den Schutz bei Überschlagunfällen eingesetzt werden, um Kopfverletzungen zu reduzieren und das Herausschleudern zu verhindern.

#### 9.8.2.4 Sitze, Sitzlehne und Kopfstütze

Die Verbesserungen in der Frontal- und Seitenkollision hat zunehmend den Fokus auch auf die Heckkollision und eine einwandfreie Funktion der Kopfstütze gelegt. Die Halswirbelverletzungen verursachen häufig sehr langwierige Erholungsprozesse, so dass neue Lösungen erarbeitet wurden. Daher wird die Kopfstütze, falls ein schwerer Unfall vorliegt, näher an den Kopf geführt. Die Aktivierung erfolgt pyrotechnisch, federbasiert oder auch elektrisch mit einem Heckaufprallsensor oder durch die Rückwärtsbewegung des Insassen. Auch Airbag-Lösungen gibt es. ◘ Abb. 9.30 zeigt bei einem Saab wie sich die Kopfstütze nach oben und näher an den Kopf bewegt.



◘ **Abb. 9.30** Kopfstütze (SAAB)

### 9.8.3 Zusammenwirken von Rückhaltesystemen und Fahrzeug

#### 9.8.3.1 Insasse

Beim frontalen Aufprall eines Fahrzeuges gegen eine feste Barriere oder ein anderes Fahrzeug bewegt sich der Insasse aufgrund seiner Trägheit relativ zum Fahrzeug in Richtung Armaturenbrett und/oder Lenkrad. In erster Näherung

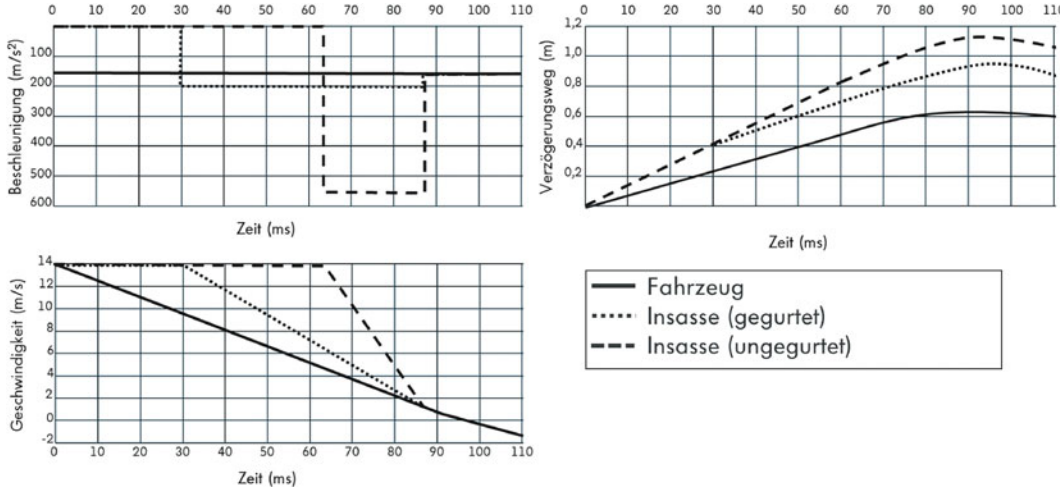



**Abb. 9.31** Prinzipdarstellung der Verzögerung-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit- und Weg-Zeit-Verläufe bei einem 50 km/h-Aufprall auf ein festes Hindernis



gilt:

| Fahrzeug | Insasse bis Aufschlag |
|---|---|
| $\ddot{s}_{FZ} = -a$ | $\ddot{s}_I = 0$ |
| $\dot{s}_{FZ} = -a \cdot t + v_I$ | $\dot{s}_I = v_I$ |
| $s_{FZ} = \frac{a \cdot t^2}{2} + v_I \cdot t + s_0$ | $s_I = v_I \cdot t + s_0$ |

Der Relativweg zwischen Insasse und Fahrzeug ist:

$$\Delta s = s_I - s_{FZ} = \frac{a \cdot t^2}{2} .$$

Bei einem 50 km/h-Aufprall, einer mittleren Fahrzeugverzögerung von 15 g und einem Abstand Insasse-Lenkrad von 0,30 m schlägt der Insasse nach rd. 64 ms auf. Die Differenzgeschwindigkeit beträgt dann noch rd. 33,9 km/h. Ohne Rückhaltesystem muss die kinetische Energie des Insassen von Lenkrad, Armaturenbrett und Windschutzscheibe aufgenommen werden, so dass die mittlere Verzögerung des Insassen ca. 58 g beträgt (Abb. 9.31).

### 9.8.3.2 Angelegter Dreipunktgurt

Beim Dreipunktgurt ohne Gurtstraffer wird der Insasse nach dem Blockieren der Automaten zunächst so weit nach vorne bewegt, bis das Gurtband auf der Automatikrolle zusammengezogen ist. Durch den Beckengurtteil und den Oberkörpergurt wird der Körper des Insassen relativ zum Fahrzeug zurückgehalten. Der Beckengurt erzeugt mit wachsender Kraftbeanspruchung auch eine vertikale Kraft nach unten, so dass auch die Sitzschalenkonstruktion und deren Abstützung in das Insassenschutzsystem mit einbezogen werden muss. Abb. 9.32 zeigt typische Kopf-Verzögerungs-Zeit und Brust-Verzögerungs-Zeit-Funktionen und den Verlauf der Gurtkräfte für eine mit einem Dreipunktgurt angeschnallte Versuchspuppe beim 50 km/h-Barrierenaufprall.

Um die relative Vorwärtsverlagerung des Insassen speziell auf der Fahrerseite zu begrenzen, werden Gurtstraffer eingesetzt. Nach dem Erreichen einer fahrzeugtypischen Aufprallschwere wird der pyrotechnische Strammer über einen Sensor aktiviert. Es ergeben sich zwei Effekte: Der Anstieg der Gurtkraft beginnt früher und das Kraftniveau ist im Vergleich zu einem normalen Dreipunktgurt bei gleichem Verzögerungs-Zeit-Verlauf kleiner.

### 9.8.3.3 Airbag-Systeme

Die beiden unterschiedlichen Auslegungen „Airbag plus Dreipunktgurt“ und „Airbag ohne Gurtsystem“ führen zu unterschiedlicher Insassenbewegung. Zunächst zum System mit Dreipunktgurt.

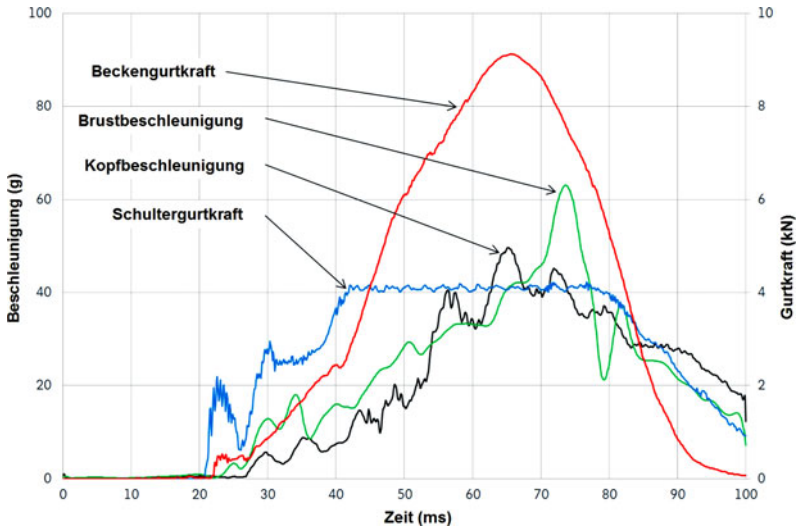



**Abb. 9.32** Beispiel für Verzögerungs-Zeit- und Gurtkraft-Zeit-Funktion für eine mit einem Dreipunktgurt angeschnallte Versuchspuppe bei einem 50 km/h-Barrierenaufprall

Der Insasse macht am Anfang eine ähnliche Bewegung wie bei konventionellen Rückhaltesystemen. Nach dem Aufblasen des Bags wird die Kopfrotation deutlich reduziert, und auch die Brustverzögerungswerte verbessern sich. In speziellen Versuchen wird auch die Flächenpressung gemessen, die beim Aufschlag auf ein energieabsorbierendes Lenkrad im Vergleich zu einem Airbag-Lenkrad entsteht. Beim Airbag-Lenkrad ist die Flächenpressung deutlich geringer.

Beim Airbag-System, das im Wesentlichen für den Fall des unangeschnallten Insassen ausgelegt ist, wird die Verzögerung des Insassen auf der Fahrerseite über den Airbag, die Lenksäule und das energieabsorbierende Kniepolster aufgebracht. Auf der Beifahrerseite muss die Energie durch den Airbag und das Kniepolster bzw. Kneebag absorbiert werden. Besonders kritisch sind bei nicht angelegtem Gurt die „Out-of-position" Probleme, z. B. das nichtmittig zum Airbag Sitzen. Schon deshalb ist es notwendig, dass der Dreipunktgurt angelegt wird. Inzwischen sind bei den meisten Fahrzeugen zumindest die Hardwarekomponenten der Sensorik und die Größen der Airbags länderunabhängig einheitlich ausgelegt. Über Softwareanpassung werden spezielle Wünsche berücksichtigt.

**Funktionen der Airbag-Technik**

- Das Crashsignal wird ausgewertet, entsprechend der Schwere wird die erste oder zweite Stufe des Gasgenerators gezündet bzw. der Airbag wird nicht ausgelöst.
- Die Gurtanlegung wird überprüft. Darüber hinaus kann der Beifahrersitz mit Ultraschall, Video, Sitzmatte und über Infrarot-Sensoren überwacht werden, um Informationen über die Sitzbelegung, „Out of Position" oder das Vorhandensein eines Kindersitzes zu erhalten.
- Die situative Airbagzündung ist im Grunde genommen bereits eine adaptive Auslegung. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Insassen und Unfallschweren wird als adaptiver Insassenschutz bezeichnet. Dabei werden unterschiedliche Airbaghärten und Gurtkräfte zur Verfügung gestellt [50, 57].

## 9.8.4 Adaptiver Insassenschutz

### 9.8.4.1 Anforderungen durch das Unfallgeschehen

Ein adaptives Rückhaltesystem sollte in Abhängigkeit der Unfallschwere und den individuellen Ei-

genschaften des Insassen variabel auslösen. Im Idealfall gilt das für alle Unfallschweren und alle Insassen. Allerdings ist die Wirksamkeit des adaptiven Rückhaltesystems nicht für jeden Unfall gleichermaßen umsetzbar. Der Grund liegt in der physikalischen Anforderung des adaptiven Systems, nur optimal arbeiten zu können, wenn der zur Verfügung stehende Vorverlagerungsweg unter minimaler Rückhaltekraft vollständig ausgenutzt wird. Das Kraftniveau der Rückhaltekraft wird dabei prinzipiell durch den Insassen und die Unfallschwere bestimmt. Ist dieser zur Verzögerung des Insassen nutzbare Vorverlagerungsweg z. B. durch eine fehlende Gurtbenutzung oder durch Intrusion der Fahrgastzelle eingeschränkt oder durch die Kollisionsart bedingt (z. B. Überschlag) nicht vorhanden, so ist das Potential eines adaptives Rückhaltesystem gering.

Das Wirkfeld, in dem ein adaptives Rückhaltesystem Potentiale entfalten kann, lässt sich nach der Kollisionsart, dem Kollisionskontrahenten, der erforderlichen Gurtbenutzung und der Forderung nach Zellenintegrität auf ca. 30 % aller MAIS3+ verletzten PKW-Insassen zusammenfassen [41].

Die relevanten Einflussparameter, die von einer Sensorik zu erfassen sind, sind die Unfallschwere und das Insassengewicht, da beide Parameter maßgeblich die vom Rückhaltesystem aufzubringende Energie beeinflussen. Für die Auslegung adaptiver Rückhaltesysteme ist der nutzbare Vorverlagerungsweg des Insassen und damit die Sitzlängsposition ebenfalls von Interesse, da dieser die Höhe der Rückhaltekraft bestimmt [50].

### 9.8.4.2 Airbag-Steuerungskonzepte

Ein adaptiv zu gestaltendes Rückhaltesystem wird maßgeblich durch das Airbag- und Gurtsystem beschrieben. Der prinzipielle Verlauf der Airbag- und Gurtkraftfunktion erfordert eine degressive Airbagkraft und eine degressive Schulter-Gurtkraft über den zeitlichen Verlauf [50]. Die Härte des Airbags kann durch den zeitlichen Verlauf des Airbagdrucks $p_{\mathrm{Airbag}}(t)$ beschrieben werden. Zur Abschätzung der Einflüsse auf den Airbagdruck kann die Zustandsgleichung idealer Gase herangezogen werden. Dabei gilt die vereinfachte Annahme, dass sich das Gasgemisch im Airbag näherungsweise wie ein ideales Gas verhält:

$$p_{\mathrm{Airbag}}(t) = \frac{v_{\mathrm{Airbag}}(t) \cdot R \cdot T}{V_{\mathrm{Airbag}}(t)}$$

Es gilt mit der molekularen Masse $M$: $v_{\mathrm{Airbag}} = m_{\mathrm{Airbag}}/M$ [g/(g/mol)].

Daraus folgt, dass der Airbagdruck durch das Airbagvolumen $V_{\mathrm{Airbag}}$ und der Stoffmenge $v_{\mathrm{Airbag}}$ im Airbag zu beeinflussen ist. Die Stoffmenge ist dabei direkt abhängig von der Gasmasse $m_{\mathrm{Airbag}}$. Nicht adaptiv steuerbare Parameter sind die Gastemperatur $T$ und die allgemeine Gaskonstante $R = 8{,}314\,\mathrm{Pa} \cdot \mathrm{m}^3/\mathrm{mol} \cdot \mathrm{K}$.

Das Airbag- und Gurtsystem kann in seiner Härte demnach prinzipiell durch vier unterschiedliche Steuermaßnahmen variiert werden:

- Massenstrom: Zeitlich variable Zufuhr der Gasmasse zur Befüllung des Airbags: $m_{\mathrm{Airbag}}(t)$,
- Volumen: Zeitliche Variation des Airbag-Volumens: $V_{\mathrm{Airbag}}(t)$,
- Vent: Variation des Gasaustritts durch variable Ausblasöffnungen (Vents): $A_V(t)$,
- Gurtkraft: Variation der Gurtkraft über die Zeit: $F_G(t)$.

Der Vergleich der unterschiedlichen Steuerkonzepte zeigt, dass die Airbag-Ventsteuerung und die Gurtkraftsteuerung am besten den funktionellen Verlauf der Rückhaltewirkung variieren können, um eine Trapezkennung der Insassenverzögerung sicherzustellen. Für die unterschiedlichen Insassen und Unfallschweren lässt sich somit ein minimales Verletzungsniveau der Insassen erzielen [50].

### 9.8.4.3 Insassen- und unfallschwerespezifische Adaptivität

Das Airbagsteuerungskonzept der degressiven Ventsteuerung mit schaltbarem Gurtkraftbegrenzer ermöglicht prinzipiell die geforderte adaptive Anpassung der Rückhaltewirkung durch Bereitstellung unterschiedlicher Airbaghärten in Abhängigkeit der Insassen und Unfallschweren.

Anhand der Einzelbelastungen Kopfbeschleunigung und Brustbeschleunigung zeigt ◘ Abb. 9.33,

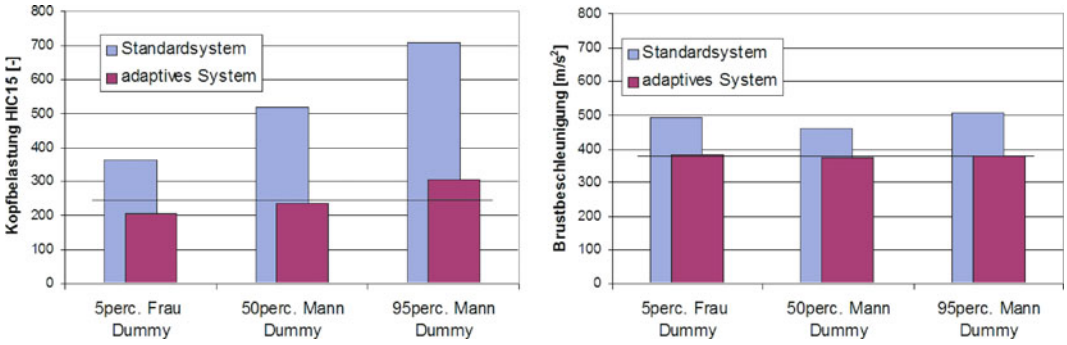



**Abb. 9.33** Simulationstechnischer Vergleich des Standard-Rückhaltesystems mit dem adaptiven Rückhaltesystem im US-NCAP Crashtest [41]

dass mit einer adaptiven Airbag-Ventsteuerung die Gesamtbelastung nicht nur für einen Insassentyp, sondern für die unterschiedlichen Insassen verringert werden kann. Diese sind im Wesentlichen durch die Bandbreite der 5percentile, 50percentile und 95percentile beschrieben.

Darüber hinaus zeigt sich, dass mit der individuellen Rückhaltewirkung die Unterschiede in der Belastung zwischen den unterschiedlichen Insassen geringer werden und es zu einer Annäherung der unterschiedlichen Belastungsniveaus kommt.

Das Airbag-Steuerungskonzept ist insbesondere für einen verbesserten Thoraxschutz geeignet, da die Gurtkraft verringert und gleichzeitig die flächiger wirkende Airbagkraft erhöht werden kann. Die Senkung der Gurtkraft muss dabei allerdings durch einen erhöhten Energieumsatz am Airbag erfolgen. Dies wird mit einem höheren Airbagdruck des anfangs zunächst geschlossenen Vents erreicht. Dabei ist die flächige Verteilung der Airbagkraft auf dem Thorax des Dummy gegenüber dem Gurt um ca. 310 % größer und entspricht im Mittel einer Fläche von ca. 0,11 $m^2$ (Abb. 9.34).

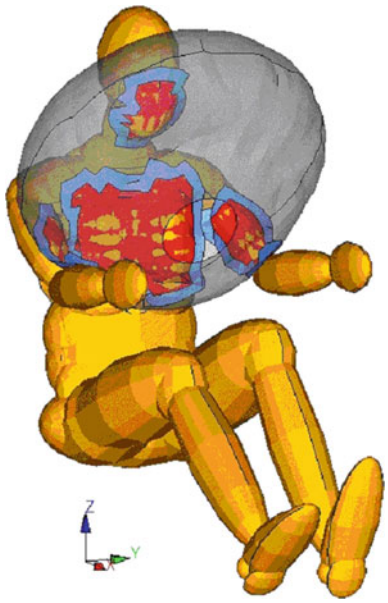



**Abb. 9.34** Flächige Abstützung des Thorax beim adaptiven Airbag [78]

## 9.8.5 Seitenkollisionen

Die Möglichkeiten des Einsatzes besonderer Rückhaltesysteme zum Schutz der Insassen bei seitlichen Kollisionen sind wegen der örtlichen Nähe des Insassen zur Tür begrenzt. Die beeinflussbare Größe ist die Steifigkeit der Karosserie gegen das Eindringen des stoßenden Fahrzeuges, z. B. durch eine kollisionsgerechte Konstruktion des Schwellers oder durch Türbiegeträger und Türverstärkungen in Schulterhöhe. Auch innerhalb der Fahrgastzelle sind Querverstärkungen unter dem Armaturenbrett, Sitzquerträger, Sitzkonstruktion und Querverstärkungen im hinteren Fahrzeugbereich für den Insassenschutz hilfreich.

Die zweite Größe ist die Gestaltung des Fahrzeuginnenraums. Besondere Bedeutung haben die Form und das Material der Tür- und Seitenteil-

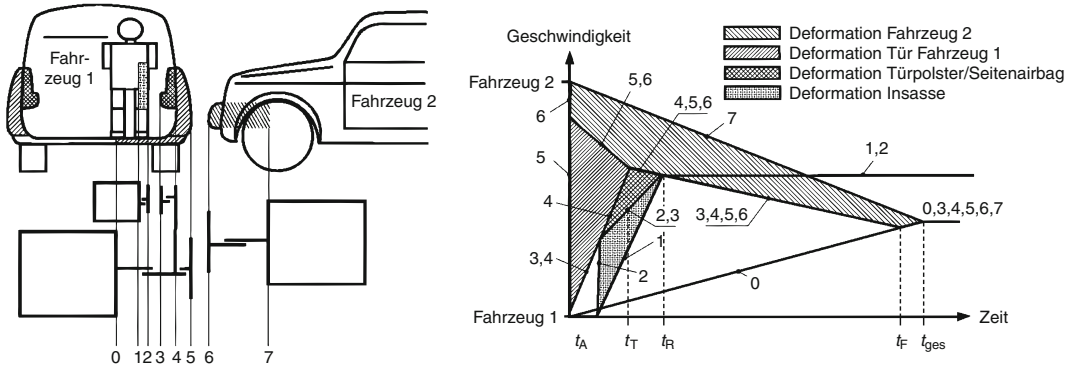



**Abb. 9.35** Schematische Geschwindigkeit-Zeit-Darstellung für Fahrzeugstruktur und Insassen bei einer rechtwinkligen Seitenkollision

verkleidungen. Erste Versuche den Insassen und Sitz vom stoßenden Fahrzeug weg zu bewegen sind erfolgreich verlaufen. Das Airbag-System für die Fahrzeugseite ist abhängig von einem funktionsfähigen Sensorsystem, das so frühzeitig das Eintreten eines schweren Unfalles erkennen muss, dass der Bag gefüllt werden kann, bevor der Kopf des Insassen die Seitenscheibe berührt.

### 9.8.5.1 Theoretische Betrachtung

Im Vergleich zum Frontalaufprall ist beim Seitenaufprall die Variationsbreite des möglichen Unfallvorganges noch größer (z. B. Stoßrichtung, Anstoßpunkt). Außerdem steht den Fahrzeuginsassen nur wenig Deformationsweg zur Verfügung.

Wesentliche Faktoren sind: Beteiligte Kollisionspartner (Masse, Struktursteifigkeit, Strukturgeometrie), Aufprallort und -winkel, Aufprallgeschwindigkeiten und Insassenplatzierung, Fahrzeuginnenraumgestaltung, Benutzung von Rückhaltesystemen.

In Abb. 9.35 wird der Fahrzeug-Fahrzeug-Seitenaufprall prinzipiell erklärt. Dargestellt sind das stoßende und das gestoßene Fahrzeug mit einem Insassen an der Stoßseite, das abgeleitete mechanische Ersatzmodell und der vereinfachte Bewegungsablauf des Stoßvorganges am Beispiel eines Geschwindigkeits-Zeit-Diagrammes. Die Ziffern 1 bis 7 kennzeichnen die Geschwindigkeit-Zeit-Verläufe der fahrzeugbezogenen indizierten Bauteile und des Insassen. Die von diesen „Geschwindigkeitsbahnen" eingegrenzten Flächen entsprechen den Relativwegen (Deformationswegen) zwischen den indizierten Bauteilen bzw. zwischen den Bauteilen und den Insassen.

Die Kraft-Weg-Kennungen der Strukturen und des seitlichen Rückhaltesystems (Polster) werden zwecks einfacher Darstellung als rechteckförmig angenommen. Schwingungen des mechanischen Ersatzsystems werden nicht berücksichtigt. Die daraus resultierenden Funktionen $a = f(t)$ und $s = f(t)$ weichen damit von denen eines realen Unfalles ab. Aufgrund dieser Randbedingungen und des Einmassen-Insassen-Systems ist nur ein qualitativer Vergleich des im Folgenden diskutierten Kollisionsmodells mit den realen Gegebenheiten möglich. Das stoßende Fahrzeug fährt mit der Geschwindigkeit $v_{st}$ unter 90° in die Seite eines stehenden Fahrzeuges. Die Türaußenseite 5 hat nach kurzer Zeit die gleiche Geschwindigkeit wie der Stoßfänger 6. Die Türinnenseite 3 hat bei $t_T$ die gleiche Geschwindigkeit wie der Stoßfänger. Der Kontakt zwischen Insasse und Rückhaltesystem 3 beginnt zum Zeitpunkt $t_A$. Bei $t_T$ ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Insassen und Tür am größten. Sie ist größer als die Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Fahrzeuges. Der Insasse wird vom Polster verzögert. Der Deformationsweg ist $S_R$. Insasse 1 und Stoßfänger 6 haben bei $t_R$ die gleiche Geschwindigkeit. Bis $t_{ges}$ werden Insasse und Stoßfänger gleichzeitig verzögert. Die Deformation der Seitenstruktur ist bei $t_F$ beendet (Sitze gehen z. B. auf Block, d. h. es steht kein weiterer Deformationsweg mehr zur Verfügung). Die Frontstruktur des stoßenden Fahrzeuges hat sich um $s_F$ deformiert. Die Deformation der Seitenstruktur wird durch die Relativbewegung



**Abb. 9.36** Kopf-Airbag beim Seitenaufprall [58]

der Tür 3 zu einem unverformten Punkt des Fahrzeuges bestimmt.

#### 9.8.5.2 In den USA und Europa definierte Seitenaufpralltests

Für die Simulation der dynamischen Fahrzeug-Fahrzeug Kollision setzt in den USA stufenweise der neue Barrieretest ein. Die Bedingungen sind wie folgt:

**Barriere** – 1368 kg Masse, 279 mm Bodenfreiheit, Barrierefront 1676 mm Breite,

**Aufprallgeschwindigkeit** – 54 km/h,

**Aufprallrichtung** – seitlich 90° mit 27° Krebsgang,

**Versuchspuppen** – ES-2re vorn/SID-$II_s$ hinten, Stoßseite,

**Kriterien** – $SID\,II_s \cdot HiC_{36} < 1000$ [–], Beschleunigung lower Spine $< 82g$, Beckenkraft < 5,525 kN,
ES-2re: $HIC_{36} < 1000$ [–], Brusteindrückung < 44 mm, Abdomenkraft < 2,5 kN, PSPF < 6 kN

Für Europa gelten die Bedingungen ECE R95 und 96/27/EG

**Barriere** – 950 kg Masse, 300 mm Bodenfreiheit, Barrierefront 800 mm hoch, 1500 mm breit,

**Aufprallgeschwindigkeit** – 50 km/h,

**Versuchspuppe** – ES-2 vorn,

**Kriterien** – HPC < 1000, Viscosekriterium < 1 m/sec, Brusteindrückung < 42 mm, Abdomenkraft < 2,5 kN, PSPF < 6 kN

Leider wirken die länderspezifischen Verfahren sich auch unterschiedlich bezüglich der Seitenschutzmaßnahmen aus. Zunächst wurde der Schutz bei seitlicher Kollision durch das Fahrzeug selbst (widerstandsfähige Karosse und energieabsorbierender Innenraum) erzielt. Nach Einsatz eines Brust-Airbag, der aus der Sitzlehne oder Armbrüstung kommt, werden immer mehr Oberkörper- und Kopfairbags, wie Abb. 9.36 zeigt, eingesetzt [58]. Das Bild zeigt den „Fenster-Airbag", welcher in diesem Fall 2 m lang, 250 mm breit und 60 mm dick ist. Mit 9 Kammern hat er ein Volumen von 12 l. Innerhalb von 25 ms ist er „aufgeblasen". Wegen der schnellen Zeitabläufe im Seitencrash werden an die Crashsensorik erhöhte Anforderungen gestellt. Aufgrund der amerikanischen Forderung des „containment test" ist der Kopfairbag zurzeit in intensiver Weiterentwicklung. Dies gilt auch für die Kompatibilität der Kollisionspartner im Seitencrash.

### 9.8.6 Kompatibilität

#### 9.8.6.1 Allgemeine Aussage

Unter dem Begriff Kompatibilität versteht man die Verträglichkeit von Verkehrsteilnehmern im Fall ei-

ner Kollision miteinander. Erste wissenschaftliche Arbeiten wurden zu diesem Thema zu Beginn der 70er Jahre [59–61] durchgeführt.

Im Unfallgeschehen des Straßenverkehrs sind besonders folgende Teilnehmergruppen zu berücksichtigen: Fußgänger, Zweiradfahrer, Pkw-, Lkw- und Businsassen. Verletzungen können bei Unfällen mit anderen Kollisionspartnern oder beim Alleinunfall auftreten. Bei Kompatibilitätsuntersuchungen hat sich gezeigt, dass ein globaler Ansatz, der alle Kollisionsgruppen einschließt, außerordentlich komplex ist und die Lösungsmöglichkeiten sehr erschwert. Für die Auslegung von Fahrzeugen gehen unter Kompatibilitätsaspekten folgende Kriterien in den Kollisionsablauf ein:

- Massenverhältnis, Geometrie der Fahrzeugstruktur, Kraft-Weg-Kennung der Fahrzeugstruktur, Anordnung und Masse der Antriebsaggregate,
- Rückhaltesysteme, Geometrie der Fahrgastzelle (Überlebensraum),
- Verhalten von Lenkung, Armaturenbrett, Aufpolsterung usw.

Bei Kompatibilitätsbetrachtungen muss die Verringerung der Unfallfolgekosten, allen daraus relevanten Folgen, wie evtl. verringerter Komfort, erhöhter Energie- und Rohstoffverbrauch und die Herstellkosten, gegenübergestellt werden. Allerdings wird von den heutigen Fahrzeugbesitzern vorausgesetzt, dass der Selbstschutz, d. h. der Schutz als Insasse im eigenen Fahrzeug, nicht verringert wird. Neben der Beschreibung der Unfallart muss daher auch eine Information über die Verletzungsart und -schwere vorliegen. Zwischen der Verletzungsschwere, die nach der „AIS"-Skala eingestuft wird und dem Verletzungskriterium, das mittels Versuchspuppe gemessen und berechnet wird, muss eine Beziehung gefunden werden, um die jeweilige Maßnahme bewerten zu können.

Für verschiedene Masseklassen und Rückhaltesysteme können die Kraft-Deformations-Kennlinien so verändert werden, dass ein Minimum der Gesamtkosten (Unfallfolgekosten, Herstell- und Betriebskosten) erreicht wird. Kennt man

- das Unfallgeschehen in Korrelation zur „AIS"-Verletzungsschwere,
- die Korrelation der „AIS"-Insassenverletzung zu den Messdaten der Versuchspuppe,
- die finanzielle Bewertung der Insassenverletzung und der durch den Konstruktionsaufwand entstehenden Kosten,

so kann man Fahrzeuge und Rückhaltesysteme im Hinblick auf minimale Gesamtkosten optimieren [62].

#### 9.8.6.2 PKW/PKW-Kollision

In den letzten Jahren haben sich Wissenschaftler und Automobilunternehmen [63] wieder verstärkt diesem Thema gewidmet. Neuere Untersuchungen [64] bestätigen die Notwendigkeit der mathematischen Versuchspuppenmodelle um eine präzisere Aussage über das Kompatibilitätsverhalten von Fahrzeugen zu definieren. Örtliche Kraftspitzen bedeuten automatisch ein reduziertes Kompatibilitätsverhalten. Man kann daher mit FEM-Modellen und/oder der Kraftmessung beim Frontalaufprall die Kraftverteilungsgüte als ein Maß für die Kompatibilität einsetzen. Besonders das erarbeitete „bulk head concept" ist eine interessante Lösung [65]. Bei diesem Konzept wird davon ausgegangen, dass bei genügender Steifigkeit der Fahrgastzelle die Möglichkeiten der heutigen Rückhaltesysteme ausreichen, um eine Überlebenschance auch bei sehr schweren Fahrzeug-/Fahrzeugunfällen zu gewährleisten. Nach mehr als 30 Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden die gesetzlichen Anforderungen speziell in den USA konkreter. Die von IIHS definierte Barriere von 1500 kg mit dem hochgesetzten Deformationselement fährt mit 50 km/h unter 90° in die Seite des zu prüfenden Fahrzeuges. Für die Front zu Front Kompatibilität werden geometrische Forderungen an die absorbierende Struktur gestellt. Hier ist besonders der „small overlap crashtest" der IIHS zu beachten, welcher ein Teil des US NCAP-Tests ist. Der Small-Overlap-Simulationstest wurde durch das IIHS (Insurance Institute for Highway Safety, USA) wurde ein Frontaltest entwickelt, bei dem das zu prüfende Fahrzeug




**Abb. 9.37** Small-Overlap-Unfall eines Volkswagen Käfer Typ 1 gegen Fiat 1500 Mitte der 70 Jahre [83]

mit 64 km/h und einer 50 %-Mann-Hybrid III-Versuchspuppe auf den Fahrersitz gegen eine Barriere mit geringer Überlappung fährt. Der Grund für die Entwicklung und Einführung dieses Tests waren die Ergebnisse der Unfallanalyse, speziell in den USA [83].

Auch die Begrenzung der Deformationskraft und eine Höhengewichtung sind in Diskussion [66, 67]. Diese Anforderungen schließen „Light Duty Trucks" und SUV D Sport Utility Vehicles" mit ein. Erste positive Ergebnisse durch geometrische Optimierungen sind bereits erkennbar [88].

### 9.8.6.3 Pkw/Lkw-Kollision

Ein besonderes Kompatibilitätsproblem ist die Kollision zwischen einem Lkw und einem Pkw, da nicht nur das Massenverhältnis, sondern vor allen Dingen die geometrischen Verhältnisse kritisch sind. Auch in den USA wird die Inkompatibilität zwischen den „light duty trucks" und den Pkw als sehr bedenklich eingestuft. Für den Lkw-Bereich wird in [68] eine zukunftsweisende Lösung aufgezeigt: der Plankenrahmen, der den gesamten Lkw und Hänger umgibt und somit ein Unterfahren verhindert.

### 9.8.6.4 Fußgängerkollision

Eine weitere Inkompatibilität ist bei der Kollision von Fußgängern und Pkws vorhanden. Sowohl die Massenverhältnisse als auch die unterschiedlichen Körpergrößen und Widerstandsfähigkeit der Fußgänger lassen nur geringen Spielraum für eine Verbesserung der Situation. Allgemein gilt, dass folgende Maßnahmen positiv sind:

- die reduzierte Wartezeit an Lichtsignalanlagen $< 40$ s,
- die geometrische Gestaltung von Fußgängerüberwegen, die automatisch den Blick der Fußgänger in Richtung ankommenden Verkehr wenden,
- die getrennte Signalisierung von Abbiegern und Fußgängern,
- das Bewusstsein wecken beim Kraftfahrer für den Geschwindigkeitseinfluss beim Bremsen,
- Verkehrserziehung insbesondere Kindergarten/Schule, Erscheinungsbild, Aufmerksam machen auf die Gefahrensituation: Abbiegen.

In zahlreichen Staaten hat der Fußgängerschutz eine hohe Priorität. So hat Europa in das Gesetz zum Fußgängerschutz (EG 78/2009) auch unfallvorbeugende Elemente wie dem Bremsassistenten mit aufgenommen [69].

Einen weiteren wichtigen Schub hat der Fußgängerschutz dadurch erreicht, dass er nun fester Bestandteil der EuroNCAP-Beurteilung (www.euroncap.com) ist. Neben der nationalen Gesetzgebung gibt es auch im Rahmen der Global Technical Regulation eine weitere Möglichkeit der Vereinheitlichung der nationalen Gesetzgebung (Abb. 9.38).

Die Anzahl der Komponenten für den Fußgängerschutz im Vorderbereich umfasst zahlreiche Bauteile: Stoßfänger, Spoiler, Kühler, Scheinwerfer und Frontend, Fronthaube samt Verriegelung und Scharnieren, Kotflügel, A-Säulen und Windschutzscheibe, Scheibenwischerachsen sowie die Bauteile im Motorraum direkt unter der Frontklappe. Bei einer aktiven Haubenverstellung, um den notwendigen Freiraum für die Energieabsorption des Kopfaufschlags zu erreichen, benötigt man zusätzlich eine entsprechende Sensorik. Inzwischen haben auch die ersten Fußgängerschutzsysteme bei mehreren Automobilfirmen eingesetzt, die den Fußgänger mit Hilfe von Umfeldsensoren erkennen und bei Nichtreaktion des Fahrers automatisch eine Bremsung einleiten.

### 9.8.6.5 Zusammenfassung

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Fahrerassistenz und des automatisierten Fahrens werden die

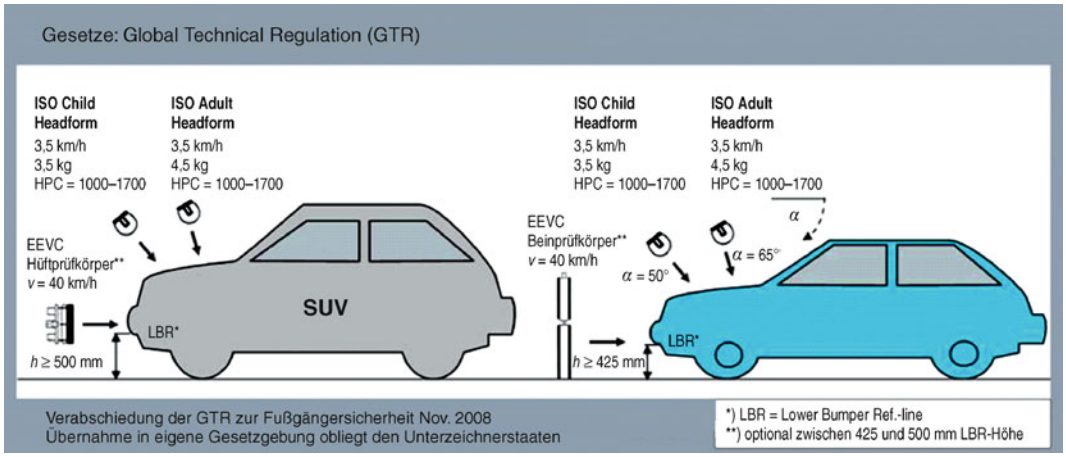



**Abb. 9.38** Gesetzgebung Fußgängerschutz

9

Kollisionen zwischen unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern weiter reduzieren und auf jeden Fall deren Schwere verringern.

## 9.9 Integrale Sicherheit

In der Vergangenheit wurde die Sicherheit in zwei wesentlichen Bereichen weitgehend unabhängig voneinander mit Erfolg weiterentwickelt. Durch die Integration der aktiven und passiven Sicherheit zur Integralen Sicherheit lassen sich zukünftig weitere Potenziale zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit erzielen, Abb. 9.39 [70, 71].

Durch die Vernetzung der Systeme der unterschiedlichen Systemebenen ergeben sich neue Funktionsausprägungen, die bestehende Systeme adaptiv verbessern und ganz neue Systeme ermöglichen. Durch die Vernetzung können unter Nutzung einer gemeinsamen Sensorik unterschiedliche Systeme wirtschaftlicher dargestellt werden. Im Ergebnis steigt damit die Funktionsgüte und Verfügbarkeit der Systeme. Abb. 9.40 zeigt die Teilbereiche der Integralen Sicherheit. Die Einordnung erfolgt über die zeitliche Abfolge der Funktionen vom Beginn des Systemeingriffs bis zum Crash und der anschließenden Unterstützung bei der Rettung. Dies stellt die Reihenfolge eines typischen Unfallablaufs dar. Das Ziel muss sein, zunächst über die Warnung (visuell, haptisch, auditiv) den Fahrer zu einer Handlung zu bringen, damit der Unfall noch vermieden werden kann. Der Fahrer ist dabei mit seiner Erfahrung und visuellen Fähigkeiten und der Interpretation der Situation heutiger Sensorik noch in vielen Situationen überlegen. Damit werden Fehlauslösungen und mögliche Produkthaftungen vermieden. Bei einer Nichtreaktion des Fahrers erfolgt ein fahrzeugseitiger Eingriff durch Bremsen und ggf. Lenken. Im Zeitbereich kurz vor der Kollision, bei dem der Unfall nicht mehr vermeidbar ist, greifen zusätzlich PreCrash-Maßnahmen. Der systemseitige Eingriff

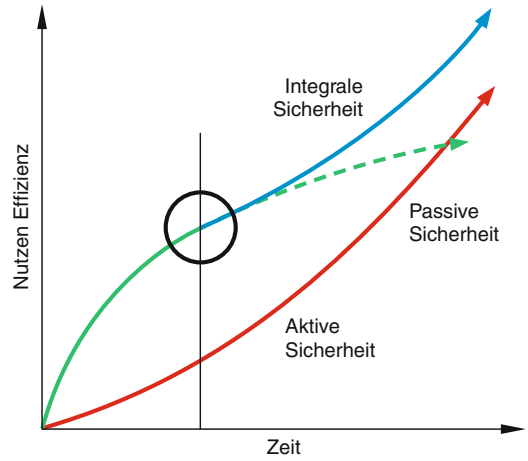



**Abb. 9.39** Potenzial der Integralen Sicherheit

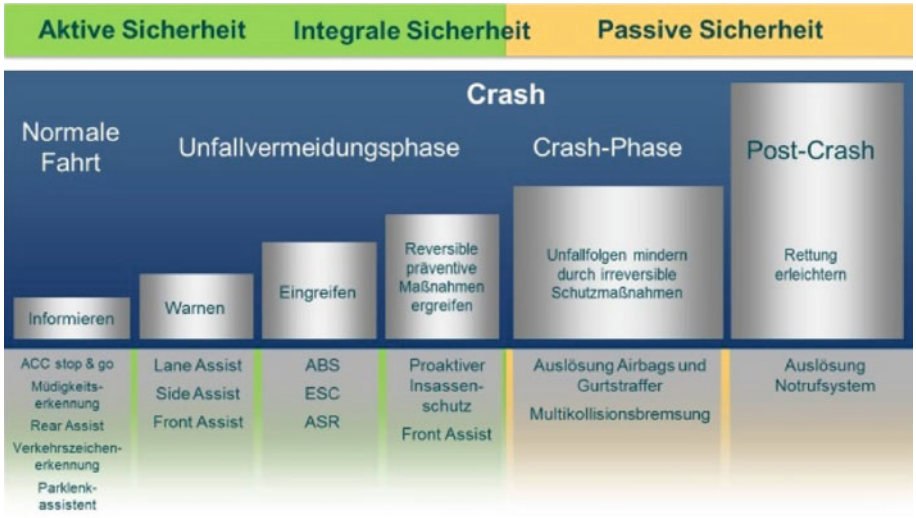



**Abb. 9.40** Teilbereiche der Integralen Sicherheit [91]

erfordert hohe Auslösegüten bei einem sehr geringen Grad an möglichen Fehlinterpretationen [72, 73].

Die Integration der unterschiedlichen Systeme zu einem Gesamtsystem mit unterschiedlichen Eskalationsstufen wird in ► Abschn. 9.9.3 beispielhaft anhand des integralen Fußgängerschutzes dargestellt. Zukünftig wird der ganzheitliche Ansatz von Sicherheitsfunktionen über den gesamten Unfallablauf notwendig, um die unterschiedlichen Einzelfunktionen über einen Entscheider in einer Gesamtfunktion darstellen zu können.

## 9.9.1 Fahrer, Fahrzeug und Umfeld

Zur Erkennung von kritischen Fahrsituationen werden unterschiedliche Informationen vom Fahrzeug und dem Umfeld benötigt. Fahrzeuginterne Informationen wie z.B. Eigengeschwindigkeit, oder fahrdynamische Informationen wie Querbeschleunigung, ESC- und ABS-Einsatz können direkt vom Bussystem (Can, Flexray) entnommen werden. Fahrzeugintegrierte Umfeldsensorik bietet die Möglichkeit Informationen über das Umfeld zu erhalten. Darin können andere bewegte Objekte, aber auch statische Hindernisse und die Seitenraumgestaltung detektiert werden.

Darüber hinaus benötigt die Auslegung des HMI des Systems zunehmend die Berücksichtigung des Fahrers. Dabei ist insbesondere das funktionelle Design zwischen System und Fahrer (HMI) auszulegen, damit der Fahrer die Funktion und die Systembedienung intuitiv versteht. Mit der Fahrermodellierung (Leistungsfähigkeit, Fahrertyp, Risikobereitschaft, aktuelle Verfassung) ist ein Systemeingriff adaptiv auf den Fahrer abstimmbar. Damit steigt prinzipiell die Akzeptanz des Fahrerassistenz- und Sicherheitssystems.

Jeder der oben erwähnten Bereiche stellt unterschiedliche Möglichkeiten der Modellierung des Fahrers dar. Die Leistungsfähigkeit beschreibt das aktuelle Leistungsvermögen des Fahrers. Geringes Leistungsvermögen bedeutet, dass der Fahrer nicht in der Lage ist, gefährliche Situationen zu erkennen oder rechtzeitig bzw. richtig darauf zu reagieren, z. B. auf Grund von Müdigkeit oder Ablenkung. Die Prädiktion von Fahrmanövern liefert eine Aussage über die aktuelle Verfassung des Fahrers. Wenn aktuell gefahrene Fahrmanöver nicht in der bekannten Form durchgeführt werden, können möglicherweise Rückschlüsse auf Stress oder aggressives Fahrverhalten gezogen werden. Der Fahrertyp beschreibt die Grenzen, innerhalb derer sich der Fahrer sicher fühlt und sein Fahrzeug und die Fahrsituation unter Kontrolle hat. Unter

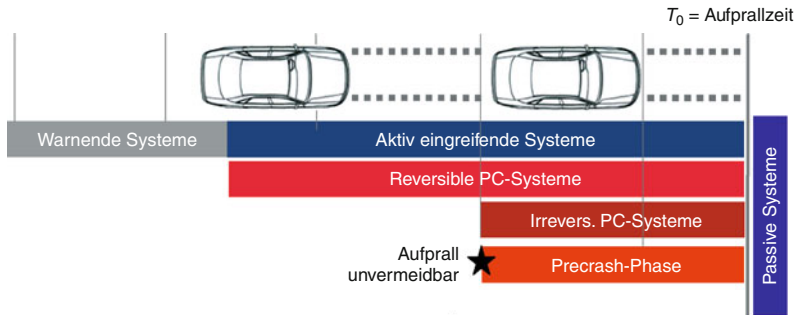



**Abb. 9.41** Definition der PreCash-Phase [74]

Risikobereitschaft wird verstanden, wie stark der Fahrer durch sein Fahrverhalten sich und seine Umwelt gefährdet. Diese unterschiedlichen Modelle des Fahrers können unterschiedliche Aspekte von Assistenz- und Sicherheitssystemen verbessern.

Grundlage eines systemseitigen Eingriffs ist die Bestimmung der Gefährlichkeit der aktuellen Fahrsituation. Diese wird üblicherweise aus dem Zustand des eigenen Fahrzeugs und dem anderer Verkehrsteilnehmer ermittelt, die mit Hilfe von Sensoren erfasst werden können. Für eine hinreichend genaue Umfeldwahrnehmung und deren Interpretation mit dem eigenen Fahrzeug ist eine präzise Bestimmung verschiedener Größen während der Fahrt zwingend erforderlich. Aus diesem Grund liefern intelligente Sensoren zyklisch ihre Daten auf dem Bussystem. Insbesondere die Messung von fahrwerkrelevanten Signalen wird von vielen Teilfunktionen benötigt. So werden die Geschwindigkeit, die Gierrate oder auch die Nick- und Wankbewegung mit hoher Auflösung und Updaterate ermittelt. Sowohl die Komponenten der Umfeldwahrnehmung als auch die Module, die die Prädiktion kritischer Situationen umsetzen, benötigen diese Daten um ein für vorausschauende Sicherheitsfunktionen notwendiges Abbild der Situation zu bestimmen. Es können jedoch zusätzliche Informationen hinzugezogen werden, wie beispielweise Kartendaten und Erkenntnisse aus der Fahrermodellierung. Je komplexer sich eine Situation darstellt, umso mehr Informationen werden für einen sicheren Eingriff benötigt.

## 9.9.2 PreCrash

Da den aktuellen Sicherheitssystemen aus technischen Gründen nicht immer und überall alle relevanten Informationen zur Verfügung stehen, erfolgt ein Eingriff erst nach einer sicher prädizierten Kollision. Erst in diesem Zeitraum ist eine Kollision unabhängig von der Fahrsituation durch den Fahrer nicht mehr vermeidbar. Dieser Zeitbereich vor der Kollision wird als PreCrash-Phase beschrieben (vgl. Abb. 9.41).

Die Auswertung des Unfallgeschehens zeigt, dass eine fahrdynamische Unvermeidbarkeit erst sehr kurz vor der Kollision erreicht wird. Damit verbleiben in der PreCrash-Phase nur wenige hundert Millisekunden bis zum Zeitpunkt der Kollision (Abb. 9.42). Dieser Zeitbereich könnte genutzt werden, um die Kollisionsgeschwindigkeit durch Bremseingriffe zu verringern, Rückhaltesysteme zu adaptieren oder die Insassen frühzeitig anzukoppeln. Zukünftige PreCrash-Systeme könnten mit zusätzlichen Informationen aus der Umfeld- und Fahrermodellierung tendenziell früher eingreifen ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen.

Außerdem ist eine sehr hohe Präzision in der Objektrepräsentation gefordert. Systemseitig wird eine möglichst frühe Erstdetektion, eine stabile Zielverfolgung und geringe Prädiktionsdauer gefordert. Für die bei einer PreCrash-Funktion verwendeten Aktoren sollte die Aktivierungszeit kleiner sein als die bis zum Crash prädizierte verbleibende Zeit, um einen optimalen Schutz für die Insassen zu erreichen.

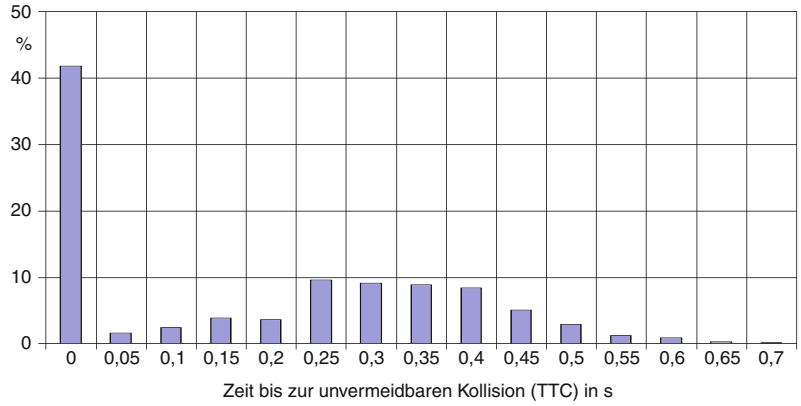



**Abb. 9.42** Zeitbereiche der fahrdynamischen Unvermeidbarkeit bei Pkw-Frontalunfällen [75]

### 9.9.2.1 Automatischer Bremseingriff

Aus der GIDAS Unfalldatenbank wird ersichtlich, dass nur etwas mehr als die Hälfte der Pkw-Fahrer bei Frontalunfällen (zumeist noch zu schwach) bremsen. In diesen Fällen unterstützt der Bremsassistent. In den verbleibenden Unfällen, in dem der Fahrer keine Reaktion zeigt, verbleiben aufgrund des Unvermeidbarkeitsansatzes nur wenige hundert Millisekunden Eingriffszeit bis zum Zeitpunkt der Kollision (Abb. 9.41). Einige dieser Unfälle können teilweise mit einer automatischen Notbremse auf ESC-Basis angesprochen werden (vgl. ► Kap. 7).

Aufgrund der Ansprechzeit der ESC-Einheit ist der Bremsdruckaufbau bis zum Vollbremsdruck mit bis zu 0,6 s allerdings zu langsam, so dass in der PreCrash-Phase schnelle Bremsaktoren erforderlich werden. Zukünftige schnelle elektrische oder pyrotechnische Bremsaktoren können dabei Bremsgradienten von bis zu 1000 bar in der Sekunde realisieren (Abb. 9.43). Damit können in einer Notsituation innerhalb 100 bis 300 ms vor dem Crash-Geschwindigkeiten von 3 bis zu 8 km/h abgebaut werden, um die Unfallschwere zu verringern.

Der schnelle Bremsdruckanstieg ist besonders in Fahrsituationen von Vorteil, wo eine schnelle Zielerkennung und -verfolgung durch die Sensoren erforderlich sind, wie z. B. beim Ein- und Abbiegen, in Kreuzungsbereichen sowie beim Überschreiten

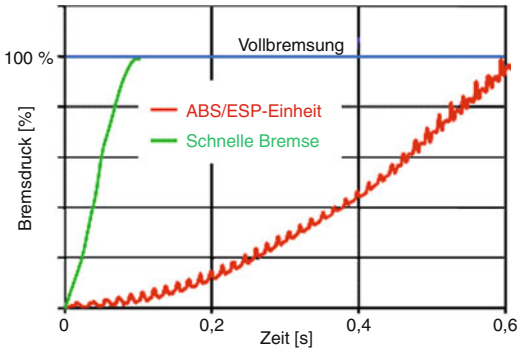



**Abb. 9.43** Schnelle Bremsaktoren können Bremsgradienten von bis zu 1000 bar in der Sekunde realisieren

der Fahrbahn von Fußgängern oder Radfahren (Abb. 9.44). Für die Auslösung einer schnellen Bremse, ist es erforderlich eine sichere Funktionalität des Systems zu gewährleisten. Die Erfüllung des gleichzeitigen Anspruchs einer sehr hohen Auslösegüte und einer sehr geringen Falschalarmwahrscheinlichkeit stellt eine große Herausforderung dar.

### 9.9.2.2 Präventiv wirkender Insassenschutz

Reversible Rückhaltesysteme werden vor einer möglichen Kollision ausgelöst um die Fahrzeuginsassen schon vor einer möglichen Kollision optimal

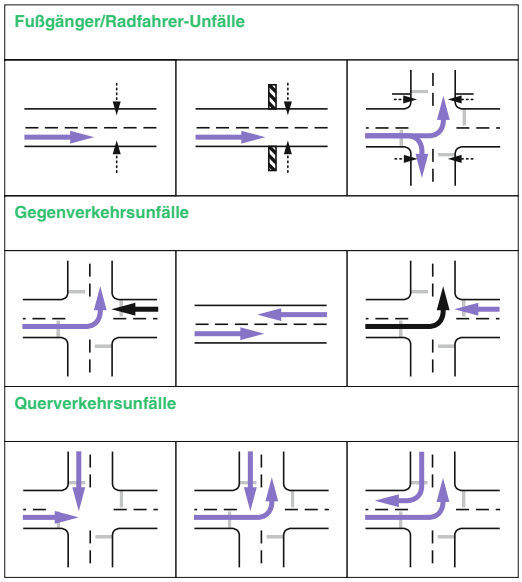



**Abb. 9.44** Beispiele typischer Situationen für den Einsatz einer schnellen Bremsaktuatorik



**Abb. 9.45** Präventiv wirkender Insassenschutz [76]

vorzubereiten. Das präventiv wirkende Insassenschutzsystem erhöht dabei das bereits hohe, passive Schutzpotenzial nochmals.

Erkennt das System eine potenzielle Unfallsituation, erfolgt eine elektrische Straffung der Sicherheitsgurte. Dadurch wird die vorhandene Gurtlose aus dem Gurtsystem entfernt und der Fahrer und Beifahrer wird optimal im Sitz fixiert, um so das optimale Schutzpotenzial durch das Airbag- und Gurtsystem zu erreichen. Bei hoher Querdynamik werden zusätzlich die Seitenscheiben und das Schiebedach bis auf einen Restspalt geschlossen. Durch das Schließen der Scheiben können sich die Kopf-/Seitenairbags optimal abstützen sowie die Gefahr des Herauspendelns von Körperteilen reduzieren.

Wesentliches Merkmal des Insassenschutzsystems ist die Verbindung von aktiven und passiven Sicherheitselementen. Die technische Basis bilden dabei die Sensoren der fahrdynamischen Regelsysteme (zum Beispiel Bremsassistent und ESC). Sie helfen kritische Situationen mit erhöhtem Unfallpotenzial frühzeitig zu erkennen und zu entschärfen. Die Aktivierung des Systems erfolgt bei einer Not- oder Gefahrenbremsungen mit sehr schneller Bremspedalbetätigung, die in der Regel einhergeht mit einer Aktivierung des Bremsassistenten, oder bei starkem Unter- oder Übersteuern mit ESC-Eingriff.

Einem integralen Sicherheitsansatz folgend, ist das präventiv wirkende Insassenschutzsystem mit der Umfeld-Sensorik der Automatischen Distanzregelung (ACC) zu einem gemeinsamen System verbunden. Basierend auf Radar-Sensorik und Kameratechnik, die weit vorausschaut und die Umgebung des Fahrzeugs überwacht, kann der Fahrer bei einem drohenden Auffahrunfall gewarnt und durch Bremseingriffe bis hin zur autonomen Notbremsung unterstützt werden. Insbesondere in Verbindung mit einem Notbremssystem verringert der Einsatz des reversiblen Gurtstraffers die Vorverlagerung der Insassen wirkungsvoll.

### 9.9.2.3 Irreversible Rückhaltesysteme

Für den Fall einer PreCrash Auslösung des Rückhaltesystems ergeben sich vor allem neue Möglichkeiten bei der Auslegung der Airbags im Vergleich zu den heutigen Standardairbags. Eine PreCrash Auslösung des Airbags vor einer Kollision ermöglicht eine Verbesserung der Anpassung des Airbags an den zeitlichen Verlauf der Insassenkinematik.

Bei entsprechender Auslegung ist der Airbag bereits zu dem Zeitpunkt voll befüllt, wenn die Vorverlagerung des Insassen beginnt. Durch die längere Aufblaszeit des Airbags kann außerdem das Volumen des PreCrash Airbags gegenüber dem Standardairbag vergrößert werden. Für den Insassen ergeben sich damit folgende Vorteile:

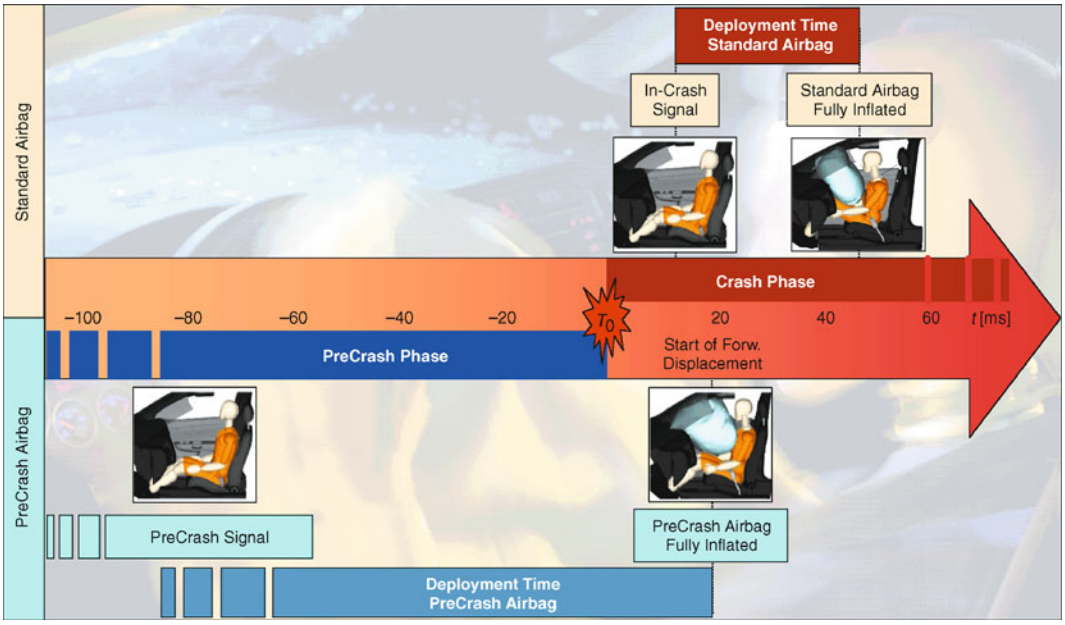



**Abb. 9.46** Phasen des Standard- und PreCrash-Airbags [74]

- frühes Ankoppeln an den Airbag und damit frühzeitige Teilnahme an der Fahrzeugverzögerung (insbesondere ohne Gurt),
- Verlagerung der Rückhaltewirkung vom Gurt auf den Airbag (großflächige Abstützung),
- Fixierung des Insassen im Sitz wird durch den größeren Airbag verbessert,
- verbesserte Performance beim Schrägaufprall durch größeren Abdeckbereich des Airbags,
- reduzierte Aggressivität des Airbags durch längere Aufblaszeit,
- evtl. ist ein sanftes Zurückdrücken eines nach vorn gebeugten Insassen möglich.

Die durch die längere Aufblaszeit reduzierte Airbagaggressivität wird auch zur Erfüllung der Out-of-Position-Anforderungen mit dem größeren PreCrash Airbag benötigt. Zur Umsetzung der verbesserten Ankopplung des Insassen an den Airbag kann das Volumen des Standardairbags um circa 30 % erhöht werden, Abb. 9.47 [74].

Da aus heutiger Sicht eine PreCrash Sensorik noch keine ausreichende Detektionsrate hat, muss im Konzept eines irreversiblen PreCrash Rückhaltesystems die Möglichkeit einer In-Crash-Auslösung




**Abb. 9.47** Volumen Standard und PreCrash-Airbag [74]

als Rückfallebene vorgehalten werden. Der PreCrash Airbag besteht daher aus einem Bi-Volume Bag. Das Entfaltungsverhalten des Luftsackes kann dann über zwei Fangbänder im Bag gesteuert werden.

Eine Abschätzung des Wirkfeldes eines PreCrash Rückhaltesystems für Fahrer und Beifahrer ergibt unter der Einbeziehung der Tatsache, dass nicht alle Unfallkonstellationen ausreichend sicher

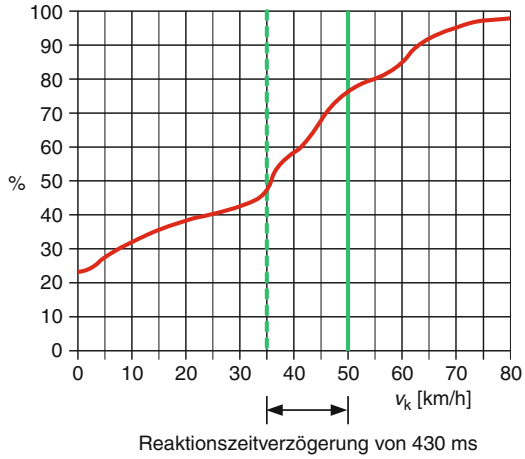



**Abb. 9.48** Fußgänger Verletzungsrisikofunktion MAIS2+ mit Pkw sowie kleine Nutzfahrzeuge als Kollisionsgegner

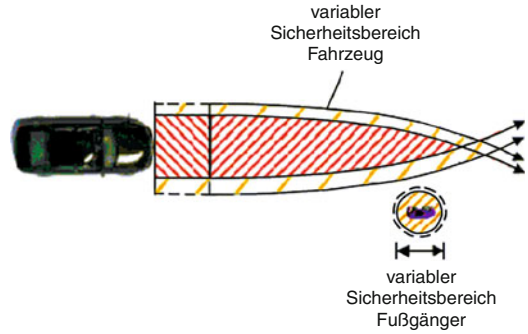



**Abb. 9.49** Bewegungsbereich für Algorithmus mit variablem Sicherheitsbereich

9

detektiert werden können, einen für 1:3 aller Pkw-Insassen möglichen Nutzen.

## 9.9.3 Integraler Fußgängerschutz

Die Motivation für einen integralen Fußgängerschutz ergibt sich aus dem hohen Anteil getöteter und schwerverletzter Fußgänger, die im Straßenverkehr zu beklagen sind (Deutschland 2014: 523 getötete Fußgänger [9]). Die Ursachen der tödlichen Unfälle sind in über 80 % der Fälle Fehleinschätzung der Fußgänger und eine zu späte Reaktion der Fahrzeugführer.

Passive Fußgängerschutzmaßnahmen tragen zu einer Verringerung der Verletzungen der Fußgänger beim Anprall bei. Die Maßnahmen sind im Frontbereich des Fahrzeugs untergebracht (z. B. Fußgängerschutz-Schaum im Frontbereich und deformierbare Hauben). Passive Maßnahmen sind allerdings begrenzt. Ein nicht unerhebliches Verletzungsrisiko, insbesondere für Kopfverletzungen, entsteht durch den sekundären Aufprall des Fußgängers auf der Straßenoberfläche. Das zukünftige Ziel die Kollisionsgeschwindigkeit durch aktive Bremsung des Fahrzeugs nennenswert zu verringern, verspricht daher ein größeres Potenzial (Abb. 9.48).

Aufgrund der möglichen Fußgängerbewegung sind Unfälle zwischen Fahrzeugen und Fußgängern durch einfaches Stehenbleiben der Fußgänger bis kurz vor der Kollision noch vermeidbar. Dadurch ergeben sich die Anforderungen an schnell eingreifende Systeme.

Eine Vorausschau einer Fußgängerbewegung ist komplex. Während Fahrzeuge durch die höhere Geschwindigkeit, ihre hohe Masse und die geringe Aufstandsfläche in ihrer weiteren Bewegung träge und damit gut physikalisch beschreibbar sind, sind Bewegungen von Fußgänger deutlich dynamischer. Daher ist ein spezieller Fußgänger-Algorithmus mit variablem Sicherheitsbereich erforderlich, der die Bewegung des Fußgängers abbildet, Abb. 9.49.

Aufgrund der hohen Dynamik des Fußgängers ist eine Unfallvermeidung durch den Einsatz von eingreifenden Systemen im Bereich der Unvermeidbarkeit (wie z. B. eine Notbremse) nicht immer möglich. Daher ist ein integrales Fußgängerschutzkonzept erforderlich, das den Fahrer in kritischen Situationen informierend und warnend unterstützt und erst nachgeschaltet durch eine automatische Bremse eingreift (Abb. 9.50).

Die Integration der unterschiedlichen Systeme zu einem Gesamtsystem mit unterschiedlichen Eskalationsstufen wird zukünftig über den gesamten Unfallablauf notwendig. Die unterschiedlichen Einzelfunktionen werden dabei über einen Entscheider in eine Gesamtfunktion überführt. So kann dem Fahrer zunächst eine richtungsbezogene Information auf die Fußgänger gegeben werden, die sich im

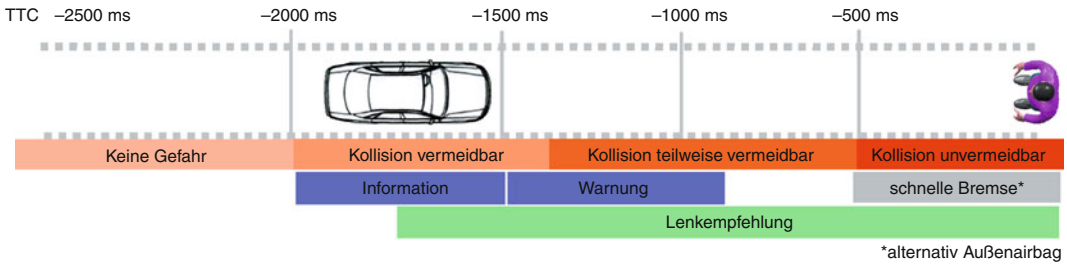



**Abb. 9.50** Zeitlicher Ablauf Aktionskonzept Fußgängerschutz

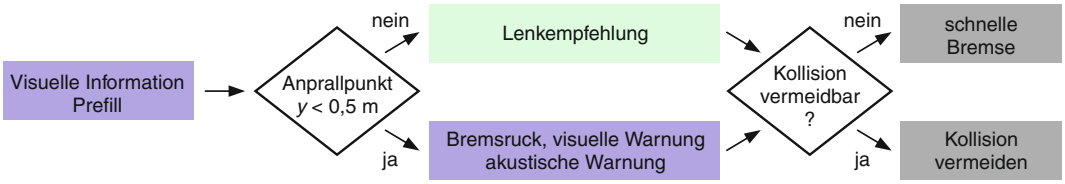



**Abb. 9.51** Aktionskonzept Fußgängerschutz

Fahrschlauch befinden bzw. so darauf zu bewegen, dass eine Kollision möglich werden könnte. Parallel wird ein PreFill der Bremsen durchgeführt. Aufgrund der möglichen Fußgängerbewegung kann erst unterhalb einer TTC (TimeToCollision) von 2 s Informiert werden, um Fehlwarnungen zu vermeiden.

In Abhängigkeit der vorhergesagten Anprallposition des Fußgängers am Fahrzeug aktiviert der vorgeschaltete Entscheider eine haptische Lenkempfehlung, wenn bereits eine geringe Lenkreaktion zum Ausweichen ausreichen sollte. In den anderen Fällen wird eine Bremswarnung bestehend aus Bremsruck, visuell-akustischer Warnung erzeugt, auf die der Fahrer möglichst intuitiv reagiert. Ein automatischer Notbremseingriff könnte nachgeschaltet erfolgen, wenn der Fahrer nicht reagiert hat und die mögliche Kollision bis zu diesem Zeitpunkt (ca. < 500 ms) nicht entschärft werden konnte. In dieser PreCrash-Phase wäre eine schnelle eingreifende Bremse vorteilhaft, um die verbleibende Unfallschwere möglichst gering zu halten, Abb. 9.51.

## 9.9.4 Multikollisionsbremse

Unfallforschungsergebnisse zeigen, dass bei ca. 25 % der Fahrzeugunfälle nach der primären Kollision aufgrund des Kontrollverlustes des Fahrers und einer hohen kinetischen Energie eine weitere Kollision mit einem weiteren Fahrzeug oder einem anderen Objekt stattfindet. Eine automatisch eingeleitete Bremsung nach der ersten Kollision kann hier den Fahrer zur Vermeidung größerer Unfallfolgen unterstützen. Die Auslösung der Multikollsionsbremse basiert auf der Erkennung einer primären Kollision durch die Airbagsensorik. Diese wertet hierbei die Verzögerung der Beschleunigungssensoren und/oder Drucksensoren aus. Die Multikollsionsbremse wird bei einer Auslösung der Gurtstraffer und/oder der Airbags bei Front, Seiten und Heckcrashs automatisch aktiviert und bremst das Fahrzeug bis zum Stillstand ab, Abb. 9.52.

## 9.9.5 Von der Lenkunterstützung bis zum Eingriff beim automatischen Fahren

Um Unfälle bei höheren Relativgeschwindigkeiten zu vermeiden ist es vielfach notwendig ein Ausweichen durch Lenken durchzuführen, da der notwendige Bremsweg mit der Geschwindigkeit im Quadrat ansteigt und dann größer wird als der Abstand. Dagegen ist für geringe Geschwindigkeiten das Bremsen meist die bessere Option. Ein Beispiel ist hier die City-Notbremsfunktion der Fahr-

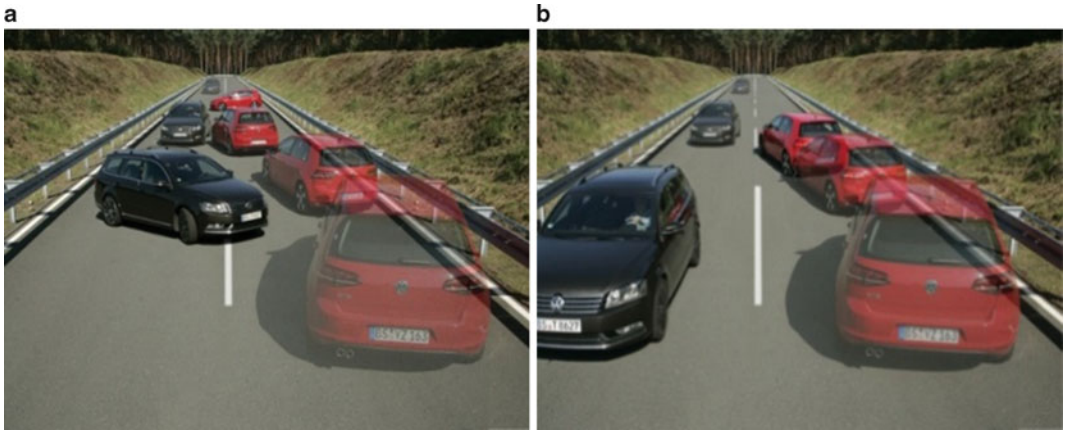



**Abb. 9.52** Ohne (**a**) und mit (**b**) Multikollisionsbremse



zeughersteller. Abb. 9.53 zeigt den Zusammenhang zwischen dem spätesten Lenkzeitpunkt und Bremszeitpunkt auf.

Eine Anforderung dabei ist die Berechnung der Unvermeidbarkeit der Kollision. In Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und des Abstandes zum Unfallgegner wird durch einen Funktionsentscheider die situationsbezogene Unterstützung, wie z. B. die Notbremse, eine Lenkempfehlung oder eine Lenkunterstützung, gewählt.

Mit der Entwicklung des automatisierten Fahrens wird die Funktionalität der Lenkunterstützung weiterentwickelt und zu einem automatisierten Ausweichen führen. Dies wird eine der Herausforderung des automatischen Fahrens sein, da automatisches Fahren ein unfallfreies Fahren erfordert.

Automatisches Fahren kann in drei Gebieten unterteilt werden: Teilautomatisch, hochautomatisch und vollautomatisch. Während des vollautomatischen Fahrens ist keine Überwachung der Fahraufgabe oder einen Systemeingriff durch den Fahrer erforderlich. Hochautomatisiertes Fahren bedeutet, dass die Funktion für eine begrenzte Zeit aktiv ist und der Fahrer in der Lage ist durch eine Übergabeaufforderung, nach heutigen Erkenntnissen innerhalb ca. 10 s, wieder die Fahraufgabe zu übernehmen.

Im ersten Schritt hat bereits eine automatische Fahrfunktion Einzug erhalten. So kann bei einem Fahrerausfall durch einen medizinischen Notfall eine Notbremsfunktion das Fahrzeug bis zum Stilstand abbremsen und in den sicheren Fahrzustand bringen (vgl. Emergency Assist ▶ Abschn. 9.4.2.3), um schwere Unfälle zu vermeiden. Auch eine Erweiterung mit einem optionalen kooperativen Fahrstreifenwechsel ist vorstellbar.

In Zukunft werden die Fahrzeuginsassen während des automatisierten Fahrens die Zeit im Auto für andere Dinge, wie Lesen und Arbeiten mit Internetanwendungen oder Entspannen, nutzen. In diesem Fall erfordert das unfallfreie Fahren integrierte Sicherheitsfunktionen, die die Fahrfunktionen so unterstützen, dass Unfallrisiken bereits frühzeitig vermieden werden können. Dazu wird ein kooperatives Fahren mit optimierten Lenk- und Bremseingriffen erforderlich sein, die das gewünschte Verhalten und die Akzeptanz bei den Fahrer, Insassen und im gemischten Verkehr (Selbstfahrer, assistiertes Fahren, automatisiertes Fahren) mit den anderen Verkehrsteilnehmern erreichen [78].

### 9.9.6 Consumer- und Gesetzestests für aktive Sicherheitssysteme

Durch die Verbreitung der aktiven Sicherheitssysteme wie z. B. automatischer Notbremsen oder Spurhaltesyteme gerät die Bewertung in Fahrzeugtests zunehmend in den Fokus der Consumertest-Organisationen weltweit. Unter anderem werden Notbremssysteme auf Fahrzeuge, Fußgänger und

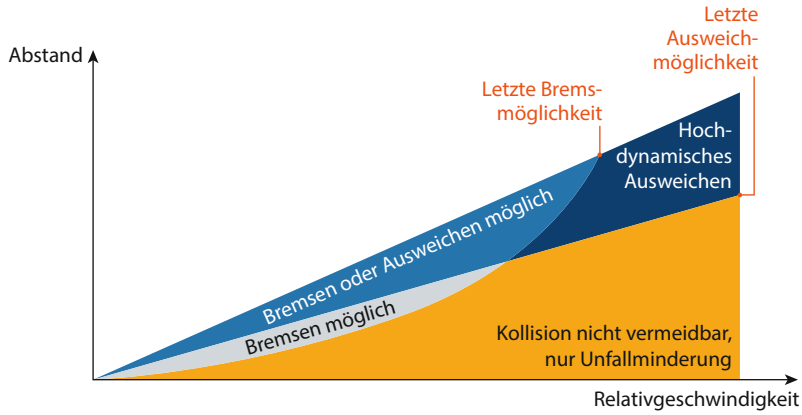



**Abb. 9.53** Bremsen und Lenken zur Vermeidung einer Kollision in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Abstandes [78]

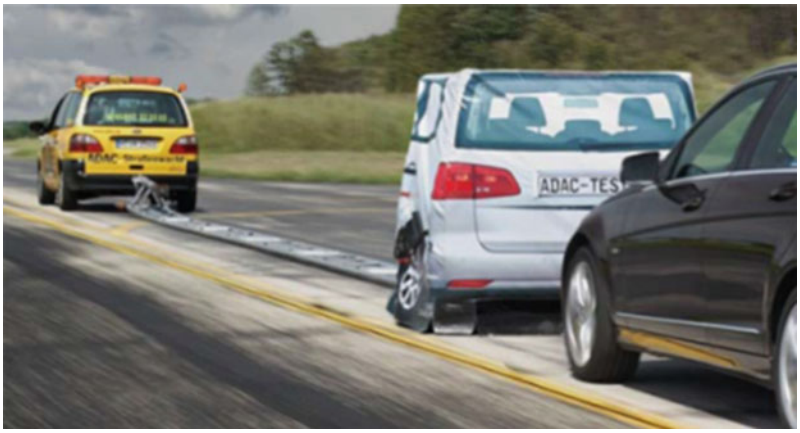


**Abb. 9.54** Tests von Notbremssystemen (Quelle: ADAC)

Fahrradfahrer sowie Spurhalte- und Spurverlassenswarnsystemen von Testinstituten bewertet und fließen zusammen mit der passiven Sicherheit im Crash in die Gesamtbewertung der Fahrzeugsicherheit eines Fahrzeugs ein.

Überwiegend werden die Tests im Gesamtfahrzeug in definierten Testszenarien durchgeführt. Beispielsweise wird beim Consumertest „EuroNCAP“ seit 2014 ein Test der automatischen Notbremse auf Fahrzeuge durchgeführt. Es werden Notbremsversuche auf stehende Fahrzeuge, vorausfahrende Fahrzeuge mit geringer Geschwindigkeit und vorausfahrende, stark bremsende Fahrzeuge durchgeführt, Abb. 9.54.

In dem Versuch wird geprüft, ob eine Kollision durch das automatische Notbremssystem vermieden werden kann, oder in welchem Maß eine Reduzierung der Kollisionsgeschwindigkeit erreicht wird. Weiterhin findet eine Bewertung der Wirksamkeit des Warnsystems statt, indem der Zeitpunkt und die Deutlichkeit der Warnung bewertet wird. Für die Durchführung der Tests sind spezielle Steuerungs- und Messverfahren auf Basis von Fahrrobotern und Differential-GPS anzuwenden, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten. Da Kollisionen nicht in jedem Fall vermieden werden, werden crashbare Targets eingesetzt, die bezüglich der Sensoreigenschaften ein vorausfahrendes Fahr-

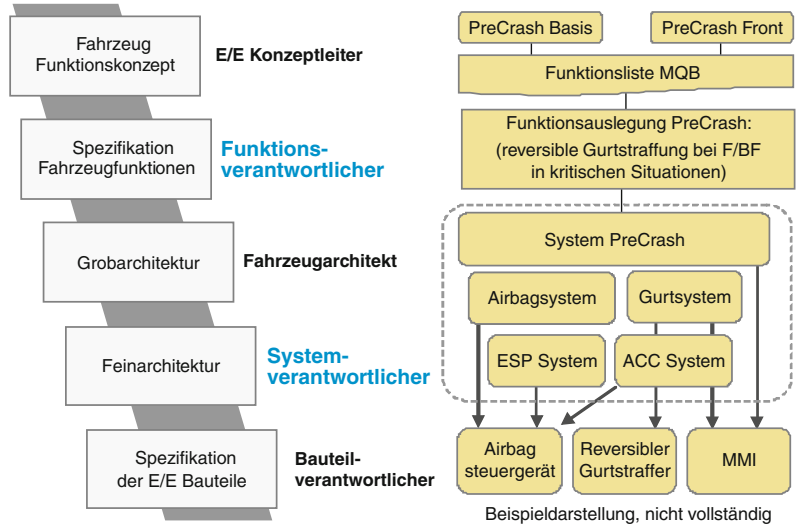



**Abb. 9.55** Entwicklung vernetzter elektrisch/elektronischer Systeme (Beispiel PreCash-Insassenschutz)

zeug repräsentieren, aber durch leichte und deformierbare Strukturen eine Kollision ohne Schäden überstehen. Tests für aktive Sicherheitssysteme werden aktuell in Europa, USA (NHTSA, IIHS), Japan und Korea durchgeführt. Angekündigt sind Testverfahren in China, Süd-Ost-Asien und Australien.

## 9.9.7 Entwicklungsprozess integraler Funktionen

Die Entwicklung von integralen Sicherheitsfunktionen erfordert aufgrund der bereichsübergreifenden Disziplinen eine sehr große Vernetzung innerhalb des Entwicklungsprozesses. Dabei wachsen die Kompetenzen aus Fahrwerk, Elektronik, Aufbau und Sicherheit immer weiter zusammen, Abb. 9.55.

Die parallele Entwicklung vernetzter Funktionen und Systeme erfordert eine besondere Strukturierung der Entwicklungsaufgaben und -prozesse. Ausgehend von der Funktionsspezifikation sind Systeme und Komponenten in einem gemeinsamen Architekturprozess zu entwickeln. Dabei ist eine definierte Rollenverteilung der am Entwicklungsprozess Beteiligten einzuhalten, sowie eine durchgängige und transparente Dokumentation der für die Funktion notwendigen Spezifikationen und Schnittstellen sicherzustellen. Nicht zuletzt ist die exakte und abgestimmte Durchführung der Tests und Erprobungen maßgeblich für den Erfolg der Entwicklung.

### 9.9.7.1 Simulation vorausschauender Sicherheitssysteme

Im Entwicklungsprozess wird bereits frühzeitig auf die Simulation zurückgegriffen, um die Zuverlässigkeit einer Sicherheitsfunktion zu gewährleisten. Hierzu ist vor allem eine Quantisierung der Detektions- und der Falschalarmrate auf Basis repräsentativer Daten und eine darauf basierende Extrapolation des Nutzens erforderlich. Aufgrund der Vielzahl der notwendigen Messdaten und der Komplexität des Absicherungsvorgangs ist ein rechnergestützter Entwicklungsprozess notwendig. In mehrfachen Iterationsschleifen werden reale Messdaten aufgenommen, ausgewertet und parallel Algorithmen zur Funktionsapplikation entwickelt. Die Funktionsentwicklung erfolgt meist Modell- oder auch Software-in-the-Loop (MiL, SiL) basiert. Außerdem werden auf der Basis synthetisch erstellter oder simulierter Daten die für die Funktion notwendigen logischen Berechnungsvorschriften erstellt. Der Vorteil bei diesem Entwicklungsschritt ist, dass die logische Komponente von der zeitlichen nahezu entkoppelt ist und sich große



**Abb. 9.56** Simulation zur virtuellen Absicherung

Datenmengen in kürzester Zeit untersuchen lassen. Bei der sogenannten Virtuellen Absicherung werden in der Simulationsumgebung Elektronik und Sensoren auf Steuergeräten frühzeitig eingebunden. Damit lassen sich komplexe Szenarien und große Szenarien-Umfänge realitätsnah auch ohne Versuchsfahrzeug frühzeitig testen (Abb. 9.56).

Eine spezielle Form der Anwendung der Simulation betrachtet das Verhalten des Fahrzeugs in definierten Testszenarien wie z. B. Consumertests. Aufgrund der definierten Toleranzen der Testausführung ergeben sich bei Notbremssystemen Variationen in den Ergebnissen der erzielten Kollisionsgeschwindigkeiten. Durch Abbildung der Toleranzen wie z. B. Testgeschwindigkeit des Vehicle under Test (VUT), Position und Geschwindigkeit des Targets in einer Simulationsumgebung können eine Vielzahl von möglichen Anfahrt-Trajektorien berücksichtigt werden und der Einfluss auf die (virtuellen) Systemkomponenten sowie Algorithmus frühzeitig im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, Abb. 9.57.

In dem darauf folgenden Entwicklungsschritt wird der Einfluss von real angebundenen Steuergeräten und realem (Echt-)Zeitverhalten im Hardware-in-the-Loop (HiL) Test festgestellt. Komponenten wie die Buskommunikation, das Prototypensteuergeräte- oder auch das Aktuatorikverhalten werden analysiert und Teilfunktionen abgeprüft. Für die Echtzeitfähigkeit einer Systemfunktion muss das zeitliche Jitterverhalten bestimmbar sein. Die Funktion wird dementsprechend tolerant ausgelegt, Abb. 9.58.

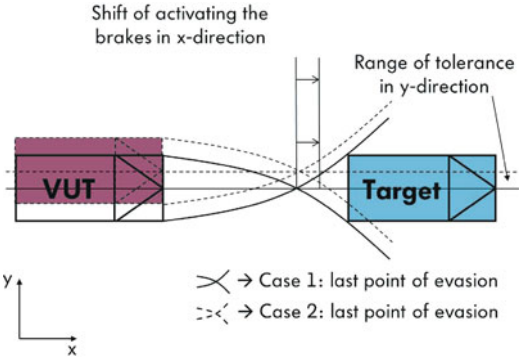



**Abb. 9.57** Simulation von Trajektorien in Notbremsversuchen [95]

Für den finalen Applikationsschritt der Gesamtfunktion im Fahrzeug steht nach den erfolgten MiL/SiL/HiL-Tests eine flexible, bereits ausgereifte Systemsoftware zur Verfügung. Über verschiedene Parametersätze kann konservatives, neutrales oder proaktives System- und Funktionsverhalten direkt in der Gesamtfahrzeugumgebung in realen Fahrszenarien eingestellt werden.

### 9.9.7.2 Funktionale Sicherheit

Auf Technischer Ebene sind komplexe Prozesse mit vielfältigen Anforderungen und Wechselwirkung zu beachten. Der Gesetzgeber hat für Neuentwicklungen mit der Norm ISO 26262 einen Rahmen für die Funktionale Sicherheit im Bereich der Fahrzeugelektronik und Software geschaffen. Dieser kann als technischer Leitfaden die Entwicklung von sicheren Systemen unterstützen.

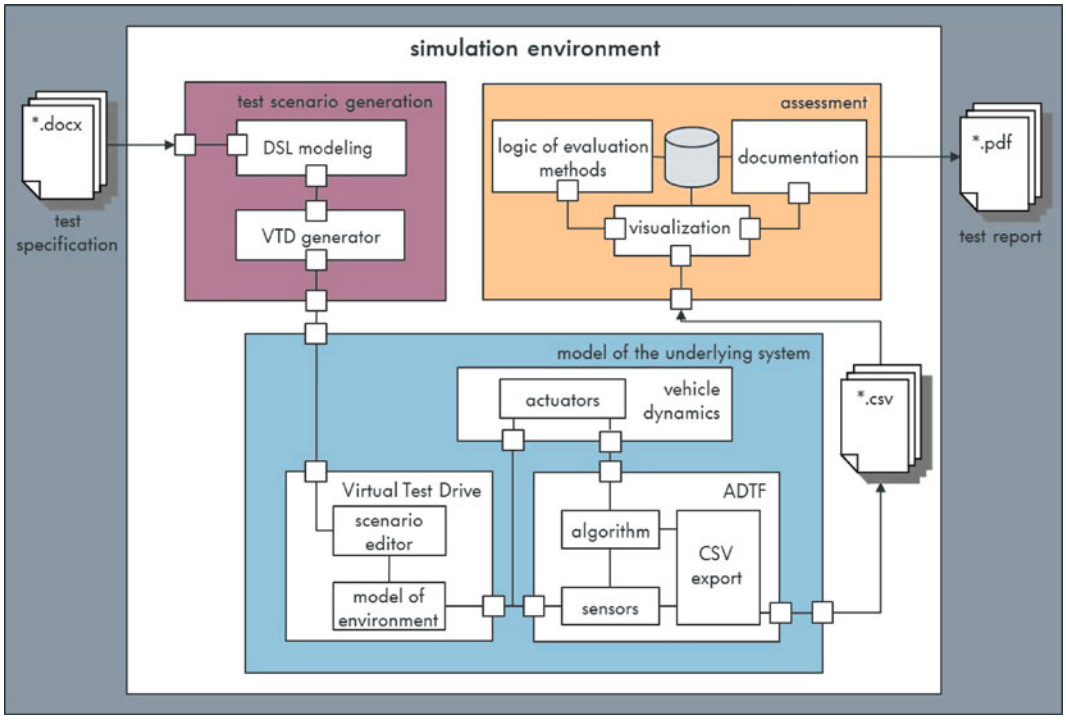



**Abb. 9.58** Simulationsumgebung für Notbremssysteme [92]

### 9.9.7.3 Rechnerunterstützung bei der Entwicklung von Sicherheitskomponenten

Schon in der Vorentwicklungsphase eines Kraftfahrzeuges muss anhand der geometrischen Vorgaben ein Optimierungsprozess zwischen Unfallverhalten, Masse, Innenraumakustik und Schwingungsverhalten gefunden werden. Der Durchbruch auf dem Gebiet der Berechnung wurde durch Entwicklung von stabilen Softwareprogrammen und die Weiterentwicklung der Rechnersysteme erreicht. Wenn auch viele Parameter die Ergebnisse bei Unfallsimulationsversuchen beeinflussen, so ist doch die Berechnung ein wichtiger Beitrag zur Verbesserung der gesamten Entwicklungsabläufe. Beim Produktentstehungsprozess spielt die Berechnung für das Zusammenwirken von Entwicklung, Produktion, Marketing, Finanzen sowie Qualitätssicherung eine immer größere Rolle (siehe ► Abschn. 11.3).

## 9.9.8 Retten und Bergen

Der integrale Sicherheitsansatz betrachtet neben den unfallvermeidenden und unfallfolgenmindernden Systemen auch die Unterstützung der Fahrzeuginsassen nach dem Crash. Die Systeme werden unter dem Begriff Retten und Bergen zusammengefasst. Darunter sind z. B. die Erhaltung der Beleuchtungseinrichtungen oder auch rettungsfreundliche Strukturen zu nennen, die es den rettenden Feuerwehren erleichtern ihr Rettungsgerät an der Karosserie optimal anzusetzen.

Integrale Systeme können zukünftig die Rettung verbessern, indem Sie Daten aus der Vorunfall- und Unfall-Phase nutzen. So könnten wichtige Informationen, wie zum Beispiel die Anzahl der Insassen, die Schwere des Unfalls und der Unfalltyp, den Rettungskräften schon vor Ihrem Eintreffen mitgeteilt werden, um eine zielgerichtete Rettung zu organisieren.

Verkehrsunfälle treten zu allen Tages- und Nachtzeiten sowie in allen Gegenden, in der Stadt, auf dem Land oder auf der Autobahn auf. Nicht immer sind mehrere Parteien an einem Unfall beteiligt. Daraus resultierend ist in Unfallsituationen gegebenenfalls niemand vor Ort, der schnell Hilfe für mögliche Verletzte herbeirufen kann. Oftmals kann der Verletzte selbst auch nicht für Hilfe sorgen, da er beispielsweise eingeklemmt ist, bewusstlos ist oder sein Handy beim Unfall zerstört wurde. Die schnelle bzw. rechtzeitige medizinische Versorgung ist jedoch der Schlüssel zum Überleben. Bei einem Herz-Kreislauf-Stillstand sinkt beispielsweise die Überlebenschance pro Minute um 10 % [93].

eCall soll hierbei Abhilfe schaffen. Ziel dieses Systems ist die automatische Benachrichtigung von Rettungsleitstellen bzw. die Sicherstellung einer Kommunikationsmöglichkeit für den Verletzten im Falle eines Unfalls. eCall ist daher an die Airbagauslösung gekoppelt, kann aber auch manuell vom Fahrer aktiviert werden.

Technisch wird eCall durch eine crashsichere Box realisiert, die mit einem GPS-Empfänger sowie einem GSM-Modul ausgestattet ist. Im Falle einer Aktivierung werden dann diverse Daten (genannt Minimum Set of Data (MSD)) an die Rettungsleitstelle übermittelt. Zu diesen Daten gehören beispielsweise Ortungsdaten, Fahrgestellnummer, Zeitstempel usw., die eine verbesserte Einschätzung der vorliegenden Unfallsituation zulassen und eine schnellere und gezieltere Rettung ermöglichen.

Die Umsetzung von eCall orientiert sich an vielen europäischen Normen und Standards (unter anderen ETSI, CEN). Die Spezifikation eines einheitlichen eCall-Systems mitsamt der dazugehörigen Infra- und Serverstruktur ist auf europäischer Ebene abgeschlossen – Einsatz 2018.

### 9.9.9 Car2X Safety – Ausblick

Als Car2Car-Kommunikation (Car2Car) bezeichnet man den Informationsaustausch von Fahrzeugen untereinander. Auf Basis der gleichen Technologie gibt es darüber hinaus die Kommunikation mit der am Straßenrand befindlichen Infrastruktur (Car-2-Infrastructure). Häufiger wird dabei auch vereinfacht der Begriff Car2X verwendet, wobei das X für jeden beliebigen Kommunikationspartner in direkter Umgebung steht.

Für diese Art der direkten Kommunikation wird ein fahrzeugherstellerübergreifender WLAN-Standard (ETSI ITS G5) verwendet, der speziell auf die Dynamikanforderungen des Straßenverkehrs adaptiert wurde und Reichweiten von mehreren hundert Metern ermöglicht. Die Informationen des Fahrzeugzustandes werden dabei periodisch oder situationsabhängig mit der direkten Umgebung ausgetauscht. Das stellt auch den großen Unterschied zu serverbasierten Systemen dar, die nicht lokal verortet sind, sondern über „Umwege“ andere Kommunikationspartner erreichen.

Neben den Vorteilen für Komfortsysteme, spielt die Fahrzeugkommunikation auch für die zukünftige Entwicklung von aktiven Sicherheitssystemen (Car2X-Safety) eine wichtige Rolle. In der Fusion mit der Integralen Sicherheit stellt es zudem die Basis für die Vision vom unfallfreien Fahren dar.

Ziel der ersten Entwicklungsstufe der Car2Car-Kommunikation ist es, bestehende Sicherheitssysteme im Fahrzeug durch die neue Technologie zu erweitern. Das ermöglicht z. B. im Fall der Funktionen PreCrash und MKB das senden der Gefahrenstelle an die Umgebung, um Folgeunfälle zu verhindern. Diese sogenannten Tag1 (DayOne)-Funktionen werden zwischen den europäischen Fahrzeugherstellern im Car2Car Communication Consortium in der Art standardisiert, dass alle das gleiche Verständnis der Sendefunktion haben. Inwieweit jeder Fahrzeug-Hersteller diese Informationen in seinen Modellen nutzt, bleibt ihm überlassen. Warnungen an den Fahrer wie z. B. vor sich nähernden Einsatzfahrzeugen, vor Baustellen, vor Stauenden oder vor dem Eingriff aktiver Sicherheitssysteme sind möglich. Ebenso kann das eigene Fahrzeug Informationen über Pannen, Unfälle und kritische Straßenbedingungen an die Umgebung weitergeben. Ziel dieser Funktionen ist es, die Sicherheit bei schwierigen Sicht- und Umgebungsverhältnissen zu verbessern und dem Fahrer mithilfe von Warnungen eine frühzeitige Reaktion zu ermöglichen.

Für zeitkritische Funktionen mit automatischem Eingriff des Fahrzeugs ist es allerdings notwendig, die Umfeldwahrnehmung der Fahrzeuge weiter zu verbessern, ◘ Abb. 9.59. In einer zweiten Entwicklungsstufe von Car2Car soll der Funkkanal

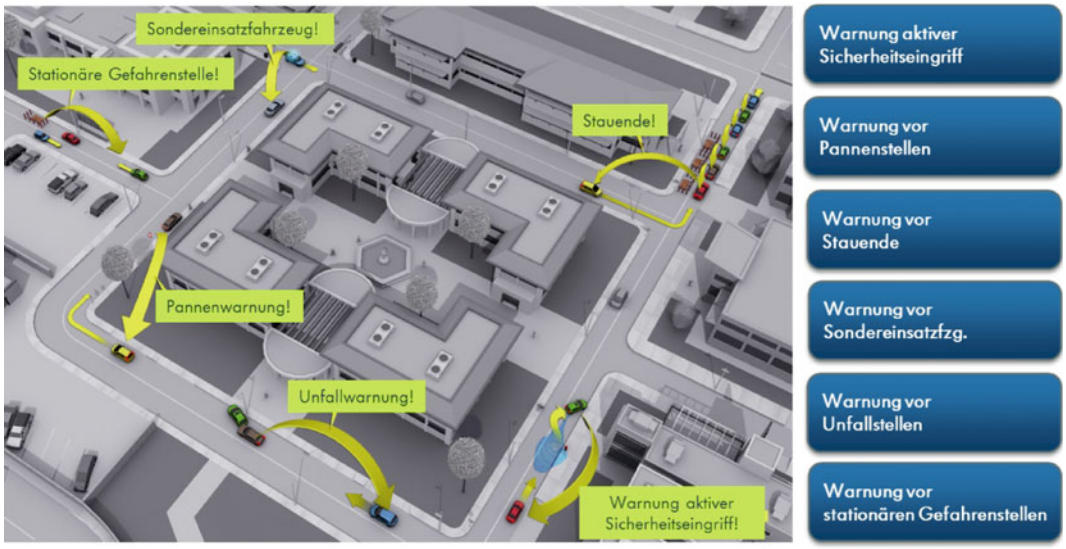



**Abb. 9.59** Gefahrenwarnung mit Car2X

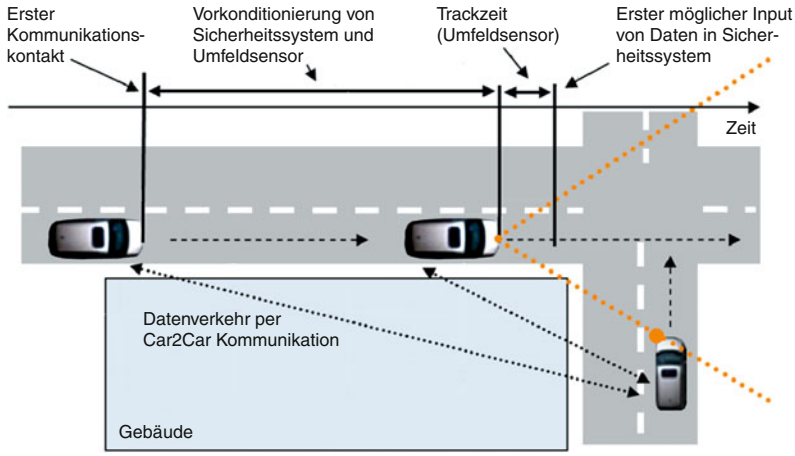



**Abb. 9.60** Fusion von Car2Car Informationen mit Daten der Umfeldsensorik [77]

als 360°-Sensor verwendet werden. Klassische Sensoren die ein solches Umfeldmodell generieren, wie Kamera oder Radarsysteme können nur auf Objekte reagieren, die sich im Detektionsbereich der Umfeldsensoren befinden (siehe Kapitel Sensor). Eine Kurve, ein Haus, Bäume oder auch andere Sichtbehinderungen können diesen Sensoren die Sicht nehmen. Durch eine Fusion von Car2X-Daten und klassischen Umfeldsensoren entsteht ein erweitertes Umfeldmodell in dem Informationen aus allen Richtungen um das Fahrzeug einbezogen werden. Die Vorteile der Fusion sind u.a. eine zusätzlichen Validierung der Umfeldsensordaten. Durch diese Validierung kann die Tracking-Zeit der Umfeldsensoren reduziert werden (s. Abb. 9.60), wodurch ein schnellerer Systemeingriff ermöglicht werden kann (s. Abb. 9.61).

Mithilfe dieser Eigenschaft wird die Wirksamkeit bestehender Sicherheitssysteme weiter verbessert. Weiterhin können nicht nur Positions- und

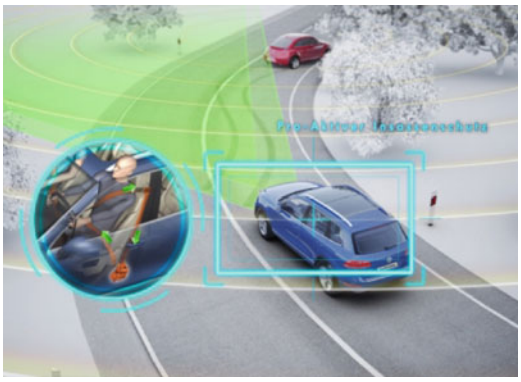


**Abb. 9.61** Beispielszenario Fusion von Car2Car Informationen mit Daten der Umfeldsensorik [94]

Bewegungsinformationen übermittelt werden, sondern beispielsweise auch Daten wie der Fahrzeugtyp oder die Fahrzeugmasse die andere Sensoren nicht erfassen können. Diese können genutzt werden um neue Funktionen zu generieren oder bestehende Systeme zu verbessern.

Nicht nur für Fahrzeuge mit aktiven Fahrern bietet die Technologie ein großes Sicherheits-Potential, sondern legt auch für autonome Fahrzeuge eine wichtige Grundlage, um kooperativ reagieren zu können. Nur durch die mögliche Interaktion kann ein Sicherheitsmaß im Mischverkehr und im komplett autonomen Verkehr sichergestellt werden.

#### 9.9.9.1 Kooperatives Fahren

Automatisches Fahren erfordert im gemischten Verkehr (Selbstfahrer, assistiertes Fahren, automatisiertes Fahren) ein kooperatives, aufeinander abgestimmtes Fahren mit hoher Fahrerakzeptanz bei gleichzeitig geringer Akzeptanz von Fehlentscheidungen des Systems. Im Gegensatz zur aktiven und passiven Sicherheit geht es hier zukünftig um die vorzeitige Vermeidung von Risikosituationen.

Nach einer Studie der UMTRI [79] werden automatisch fahrende Fahrzeuge Sicherheit nicht zwangsläufig erhöhen. Vielmehr birgt die Übergangsphase, d.h. die Zeit in der autonome Fahrzeug und konventionelle Fahrzeuge den gleichen Verkehrsraum nutzen, zusätzliche Gefahr. Hintergrund ist, das das automatische Fahren eine ausreichende Vorhersage des Verhaltens der Fahrer und Fahrzeuge im gemischten Verkehr erfordert. Die Fahrweise und Regelung muss dabei den stark streuenden Verhalten der realen Fahrer adaptiv entsprechen können, um Fehleinschätzungen des Systems und damit kritische Fahrsituationen, wie z. B. Einscherer, Drängler mit geringen Abstand, Überholer oder auch plötzliche Abbieger vermeiden zu können.

Die Herausforderung einen erfahrenen Fahrer in Bezug auf die Wahrnehmung des Verkehrsgeschehens zu ersetzen wird durch die zunehmende Rechenleistung und durch die erhöhte Wachsamkeit eines computergesteuerten Fahrzeuges begegnet. Große Herausforderungen ergeben sich aber durch die riesigen Datenmengen in der Erprobung und einer kaum abzugrenzende Vielfalt an möglichen Unfallszenarien. Dazu kommt, dass die Vorhersagefähigkeiten eines erfahrenen Fahrers und Entscheidungen zur Regelung des Fahrzeugs darauf integriert werden müssen, um das unfallfreie Fahren im gemischten Verkehr kooperativ umsetzen zu können.

## 9.10 Sicherheit von elektrischen Fahrzeugen

Bei Hybrid- und Vollelektrofahrzeugen gelten Anforderungen bei normaler Nutzung wie Schutz gegen elektrische Stromschläge sowie sicheres Laden der Batterie. Im Unfallgeschehen gelten alle Gesetzte wie für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Zusätzlich wird der Schutz des Hochvoltsystems im Anschluss an die Crashtests gemäß der UN R94/R95 geprüft. Dabei gelten erweiterte Anforderungen bezüglich des Schutzes vor Stromschlägen. Daher darf keine Hochspannung an der Karosserie oder dem Antriebsstrang messbar sein. Ein Beitrag liefert eine Sicherung, die im Crashfall den Hochvoltbereich der Batterie vom Fahrzeug trennt. Die verbleibende Energie im Hochvoltsystem muss kleiner 2,0 Joule sein und der physikalische Schutz aller Hochvoltkomponenten muss gewährleistet sein. Zum Schutz der Insassen darf innerhalb 30 min nach dem Crash kein Elektrolyt in die Fahrgastzelle gelangen und Akkus, die möglicherweise innerhalb der Fahrgastzelle montiert sind (z. B. Hybrid-Fahrzeuge) dürfen sich darüber hinaus nicht verschieben [80, 81].

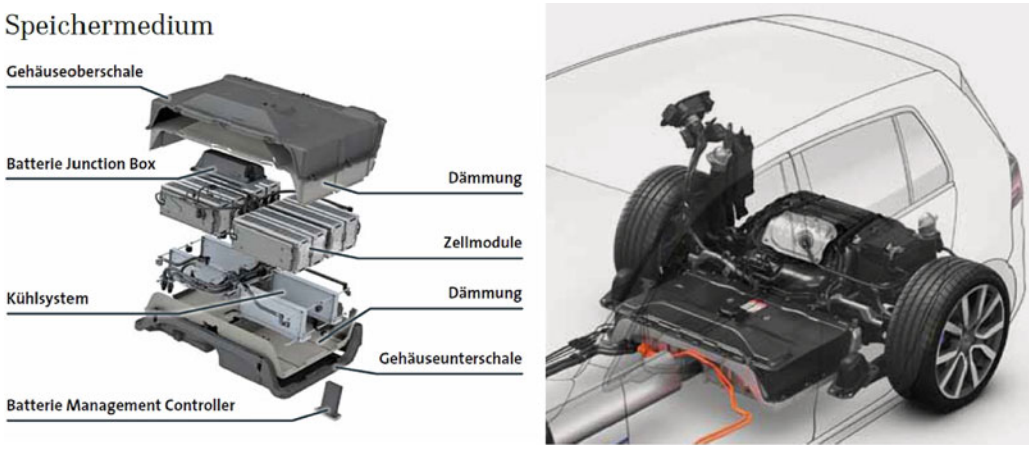



**Abb. 9.62** Schutzgehäuse und crashsichere Einbaulage des Speichermedium im Hybridfahrzeug Golf GTE [82]

9

Die passive Sicherheit der Elektro- und Hybridfahrzeuge beinhaltet eine crashsichere Einbaulage der Batterien. Darüber hinaus werden die Batterien durch ein Schutzgehäuse von äußeren Einflüssen geschützt. Ein Beispiel für die Einbaulage eines Hybridfahrzeugs zeigt Abb. 9.62. Beim Golf GTE ist die Lithium-Ionen-Batterie crashgeschützt und platzsparend unter der Rückbank eingebaut. Der 120 kg schwere Akku speichert 8,8 kWh Energie [82]. Bei einem vollelektrischen Fahrzeug (BEV) werden die Batterien vorzugsweise unter dem Fahrzeugboden in einem separaten Gehäuse und von den Crashzonen entfernt im Schutzbereich der Karosserie verbaut.

## 9.11 Zusammenfassung

Die Fahrzeugsicherheit ist ein integraler Bestandteil des Produktentstehungsprozesses. Die Möglichkeiten, das Fahrzeug als Transportmittel noch sicherer zu machen, sind durch den Einsatz von moderner Technik weiter gestiegen. Die Initiativen einzelner Hersteller haben – unabhängig von den sicherlich notwendigen gesetzlichen Regelungen – wieder Bewegung in dieses Fachgebiet gebracht. Da auf dem Gebiet der unfallfolgenmildernden Maßnahmen mehr als 90 % der denkbaren und sinnvollen Systemverbesserungen eingesetzt haben (aktuell sind die weiteren Verbesserungen zum Fußgängerschutz, zu smart restraints und zur Kompatibilität), kommt der Unfallvorbeugung eine wesentlich größere Bedeutung zu.

Wo immer die dabei eingesetzte Sensorik, z. B. PreCrash-Erkennung vorhanden ist, kann sie auch bei der weiteren Systemverbesserung bezüglich des Insassenschutzes helfen: In Position bringen des Sitzes, der Sitzlehne, der Kopfstütze, das Schiebedach und Seitenscheiben schließen, die Gurtstraffer teilweise vorspannen etc. Erste Lösungen haben in Serienfahrzeugen eingesetzt. Auch die Vereinbarung der Europäischen Kommission und der Automobilindustrie, ein automatisches Notrufsystem einzusetzen, welches bei schweren Unfällen aktiviert wird, ist sehr positiv zu sehen [86]. Es ist daher schon fast als selbstverständlich anzusehen, dass auch die Hybrid- und Elektrofahrzeuge, insbesondere die Batterien den gleichen Sicherheitsmaßstäben unterworfen werden müssen [86, 89]. Die Vision, den Straßenverkehr so sicher wie den Schienenverkehr zu machen ist realisierbar.

### Literatur

1. WHO Global Status report on Road Safety 2013
2. Murray, C.J.L., Lopez, A.D. et al.: World Report on the road traffic injury prevention
3. Braess, H.-H.: Aktive und passive Sicherheit im Straßenverkehr. Zeitschrift für Verkehrssicherheit **42**, (1996)
4. Barény, I. B.: Das Prinzip des gestaltfesten Fahrerraums. Deutsches Bundespatent 854.157 (1952)

5. Wilfert, K.: Entwicklungsmöglichkeiten im Automobilbau. ATZ, 273–278 (1973)
6. Seiffert, U.: Fahrzeugsicherheit Personenwagen. VDI-Verlag, Düsseldorf (1992)
7. Seiffert, U.: Die Automobiltechnik nach der Jahrtausendwende. Euroforum München 25./26. Mai 1998
8. VDA Techniktage, Filderstadt 2015
9. Statistisches Bundesamt Deutschland: Verkehr (2014)
10. International Road Traffic and Accident Database (IRTAD 2006)
11. Seiffert, U., et al.: Automotive Safety Handbook. Professional Engineering Publishing (2003)
12. Appel, H., Krabbel, G.: Unfallforschung und Unfallmechanik. Vorlesungsskript, TU Berlin, ISS Fahrzeugtechnik (1994)
13. Danner, M., Langwieder, K., Hummel, T.: Experience from the analysis of accidents with a high belt usage rate and aspects of continued increase in passenger safety. 11th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington, DC (1987)
14. Langwieder, K.: Perspektiven der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1). (2003)
15. Brunner, H., Georgi, A.: Drei Jahre Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden. ATZ **105**(2), (2003)
16. Brühning, E., Otte, D., Pastor, C.: 30 Jahre wissenschaftliche Erhebungen am Unfallort für mehr Verkehrssicherheit. Zeitschrift für Verkehrssicherheit **4**, 175–181 (2005)
17. Scheunert, D., Sferco, R., Becker, H.: Unfallforschung – Wo liegen Potenziale? Verband der Automobilindustrie: Technischer Kongress, Stuttgart (2002)
18. Jungmichel, M., Stanzel, M., Zobel, R.: Special aspects in accident reconstruction in the accident investigation department of Volkswagen. EVU Tagung 2002, Portoroz, Slovenija
19. Langwieder, K.: 2te Tagung Aktive Sicherheit. München (2006)
20. Zobel, R.: Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen der aktiven und passiven Sicherheit/Evaluation of effectiveness of measures of primary and secondary safety.
21. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (2006)
22. Schwarz, T.: Vergleich der Crashtestbedingungen für Personenkraftwagen mit dem realen Unfallgeschehen. Technische Universität Berlin, ISS-Fahrzeugtechnik (1999)
23. Becker, H., Sferco, R.: Anwendung von Realunfalldaten in der Fahrzeugentwicklung am Beispiel des Frontairbags. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (2003)
24. Rabe, M., et al.: Fahrzeugtechnologien zur Steigerung der Verkehrssicherheit. MPC Verkehrssicherheitstage, Berlin, 25./26. August 2008
25. http://www.volkswagen.at/modelle7Scirocco/zahlen_fakten/Sonderausstattungen. Zugegriffen: Oktober 2010
26. http://www.7-forum.com/modelle/e65/zulieferer/hella/kurvenlicht.php. Zugegriffen: Oktober 2010
27. http://www.audi.de/etc/medialib/cms4imp/audi2/product/a8/a8/d3.Par.0299.Image.jpg. Zugegriffen: Oktober 2010
28. Schulenberg, P., Gonter, M.: Active safety by driver assistance systems. International Seminar on Automotive Electronics Technology. Society of Automotive Engineers of China (SAE-China), Shanghai, 17./18. März 2009
29. http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/3series/coupe/2006/allfacts/ergonomics_bmw_autobeam.html. Zugegriffen: Oktober 2010
30. Hella: Fahrerassistenz-System: Technische Informationen. Hella KG Hueck & Co., Lippstadt. http://www.hella.com/hella-de-de/assets/media_global/Autoindustry_ti_fas_d.pdf. Zugegriffen: Oktober 2010
31. http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/modelle/touareg/highlights/Innovationen.html. Zugegriffen: Oktober 2010
32. http://www.volkswagenag.com/vwag/vwcorp/info_center/de/themes/2010/05/Shining_light.html. Zugegriffen: Oktober 2010
33. Eigth Stapp Car Crash Conference. Wayne State University Press, Detroit, 1996
34. IRCOBI proceedings 1998. International IRCOBI conference on Biomechanics of Impact. Göteborg, 16.-18. September 1998
35. AAAM (American Association for Automotive Medicine): The Abbreviated Injury Scale, 1980 Revision
36. Otte, D., et al.: Der neue Abbreviated Injury Scale (AIS) 2005. Zeitschrift Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2006)
37. Swearingen, I.: Tolerances of human face to crash impact, repart no. AM 65-20. Federal Aviation Agency, Oklahoma City, Juli 1965
38. Patrick, L.M., et al.: Survived by Design-Head-Protection. 7. Stapp Car Crash Conference, Oklahoma City
39. Fiala, E., et al.: Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule. Forschungsbericht. Technische Universität Berlin, März 1970
40. IRCOBI 1999: International Ircobi Conference on the Biomechanics of Impact. Sitges, Spain, 1999
41. Gonter, M., et al.: Potential of adaptive restraints in frontal collisions. 7th International Airbag Symposium on Car Occupant Safety Systems. 2004
42. Prüferschrift nach SAE J 921: Motor Vehicle Instrument Panel Laboratorium Impact Test Procedere – Head Area. November 1971
43. Denton ATD Inc. Product Description. Milan, USA, www.denton.com
44. Wittemann, W.: Improved Vehicle Crash-Worthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situations. Eindhoven (1999)
45. Safety Companion Carhs (2014), www.carhs.de

46. US-FMVSS – No. 301: Fuel System Integrity, National Highway Safety Administration; NHTSA: FMVSS 214: Schutz gegen Seitenaufprall. Washington, USA
47. Chou, E., et al.: A literature review of rollover test methodologies. Int. J. Vehicle Safety **1**(1/2/3) (2005)
48. Buck, W.: Energy absorbing sterring column and safety steering wheels in focus. Automobil Industrie **3**, 27–42 (1975)
49. Juby, D., O'Neill, B.: Steering column movement in several frontal crashes and its appearent effect on airbag performance. 17. ESV-Conference, Amsterdam, 2001
50. Gonter, M.: Steuerkonzepte für adaptive Airbagsysteme zur Insassen- und unfallspezifischen Optimierung des Insassenschutzes. ProBusiness Verlag, Berlin (2007)
51. http://www.seat.de/seat_/magazin/technik-lexikon/p/pyrotechnische_gurtstraffer/contentParagraphs/0/image/pyrotgurt.jpg. Zugegriffen: Oktober 2010
52. Economic Commission for Europe (ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Rückhalteeinrichtung für Kinder in Kraftfahrzeugen
53. http://www.volkswagen-zubehoer.de/shop/index.php?cat=c93_Kindersitze.html. Zugegriffen: Oktober 2010
54. Degener, M.: ISOFIX, das neue Befestigungssystem für Kindersitze. Haus der Technik, Essen, 29. September 1998
55. Insurance Institute for Highway Safety: Status Report 33. 9. Oktober 1998
56. Sziliagyi, I., et al.: Consequences of the new NHTSA regulations. 5th International Symposium Airbag. Karlsruhe, Dezember 2000
57. Gonter, M., et al.: Systemanforderungen und Potentiale des adaptiven Insassenschutzes. VDI Tagung, Innovativer Insassen- und Partnerschutz. Berlin, 2005
58. Die neue S-Klasse. ATZ/MTZ Sonderausgabe (1998); Der neue Maybach. ATZ/MTZ (2002)
59. Ventre, P.: Homogenous Safety and heterogeneous Carpopulation? 3. International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles. Washington, D.C., Juni 1972
60. Seiffert, U.: Probleme der Fahrzeugsicherheit. Dissertation, Technische Universität Berlin (1974)
61. Appel, H.: Sind kleine Wagen unsicherer als große? VDI-Nachrichten **7**, (1975)
62. Richter, B., et al.: Entwicklung von Pkw im Hinblick auf einen volkswirtschaftlich optimalen Insassenschutz. Abschlussbericht BMTF, 116 (1984)
63. Huber, G.: Passive safety of vehicles including partner protection. Fisita, Prag (1996)
64. Relou, J., et al.: Entwicklung kompatibler Fahrzeuge mittels kompatibilitätsbewertender Crashsimulation. VDI, Berechnungstagung, Würzburg, 1998; Relou, J.: Methoden zur Entwicklung crash-kompatibler Fahrzeuge. Dissertation, TU Braunschweig (2000)
65. Schwarz, T.: Selbst- und Partnerschutz bei frontalen Pkw-Pkw-Kollisionen (Kompatibilität). VDI-Bericht, Reihe 12. Bd. 502. VDI-Verlag, Düsseldorf
66. Scheef, J.: Anforderungen an Fahrzeugsicherheit. Symposium Concept. Graz, Februar 2004
67. Insurance Institute für Highway Safety: Status Report Side Impact Crash Tests **39**(5), April 2004
68. Schimmelpfennig, K.-H.: Bord Frame, a possible contribution to improve passive safety. 15. International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Melbourne, Australien, Mai 1996
69. http://wg17.eerc.org/wg17publicdoes/wg17publication.html. Zugegriffen: 2009
70. Gonter, M.: Moderne Rückhaltesysteme in Fusion mit der Aktiven Sicherheitl. Tagung Airbags. Ludwigsburg, 2001
71. Gonter, M., et al.: Entwicklungstendenzen bei Sicherheitseinrichtungen moderner Pkw. Symposium „Die neue Fahrzeuggeneration". Landesfeuerwehrschule Hamburg, 2003
72. König, M., et al.: A sensor system for precrash deployment with extremely low false alarm rate. 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT). Hamburg, 2008
73. Waldt, N., et al.: Testing of pre-crash-airbag-systems with extreme low false alarm rate. 9th International Airbag Symposium on Car Occupant Safety Systems. 2008
74. Wohllebe, T., et al.: Potential of pre-crash restraints in frontal collisions. 8th International Airbag Symposium on Car Occupant Safety Systems. Dezember 2006
75. Gonter, M., et al.: PyroBrake baut noch 100 Millisekunden vor dem Crash Energie ab. Volkswagen, Wolfsburg (2008)
76. http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/metacontent/Technik_Lexikon/proaktives_insassenschutzsystem.popup.html. Zugegriffen: Oktober 2010
77. Rößler, et al.: Car2X Safety – Future development of active safety systems based on vehicle communication systems. 7th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT). Hamburg, 23.–24. März 2010
78. Seiffert, U., Gonter, M.: Integrated Automotive Safety Handbook, SAE Book, SAE International, Warrendale, USA (2013)
79. Sivak, M., Schoettle, B.: Road Safety with Self-Driving Vehicles. The University of Michigan Transportation Research Institute, Report No. UMTRI-2015-2. USA, Januar 2015
80. CarsH training GmbH: CarsH Safety Companium 2015. Alzenau
81. Gauvin, B.: UNECE Legislative Road Map. Fisita Summit 2014, Paris
82. Golf GTE, Volkswagen AG, ViaVision, www.viavision.org. Zugegriffen: Juni 2014
83. Holtorf, W.: Small-Overlap-Unfälle. Diplomarbeit Ostfalia Hochschule, Wolfsburg (2011)
84. National Highway Traffic Safety Administration: Laboratory Test Procedure for FMVSS 214S (STATIC), Side Impact Protection TP-214S-05, 15. April 1992
85. Bild 9.14. ISO/TS 13499 – RED C: 2012
86. Europäische Kommission: IP/05/134 Notrufnummer „112" von Auto. Brüssel, 03.02.2005

87. Michael, V.: Integrale Sicherheit in der Elektromobilität. Hanser Automotive **11**, (2010). http://www.sgs-tuev.de
88. Baker, B.C., et al.: Crash compatibility between cars and light trucks: benefit of lowering front-end-energy absorbing structure in SUVs and pickups. Accident analysis and prevention **40**, 116–125
89. Hons, C.: Der neue Passat. Emergency Assist: Safety Update. Aschaffenburg (2015)
90. VDA, Verband der Automobilindustrie: Tagungsband 13. Technischer Kongress. Berlin (2011)
91. Leschke, A.: Integrale Sicherheit. Vorlesung Fahrerassistenz und Sicherheit Auto Uni, 07/2014
92. Leschke, A., Kühnel, S. et.al.: Large-Scale Evaluation of an Active Safety Algorithm with EuroNCAP and US NCAP Scenarios in a Virtual Test Environment – An Industrial Case Study. IEEE/ITSC, Las Palmas/Gran Canaria (2015)
93. http://www.avd.de/startseite/service-news/news/alle-news/2009/oktober/avd/avd-und-kvda-fordern-warnsystem-fuer-einsatzfahrten-der-rettungskraefte
94. Leschke, A., Franke, K. et.al.: Steigerung der Fahrzeugsicherheit durch Car2X-Kommunikation, ATZ 11/2012 (2012)
95. Leschke, A., Kühnel, S. et.al: Simulations on Consumer Tests: A Systematic Evaluation Approach in an Industrial Case Study IEEE/ITSC Qingdao /China 2014
96. C.J. Kahane: Lives Saved by Vehicles Safety Technologies and Associated Federal Motor Vehicle Standards, 1960 to 2012 – Passenger Cars and LTVs. National Highway Traffic Safety Administration, United States, Paper Number 15-0291 (2015)

**Allgemeine Literatur**

97. Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Grundlagen – Komponenten – Systeme. Springer Vieweg, Wiesbaden (2013)
98. Seiffert, U., et al.: Automotive Safety Handbook. SAE International, Warrendale (2004)
99. Zobel, R., et al.: International technical automotive conference compatibility in road traffic. ATZ, MTZ, Dresden (2005)
100. Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
101. VDI-Berichte zu Innovativem Insassen- und Partnerschutz
102. VDI-Berichte zur Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau
103. VDI-Berichte zu „Automotive-Security"
104. Fraunhofer Institut Chemische Technologie: Air Bag. Internationale Symposien. Karlsruhe
105. FISITA-Conferences
106. FISITA Safety Summit, 2010 www.FISITA.com
107. ESV – Experimental Safety Conferences
108. VDA, Frankfurt, Berlin: Tagungsbände zu den Technischen Kongressen
109. GZVB e. V./ITS Niedersachsen e. V. Braunschweig. Tagungsbände zu AAET
110. Appel, H., Krabbel, G., Vetter, D.: Unfallforschung, Unfallmechanik, Unfallrekonstruktion. Vieweg, Wiesbaden (2002)
111. VDI, Düsseldorf Positionspapier Wie viel passive Fahrzeugsicherheit brauchen wir in der Zukunft, November 2015

# Werkstoffe und Fertigungsverfahren

*Dr. Ludwig Hamm, Berthold Krautkrämer, Reinhart Malik, Dipl.-Ing. Volker Peitz, Dr.-Ing. Robert Plank und Dr. Peter Solfrank*

10.1 **Ein Blick zurück** – **1164**

10.2 **Werkstoffe moderner Kraftfahrzeuge** – **1167**

10.3 **Wettbewerb und Zusammenspiel der Werkstoffe** – **1233**

10.4 **Wälzlager im Fahrzeugbau** – **1234**

**Literatur** – **1249**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_10

## 10.1 Ein Blick zurück

Die Werkstoffe und Technologien, die in den Automobilen zum Einsatz kommen, spiegeln den jeweils vorhandenen Stand der Technik wider. Der für die gegebenen Anforderungen bestgeeignete Werkstoff bzw. das bestgeeignete Fertigungsverfahren kommt zum Einsatz. Somit ist ein Exkurs in die Werkstoffe der frühen Automobile zugleich ein Blick zurück in die Werkstofftechnik der damaligen Zeit, siehe auch ◘ Tab. 10.1 und ◘ Tab. 10.2.

Die Automobile des 19. Jahrhunderts mussten mit einer aus heutiger Sicht „überschaubaren" Werkstoff-Vielfalt auskommen. Die Materialien aus dem Kutschenbau für Fahrwerk und Aufbau sowie die Eisen- und Buntmetalle aus dem Stationär-Motorenbau für das Antriebsaggregat bildeten den Ausgangspunkt einer dann auch durch das Automobil getriebenen Werkstoff-Neu- und Weiterentwicklung.

Die Aufbauten boten zunächst keinen Wetterschutz, eine Innenausstattung im heutigen Sinne gab es nicht.

Als Werkstoff für Bremsbeläge an Klotzbremsen kam Leder zum Einsatz. Die Rahmen bestanden aus Stahlrohren und wurden in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts durch kombinierte Holz- und Eisenrahmen und dann gepresste Stahlrahmen, die eine erhöhte Tragfähigkeit bei niedrigem Gewicht aufwiesen, ersetzt.

Als Material für Karosserien wurde zunächst vorwiegend Holz verwandt, wobei vereinzelt auch Aluminium, Holz- oder Blechkombinationen vorkamen. Motorhauben zum Beispiel waren häufig aus Aluminiumblech in einem Stück gefertigt.

Holz blieb bis in die 30er-Jahre das wichtigste Material für die Karosserieaufbauten. Es brauchte je nach verwendeter Holzart eine entsprechende aufgespachtelte, mehrlagige Grundierung, die dann über Tage austrocknen musste. Darauf wurde dann ebenfalls in mehreren Lagen der Decklack aufgebracht. Für das Armaturenbrett wurden Holzbretter verwendet; sie leben im Namen des Bauteils auch heute noch weiter. Die Räder hatten, wie im Kutschenbau, Holzspeichen.

Das vielfach auftretende Versagen von Teilen aufgrund von Ermüdung (z. B. Kurbelwellen oder Federn) führte zu starken Überdimensionierungen der Fahrzeugkomponenten. General Motors gründete im Jahr 1911 sein erstes Werkstofflabor, um ein besseres Verständnis für Metalle zu erarbeiten.

Für die Vorderachse seines „Model T" verwendete Ford 1907 einen teuren, mit Vanadium legierten Stahl, der eine höhere Festigkeit als die herkömmlichen Stähle aufwies.

Bereits nach dem ersten Weltkrieg waren die Konstrukteure bemüht, das Gewicht der Fahrzeuge niedrig zu halten. Dieses führte unter anderem zu einem verstärkten Einsatz von Aluminium, z. B. für Kurbelgehäuse, Getriebegehäuse und Karosseriekomponenten. Schon vorher begann man primär in Amerika damit, Aluminium-Druckgussteile, zum Beispiel zur Verbindung von Rahmen, für den Automobilbau zu verwenden. Die dortige Automobilindustrie wurde sehr schnell der größte Anwender von Druckgussteilen. Mit Sandgussformen wurden vereinzelt sogar großflächige und dünnwandige Teile wie Dächer oder Türen produziert.

Es gab jedoch auch Probleme, wie das Beispiel der Zink-Druckgusstechnik zeigt.

Verunreinigungen der Zinklegierungen mit Kupfer, Blei und Zinn führten in Kombination mit Feuchtigkeit zu elektrolytischen Vorgängen, die zu einem Zerfall des Bauteils führen konnten (sog. „Zinkpest"). Erst durch Einführung hochreiner Legierungen konnte dieses Problem beseitigt werden.

Für die Firmen Dodge und Pontiac fand 1913 bzw. 1915 die Ganzstahlkarosserie zum ersten Mal Einzug in den Serienwagenbau. Biege- und Torsionssteifigkeit waren höher als bei der bis dahin verwendeten Mischbauweise aus Holz und Blech. Um die Karosserien zu bauen, die auf einem Patent von Edward G. Budd basierten und aus bis zu 300 Blechteilen bestanden, wurden aus Frankreich neu entwickelte Acetylen-Schweißanlagen nach Amerika importiert. Auch Punktschweißmaschinen existierten zu dieser Zeit bereits. Zu einer entsprechenden Automobilkarosserie gehörten damals ungefähr 1100 Schweißpunkte.

Die Umformung der Bleche war Handarbeit für Spezialisten und entsprechend teuer. Dieses kann auch als Grund dafür angesehen werden, warum sich die Ganzstahlkarosserie erst in den 20er und 30er-Jahren immer weiter bei Serienfertigungen durchsetzte. Voraussetzung dafür war die Entwicklung leistungsstarker Pressen für Karosse-

**Tabelle 10.1** Beispiele für Innovationserfolge und Fehlversuche

| Jahr | Firma/Fahrzeug | Bemerkung | |
|---|---|---|---|
| 1922 | Weymann-Karosserie | Lederbespannte Karosserie zur Reduzierung der Klappergeräusche | ↓ |
| 1924 | du Pont | Pyroxylin Lack, der die notwendige Lackierzeit von etwa 3 Wochen auf 2 Tage reduzierte und eine Oberflächenqualität garantierte, die um einiges über der bis dahin üblichen Lacke lag | ↑ |
| 1926 | Safety Stutz | Splitterfreies Sicherheitsglas mittels einer in der Mitte des Glases eingelegten Drahteinlage | ↑ |
| 1936 | Volkswagen | Magnesium Gussteile, im Wesentlichen für Getriebe- und Kurbelgehäuse mit der Folge einer großen Gewichtsersparnis | ↑ |
| 40er/50er | Crosley-Kleinwagen | Motor aus gepresstem und gestanztem Stahlblech | ↓ |
| 1941 | Opel | Tauchgrundierung | ↑ |
| 1945 | Grégoire AF | Aluminium-Karosserie mit Aluminiumgussteilen für die tragende Struktur | ↓ |
| Ende 40er | Michelin | Stahlgürtelreifen | ↑ |
| 50er | Lloyd 300 („Leukoplastbomber“) | Hartholz-Fachwerk-Gerippe mit Sperrholzverkleidung und Kunstlederbezug | ↓ |
| 1954 | Panhard Dyna 54 | Selbsttragende Karosserie aus punktgeschweißten Aluminiumblechen | ↓ |
| 1954 | GM Corvette | Stahl-Karosserie mit faserverstärkten Kunststoffaußenteilen | → |
| 1957 | Lotus Elite Coupé | Karosserie aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Drei großflächige Teile, die miteinander verklebt werden | → |
| 1962 | Glas | Kunststoff-Zahnriemen zum Nockenwellenantrieb | ↑ |
| 1977 | Porsche | Feuerverzinktes Stahlblech für die Rohkarosserie ermöglicht 6-, später 10-jährige Korrosionsschutzgarantie | ↑ |
| 1980 | GM Corvette | Glasfaserverstärkte Blattfeder | → |
| 1981 | DMC (DeLorean Motor Company) | Stahl-Zentralrahmen, faserverstärkte Kunststoffstruktur mit daran angeschraubten Edelstahl-Außenhautteilen | ↓ |
| 1983 | Polimotor Research Inc. | Vierzylinder-Ottomotor, bei dem die ruhenden Teile, wie zum Beispiel der Motorblock, aus Phenol-Verbundwerkstoff bestehen | ↓ |
| 1994 | Audi A8 | Voll-Aluminium-Karosserie in „Aluminium Space Frame“-Bauweise | ↑ |
| 1997 | Bosch | Hochdruck Dieseleinspritzung Common Rail | ↑ |
| 1997 | Toyota Prius | Erstes serienreifes Hybridfahrzeug | ↑ |
| 2000 | US-Marine | Ziviler Einsatz von GPS wird ermöglicht | ↑ |
| 2003 | Porsche Carrera GT | Erstes Serienfahrzeug mit Chassis und Aggregateträger vollständig aus CFK | ↑ |
| 2008 | Tesla Roadster | Erstes serienreifes Elektrofahrzeug der Neuzeit | → |

↑ Konnte sich in dieser oder abgewandelter Form durchsetzen
→ Wurde zumindest partiell weiterverfolgt
↓ Konnte sich nicht durchsetzen

**Tabelle 10.2** Der Motorsport als Schrittmacher für neue Werkstoffe und Technologien

| Jahr | Firma/Fahrzeug | Bemerkung |
|---|---|---|
| 1895 | Michelin | Fahrzeug mit Luftbereifung im Rennen Paris-Bordeaux-Paris |
| 1899 | Dürrkopp | Entwicklung eines kleinen Sportwagens, der zur Gewichtsreduzierung eine Aluminium-Karosserie besaß |
| 1900 | Maybach/Daimler | Für Jellinek gelieferter Daimler, den dieser dann nach seiner Tochter „Mercedes" nannte, hatte einen weitgehend aus Aluminium und Magnesium hergestellten Motor sowie einen Bienenwabenkühler aus Messing |
| 1934 | Auto-Union | Kurbelgehäuse und Zylinderköpfe aus Aluminiumguss gefertigt beim 16-Zylinder Motor |
| 1962 | Porsche | Titan für die Pleuel des Formel 1-Motors |
| 1963 | Porsche 904 GTS | Erstes deutsches Serienfahrzeug mit GFK-Außenhaut |
| 1967 | Porsche 910/8 | Verwendung eines Aluminium-Gitter-Rohrrahmens mit part. Sekundärfunktion der Rohre als Ölleitung |
| 1971 | Porsche 917 | Verwendung von Magnesium für Gitter-Rohrrahmen |
| 1981 | Hercules/McLaren/Lotus | Tragende Struktur von Formel 1-Fahrzeugen erstmals aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen |
| 1982 | Hohlspeichenfelge (Mg- Guss) mit Reifendruck-überwachung | Hohlgegossene und reibgeschweißte Felge für den Porsche 956 |
| 1986 | Stabi aus CFK | Einsatz im Porsche 956 |
| 1986 | Kevlar-Kohlefaser-Verbund als Unterbodenschleif-schutz | Einsatz im Porsche 959 (Ralley- Version) mit wesentlich geringeren Gewicht bei verbesserter Verschleißfestigkeit als eine Metallausführung |
| 1994 | Mg- Schmiedefelge, BBS | Einsatz bei Ferrari |



riebleche, um eine Serienfertigung von entsprechenden Blechteilen in größerer Stückzahl zu ermöglichen. Ford zum Beispiel baute sein T-Modell mit Holzgerippe-Karosserie bis zur Produktionsumstellung 1927. Ebenfalls in jenem Jahr präsentierte Krupp ein speziell für Karosserieteile geeignetes Tiefzieh-Feinblech.

Weiterhin dominierte die Bauweise eines fahrfähigen Leiterrahmens, auf den anschließend die Karosserie montiert wurde.

Es gab Ausnahmen, wie zum Beispiel der im Oktober 1922 präsentierte Lancia Lambda, der einen kastenförmig hochgezogenen Rahmen besaß und damit als das erste Fahrzeug mit einer teilweise selbsttragenden Karosserie angesehen werden kann. Lancia besaß das Patent für ein Fahrzeug ohne herkömmliches Fahrgestell.

In den dreißiger Jahren ersetzte Aluminium als Werkstoff für Kolben das Gusseisen in den meisten Motoren. Zylinderköpfe aus Aluminium dagegen waren zu diesem Zeitpunkt aus Gründen der Haltbarkeit weniger erfolgreich.

Ebenfalls in den 30er-Jahren stiegen die Anwendungen für Elastomere. Chrysler zum Beispiel verwendete zur Steigerung des Akustik-/Schwingungskomforts Gummilager für seinen 4-Zylinder Motor. Weiterhin wurden Elastomere erstmals zur Abdichtung der Karosserie eingesetzt.

Da auch das Design der Fahrzeuge immer mehr zu einem Verkaufsargument wurde, fing man an, diese äußerlich zu verzieren. So verwendete Ford rostfreie Stähle für Kühlergehäuse, Türgriffe und Haubenabdeckungen. Mit dem gleichen Ziel wurden in den 30er-Jahren ebenfalls ver-

mehrt verchromte Bauteile als Stilelement verwendet.

Das durchschnittliche Automobil verwendete 1955 ungefähr 5 kg an Kunststoffen mehrheitlich für dekorative Teile, wie z. B. Raddeckelembleme oder Hupenknöpfe. Zwischen 1960 und 1970 stieg der durchschnittliche Anteil an Kunststoffen von 11 kg auf 45 kg. Der größte Anteil davon entfiel auf nichttragende Interieurbauteile.

Die Einführung der Kunststoffe in das Fahrzeug verlief eingangs nicht reibungslos. Sie wurde zwischendurch getrübt durch „billig" und unfertig wirkende Anwendungen. Erst in den sechziger Jahren wurde Kunststoff generell akzeptiert und verlor zunehmend sein Image des preiswerten Ersatzwerkstoffes.

Mehrere Gründe haben dazu geführt, dass sich Faserverbundkunststoffe bis heute noch nicht in größerer Stückzahl im Automobilbau durchgesetzt haben. Diese sind z. B. gegenüber Aluminium und Stahl höhere Werkstoffkosten, aufwändigere Fertigungsverfahren mit zum Teil langen Zykluszeiten und aufwändige Prüf- und Qualitätssicherungsverfahren.

## 10.2 Werkstoffe moderner Kraftfahrzeuge

Der folgende Abschnitt gibt einen Gesamtüberblick zum umfangreichen Thema „Werkstoffe und Fertigungsverfahren" sowie zu den damit eng verknüpften Fertigungs-, Füge-, und Recylingverfahren im Automobilbereich.

### 10.2.1 Materialanteile im Automobilbau

Abb. 10.1 zeigt die Anteile von unterschiedlichen Werkstoffen in Pkws für das Jahr 2007 und als Ausblick für das Jahr 2015.

Entgegen früherer Aussagen hat sich der Anteil der Stahlwerkstoffe in den vergangenen 30 Jahren nicht so stark reduziert, wie dies in der Vergangenheit angekündigt worden ist. Auch für die Zukunft wird mit einer weiteren geringfügigen Reduzierung des Stahlanteils gerechnet, der von Werkstoffen aus dem Bereich der Nicht-Eisenmetalle (Leichtmetalle) und modernen Kunststoffen substituiert wird.

**Karosserie** Der nach wie vor dominierende Werkstoff in der Karosserie ist Stahl. Unter dem Fokus des Leichtbaus werden verstärkt hoch- und höchstfeste Stähle mit einer Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 180 MPa bis sogar >1800 MPa (Bor-legierte Stähle) ausgewählt [8]. Aluminiumintensive Karosseriekonzepte sind im Wesentlichen auf Fahrzeuge der Oberklasse beschränkt, hatten zwischenzeitlich in Verbindung mit dem „3-Liter-Auto" aber auch in der Kompakt- und Kleinwagenklasse Einzug gehalten (z. B. der frühere Audi A2).

Magnesium kommt bereits in vielen Bereichen der Karosserie moderner Kraftfahrzeuge zum Einsatz. Z. B. für Sitzrahmen, Türrahmen, Instrumententafelträger oder Verdeckkomponenten.

Kunststoffe spielen vor allem im Interieur eine dominierende Rolle. Im Exterieurbereich findet man sie hauptsächlich im Bug- und Heckverkleidungen. Kunststoff wird auch in Kombination mit metallischen Werkstoffen in Form von Hybridbauteilen eingesetzt, wobei die positiven Eigenschaften der unterschiedlichen Werkstoffe miteinander kombiniert werden.

Faserverbundwerkstoffe spielen für Großserienfahrzeuge bislang keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der aufwändigen Verarbeitung und der schwierigen Qualitätssicherung ist ein breiter Einsatz bislang ausgeblieben. BMW hat in dem Joint Venture gemeinsam mit SGL Carbon CFK auch für die Großserie einsetzbar gemacht.

Eine zunehmende Anzahl von Karosserien weist einen sog. Werkstoffmischbau mit unterschiedlichen Anteilen von Stahl, Aluminium, Magnesium oder Kunststoffen im Rohbau auf. Dabei ist es das Ziel, den für den jeweiligen Bereich am besten geeigneten Werkstoff einzusetzen. Beispiele für Karosserien in Mischbauweise sind die Fahrzeuge von Aston Martin, der Audi TT, oder der Porsche Panamera.

**Fahrwerk** Auch im Fahrwerk stellen Leichtmetalle, speziell Aluminium als Guss- oder Knetlegierung, einen immer größeren Werkstoffanteil. Der Anteil

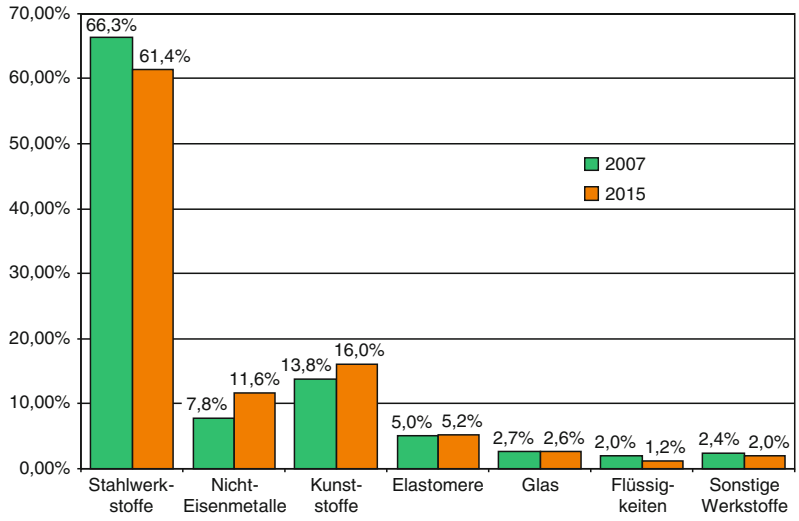



**Abb. 10.1** Werkstoffanteile [%] im Pkw [7]

10

an Stahl- und Eisenwerkstoffen nimmt dementsprechend auch im Fahrwerk kontinuierlich ab.

Magnesium wird in den typischen Fahrwerksbereichen (Schwenklager, Lenker, etc.) aufgrund der Korrosionsrisiken und der niedrigen mechanischen Kennwerte dagegen nicht eingesetzt.

Magnesiumräder sind zwar technisch machbar, blieben jedoch auf Kleinserienanwendungen im Sportwagenbereich (z. B. Porsche Carrera GT) oder den Zubehörhandel beschränkt [11].

**Antrieb** Im Antrieb kommt heute schon eine Vielzahl von Werkstoffen zum Einsatz, so dass hier der Begriff „Multi-Material-Design" am ehesten gerechtfertigt ist [12].

Kurbelgehäuse aus hochsiliziumhaltigem Aluminium (z. B. AlSi17Cu4) oder Grauguss finden sich ebenso wie Ansaugrohre aus glasfaserverstärktem Kunststoff oder Kurbelwellen aus geschmiedeten Stahlwerkstoffen. Keramikmaterialen in Katalysatoren sind heute ebenso Stand der Technik wie sog. Keramik-Preforms für verschleißarme Zylinderlaufflächen als Einlegeteile in Aluminiumkurbelgehäusen. Im Reihensechszylinder Ottomotor von BMW wurde der Werkstoff Magnesium zum ersten Mal als Mg/Al-Verbundkurbelgehäuse in Serie gebracht. Gegenüber einem vergleichbaren Aluminium Kurbelgehäuse wurden hierdurch ca. 10 kg Gewicht eingespart. Neben dem Kurbelgehäuse besteht die Zylinderkopfhaube aus Magnesium.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Verwendung von Stahl anteilig zwar gesunken ist, Stahlwerkstoffe aber nach wie vor eine dominierende Rolle im Automobilbau spielen. Die Steigerungsraten der Kunststoffe haben sich in den letzten Jahren abgeschwächt, doch werden sie in innovativen Fahrzeugkonzepten zukünftig weiter eine wichtige Rolle spielen. Leichtmetalle, und hier liegt der Fokus besonders auf Aluminium, werden bei der Auslegung zukünftiger, gewichtsoptimierter Fahrzeuge weiter an Bedeutung gewinnen. Mit zunehmender Verkehrsdichte und durch gesellschaftliche und ökologische Veränderungen wurden und werden die Anforderungen an Automobile immer komplexer und anspruchsvoller. Nicht durch alleinige Werkstoffsubstitution, sondern erst durch eine integrale Betrachtungsweise von Bauteil/Gewerk + Werkstoff + Bauweise + Verfahren werden neue Lösungsansätze zur Bewältigung zukünftiger Aufgaben entwickelt.

## 10.2.2 Fortschritte in den Leistungsmerkmalen

### 10.2.2.1 Festigkeit und Verarbeitung

#### 10.2.2.1.1 Stahlwerkstoffe

Karosseriestrukturen sind heute immer noch geprägt durch die klassische Stahl-Schalenbauweise. Ein weiteres Leichtbaupotenzial wird durch die Weiterentwicklung von Stahlwerkstoffen und -halbzeugen gehoben, die zu kostenoptimierten Karosserien in Stahl-Schalenbauweise mit deutlichen Gewichtseinsparungen gegenüber aktuellen Karosserien führen können [13].

Im Folgenden werden speziell Entwicklungen im Bereich der Stahl-Feinbleche betrachtet (◘ Tab. 10.3). Nach den früher ausschließlich eingesetzten weichen Stählen wurden im ersten Schritt zunächst höherfeste Bleche (Mindestdehngrenze $> 180$ MPa) entwickelt. In jüngster Zeit sind durch intensive Weiterentwicklung höchstfeste Stahlbleche, teilweise mit Zugfestigkeiten von bis zu 1200 MPa, im Einsatz.

**Weiche Stähle**

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Tiefzieh- bzw. Streckziehbarkeit der Werkstoffe wurden neben den seit längerem bekannten weichen Stahlfeinblechen die Stahlsorten DX56 und DX57 mit einer extrem hohen Bruchdehnung entwickelt. Hierbei ist es gelungen, durch eine Optimierung der Vakuumbehandlung immer niedrigere Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte einzustellen bzw. Kohlenstoff und Stickstoff durch entsprechende Legierungselemente abzubinden.

**Höherfeste Stähle**

**Mikrolegierte Stähle (Index LA)** Zu den mittlerweile bewährten und bereits seit längerem bei vielen Fahrzeugherstellern eingeführten Stählen gehören mikrolegierte Stähle (Legierungselemente Niob, Vanadium und Titan). Diese Stähle wurden Mitte der 70er-Jahre konzipiert und seit dem kontinuierlich weiterentwickelt. Bereits heute wird im Rohbau häufig ein (gewichtsbezogener) Anteil an hoch- und höchstfesten Blechen von über 50 % realisiert. Seit Beginn der Entwicklung dieser Stahlsorten war eine stetige Festigkeitssteigerung gegenüber unlegierten Stählen bei gleichzeitig besseren Verarbeitungseigenschaften möglich. Heute können diese Stähle bis zu einer Mindestdehngrenze von 500 MPa geliefert werden.

**Bake Hardening Stähle (Index B)** Unter der Bezeichnung Bake Hardening Stähle werden Kaltbandstähle geliefert, die bei Raumtemperatur alterungsbeständig sind und im Anlieferungszustand eine gute Kaltumformbarkeit infolge einer niedrigen Dehngrenze aufweisen. Sie werden nach einem Verfahren hergestellt und behandelt, welches eine bedeutende Dehngrenzensteigerung durch eine Warmbehandlung im Niedrigtemperaturbereich (z. B. durch den Lackeinbrennprozess) zur Folge hat. Es kann also bei gleichzeitiger Beibehaltung guter Umformeigenschaften ein erheblich höheres Festigkeitsniveau am Fertigteil erreicht werden. Die so erzielte Dehngrenzenerhöhung, der sog. „Bake-Hardening Effekt“ (BH), beträgt ca. 40 MPa. Die Mindestdehngrenzen im Anlieferungszustand liegen zwischen 180 und 340 MPa.

**IF-Stähle (Index Y)** IF-Stähle werden nach einem Verfahren erzeugt, das eine interstitielle Einlagerung von Legierungselementen verhindert (IF: Interstitial Free). Die Steigerung der Festigkeit wird durch Zulegieren von Mangan, Silizium und Phosphor zur Ferritmatrix während der Stahlerzeugung erreicht. So wird die Tiefziehfähigkeit optimiert. Ein niedriges $R_e/R_m$-Verhältnis und einer hoher Verfestigungsexponent $n$ sorgen für ausgezeichnete Tiefzieheigenschaften und eine gleichmäßige Verteilung der Verformung.

**Mehrphasenstähle (Index X, T, C, M)** Für Konstruktionselemente und crashrelevante Strukturteile im Fahrzeugbau sind zunehmend hoch- und höchstfeste Stähle von Interesse. Das grundsätzliche Problem einer steigenden Werkstofffestigkeit ist dabei eine naturgemäße Verminderung des Umformvermögens. Hierdurch können die Einsatzmöglichkeiten des Werkstoffes begrenzt sein.

Dies führte zu neuen Konzepten, den sog. Mehrphasenstählen. Die Festigkeitssteigerung beruht hier auf einer Gefügehärtung (structural hardening). In eine Matrix bestehend aus weichen,

**Tabelle 10.3** Auszug aus der DIN-EN 10346 „Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl" [16]

| | **Dehngrenze $R_{p0,2}$ MPa** | **Zugfestigkeit $R_m$ MPa** | **Bruchdehnung $A_{80}$ % min.** | **Senkrechte Anisotropie $r_{90}$ min.** | **Verfestigungsexponent $n_{90}$ min.** |
|---|---|---|---|---|---|
| *Weiche Stähle* | | | | | |
| DX54D+Z | 120–220 | 260–350 | 36 | 1,6 | 0,18 |
| DX56D+Z | 120–180 | 260–350 | 39 | 1,9 | 0,21 |
| DX57D+Z | 120–170 | 260–350 | 41 | 2,1 | 0,22 |
| *Mikrolegierte Stähle* | | | | | |
| HX260LAD+Z | 260–330 | 350–430 | 26 | k. A. | k. A. |
| HX340LAD+Z | 340–420 | 410–510 | 21 | k. A. | k. A. |
| HX420LAD+Z | 420–520 | 470–590 | 17 | k. A. | k. A. |
| *Bake-Hardening Stähle* | | | | | |
| HX180BD+Z | 180–240 | 290–360 | 34 | 1,5 | 0,16 |
| HX260BD+Z | 260–320 | 360–440 | 28 | k. A. | k. A. |
| HX300BD+Z | 300–360 | 400–480 | 26 | k. A. | k. A. |
| *IF-Stähle* | | | | | |
| HX180YD+Z | 180–240 | 330–390 | 34 | 1,7 | 0,18 |
| HX220YD+Z | 220–280 | 320–400 | 32 | 1,2 | 0,15 |
| HX300YD+Z | 300–360 | 390–470 | 27 | 1,3 | 0,15 |
| *Dualphasen-Stähle* | | | | | |
| HCT500X+Z | 300–380 | ≥ 500 | 23 | k. A. | 0,15 |
| HCT600X+Z | 340–420 | ≥ 600 | 20 | k. A. | 0,14 |
| HCT780X+Z | 450–560 | ≥ 780 | 14 | k. A. | k. A. |
| HCT980X+Z | 600–750 | ≥ 980 | 10 | k. A. | k. A. |
| *TRIP-Stähle* | | | | | |
| HCT690T+Z | 430–550 | ≥ 690 | 23 | k. A. | 0,18 |
| HCT780T+Z | 470–600 | ≥ 780 | 21 | k. A. | 0,16 |
| *Complexphasen-Stähle* | | | | | |
| HCT780C+Z | 500–700 | ≥ 780 | 10 | k. A. | k. A. |
| HCT980C+Z | 700–900 | ≥ 980 | 7 | k. A. | k. A. |
| *Martensitphasen-Stähle* (warmgewalzt) | | | | | |
| HDT1200M+Z | 900–1150 | ≥ 1200 | 5 | k. A. | k. A. |

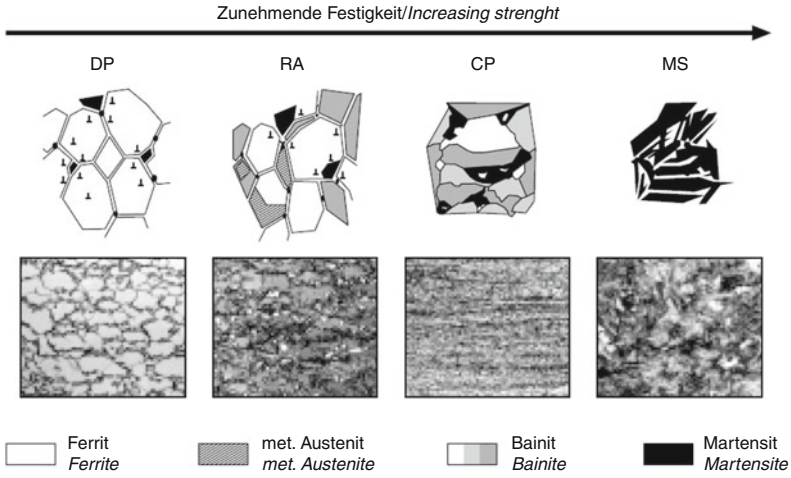



**Abb. 10.2** Gefügehärtung bei Mehrphasen-Stählen [15]

ferritischen Anteilen wird möglichst gleichmäßig verteilt ein härterer Gefügeanteil aus einer oder mehreren anderen Phasen eingebracht.

Begonnen hat diese Entwicklung mit den Dualphasenstählen (DP, Index X), gefolgt von Rest-Austenit/TRIP Stählen (TRIP = **Tr**ansformation **I**nduced **P**lasticity, Index T). Hinzugekommen sind in jüngster Zeit höchstfeste Complexphasenstähle (CP, Index C) und Martensitphasenstähle (MS, Index M). Diese decken einen Festigkeitsbereich von ca. 750–1200 MPa ab. Erfolgreich eingesetzt werden die CP- und MS-Stähle bereits bei Türaufpralllträgern, Stoßfängerquerträgern, Sitzquerträgern und anderen, crash-relevanten Bauteilen (z. B. Verstärkungen, Säulen).

**Herstellung und Gefüge von Mehrphasenstählen**
Wie bereits einleitend erwähnt, basieren die besonderen Eigenschaften der Mehrphasenstähle auf ihrer Mikrostruktur. Eine oder mehrere Härtungsphasen müssen möglichst gleichmäßig in die weiche Ferritmatrix eingebettet sein (Abb. 10.2). Ausgehend von einem Austenit-Ferrit Zweiphasengefüge, das beim Warmband nach dem Walzende bzw. beim Kaltband im Durchlaufglühprozess während des Glühens eingestellt wird, erfolgt eine rasche Abkühlung, mit der die sonst übliche Perlitumwandlung so weit wie möglich unterdrückt und eine Martensitbildung des verbliebenen C-angereicherten Austenits erreicht wird. So lässt sich bspw. beim DP-Stahl ein Martensitgehalt von ca. 10–20 % mit Zugfestigkeiten von 500–1000 MPa erzielen. Weitere Entwicklungen deuten noch höhere Festigkeiten dieser Werkstoffvariante an.

Bei TRIP- und CP-Stählen findet die Austenitumwandlung gezielt bei höheren Temperaturen im Bereich des Bainits statt. Daher setzt sich das Gefüge bei einem Trip-Stahl neben dem Hauptbestandteil Ferrit aus einem Anteil an eingelagertem Bainit und einem geringen Anteil metastabilen Restaustenits zusammen. Dieser Restaustenit wandelt sich erst bei einer nachfolgenden Verformung, z. B. dem Tiefziehen, in Martensit um. Abb. 10.3 zeigt eine schematische Darstellung der Glühbehandlung eines kaltgewalzten TRIP-Stahls mit den jeweils entstehenden Phasen. TRIP-Stähle sind derzeit mit Festigkeiten von 700–800 MPa verfügbar. Sie weisen gegenüber DP-Stählen bei vergleichbaren Festigkeiten höhere Dehnungen und damit eine bessere Umformbarkeit auf, sind jedoch aufgrund der oben beschriebenen anspruchsvollen Prozessführung bei der Erzeugung deutlich teurer.

CP-Stähle weisen ebenfalls eine sehr feine Gefügestruktur gemäß obigem Muster auf. Zusätzlich findet jedoch durch feine Karbid- und/oder Nitridausscheidungen eine Ausscheidungshärtung statt. Der Festigkeitsbereich dieser Stähle liegt zwischen 800 und 1000 MPa. Aufgrund der vergleichswei-

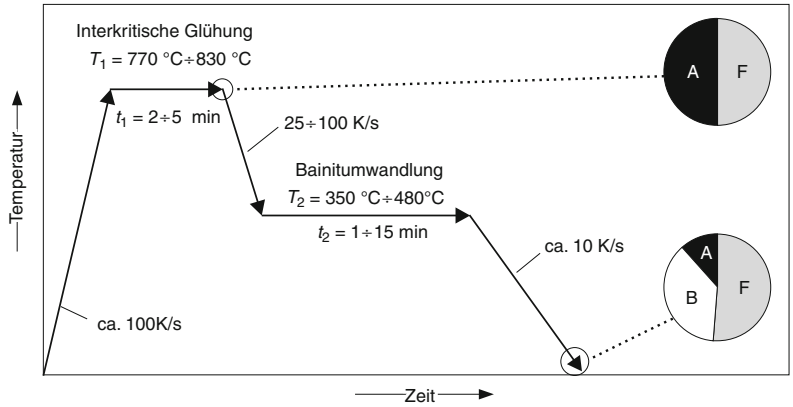



**Abb. 10.3** Schematische Darstellung der Glühbehandlung von kaltgewalzten TRIP-Stäben mit Angabe der entstehenden Phasen: *A* = Restaustenit, *F* = Ferrit, *B* = Bainit [14]

se geringen Dehnung ist die Umformbarkeit dieser Werkstoffe allerdings eingeschränkt, so dass hier häufig das Rollformen als formgebendes Verfahren eingesetzt wird (z. B. für Stoßfänger- und Türaufpralllträger).

**Eigenschaften von Mehrphasenstählen**

Das gute Verformungsverhalten dieser Stähle beruht auf der überwiegenden Konzentration der plastischen Verformung auf die weichere Matrix, speziell zu Beginn des Umformprozesses. Im klassischen Zugversuch drückt sich ein gutes Verfestigungsvermögen in einem hohen *n*-Wert (Verfestigungsexponent) bzw. einem niedrigen Streckgrenzenverhältnis $R_e/R_m$ aus. Bei konventionellen höherfesten mikrolegierten Güten kann die Streckgrenze mehr als 90 % der Zugfestigkeit betragen. Bei DP-Stählen weist sie dagegen nur ca. 70 % der Zugfestigkeit auf. Dies erleichtert den Umformprozess erheblich. Das Risiko für ein partielles Ausdünnen oder gar des Reißens bei schwierigen Umformprozessen wird durch das hohe Verfestigungsvermögen dieser Stähle verringert. Durch die starke Verfestigung werden trotz niedriger Ausgangsstreckgrenzen nach der Umformung hohe Bauteilfestigkeiten erzielt.

Noch niedrigere Streckgrenzenverhältnisse und gleichzeitig gute Verfestigungswerte werden mit TRIP-Stählen erreicht. Die mit diesen Stahlsorten, gemessen an ihren Festigkeiten im Bereich von 700–800 MPa, erreichbare Umformbarkeit ist bislang unübertroffen.

CP-Stähle wurden zunächst nur als Warmband mit einer minimalen Dicke von ca. 1,5 mm hergestellt, mittlerweile sind auch kaltgewalzte Güten verfügbar. Bislang bekannte Werkstoffe dieser Festigkeitsklasse mussten in der Regel warmumgeformt und danach vergütet werden. Der Vorteil der CP-Stähle liegt darin, dass eine Kaltumformung (ohne anschließende Vergütung) und damit ein erhebliches Kosteneinsparungspotenzial möglich ist.

Wegen des nochmals erhöhten Martensitanteils bieten MS-Stähle Zugfestigkeiten von ca. 1200 MPa, allerdings bei einer vergleichsweise geringen Bruchdehnung von 5 %. Daher werden Bauteile aus solchen Güten, die derzeit nur als Warmband verfügbar sind, ausschließlich mittels Rollformen hergestellt (z. B. Türaufpralllträger).

Der bereits oben beschriebene Bake-Hardening Effekt kann auch bei den Mehrphasenstählen beobachtet werden. Eine (Feuer-)Verzinkung im Herstellprozess, also direkt am Coil, der hier beschriebenen Werkstoffe ist möglich und aus Korrosionschutzgesichtspunkten, speziell bei reduzierten Blechdicken, auch sinnvoll.

Generell ist festzuhalten: Die Auswahl der einzusetzenden Feinblechsorte für ein bestimmtes Festigkeitsniveau soll mit besonderem Blick auf die hauptsächlich zu erwartende Umformbeanspruchung (Streck- oder Tiefziehbeanspruchung) ge-

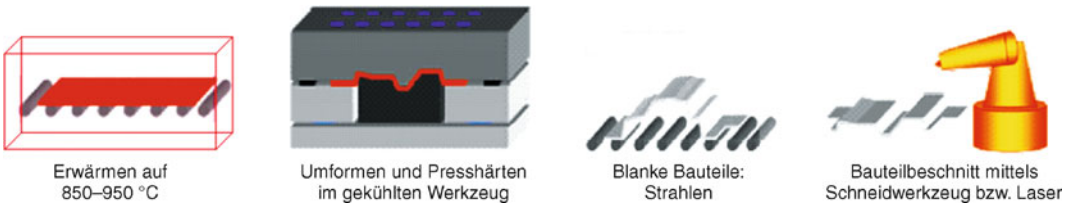



**Abb. 10.4** Schematischer Ablauf des direkten Warmumformen s [18]




**Abb. 10.5** Schematischer Ablauf des indirekten Formhärtens [18]

troffen werden. In einer Kombination von Streck- und Tiefziehbeanspruchungen haben Stähle mit gleichermaßen hohen $r$- und $n$-Werten Vorteile [174].

### Formhärtbare Stahlwerkstoffe

Die kontinuierlich steigenden Anforderungen an die passive Sicherheit und der damit steigende Bedarf an höchstfesten Stahlwerkstoffen in crashrelevanten Bereichen der Karosserie (z. B. für Seitenaufprallträger, A- und B-Säulen, Schweller, Dachrahmen oder Querträger) hat zu einem verstärkten Einsatz von sog. formhärtbaren Stählen und zur Entwicklung eines geeigneten Herstellungsprozesses geführt. Bei den als „Formhärten" bzw. „Presshärten" genannten Verfahren unterscheidet man prinzipiell zwei mögliche Herstellungswege:

1. das direkte Warmumformen und
2. das indirekte Formhärten.

Beim direkten Warmumformen (vergl. Abb. 10.4) wird das ferritisch-perlitische Halbzeug (typischerweise ein Mangan-Bor-legierter Stahl, z. B. 22 MnB5) in einem Durchlaufofen vollständig austenitisiert ($T$ = 850–950 °C). Im nächsten Schritt wird die noch im austenitischen Zustand befindliche Platine in einem gekühlten Werkzeug umgeformt und gleichzeitig durch den Abkühlvorgang gehärtet (Abkühlgeschwindigkeit ca. 30 K/s). Dabei wandelt sich der Austenit in ein Gefüge, bestehend aus angelassenem Martensit, durchsetzt mit bainitischen Phasenanteilen um. Bei blanken Bauteilen ist im Anschluss ein Strahlen zur Entfernung des Zunders erforderlich, bevor der Beschnitt erfolgen kann. Bei feueraluminierten Oberflächen bzw. Oberflächen mit einer Nano-X Beschichtung ist kein Strahlen erforderlich [17]. Der Beschnitt kann bei dünnen Bauteilen bis 1 mm Dicke durch ein Schneidwerkzeug oder bei dickeren Bauteilen mit einem Laser erfolgen.

Beim indirekten Formhärten (vgl. Abb. 10.5) wird die Platine im weichen Ausgangszustand zunächst kaltumgeformt. Dann erfolgt bereits der Beschnitt der Bauteile auf Endkontur, bevor sich der eigentliche Härteprozess, bestehend aus Erwärmen (Austenitisieren) und Presshärten (Umwandlung in das oben beschriebene martensitisch- bainitische Gefüge) im gekühlten Werkzeug anschließt. Metallurgisch laufen die gleichen Prozesse ab, wie beim direkten Warmumformen. Auch beim indirekten Formhärten müssen blanke Bauteile nach dem Härteprozess durch Strahlen von Zunder befreit werden. In der Regel werden beim indirekten Formhärten Halbzeuge mit feuerverzinkten oder galvannealed beschichteten Oberflächen verwendet, die das unkontrollierte Verzundern verhindern.

Die durch Formhärten hergestellten Bauteile sind aufgrund des Herstellungsprozesses nahezu frei von Eigenspannungen, was zu einer hohen Maßhaltigkeit führt. Folgende Anhaltswerte

der mechanischen Kennwerte für einen 22MnB5 im vollständig gehärteten Zustand können genannt werden:

Dehngrenze $R_{p0,2}$: 950 bis 1300 MPa
Zugfestigkeit $R_m$: 1400 bis 1800 MPa
Bruchdehnung $A_{80}$: $\geq$ 4,5 %.

Neben einer hohen Festigkeit werden in crashrelevanten Bauteilen auch Zonen benötigt, die bei mechanischer Belastung durch plastische Verformung Energie aufnehmen. Daher können neben den vollständig gehärteten Bauteilen auch *partiell gehärtete Bauteile/tailored Tempering Bauteile* oder Bauteile als *tailored welded Blanks* (z. B. die Kombination aus einem härtbaren Stahl mit einem Tiefziehstahl) hergestellt werden. Beim partiellen Formhärten wird das Werkzeug je nach gewünschten Eigenschaften sowohl gekühlt, als auch temperiert. Dadurch kommt es beim Presshärten in den wärmeren Bereichen des Werkzeugs zu einer langsameren Abkühlung, so dass die Umwandlung in Martensit nicht vollständig erfolgt und das Bauteil entsprechend duktile Zonen aufweist.

Neben Platinen können auch Rohre oder Profile entsprechend der oben genannten Verfahrensprinzipien hergestellt werden.

Die Verfahrenstechnik ist bereits bei einer Vielzahl von Bauteilen im Einsatz.

**Gusseisen**

Bei Gusseisen handelt es sich um Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit mindestens 2 % Kohlenstoff sowie weiteren Legierungselementen, vor allem Silizium.

Man unterscheidet:

- Gusseisen mit Lamellengraphit (DIN EN 1561),
- Gusseisen mit Kugelgraphit (DIN EN 1563),
- Gusseisen mit Vermiculargraphit,
- Tempergusseisen (DIN EN 1562),
- austenitisches Gusseisen (DIN EN 1564),
- Hartguss,
- verschleißbeständiges legiertes Gusseisen (DIN 1695),
- bainitisches Gusseisen (DIN EN 1564).

*Gusseisen mit Lamellengraphit*, auch als Grauguss bezeichnet, ist mit Abstand der am meisten vergossene Gusswerkstoff. Es kommen verschiedene Qualitäten mit Zugfestigkeiten von 100–200 MPa (EN-GJL 100) bis zu Zugfestigkeiten von 350–450 MPa (EN-GJL-350) zur Anwendung.

Einige Gründe, den Werkstoff Grauguss zu wählen, sind der relativ niedrige Kilopreis, die leichte Herstellbarkeit, die guten gießtechnischen Eigenschaften, die gute Bearbeitbarkeit, eine im Verhältnis zur Zugfestigkeit hohe Druck- und Biegewechselfestigkeit, die Unempfindlichkeit gegen höhere und tiefere Temperaturen sowie gegen Temperaturwechsel, die Unempfindlichkeit gegen Kerben, das gute Dämpfungsverhalten und die guten Notlaufeigenschaften. Einsatz im Kraftfahrzeug u. a. bei Bremsscheiben, Motorblöcken und als Schalenhartguss bei Nockenwellen.

*Gusseisen mit Kugelgraphit*, auch als Sphäroguss bekannt, hat gegenüber Gusseisen mit Lamellengraphit den Vorzug einer höheren Zugfestigkeit und vor allem einer höheren Duktilität. Es kommen Qualitäten mit Zugfestigkeiten größer 350 MPa (EN-GJS-350-22) bis zu Zugfestigkeiten größer 900 MPa (EN-GJS-900-2) zum Einsatz. Verwendung findet Sphäroguss im Kraftfahrzeug bei Ausgleichsgetriebegehäusen, Pleueln, Achsschenkeln, Schwungrädern, Ausrückhebeln und Kurbelwellen.

*Bainitisches Gusseisen* unterscheidet sich in die Gruppen

- bainitisch-austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit,
- bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit,
- Austempered Ductile Iron, ADI (Bezeichnung nach dem Warmbehandlungsverfahren, angelsächsischer Sprachgebrauch),
- austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (Bezeichnung nach dem Gefüge der metallischen Grundmasse „Ausferrite“) [22].

Im Folgenden wird auf die Qualität ADI bzw. Austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit eingegangen, eine neue Entwicklung im Bereich bainitisches Gusseisen. Diese neue Gusseisensorte zeichnet sich durch eine günstige Kombination von Festigkeit, Zähigkeit, Dämpfungsfähigkeit und Verschleißbeständigkeit aus. ADI wird durch eine Vergütungsbehandlung von hochwertigen Gussstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit

**Tabelle 10.4** Chemische Zusammensetzung der Legierung AlMg5Si2Mn (Massenanteil in %)

| | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Ti | andere | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | einzeln | gesamt |
| min. | 1,8 | | | 0,4 | 4,7 | | | | |
| max. | 2,6 | 0,25 | 0,05 | 0,8 | 6,0 | 0,07 | 0,25 | 0,05 | 0,15 |

hergestellt. Das Gussstück wird auf eine Temperatur von 840 bis 950 °C erhitzt, zur Austenitisierung auf dieser Temperatur gehalten und dann auf die Umwandlungstemperatur in der Bainitstufe von 230 bis 450 °C rasch abgekühlt [23]. Die Grundmasse von ADI besteht aus nadligem Ferrit in einer Matrix aus hochgekohltem, stabilisiertem Austenit, auch als Ausferrit bezeichnet. Dieses Gefüge hat mit dem bei Stahl vorliegenden Bainit nur entfernte Ähnlichkeit.

Es wird in vier Qualitäten mit mindestens 800 MPa Zugfestigkeit (EN-GJS-800-8) bis mindestens 1400 MPa Zugfestigkeit (EN-GJS-1400-1) unterschieden. Typische Bauteile für diesen Werkstoff sind Achsgehäuse, Radnaben, Zahnkränze und Kurbelwellen.

#### 10.2.2.1.2 Leichtmetalle

**Hochfeste Aluminiumlegierungen**

Insbesondere im Fahrwerk konzentriert sich die Entwicklung auf hochfeste und gleichzeitig hochzähe Legierungen. Im Folgenden sollen zwei typische Vertreter dieser Legierungen kurz vorgestellt und charakterisiert werden.

„*Magsimal-59*“, chemische Bezeichnung ENAC-AlMg5Si2Mn, ist ein von der Fa. Rheinfelden entwickelter Gusswerkstoff für Druckguss und Squeeze Casting, (siehe ▶ Abschn. 10.2.5), der im Gusszustand (Bezeichnung $F$) hohe Festigkeit bei höchster Bruchdehnung besitzt. In ◘ Tab. 10.4 ist die Werkstoffzusammensetzung nach DIN EN 1706:2010-06 wiedergegeben [24].

In vielen Fällen ist eine Wärmebehandlung der Gussstücke nicht mehr notwendig. Trotzdem werden nahezu die gleichen Festigkeitseigenschaften einer vergleichbaren Warmaushärtung T6, bei gleichzeitig hervorragenden Dehnungswerten, erreicht.

Die mechanischen Eigenschaften der Druckguss- und Squeeze Casting-Bauteile hängen von den Abkühlungsgeschwindigkeiten und den erzielbaren Dendritenabständen in den einzelnen Bauteilabschnitten und damit von den Wandstärken und der Werkzeugtemperatur ab. Bis 4 mm Wandstärke liegen im Gusszustand gute Streckgrenzen ($R_{p\,0,2}$), Zugfestigkeits- ($R_m$) und Dehnungswerte ($A_5$) vor. Mit zunehmenden Wandstärken bis 12 mm ist neben Zugfestigkeit und Dehnung vor allem die Streckgrenze von einem Abfall betroffen.

Bei 5 % Bruchwahrscheinlichkeit beträgt die Dauerfestigkeit für den Zustand „$F$“ 100 MPa (◘ Abb. 10.6). Im Vergleich dazu hat AlSi7MgT6 Kokillenguss warmausgehärtet, unter gleichen Prüfbedingungen geprüft, 93 MPa Dauerfestigkeit. Da auf eine Wärmebehandlung bei der Verwendung von „*Magsimal-59*“ verzichtet werden kann, können diese Teile kostengünstig hergestellt werden.

Mögliche Anwendungsbeispiele sind Lenkradskelette, Fahrwerksträger, Gussknoten für Space Frame Karosserien, Naben für Speichenräder mit eingegossenem Stahl und Bremsringe.

„*Silafont 36*“ (Fa. Rheinfelden), chemische Bezeichnung AlSi9MgMnSr, ist eine duktile Druckgusslegierung mit geringem Eisengehalt, eine Weiterentwicklung auf Basis des bekannten Werkstoffs AlSi9Mg, ◘ Tab. 10.5.

Der Richtwert für Silizium wird mit 10,5 % angegeben, womit die Legierung gut gießbar ist und ein gutes Formfüllungsvermögen aufweist. Der Eisen-Gehalt wurde so niedrig wie möglich eingestellt, um den Anteil der meist plattenförmig vorliegenden AlFeSi-Phasen möglichst gering zu halten. Diese Phasen sind wesentliche Ursache für niedrige Festigkeits- und Dehnungswerte.

Zur Erhöhung der Gestaltfestigkeit und zur Verringerung der Klebeneigung des Bauteils in der Form wurde der Mangangehalt auf rund 0,65 %

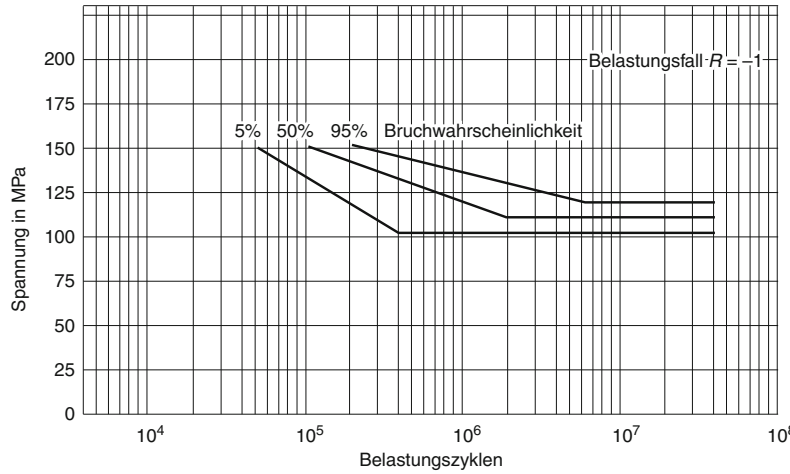



**Abb. 10.6** Wöhlerkurven für die Legierung AlMg5Si2Mn (Magismal-59) im Gusszustand. Bem.: Idealisiert dargestellt! In der Praxis erkennt man einen leichten Abfall der Dauerfestigkeit



angehoben. Mangan besitzt bei der Herabsetzung der Klebeneigung die gleiche Wirkung wie Eisen. Damit die Siliziumphase bereits im Gusszustand fein verteilt vorliegt, ist die Legierung mit Strontium dauerveredelt. Die mechanischen Eigenschaften werden durch die Höhe des Magnesiumgehaltes eingestellt [26].

Niedriger Magnesiumgehalt bedeutet hohe Dehnung bei geringer Festigkeit, und umgekehrt bedeutet hoher Magnesiumgehalt hohe Festigkeit, bei geringerer Dehnung.

Die mechanischen Eigenschaften für die verschiedenen Behandlungszustände sind in Tab. 10.5 dargestellt [27].

Durch Variieren der Auslagerungstemperatur und der Auslagerungszeit können Dehnungs- und Festigkeitswerte gezielt beeinflusst werden (Abb. 10.7) [25].

Bei 5 % Bruchwahrscheinlichkeit liegt die höchste Dauerfestigkeit im Gusszustand *F* vor, gefolgt von den Zuständen T4 und T6 (Abb. 10.8).

Die Unterschiede sind allerdings nicht sehr groß, was zeigt, dass die Dauerfestigkeit nicht vom Warmbehandlungszustand abhängt. Im Zustand *F* wird eine Dauerfestigkeit von 89 MPa erreicht [25].

Die neue Legierung wird bereits für eine Vielzahl von Gussteilen (z. B. Lenkradskelette, Gussknoten für „Space-Frame", Integralträger und Fahrzeugtürrahmen) eingesetzt [25].

Die Entwicklung duktilerer Aluminium-Legierungen ist bereits soweit fortgeschritten, dass ganze Bauteile (wie z. B. B-Säule im Audi A8) komplett aus Aluminium in Serie druckgegossen werden können. Durch Absenken des Silizium-Gehaltes auf 4 % in Kombination mit einem Magnesium-Gehalt zwischen 0,1 und 0,2 % können Bruchdehnungswerte von 16–20 % bei einer Dehngrenze von 100–220 MPa erreicht werden (AlSi4Mg2Mn). Durch Zugabe von Kupfer konnte die Dehngrenze zusätzlich gesteigert werden. Höhere Anforderungen an die Festigkeit im Gusszustand wurden durch Anhebung des Magnesium-Gehaltes erreicht.

### Magnesium-Legierungen

Magnesium ist mit einer Dichte von etwa 1,74 kg/dm$^3$ der leichteste aller metallischen Werkstoffe. Magnesium wurde bereits vor 80 Jahren erfolgreich als Konstruktionswerkstoff im Fahrzeug- und Flugzeugbau eingesetzt. Bereits im VW Käfer steckten über 17 kg Magnesiumlegierungen – für Kurbelgehäuse, Getriebegehäuse, Lichtmaschinenarm und andere Bauteile. Wegen der geringen Wärme- und Korrosionsbeständigkeit wurde lange Zeit der Einsatz von Magnesium im Automobilbereich begrenzt. Erst als es Mitte der 80er-Jahre gelang, reinere und damit korrosionsbeständigere Legierungen herzustellen, gewann Magnesium, auch aufgrund eines fallenden Material- bzw. Halb-

**Tabelle 10.5** Mechanische Eigenschaften von „Silafont 36" in Abhängigkeit vom Behandlungszustand

| Werkstoffzustand | $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | $A_5$ [%] | HB 5/250-30 |
|---|---|---|---|---|
| F | 120–150 | 250–290 | 5–10 | 75–95 |
| T4 | 95–140 | 210–260 | 15–22 | 60–75 |
| T5 | 155–245 | 275–340 | 4–9 | 90–110 |
| T6 | 210–280 | 290–340 | 7–12 | 100–110 |
| T7 | 120–170 | 200–240 | 15–20 | 60–75 |

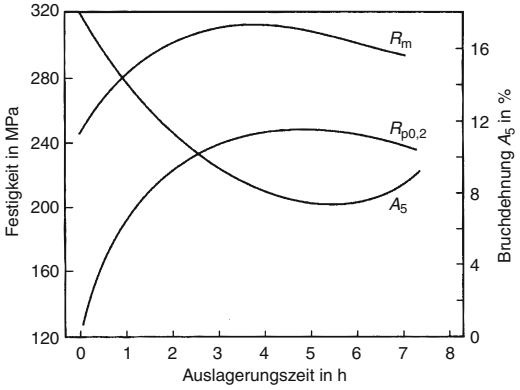



**Abb. 10.7** Mechanische Eigenschaften als Funktion der Auslagerungszeit. Mg-Gehalt 0,3 %, Wärmebehandlung: 490 °C/3 h; Abschreckung in Wasser; Auslagerungstemperatur: 170 °C

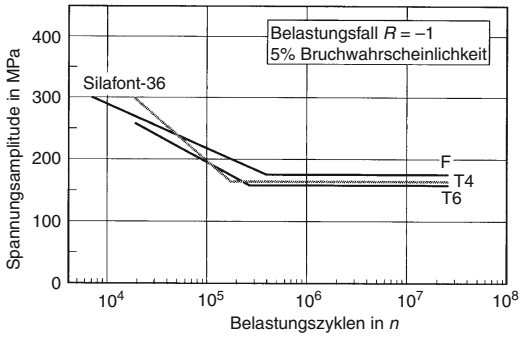



**Abb. 10.8** Wöhlerkurven von „Silafont 36" unter Berücksichtigung der Wärmebehandlung; Bem.: Idealisiert dargestellt! In der Praxis erkennt man einen leichten Abfall der Dauerfestigkeit

zeugpreises und interessanter Eigenschaften, wie hoher spezifischer Energieaufnahmefähigkeit und wirtschaftlichen Recyclingpotenzials, wieder an Bedeutung.

Ergänzend muss jedoch erwähnt werden, dass das Problem der Kontaktkorrosion dieser Legierungen nicht gelöst wurde und durch einen entsprechenden Oberflächenschutz und eine abgestimmte Verbindungstechnik berücksichtigt werden muss.

Komplexe Bauteile mit unterschiedlichen, variablen Wanddicken werden heute aus Magnesium-Walzplatten durch spanende Bearbeitung mit geringen Schnittkräften und -momenten gefertigt. Hierbei sind allerdings besondere Arbeitsvorschriften zu berücksichtigen, um der leichten Entflammbarkeit der Magnesium-Stäube und -Späne entgegen zu wirken [28, 29].

Rund 90 % aller Magnesiumbauteile werden wegen der hervorragenden Gießeigenschaften von Magnesium als Gussbauteile hergestellt. Aber auch als Schmiede-, Strangpress- oder Blechbauteil hält Magnesium in der Karosserie Einzug und kann gegenüber einer bereits gewichtsoptimierten Al-Bauweise das Gewicht der Komponenten um weitere 15–20 % reduzieren [30].

**Magnesium für Gussbauteile** AZ91HP (MgAl9Zn1HP) und AZ81HP (MgAl8Zn1HP) sind Magnesiumgusswerkstoffe mit guten Festigkeitseigenschaften, guter Korrosionsbeständigkeit und sehr guter Gießbarkeit. Der Zusatz HP – high purity (hochrein) bedeutet eine starke Absenkung der Schwermetallanteile Eisen, Nickel und Kupfer und eine damit im Vergleich zu herkömmlichen Magnesiumlegierungen verbesserte Korrosionsbeständigkeit.

**Tabelle 10.6** Mechanische Werkstoffeigenschaften von Magnesium-Gusslegierungen

| Legierung | Gießverfahren | Zustands-bezeichnung | Zugfestigkeit [MPa] min. | 0,2 %-Grenze [MPa] min. | Bruch-dehnung [%] min. | Brinellhärte [HB-5/250][b] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MgAl9Zn1(A)[a] | Druckguss | – F | 200–260 | 140–170 | 1–6 | 65–85 |
| | Kokillenguss | – F | 160 | 110 | 2 | 55–70 |
| | | – T4 | 240 | 120 | 6 | 55–70 |
| | | – T6 | 240 | 150 | 2 | 60–90 |
| | Sandguss | – F | 160 | 90 | 2 | 50–65 |
| | | – T4 | 240 | 110 | 6 | 55–70 |
| | | – T6 | 240 | 150 | 2 | 60–90 |
| MgAl8Zn1[a] | Druckguss | – F | 200–250 | 140–160 | 1–7 | 60–85 |
| | Kokillenguss | – F | 160 | 90 | 2 | 50–65 |
| | | – T4 | 240 | 90 | 8 | 50–65 |
| | Sandguss | – F | 160 | 90 | 2 | 50–65 |
| | | – T4 | 240 | 90 | 8 | 50–65 |

[a] Übereinstimmung nach DIN EN 1753:1997-08; die angegebenen Werte gelten für gesondert gegossene Proben; bei Druckguss handelt es sich nur um Anhaltswerte
[b] Anhaltswerte nach DIN EN 1753:1997-08

Beide Legierungen sind mit der Bezeichnung EN-MCMgAl9Zn1(A) und EN-MCMgAl8Zn1 in der DIN EN 1753:1997-08 aufgeführt. In Abhängigkeit vom Gießverfahren und vom Behandlungszustand werden für die Legierungen MgAl9Zn1(A) und MgAl8Zn1 die in Tab. 10.6 aufgeführten, mechanischen Werkstoffeigenschaften erzielt.

Diese Legierungen kommen vor allem bei Druckgussteilen, wie z. B. Deckeln und Zylinderkopfhauben, zum Einsatz.

AM60HP (MgAl6HP) und AM50HP (MgAl5HP) sind ebenfalls High Purity Mg-Legierungen. Sie zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Dehnung, verbunden mit guter Gießbarkeit aus. Beide Legierungen sind mit der Bezeichnung EN-MCMgAl5Mn und EN-MCMgAl6Mn in der DIN EN 1753:1997-08 aufgeführt.

In Tab. 10.7 sind die in Abhängigkeit von Gießverfahren und Behandlungszustand erzielbaren mechanischen Werkstoffeigenschaften aufgeführt. Diese Legierungen eignen sich sehr gut zur Herstellung von Sitzteilen (z. B. DaimlerChrysler), Instrumententafelträger, Räder, Cabrio-Verdeckgestellen (Porsche: Boxster und 911 Carrera) und Lenkradskeletten, die in Druckguss gefertigt werden.

Im Antriebsbereich ist neben guten mechanischen Eigenschaften oft eine hohe Kriechfestigkeit gefordert. Diese wird durch Zugabe von Metallen der seltenen Erden zur Magnesiumlegierung erzielt. Bei AE44 (MgAl4RE4) beispielsweise handelt es sich um eine höher kriechfeste, von Hydro Magnesium entwickelte, Druckgusslegierung. Die Legierung zeichnet sich weiter durch eine hohe Duktilität und eine gute Korrosionsbeständigkeit aus und kommt bei thermisch höher beanspruchten Bauteilen, wie Ölführungsgehäusen, Ölwannen und Ventildeckeln, zum Einsatz.

Faser- bzw. partikelverstärkte Aluminium- und Magnesiumverbundwerkstoffe, deren Hauptvorteile in der Erhöhung von Zugfestigkeit, Streckgrenze, E-Modul und Warmfestigkeit erwartet werden, sind

**Tabelle 10.7** Mechanische Werkstoffeigenschaften von Mg-Gusslegierungen in Abhängigkeit von Gießverfahren und Behandlungszustand

| Legierung | Gießverfahren | Zustands-bezeichnung | Zugfestigkeit [MPa] | 0,2 %-Grenze [MPa] | Bruch-dehnung [%] | Brinellhärte [HB-5/250][b] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MgAl6Mn[a] | Druckguss | – F | 190–250 | 120–150 | 4–14 | 55–70 |
| MgAl5Mn[a] | Druckguss | – F | 180–230 | 110–130 | 5–15 | 50–65 |

[a] Übereinstimmung nach DIN EN 1753:1997-08; die angegebenen Werte gelten für gesondert gegossene Proben; bei Druckguss handelt es sich nur um Anhaltswerte
[b] Anhaltswerte nach DIN EN 1753:1997-08

in Entwicklung, kommen aber derzeit aus Kostengründen in Großserie noch nicht zum Einsatz.

**Magnesium für Schmiedebauteile** Im Porsche Carrera GT kamen zum ersten Mal in einem Serienfahrzeug Felgen aus Magnesium (Abb. 10.9) [31] zum Einsatz, die als Rohlinge im Schmiedeverfahren hergestellt wurden. Das spezielle Verfahren verbessert das Dauerfestigkeitsverhalten des Werkstoffs und ermöglicht eine 25 prozentige Gewichtseinsparung gegenüber Rädern in Aluminium-Gusstechnik. Allerdings sind bedingt durch das Fertigungsverfahren im Vergleich zu Gussbauteilen Designmöglichkeiten – wie z. B. Hinterschnitte – eingeschränkt.

Verwendet wird die Magnesium-Knetlegierung AZ80A (MgAl8Zn) mit einer Zugfestigkeit im Bereich von 290–320 MPa und einer Bruchdehnung $A_5$ von etwa 5–12 %. Zur Reduzierung der Korrosionsempfindlichkeit wird das Rad zuerst geschliffen, anodisiert, KTL-beschichtet und anschließend lackiert. Bei der Auslegung des Bauteils ist besonders durch Vermeidung scharfer Kerben und Kanten der Kerbempfindlichkeit des Werkstoffs entgegenzuwirken. Auch zur Vermeidung der Kontaktkorrosion ist eine galvanische Trennung zu verschiedenen Anbauteilen notwendig.




**Abb. 10.9** Felge des Porsche Carrera GT

**Magnesium für Blechbauteile**
Die Leichtbau- und Verbrauchsdiskussion hatte in den letzten Jahren auch die konsequente Weiterentwicklung der Magnesium-Blechherstellung zur Folge. Das Potenzial lässt sich besonders bei großformatigen dünnwandigen Blechbauteilen entfalten. Betrachtet man die dichteabhängigen Leichtbaufaktoren, so hat Magnesium-Blech bei gleichem Bauteilgewicht eine 1,35-fache Biege- und Beulsteifigkeit im Vergleich zu Aluminium. Eine Gewichtseinsparung von 20–30 % ist somit prinzipiell möglich [36].

Aktuell werden drei Fertigungsrouten für Magnesiumblech verfolgt:

1. Gießwalzen,
2. Warmwalzen aus der Bramme,
3. Herstellung von Rohren und Aufspalten zu Blech.

Das Verfahren des Gießwalzens ist schon vom Werkstoffen Stahl und Aluminium bekannt. Das Produktionsverfahren auf Magnesiumbleche und Bänder zu übertragen, bietet die Möglichkeit, Flachprodukte für Umformanwendungen zukünftig noch wirtschaftlicher zu machen. Dabei liegt der wesentliche Vorteil gegenüber dem konventionellen Warmwalzen im Einsatz von kostengünstigerem Rohmaterial und dem Wegfall der Walzschritte von der Bramme bis zur Platine. Die aktuell verfügbare Blechbreite liegt bei 700 mm, die auch als Coil verfügbar ist [37]. Großformatige Tafeln können durch Längs- und Querwalzen oder durch das Zusammenschweißen zu Tailored Blanks gefertigt werden.

Beim konventionellen Warmwalzen wird das Magnesiumblech aus stranggegossenen Brammen erzeugt. Die Ausgangsbramme der Stärke 120 mm wird in etwa 15 Walzvorgängen auf eine Dicke von 2 mm heruntergewalzt. Die aktuell verfügbare Blechbreite beträgt 2000 mm. Magnesiumblech ist aktuell in einer Stärke ab 0,4 mm erhältlich.

Die Blechfertigungsroute über die Herstellung von Rohren und das anschließende Aufspalten zu Blechen ist gerade in der Entwicklung.

Bei der Weiterverarbeitung der Bleche müssen die Eigenschaften des Magnesiums beachtet werden. Aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur verfügt Magnesium – wie Titan auch – nur über eine Gleitebene und bietet daher bei 3 Gleitrichtungen nur 3 Gleitsysteme (im Vergleich dazu hat Aluminium 12 Gleitsysteme). Dies bedeutet, dass Magnesium grundsätzlich bei Raumtemperatur ein geringes Formänderungsvermögen und eine hohe Kerbempfindlichkeit hat. Erst durch ein temperiertes Tiefziehverfahren können in dem hexagonalen Kristallaufbau weitere Gleitsysteme aktiviert und so die Umformbarkeit deutlich verbessert werden. Abhängig von der Legierung, der Gefügestruktur und -morphologie liegt die Umformtemperatur zwischen 150 und 250 °C.

Im Carrera GT setzte Porsche als erster Hersteller Magnesiumblech im Sichtbereich des Fahrers in der Mittelkonsole ein [31]. Als zweischalige Bauweise mit Laserlötung wurde zum einen der Gewichtsanforderung, zum anderen den optischen und haptischen Qualitätsansprüchen durch Einsatz von Magnesium Rechnung getragen. Verwendet wird die Legierung AZ 31 mit einer Zugfestigkeit zwischen 240 und 260 MPa.

Die Entwicklung von Magnesium-Blechen wurde seit Oktober 1998 durch das BMBF gefördert. An dieser Stelle werden einige wichtige Verbundvorhaben kurz erwähnt: Im Vorhaben „Entwicklung von Umformtechnologien für die Verarbeitung von Walzprodukten aus Magnesiumlegierungen“ wurden die ersten Grundlagen zum Umformen von Magnesium gelegt. Im Jahre 2001 folgte dann das Projekt „Einfluss thermomechanischer Behandlungen auf die Entwicklung von Mikrostrukturen und Texturen sowie auf das Ermüdungsverhalten von Magnesiumknetlegierungen“. Im folgenden Vorhaben ULM (Ultra-Leichtbauteile aus Magnesium) wird eine Magnesiumblechstruktur für die Verkehrstechnik entwickelt. Im Projekt MIA (Magnesium im Automobil) konzentriert sich die Entwicklung auf die Herstellung von Fahrzeugkomponenten aus Mg-Knetlegierungen als Schmiede-, Strangpress- oder Blechbauteile. Den Abschluss der Reihe bildete das Projekt $M^3$ (Mobil mit Magnesium), in dem die neuen Werkstoffkonzepte und Fertigungsrouten auf der Magnesiumblech-Halbzeugseite mit anwendungsbezogenen Weiterverarbeitungsstrategien zusammenzuführen wurden, um die Darstellung von Hochleistungsprodukten mit Magnesiumblech innerhalb technisch gesicherter Prozessketten mit nachhaltiger Einsatzperspektive zu ermöglichen. Parallel dazu wurde 2005 das von der EU geförderte Projekt SLC (Super Light Car) gestartet, in dem ein Magnesium-Dach entwickelt wurde (◘ Abb. 10.10). Porsche hat im 991 Carrera GT3RS ein Leichtbau-Magnesiumdach in die Serie überführt.

Die vorhandenen Herausforderungen im Bereich der Fügetechnik und Korrosion konnten durch anwendungsspezifisch differenzierte Konzepte im Rahmen der geförderten Forschungsprojekte gelöst werden.

Aufgrund der aktuellen Preisentwicklung von Magnesium-Blech (bis 700 mm unter 10 € pro Kilogramm Blech) wird ein steigender Einsatz im Fahrzeug erwartet.

### Zink im Kraftfahrzeug

Laut einer Studie der International Zinc Association enthalten Pkws aus Japan, Europa und den

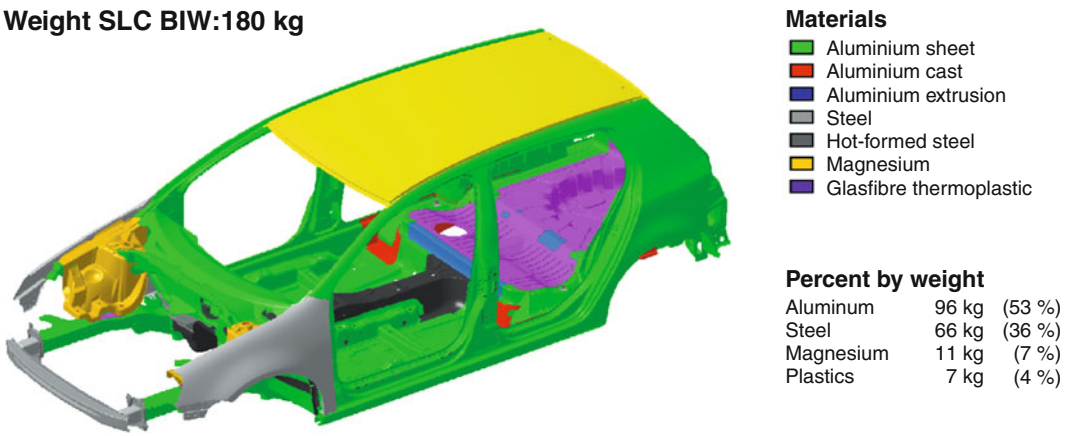
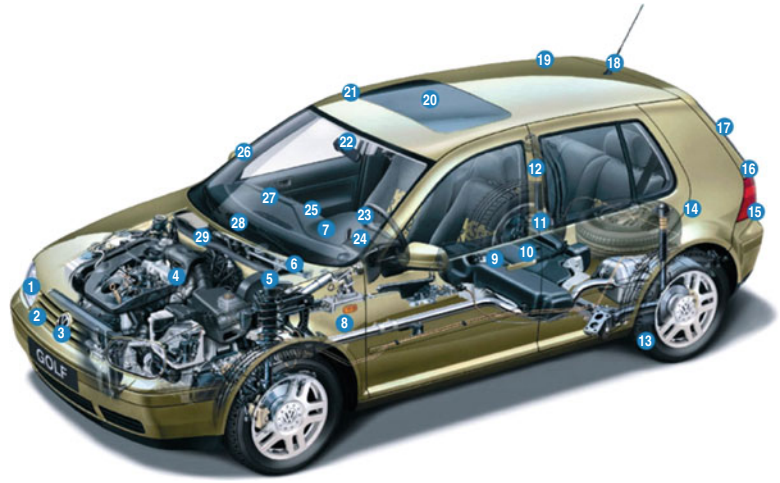



**Abb. 10.10** Magnesiumeinsatz im SLC-Projekt [38]




1 Scheinwerfer (Gehäuse)
2 Kühlergrill
3 Symbole und Embleme
4 Elektronische Baugruppen (Airbagsensoren)
5 Pumpengehäuse
6 Lüftungsklappen
7 Instrumenteinfassung
8 Pedale
9 Teile des Türöffnungssystems
10 Innenausstattung (z. B. Aschenbecher)
11 Autositz (Baugruppen)
12 Gurt (Baugruppen)
13 Vulkanisator im Gummi
14 Tankabdeckung
15 Heckleuchte (Gehäuse)
16 Zierleiste, Heck
17 Verschlussmechanismus
18 Antenne
19 Dachkomponenten
20 Sonnendach (Einfassung)
21 Fensterheber (Gehäuse, Mechanismus)
22 Innenspiegel (Gehäuse)
23 Lenksäule
24 Schließzylinder (Diebstahlsicherung)
25 Radio/RF/CD-Player/GPS/ Navigation (Rahmen)
26 Außenspiegel (Gehäuse)
27 Kindersicherung
28 Scheibenwischanlage (Wischarm)
29 Scheibenwischanlage (Motorengehäuse)

**Abb. 10.11** Bauteile aus Zink in einem Pkw [39]

USA im Schnitt 10,2 kg Zink. Davon entfällt mit 4,9 kg der größte Teil auf Zinkdruckgussbauteile, etwa 3 kg befinden sich als Korrosionsschutzschicht auf Stahlbauteilen und ein geringer Anteil (ca. 0,5 kg) als Aktivator in dem für Reifen eingesetzten Gummi (siehe Abb. 10.11). Zink bietet aufgrund seiner Vielseitigkeit ein breites Spektrum von Einsatzmöglichkeiten im Kraftfahrzeug. Darüber hinaus kann Zink problemlos rezykliert werden.

**Verzinkte Stahlbleche** Bereits seit Anfang der 70er Jahre wird Zink als Korrosionsschutz bei Stahlblechen im Kraftfahrzeugbau eingesetzt. Seit dieser Zeit wurde das Spektrum an verfügbaren Stählen enorm erweitert, so dass heute weiche und gut umformbare Güten bis hin zu höher- und höchstfesten Stählen in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen. In gleichem Maße wurde auch der Einsatz von Zink als Schutzschicht auf diesen Stählen weiterentwickelt, so dass heute nahezu jede Stahlsorte mit einer Zinkschutzschicht verfügbar ist. Die Schutzwirkung ist dabei auf den kathodischen Korrosionsschutz des Zinks auf dem Stahl zurückzuführen. Das unedlere Zink geht bei korrosiver Belastung in Lösung und schützt so das darunter liegende Stahlblech vor Korrosion.

Bei Stahlblechen für die Kraftfahrzeugindustrie unterscheidet man in der Regel zwischen feuerverzinkten und elektrolytisch abgeschiedenen Zinkbeschichtungen:

Bei den feuerverzinkten Güten wird das Stahlblech nach dem Walzprozess durch ein flüssiges Zinkbad geführt. Dabei bleibt das Zink an der Oberfläche haften und bildet mit dem Eisen des Stahls eine Legierungsschicht aus. Überschüssiges Zink wird durch starke Düsen (Air Knifes) von der Oberfläche entfernt, so dass die gewünschte normgerechte Schichtdicke des Zinks im µm-Bereich eingestellt werden kann.

Bei der elektrolytischen (galvanischen Verzinkung) durchläuft das Stahlblech keine Schmelze, sondern ein Zinkelektrolyt. Das Zink wird dabei galvanisch auf dem Stahl aufgebracht. Durch Kontrolle der Prozessgrößen pH-Wert, Stromdichte und Temperatur lassen sich die gewünschten Schichtdicken auf der Stahloberfläche genau abscheiden. Ein Abstreifen wie beim Feuerverzinken ist so nicht nötig. Im Gegensatz zur Feuerverzinkung kann die elektrolytische Verzinkung beidseitig oder nur auf einer Seite erfolgen.

Gängige Zinkschichtdicken bei Karosserieblechen liegen im unverformten Zustand zwischen 5 und 20 µm. Auch bei nachfolgenden Umformschritten bleibt die Zinkschicht erhalten. Thermische Fügeverfahren (Schweißen und Löten) führen – eng begrenzt – zu einer Entfernung der Zinkschicht im Bereich der Wärmeeinflusszone der Fügestelle. Aufgrund der Fernwirkung des Zinks bleiben diese Stellen bei korrosiver Belastung vor einem Angriff geschützt.

**Stückverzinken** Einzelne kompakte Bauteile, z. B. Fahrwerkskomponenten, wie Querlenker oder Spurstangen, können durch das so genannte Stück- oder Feuerverzinken sicher vor der Korrosion geschützt werden. Dazu wird das Bauteil in eine flüssige Zinkschmelze getaucht, in der sich je nach Höhe der Temperatur und der Zeit wie bei den bandverzinkten Stählen eine kristalline Zinkschicht bildet, die durch eine Übergangszone fest mit dem Substrat verbunden ist. Während des Tauchvorgangs wandern Metallatome vom Zink in den Stahl und umgekehrt Eisenatome in die Zinkschicht, so dass Eisen-Zink-Legierungsschichten entstehen.

Die Schichtdicke beim Feuerverzinken ist mit 35 bis 80 µm deutlich höher als bei bandbeschichteten Blechen, so dass entsprechend geschützte Bauteile stärkeren korrosiven Belastungen ausgesetzt werden können. Die Schichten sind zudem so hart und abriebfest, dass sie auch bei starken mechanischen Belastungen z. B. bei Transport oder in der Nutzungsphase nicht beschädigt werden.

**Zinkdruckguss** Ein Großteil des in PKWs zum Einsatz kommenden Zinks entfällt auf Druckgussbauteile. Zinkdruckgusslegierungen sind in den Normen EN 1774 (Gusslegierungen, siehe ◘ Tab. 10.8) und EN 12844 (Gussstücke) genormt. Hauptlegierungselemente sind Aluminium, Kupfer und Magnesium. Hauptsächlich kommen für Druckgussbauteile die wenig legierten Legierungen ZP0400, ZP0410 und ZP0430 zum Einsatz, die auch als ZAMAK bezeichnet werden.

Die wichtigste physikalische Eigenschaft der Zinklegierungen für den Druckguss ist das hervorragende Fließverhalten. Mit den gebräuchlichen Legierungen sind so Wandstärken von 0,5 bis 0,8 mm möglich [39]. Dies ermöglicht im Druckgussprozess hochkomplexe dünnwandige Bauteile. Zusätzlich können Anschraubpunkte nachbearbeitungsfrei mit gegossen werden, was die benötigte mechanische Nacharbeit auf ein Minimum reduziert. Aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes unter 400 °C werden die für den Druckguss benötigten

**Tabelle 10.8** Mechanische Kennwerte der gebräuchlichsten Zink-Druckgusslegierungen (Quelle: EN 1774)

| Werkstoff Nr. | Kurzzeichen | E-Modul [GPa] | Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa] | Zugfestigkeit $R_m$ [MPa] | Bruchdehnung $A_5$ [%] | Kerbschlagarbeit [J] | Härte HBS 10-500-30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZP 0400 | ZP3 | 85 | 200 | 280 | 10 | 57 | 83 |
| ZP 0410 | ZP5 | 85 | 250 | 330 | 5 | 9258 | 92 |
| ZP 0430 | ZP2 | 85 | 270 | 335 | 5 | 10.259 | 102 |

Stahlformen wesentlich weniger belastet, was den Verschleiß reduziert und damit die Formstandzeit deutlich verbessert.

**Zink im Interieur** Neben der bereits erwähnten guten Gießbarkeit und der damit verbundenen großen Gestaltungsfreiheit kommt bei Interieurbauteilen noch eine weitere positive Eigenschaft des Zinks zum Tragen. Zink kann mit verschiedenen galvanisch abgeschiedenen Oberflächen versehen werden. So können für den Kunden attraktive optische und haptische Dekore dargestellt werden. Die Bandbreite ist nahezu unendlich groß und reicht von matten Beschichtungen mit Anti-Fingerprintausrüstung bis hin zu hochglänzenden polierten Chromoberflächen in zahlreichen Metallfarbnuancen. Die durch Gießen hergestellten Schalter, Türgriffe oder Zierteile (siehe Abb. 10.12) werden nach dem Entformen und Entgraten zunächst einer mechanischen Bearbeitung in Form von Schleifen und Polieren unterzogen, um so die Oberfläche für die Beschichtung vorzubereiten. Dann wird in einem mehrstufigen Beschichtungsprozess die gewünschte Oberfläche appliziert. Schalter können durch einen Laserschnitt mit Piktogrammen versehen werden, die dann mit einem speziellen Harz transparent ausgegossen werden, so dass die Schalter illuminiert werden können (siehe Abb. 10.13 und [40]).



**Abb. 10.12** Mittelkonsole des Mercedes SLS [40]

**Zink in weiteren Fahrzeugkomponenten** Neben der primären Verwendung von Zink für Bauteile im Fahrzeug, spielt das Metall als Zinkoxid auch bei der Herstellung von Reifen eine große Rolle. Zinkoxid ist als Aktivator ein unverzichtbarer Teil des Vulkanisationsprozesses. Der so hergestellte Gummi wird beständig gegen Temperatur, Druck, chemische und mechanische Beanspruchungen und erhält die notwendigen dauerelastischen Eigenschaften. Pro Pkw-Reifen werden etwa 100 g Zinkoxid benötigt.

Auch in Lacken kommt Zinkoxid zum Einsatz: Dabei macht man sich die Eigenschaft des Zinkoxids zunutze, die durch das Sonnenlicht einfal-




**Abb. 10.13** Beispiel für Schalter aus Zink [39]

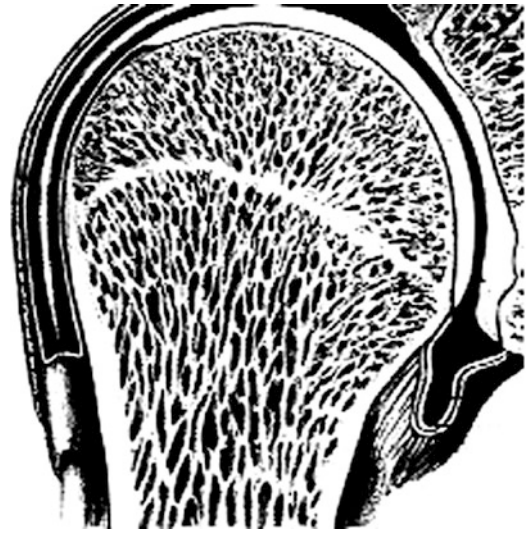


**Abb. 10.14** Knochenaufbau des Humerus



lende Strahlungsenergie in Wärme umzuwandeln. Zinkoxid verhindert so die Alterung der Lacke durch UV-Strahlung.

**Metallschäume im Automobilbau**

In Anlehnung an die Bionik wird versucht, „metallische Knochen" zu entwickeln. Metallschäume sind vergleichbar porös wie Knochen (Abb. 10.14) und können das Gewicht um 90 % reduzieren.

Metallschäume sind bereits seit den 50er-Jahren bekannt, jedoch war es bislang nicht möglich, geschäumte Metalle in ausreichender Menge und gleich bleibender Qualität herzustellen.

Man unterscheidet zwischen pulvermetallurgischen, schmelzmetallurgischen und speziellen Herstellungsverfahren (z. B. Abscheide-Technik), wobei die pulvermetallurgischen Varianten als die geeignetsten angesehen werden. Hierbei wird ein Treibmittel mit dem Metallpulver vermischt und konsolidiert (HIP, Strangpressen, etc.). Danach kann dieses Halbzeug durch Erwärmung auf Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt reproduzierbar aufgeschäumt werden.

Um qualitativ einen guten Schaum zu erhalten, ist im Aufschäumprozess die Degradation des Schaumes einzuschränken. Aufgrund der Schwerkraft und der Oberflächenspannung strebt die Schmelze aus den Stegen in die Knoten. Risse und zu große Poren sind die Folge. Mit Hilfe der numerischen Simulation können die Randbedingungen des Aufschäumprozesses bestimmt und für die jeweiligen Anforderungen angepasst werden [47].

Neben den bekannten Aluminiumschäumen lassen sich weitere Metalle und Legierungen aufschäumen, so z. B. Zink, Zinn, Bronze, Messing und Blei. Titan- und Eisenschäume [46] befinden sich noch in der Entwicklung. Zurzeit werden fast ausschließlich geschlossenporige Schäume hergestellt. Metallschäume erlauben die Herstellung einer Vielzahl von Formenvarianten, wie z. B. ausgeschäumte Hohlformen (Abb. 10.15) oder Werkstoffverbunde und Platten. Die Platten können vor dem Aufschäumen tiefgezogen werden, was die Formvarianz noch erhöht (Abb. 10.16). Das Fügen von Metallschäumen kann mit Hilfe von Laserschweißprozessen, aber auch durch Kleben, Verschrauben oder Nieten erfolgen. Das Löten eignet sich nicht, da es hierbei zu Korrosionsproblemen aufgrund von Kontaktkorrosion in den Poren kommen kann [42–44].

Die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, E-Modul) steigen mit zunehmender Schaumdichte stark an. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit der Schäume ist gegenüber den massiven Legierungen deutlich reduziert, während der thermische



**Abb. 10.15** Rohrprofile mit Aluminiumschaum

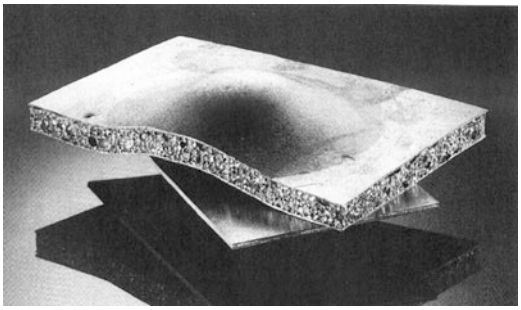


**Abb. 10.16** Tiefgezogenes und anschließend geschäumtes Blech

Ausdehnungskoeffizient unverändert bleibt. Bei der plastischen Verformung von Metallschäumen bleibt das Spannungsniveau über einen großen Verformungsweg hin nahezu konstant und ähnelt dabei stark einem idealen Absorber. Gängige Aluminiumschäume können bei Stauchung etwa 80 bis 90 % der Energie des idealen Absorbers aufnehmen. Aus diesem Grund lassen sich Metallschäume z. B. für energieabsorbierende Front-, Seiten- und Heckaufprallelemente ein- setzen. Eine weitere Anwendung der metallischen Schäume ergibt sich aus der Tatsache, dass diese das Knick- und Stauchverhalten von Hohlprofilen deutlich steigern und deshalb z. B. als Versteifungen eingesetzt werden können. Das Korrosionsverhalten von Metallschäumen hängt stark von den verwendeten Metallen und ihrer Lage im Fahrzeug ab. Die für die Verwendung im Kraftfahrzeug in Frage kommenden Aluminiumschäume können als eher unkritisch angesehen werden, da sie über eine geschlossene Oxidschicht verfügen, die bei unterschiedlichen Metallkombinationen eine genügende Isolation bietet.

**Titan-Legierungen**

Titan-Legierungen werden derzeit vor allem in der Luft- und Raumfahrt sowie im Fahrzeugrennsport eingesetzt. Der Hauptbeweggrund für den Einsatz von Titan ist die Reduzierung des Gewichtes.

Das größte Potenzial für die Anwendung von Titan im Fahrzeug bietet sicherlich der Antriebsbereich, da hier durch eine Gewichtseinsparung, d. h. eine Verringerung der bewegten Massen, der Kraftstoffverbrauch im besonderen Maße reduziert werden kann. Mögliche Serienanwendungen von Titanlegierungen sind z. B. Pleuel, Tassenstößel, Zahnräder, Ventile, Ventilsitzringe, Ventilfederteller, Schrauben, Differentialgehäuse, diverse Antriebswellen etc.

Die Vorteile von Titanlegierungen sind eine hohe statische und dynamische Festigkeit in Verbindung mit einer geringen Dichte, eine gute Warm- und Zeitstandfestigkeit und sehr gute Korrosionseigenschaften.

Nachteilig sind die schwierige Umformbarkeit (wie Mg-Legierungen), die schwierige mechanische Bearbeitung, eine höhere Kerbempfindlichkeit als Stahl sowie ein ungünstiges Tribologieverhalten.

Zur Verbesserung der Verschleiß- und Dauerfestigkeit werden Bauteile aus Titanlegierungen häufig nitriert.

Eine weitere Möglichkeit, die tribologischen Eigenschaften von Titanlegierungen zu verbessern, ist die Oberflächenbeschichtung. Neben den bekannten klassischen elektrochemischen oder chemischen Verfahren finden die plasma- und ionengestützten Hochvakuumverfahren (CVD, PVD) in Kombination mit den galvanischen Verfahren immer breitere Anwendung [48].

Man unterscheidet zwischen verschiedenen Titanlegierungen (Abb. 10.17). In der Entwicklung befinden sich neue intermetallische $\gamma$-TiAl (Cr,Mo,Si)-Legierungen für hochwarmfeste Anwendungen wie z. B. Ventile, Turbolader, Pleuel, Kolbenbolzen [49].

In Tab. 10.9 sind die mechanischen Kennwerte von $\alpha$-, und $\alpha + \beta$-Legierungen im Vergleich zur $\gamma$-TiAl-Legierung (Ti48Al2Cr) aufgeführt [48].

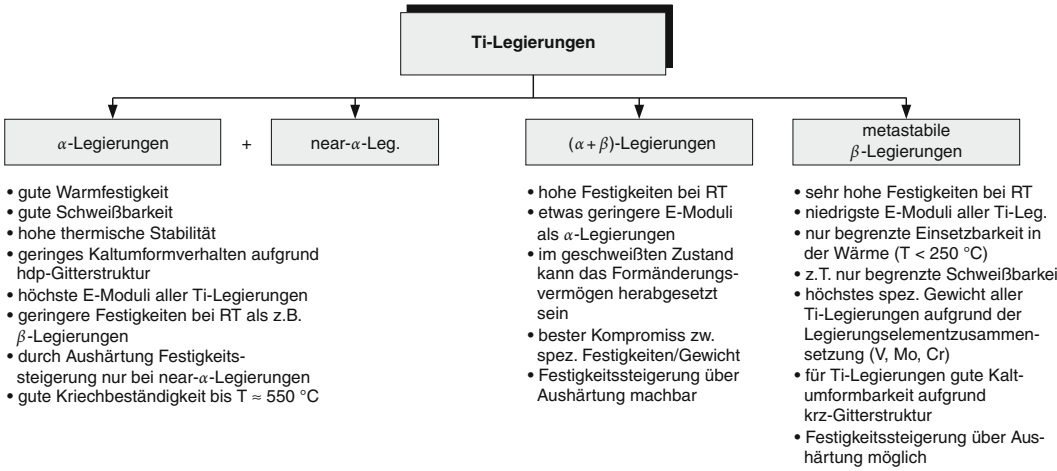



**Abb. 10.17** Titan-Legierungen

**Tabelle 10.9** Eigenschaften verschiedener Titanlegierungen

| Eigenschaft | Einheit | α-TiAl (Ti48Al2Cr) | α + β (TiAl6V4) | γ-Ti |
|---|---|---|---|---|
| Dichte | [g/cm³] | 3,7–3,9 | 4,5 | 4,6–4,9 |
| E-Modul | [GPa] | 155–180 | 105–115 | 90–105 |
| Streckgrenze | [MPa] | 400–750 | 850–950 | 1200–1350 |
| Zugfestigkeit | [MPa] | 400–850 | 900–1100 | 1200–1600 |
| Bruchdehnung RT | [A%] | 1–4 | 10–16 | 12–25 |

Die hohen Kosten zur Gewinnung von Titan und die hohen Verarbeitungskosten lassen trotz moderner Herstellungstechnologien einen Serieneinsatz im Pkw-/Lkw-Bereich in naher Zukunft unwahrscheinlich erscheinen. Als Konzept wurde eine Abgasanlage aus Titan im Audi A2 ÖKO untersucht.

Für den Porsche Carrera GT2 (2007) kam serienmäßig eine Abgasanlage mit einem Endschalldämpfer sowie Endrohren aus Titan zum Einsatz. Gegenüber einem vergleichbaren Endschalldämpfer aus Edelstahl konnte so das Gewicht um etwa 50 % reduziert werden.

Eine Weiterentwicklung bei der Titangewinnung und fortschrittliche Verarbeitungstechniken sollten jedoch mittel- bis langfristig den Einsatz von Titan auch in der Großserie ermöglichen.

### Sandwichverbunde

**Plattierte Bleche** Beim Plattieren wird ein stählerner Kern aus Band oder Blech mit Auflagen aus anderen Metallen untrennbar verbunden. Als Auflage kommen beispielsweise NE-Metalle wie Aluminium, Bronze, Kupfer, Messing, Nickel und Titan, aber auch spezielle Edelstähle zum Einsatz.

Mit diesem Verfahren ist es möglich, die guten Gebrauchseigenschaften von Stahl, wie Festigkeit, Federungs-, Umform- und Tiefziehvermögen, um weitere, bei anderen Metallen angelegte spezifische Eigenschaften zu ergänzen. Dies können beispielsweise elektrische Leitfähigkeit, Wärmereflexion bzw. -leitung, Hitzebeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit sein.

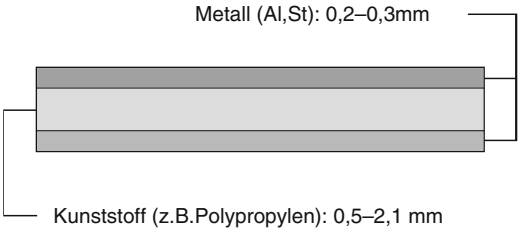



**Abb. 10.18** Metall-Kunststoff-Metall Verbund

Beim Plattieren wird zunächst durch hohe Press- und Reibungskräfte ein mechanischer Verbund erzeugt, bei dem der Auflagewerkstoff durch Adhäsion mit dem Stahl verbunden wird. Bei der anschließenden Wärmebehandlung geht die Adhäsionshaftung in Diffusionshaftung über, die Metalle sind untrennbar miteinander verbunden. Die so produzierten Bänder bzw. Bleche bestehen aus zwei, drei oder noch mehr Lagen, wobei große Freiheit bei der Kombination von Werkstoffen und der Dicke ihrer Auflage gegeben ist. Nahezu täglich werden plattierte Werkstoffe in die Hand genommen. Sie kommen im Automobil als Bestandteil von Schalldämpferanlagen, Hitzeschilden, Schutzblechen, Kugellagerkäfigen, Schlauchkupplungen und Zylinderkopfdichtungen vor.

**Metall-Kunststoff-Metall Verbunde** Eine interessante Neuentwicklung für Anwendungen im Karosseriebereich stellen Metall-Kunststoff-Metall Verbunde dar (Abb. 10.18). In diesem Fall wurden die jeweiligen Werkstoffgrenzen durchbrochen und durch Kombination von bekannten Materialien und deren positiven Eigenschaften ein in Bezug auf Steifigkeit, Gewicht und Akustik optimierter Werkstoffverbund entwickelt [51].

Im Vergleich zu Stahlblechen mit gleicher Biegefestigkeit oder Aluminiumblechen (1 mm) sind diese Sandwichbleche (0,2 mm Al/0,8 mm Polypropylen/0,2 mm Al), ca. 60 % bzw. 35 % leichter. Durch Verwendung von unterschiedlichen Deckschichtmaterialien und Kernschichtwerkstoffen, zusammen mit angepassten Wandstärken, lassen sich die Eigenschaften den Anforderungen anpassen. In der Regel wird als Kernschicht Polypropylen in einer Dicke von ca. 0,8 mm verwendet, das beidseitig mit ca. 0,2 mm starken Aluminium- oder Stahlfolien verklebt ist.

Erste Untersuchungen in Form einer Reserveradmulde im ULSAB-Projekt (Stahl-Kunststoff-Stahl) und einer Fronthaubenstudie des VW Lupo (Al-Kunststoff-Al) untermauern das hohe Leichtbaupotenzial dieses Verbundes.

Wie bei jedem neuen Werkstoff müssen aber auch hier die materialspezifischen Besonderheiten bei der Verarbeitung berücksichtigt werden.

So sind die im Karosseriebereich überwiegend eingesetzten Schweißverfahren mit der damit verbundenen Temperaturbelastung aufgrund der thermoplastischen Kernschicht nicht als Fügeverfahren geeignet.

Mögliche Fügeverfahren sind dagegen die mechanischen Fügeverfahren (Stanznieten, Bördeln, Durchsetzfügen) und das Kleben.

Auch beim Tiefziehen müssen die Prozessparameter den im Vergleich zu herkömmlichen Stahl- oder Aluminiumblechen geänderten Werkstoffeigenschaften angepasst werden.

Gleiches gilt für das gesamte Fertigungslayout, wo die heute üblichen KTL- bzw. Decklacktemperaturen der Karosserielackierung eine On-Line-Lackierung dieser Sandwichbleche unter Umständen unmöglich machen (Schmelztemperatur der Polypropylen Kernschicht: ca. 163 °C, KTL-Temperatur ca. 160–185 °C).

Die ersten Ansätze sind jedoch Erfolg versprechend und lassen auf weitere Fortschritte hoffen.

#### 10.2.2.1.3 Edelmetalle

Als Edelmetalle werden die Elemente Silber (Ag) und Gold (Au), sowie Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir) und Platin (Pt) bezeichnet. Da sie elektrochemisch sehr edel sind, d. h. eine hohe Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit aufweisen, werden sie vor allem in der Chemie- und Elektronikindustrie eingesetzt.

**Elektronikkomponenten** Edelmetalle, insbesondere Gold- und Silberlegierungen, finden Anwendung in verschiedenen elektronischen Komponenten im Fahrzeugbau.

Gold- und Silberlegierungen werden primär in Bereichen eingesetzt, in denen

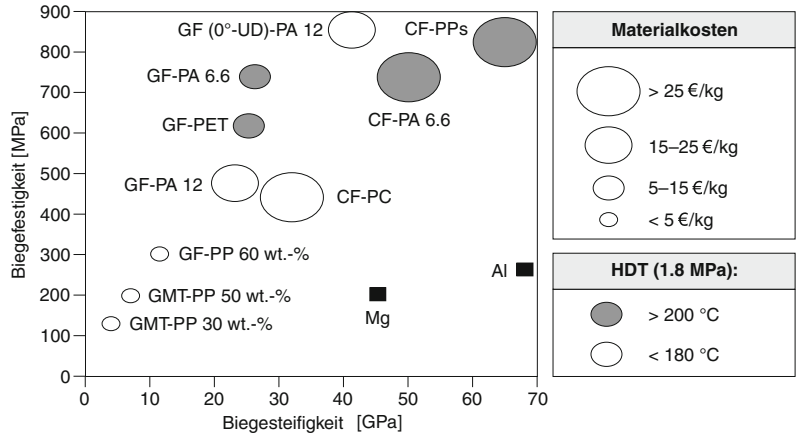



**Abb. 10.19** Eigenschaftsspektrum thermoplastischer Composites

- niedrige elektrische Ströme fließen (< 5 mA),
- niedrige Übergangswiderstände gefordert sind,
- die Kontakte vor Korrosion geschützt werden müssen,
- Kontakte vor Abrieb (hervorgerufen durch Relativbewegungen im Mikrobereich) geschützt werden müssen,
- eine sehr hohe Kontaktsicherheit elektronischer Sicherheitsbauteile gefordert ist.

Beispiele für den Edelmetalleinsatz in der Automobilindustrie:

- vergoldete Kontakte in Airbagmodulen,
- Bonddrähte aus Gold zur Kontaktierung auf Leiterplatten in Integrated Circuits (IC),
- Silberlegierungen werden aufgrund ihrer niedrigen Durchgangswiderstände und der niedrigen Ströme sowohl in den leitenden Schichten der Leiterbahnen als auch in Relais verwendet,
- Sensortechnik (Raddrehzahlaufnehmer, Außenluftkühler, Lambdasonden, …),
- Katalysatoren für Verbrennungsmotoren (Platin, Palladium und Rhodium).

#### 10.2.2.1.4 Kunststoffe

Aus der Reihe der vielen Weiterentwicklungen innerhalb der Kunststoffe (Hochkristallines Polypropylen, PPO/PA-Blends, etc.) ist vor allem die Entwicklung von endlosfaserverstärkten Thermoplasten und die Langglasfaser-Technologie hervorzuheben.

**Flächige, gewebeverstärkte Thermoplaste**

Diese Werkstofffamilie, konsolidiert in der Praxis des Öfteren auch als „Organoblech" [57] bezeichnet, schließt die Lücke zwischen den kurz- und langglasfaserverstärkten Spritzgusstypen und den glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) und SMC (Sheet-moulding-Compound)-Materialien.

Als Matrixwerkstoffe kommen hauptsächlich Polypropylen (PP), Polyester (PET) und Polyamide (PA) zum Einsatz. Als Gewebe- bzw. Gestrickwerkstoff sind Glasfasern, synthetische Fasern (z. B. Aramid), Carbonfasern oder Kombinationen aus diesen möglich. Durch mehrlagige Gewebeaufbauten lassen sich darüber hinaus verschiedene Faserrichtungen festlegen (z. B. $+45°/-45°$, $0°/90°$).

Aus Kostengesichtspunkten konzentrieren sich die derzeitigen Überlegungen hauptsächlich auf die Glasfaser. Abhängig von Matrixmaterial, Fasertyp, Fasergehalt und Gewebetyp lassen sich die mechanischen Eigenschaften dieser Prepregs leicht variieren und den gegebenen Anforderungen anpassen (Abb. 10.19) [55].

Die Eigenschaften dieser Werkstoffe können unter folgenden Schlagworten zusammengefasst werden:

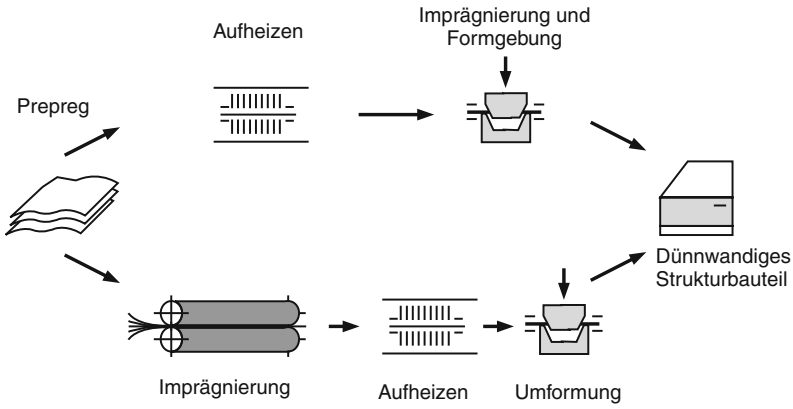



**Abb. 10.20** Gebräuchliche Produktionsvarianten zur Herstellung dünnwandiger Strukturbauteile

- geringe Dichte,
- hohe mechanische Kennwerte (Festigkeit, E-Modul),
- Korrosionsbeständigkeit,
- hohe Energieabsorption/Zähigkeit,
- schweißbar,
- recyclingfähig,
- tiefzieh-/thermoformbar [56].

Durch die thermoplastische Matrix können die Prepregs oder die vorkonsolidierten Halbzeugplatten („Organobleche“) durch Aufheizen über den jeweiligen Schmelzpunkt der eingesetzten Matrix und anschließendem Tiefziehen und Verpressen zum fertigen Bauteil umgeformt werden (Abb. 10.20) [58].

Die erreichbare Oberflächenqualität ist aufgrund der hohen Faseranteile eher schlecht, so dass eine Anwendung in optisch anspruchsvollen Außenhautbereichen (Class-A-Oberflächen) nicht möglich ist.

Auch unter Recyclinggesichtspunkten lassen sich diese Werkstoffe gut wiederverwerten, indem sie gemahlen und dann als kurzglasfaserverstärktes Spritzgussmaterial weiterverarbeitet werden bzw. als Kernschicht in Sandwichverbundwerkstoffen Verwendung finden.

Als Nachteile müssen jedoch die immer noch zu hohen Halbzeugkosten und die Aufwendungen zur Qualitätssicherung genannt werden.

**Lang-Faserverstärkte-Thermoplaste (LFT)**

Zwischen den etablierten Werkstoffsystemen (GMT, SMC, bzw. Kurzglasfaser verstärkte Thermoplaste), entwickelt sich zurzeit eine weitere Werkstoffgruppe, die sogenannten **L**ang-**F**aserverstärkten-**T**hermoplaste (LFT).

Hohe Steifigkeit bei sehr gutem Energieaufnahmevermögen zeichnen diesen neuen Werkstoff aus, der damit den Anforderungen der „Leichtbauweise“ vollauf gerecht wird. Die Langglasfaserverstärkung bewirkt außerdem eine deutliche Steigerung der Kerbschlagzähigkeit und Wärmeformbeständigkeit. Durch den Glasfaseranteil und der damit verbundenen schlechten Oberflächenqualität sind sichtbare „Class-A“-Außenanwendungen nicht, bzw. Interieuranwendungen im Sichtbereich nur mit starken Einschränkungen möglich. Typische Anwendungen sind Frontmodulträger oder kaschierte Schalttafelträger.

Es gibt derzeit drei LFT-Werkstofftypen, die bereits mit Erfolg eingesetzt werden. Man unterscheidet hierbei zwischen unterschiedlichen Faserlängen und den dazugehörigen Verfahrenstechniken (Tab. 10.10).

Um die guten mechanischen Eigenschaften des Granulats möglichst ohne Verluste im Bauteil umzusetzen, gilt für die LFT-Verarbeitung als wichtigste Forderung die Faserschonung, d. h. ein weitgehender Erhalt der Faserlänge.

**Tabelle 10.10** Klassifizierung thermoplastischer FVK-Systeme

| | **Kurzfaserverstärkte Thermoplaste** | | **Langfaserverstärkte Thermoplaste** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Faserlänge im Bauteil [mm] | < 1 | 1–5 | 5–25 | 5–25 | > 10 |
| Rohmaterial Halbzeug | Kurzfaser-granulat | LFT-Granulat | LFT-Granulat | Direkt-LFT Direktverfahren | GMT Mattentechnik |
| Verarbeitungsverfahren | Spritzgießen | | Fließpressen | | |
| Neigung zur Anisotropie | sehr hoch | gering | hoch | hoch | gering |

Eine schonende Verfahrensvariante ist das Fließpressen. Durch eine LFT-gerechte Schneckengeometrie des Plastifizierextruders und einem Schmelzeeintrag über eine Breitschlitzdüse in das offene Werkzeug werden mit dieser Technik Faserschädigungen durch unzulässige Scherung im Vergleich zum Spritzgießen deutlich reduziert.

In Verbindung mit wärmeformbeständigeren Matrixmaterialien (z. B. PA, PBT, etc.) und anderen Faserverstärkungen (z. B. Carbonfasern) werden Langfaserverstärkte-Thermoplaste weitere neue Anwendungen erschließen, die heute noch metallischen Werkstoffen vorbehalten sind.

10

**Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe**

Eine besondere Form der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) stellen die mit Kohlenstofffasern verstärkten Kunststoffe (CFK) dar. Dabei wird die herausragende Festigkeit der Kohlenstofffasern genutzt, um Bauteile mit einer optimalen Kombination der folgenden Eigenschaften herzustellen:

- hohe spezifische Festigkeiten und Elastizitätsmodule,
- geringe thermische Ausdehnung,
- gutes Dämpfungsverhalten,
- hohe Ermüdungsfestigkeit und
- hohe chemische Beständigkeit.

Wie auch bei anderen faserverstärkten Bauteilen ist auch bei CFK-Bauteilen die Auswahl der Faser, ihre Eigenschaften und Orientierung, ihr Volumenanteil und die Haftung zwischen der Matrix und der Faser, ausschlaggebend für die Eigenschaften der so hergestellten Bauteile. Die hohen mechanischen Kennwerte der Kohlenstofffasern können nur genutzt werden, wenn die auf das Bauteil wirkenden Kräfte über die Matrix in Faserrichtung eingeleitet werden können. Während bei Metallen in der Regel nur eine geringe Anisotropie der mechanischen Eigenschaften festzustellen ist, ist diese bei faserverstärkten Werkstoffen je nach Anordnung der Fasern wesentlich größer. Die mechanischen Kennwerte von Kohlenstofffasern (siehe Tab. 10.11, mechanische Eigenschaften von verschiedenen Fasern) liegen in Faserrichtung auf einen sehr hohen Niveau, quer zur Faserrichtung sind die mechanischen Kennwerte dagegen sehr gering. Schon geringe Abweichungen von der Faserrichtung führen so zu einem deutlichen Festigkeitsabfall.

Bei der Konstruktion eines Bauteils aus CFK ist daher die möglichst exakte Kenntnis seiner späteren Belastungen von zentraler Bedeutung. Aufgrund der komplexen Anforderung an mechanisch belastete Bauteile, z. B. durch überlagerte Zug-, Druck-, Torsions- und Biegebeanspruchung, werden multiaxiale Gelege mit Faserorientierungen von 0°, 45° und 90° verwendet. So kann durch die geschickte Kombination der Faserorientierungen im Bauteil die größtmögliche Belastbarkeit erreicht werden. Aufgrund der großen Gestaltungsfreiheit von CFK-Bauteilen kann durch Aussparen bzw. gezielte Reduktion von Wandstärken in gering belasteten Bereichen das Bauteilgewicht weiter reduziert werden.

**Herstellung der Kohlenstofffasern** Die Herstellung der Kohlenstofffasern erfolgt im Wesentlichen durch zwei unterschiedliche Wege, die sich dabei durch die jeweils eingesetzten Vorstufen (sog. Precursoren) unterscheiden. Abb. 10.21 zeigt dabei schematisch die Unterschiede der beiden Herstellungswege für Kohlenstofffasern aus dem Precur-

**Tabelle 10.11** Eigenschaften unterschiedlicher Fasern im Vergleich mit Stahl und Aluminium (aus [60])

| | | | E-Modul | Festigkeit | | Spezifische Eigenschaften | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Material** | **Faser** | **Verstärkung** | | **Zug** | **Druck** | **Gewicht** | **E-Modul** | **Zugfestigkeit** | **Druck-festigkeit** |
| | | | **MPa** | **MPa** | **MPa** | **g/cm³** | **km** | **km** | **km** |
| Aluminium | | | 71.000 | 540 | 480 | 2,80 | 2586 | 19,7 | 17,5 |
| Stahl | | | 207.000 | 1655 | 1520 | 7,83 | 2696 | 21,6 | 19,8 |
| GFK | E-Glas | Gewebe | 22.800 | 463 | 507 | 2,00 | 1163 | 23,6 | 25,9 |
| GFK | E-Glas | UD | 46.200 | 1070 | 660 | 2,03 | 2321 | 53,8 | 44,5 |
| AFK | Kevlar | Gewebe | 29.000 | 414 | 165 | 1,37 | 2159 | 30,8 | 12,3 |
| AFK | Kevlar | UD | 76.000 | 1400 | 235 | 1,46 | 5308 | 97,8 | 16,4 |
| CFK | hochfest HT | Gewebe | 67.230 | 524 | 500 | 1,55 | 4423 | 34,5 | 32,9 |
| CFK | hochfest HT | UD | 138.000 | 1447 | 1447 | 1,55 | 9079 | 95,2 | 95,2 |
| CFK | mittelsteif HM | UD | 155.000 | 2200 | 1400 | 1,60 | 9879 | 140,2 | 89,2 |
| CFK | hochsteif UMS | UD | 380.000 | 880 | 240 | 1,80 | 21.529 | 49,9 | 13,6 |
| BFK | Bor | UD | 204.000 | 1260 | 2500 | 1,86 | 11.185 | 69,1 | 137,1 |

GFK = Glas-Faser-Kunststoff
AFK = Aramid-Faser-Kunststoff (Kevlar, Twaron etc.)
CFK = Carbon-Faser-Kunststoff (Carbon, Kohlefasern, Kohlenstofffasern)
BFK = Bor-Faser-Kunststoff

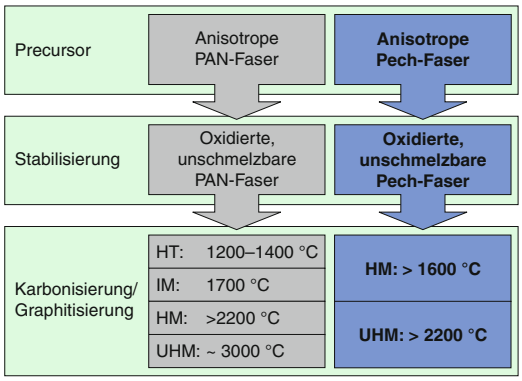



**Abb. 10.21** Schematische Darstellung der Herstellungswege von Kohlenstofffasern (aus [61])

sor PAN (Polyacrylnitril) und aus dem Precursor Pech.

Je nach Wahl der Endbehandlungstemperatur im Prozessschritt Karbonisierung/Graphitisierung werden die Festigkeitsklassen der Kohlenstofffasern eingestellt. Man unterscheidet: Hochfeste Fasern: HT; Zwischenmodulfasern: IM; Hochmodulfasern: HM und Ultrahochmodulfasern: UHM. Ihre mechanischen Kennwerte sind in Abb. 10.22 dargestellt.

Zur Verbesserung der Haftungseigenschaften in der Matrix können die Oberflächen der Kohlenstofffasern noch oxidiert und damit aktiviert, oder beschichtet werden.

**Herstellungswege von CFK-Bauteilen** Für die Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen gibt es verschiedene Prozessrouten, die sich hinsichtlich der Eigenschaften des späteren Bauteils und ihrer Herstellungsaufwands unterscheiden:

- die Preforming-Route,
- die Prepreg-Route und
- das Filament-Winding-Verfahren.

Bei der Herstellung nach der Preforming-Route werden aus den Kohlenstofffasern zunächst durch klassische, aus der Textilindustrie stammende Verfahren textile Strukturen hergestellt. Das einfachste Verfahren zur Herstellung von Geweben ist das Weben, was allerdings nur zweidimensionale Strukturen erlaubt. Weitaus komplexere Strukturen lassen sich durch das Vernähen von Kohlenstofffaserbündeln erzeugen. So hergestellte textile Strukturen werden als Gelege oder Non-Crimp Fabrics (NCF) bezeichnet. Eine weitere Möglichkeit bieten 3D-Geflechte. Bei diesem Verfahren werden mehrere Kohlenstofffaserstränge zu Profilen miteinander verflochten. Eine entsprechende Steuerung erlaubt so die Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlichen Querschnitten und auch Krümmungen. Für die Herstellung eines Bauteils werden die textilen Strukturen zugeschnitten, mit einem geeigneten Harz imprägniert und dann das Harz ausgehärtet. Ein Beispiel für ein kommerziell häufig eingesetztes Verfahren nach der Preforming- Route ist das sog. Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren. Dabei werden mehrere Lagen der textilen Strukturen übereinander in eine Form gelegt. In die geschlossene Form wird dann das Harz injiziert. Durch das Erwärmen der beheizbaren Form wird das die Polymerisationsreaktion des Harzes eingeleitet.

Bei der Prepreg Route wird ein mit Harz imprägniertes Halbzeug (z. B. eine textile Struktur), das sog. Prepreg (engl. **pre** im**preg**nated) verwendet. Die Prepregs werden vor dem Verarbeiten entsprechend zugeschnitten und zusammengelegt. Die eigentliche Herstellung des Bauteils erfolgt dann durch Laminieren einzelner Prepregs in eine Form. Es lassen sich so durch Beschnitt und entsprechende Stapelungen komplexe Bauteilformen erzeugen. Es ist so auch möglich, z. B. metallische Elemente (z. B. Anschraubstellen) im Bauteil einzulaminieren. Die durch Laminieren hergestellte Struktur wird dann mit einer Folie umgeben und in einen Autoklaven gebracht. Durch Vakuum wird der Struktur die während des Laminierens eingeschlossene Luft entzogen, bevor durch Druck und Temperatur die vollständige Aushärtung des Harzes erfolgt.

Bei der letzten Prozessroute, dem sog. Filament-Winding-Verfahren, wird eine Form durch Rotation mit Kohlenstofffasern umwickelt. Die Fasern werden dabei kontinuierlich mit Harz getränkt. Durch die entsprechende Steuerung der Achsen der Maschine können so rotationssymmetrische Bauteile unterschiedlicher Wandstärke erzeugt werden.

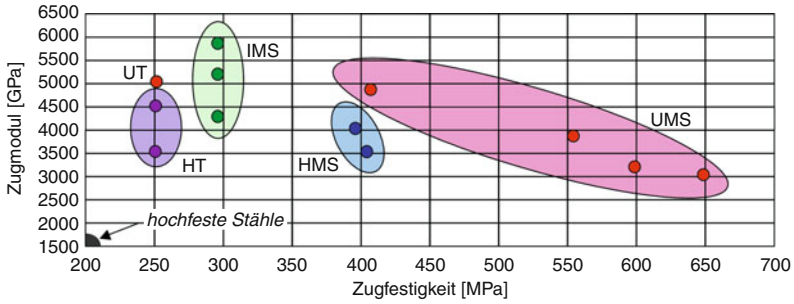



**Abb. 10.22** Mechanische Kennwerte unterschiedlicher Kohlenstofffasern (erweitert aus [61])

**CFK im Automobilbau** Aufgrund der erreichbaren hohen Festigkeiten und des geringen spezifischen Gewichtes werden Bauteile aus CFK vor allem für extreme Leichtbaustrukturen in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Durch die komplexen und aufwändigen Herstellungsprozesse sind Bauteile aus CFK allerdings sehr teuer und eignen sich aufgrund ihrer langwierigen Prozessroute bislang nicht für Großserienbauteile/-fahrzeuge. Daher finden sie sich vor allem in Hochleistungssportwagen und in Rennfahrzeugen.

Einzelne Komponenten von Fahrzeugen werden z. T. schon in CFK ausgeführt. Ein Beispiel dafür ist das CFK-Dach des BMW M3 (Typ E92) (Abb. 10.23). Das Dach wird im BMW Landshut im RTM-Verfahren hergestellt und dann mittels Kleben in der Karosserie sicher befestigt [63]. Beim Porsche Carrera GT wurde zum ersten Mal in einem Serienfahrzeug das Monocoque, wie auch der gesamte Aggregateträger, vollständig aus CFK hergestellt, was optimale Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Gewicht ergeben hat (siehe Abb. 10.24).



**Abb. 10.23** CFK-Dach, BMW M3 (Quelle: BMW-Archiv)



**Abb. 10.24** Der Porsche Carrera GT mit Monocoque und Aggregateträger aus CFK

**Ausblick** Die Autoindustrie ist sich der hervorragenden Eigenschaften der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) voll bewusst. Bislang verhindern der hohe Preis der Fasern und der aufwändige und zeitintensive Herstellungsprozess den Einsatz in der Serienproduktion. Verschiedene Automobilfirmen, Unternehmen aus dem Bereich Kohlefasern und Institute arbeiten intensiv an der Entwicklung von CFK- Bauteilen für Großserien. Vor allem in elektrisch betriebenen Fahrzeugen muss das zusätzliche Gewicht der Batterien durch den Einsatz von Leichtbaumaßnahmen kompensiert werden, um dem Kunden das von Verbrennungsmotoren angetriebenen KFZs bekannte Nutzungsspektrum zu bieten. Als Herausforderungen für den Großseri-

eneinsatz von CFK sind folgende Arbeitspunkte zu nennen:

- großserientaugliche und automatisierbare Herstellungsprozesse mit möglichst kurzen Prozesszeiten,
- preiswerte Faser- und Matrixgrundwerkstoffe,
- sichere Detektion von Fehlstellen in fertigen Bauteilen,
- Simulation von CFK- Werkstoffen (z. B. Crashsimulationen und Betriebsfestigkeitsvorhersagen bei komplexen Bauteilen).

**Elastomere**

Auch auf dem Gebiet der Elastomere kam es zu prägnanten Neuentwicklungen. Ein Beispiel sind Kautschukmischungen für Schläuche zum Einsatz in Klimaanlagen. Chlor- bzw. Brombutylkautschuk sowie HNBR sind ausgezeichnete Basispolymere für Kautschukmischungen zum Einsatz in Kfz-Klimaanlagen. Elastomere aus diesen Werkstoffen erfüllen die strengsten Spezifikationen der Automobilhersteller.

Ein weiteres Beispiel sind die Kautschukmischungen für Schläuche zum Einsatz im Kraftstoffbereich.

Durch die Umweltanforderungen werden vom Gesetzgeber sehr strenge Anforderungen an die Kraftstoffpermeation (▶ Abschn. 5.10) gestellt. Durch umfangreiche Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Verminderung der Permeation nur durch eine zusätzliche Sperrschicht erreicht werden kann. Hier erwies sich FPM als ausgezeichnete Sperrschicht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz einer FPM-Innenschicht die Permeation gegenüber einem Standardschlauch stark verringert werden kann.

Neue Kautschukmischungen wurden auch in der Reifenindustrie entwickelt (▶ Abschn. 7.3).

Thermoplastische Elastomere (TPE) gewinnen immer mehr an Bedeutung; diese sollen ihren Platz zwischen Elastomeren und Thermoplasten finden. Die Automobilindustrie erscheint hier häufig als Ort des Wettbewerbs zwischen Elastomeren und TPE. Hier stehen vor allem die Faltenbälge der Achsen und Antriebswellen im Blickpunkt, wobei nun auch auf der Motorseite TPE-E den konventionellen Elastomerwerkstoff zu verdrängen sucht. Die Vorteile der TPE liegen im Vergleich zu Elastomeren in der Gewichtsreduktion, Rezyklierbarkeit und Verarbeitung. Durch die thermoplastische Verarbeitbarkeit der TPE ergibt sich nicht selten ein Kostenvorteil. Die Nachteile der TPE hinsichtlich Medien- oder Wärmeformbeständigkeit werden zunehmend durch neue Materialentwicklungen oder TPE-gerechte Konstruktion aufgefangen [65].

**Tabelle 10.12** Anforderungsprofil an textile Werkstoffe

| Funktion | Verarbeitung |
|---|---|
| Dehnbarkeit | Verformbarkeit |
| Heißlichtechtheit | Druckempfindlichkeit |
| Luftdurchlässigkeit | Vernähbarkeit |
| Scheuerfestigkeit | Verschweißbarkeit |
| Steifigkeit | Klebefähigkeit |
| Schwerentflammbarkeit | Vulkanisierbarkeit |
| Klimabeständigkeit | … |
| Fogging/Geruch | |
| … | |

**Textilien**

Komfort und Wohlbefinden sind die zentralen Themen, die mit der Verwendung von textilen Werkstoffen und Leder im Automobil verknüpft sind. Doch nicht nur im Interieur, sondern auch in vielen anderen Bereichen sind Textilien wichtige Helfer zur Erfüllung unterschiedlicher funktioneller Anforderungen [68]. Je nach Einsatzgebiet und Anwendung sind dabei eine Vielzahl von Anforderungen bzgl. Funktion und Verarbeitung zu erfüllen (Tab. 10.12) [68].

Die früher eingesetzten Naturfasern wurden zwischenzeitlich größtenteils von Kunstfasern verdrängt. Die dominierenden Fasertypen sind Polyes-

**Tabelle 10.13** Beispiele für textile Anwendungen in der S-Klasse, Mercedes-Benz Typ W 220

| Bauteil | Materialverwendung | Textiles Produkt | Werkstoffe |
|---|---|---|---|
| Sitz | Polsterstoff (Sitzfläche) | Flachgewebe kaschiert | 55 Gew.-% Polyester + 45 Gew.-% Wolle; Polyurethan-Schaum; Polyamid oder Polyester |
| | | Veloursgewebe | 70 Gew.-% Polyester + 30 Gew.-% Wolle im Flor |
| | Verkleidungsstoff | gerautes Gewirke kaschiert | Polyester; Polyurethan Schaum; Polyamid oder Polyester |
| | Polstermaterial | genadelte Watte | 50 Gew.-% Wolle + 25 Gew.-% Zellulosefasern +25 Gew.-% Synthesefasern |
| | Unterfütterung | Gewebe | 50 Gew.-% Zellulose + 50 Gew.-% Polyester |
| | Unterpolsterung | Gummihaarmatte | 22,5 Gew.-% Kokosfasern + 22,5 Gew.-% Schweinshaare + 55 Gew.-% Latex als Binder |
| | Sicherheitsgurt | Webband | Polyester |
| Himmel | Bezugsmaterial Fertighimmel | Rundstrickvelours kaschiert | Polyester; Polyurethan Schaum; Trägerteil |
| Türverkleidung | Bezug Mittelteil | Flachgewebe kaschiert | 55 Gew.-% Polyester + 45 Gew.-% Wolle; Polyurethan Schaum schweißfähig |
| | Bezug Unterteil Türtasche | Velboursteppich getuftet | Polyamid auf Polyester-Vlies bzw. Polyester Gewebe |

ter- und Polyamidfasern, die in den letzten Jahren durch die wesentlich kostengünstigeren PP-Fasern ergänzt wurden. Naturfasern, wie z. B. Wolle, findet man teilweise noch in Sitzanwendungen. Neben den eigentlichen Faserwerkstoffen ist vor allem der Gewebetyp und der Gesamtaufbau des Gewebes ausschlaggebend für das spätere Eigenschaftsprofil.

Einen groben Überblick über die heute eingesetzten textilen Materialien am Beispiel der Mercedes-Benz S-Klasse zeigt Tab. 10.13 [68]. Mehrlagige Verdeckstoffe für Cabrios sind aus Polyester- bzw. Polyester/Polyacryl-Mischgeweben mit einer Zwischenschicht aus Chloropren-Kautschuk aufgebaut.

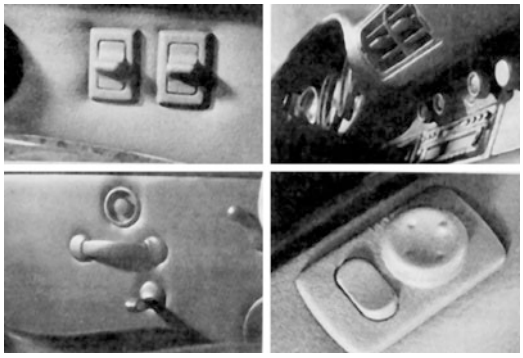


**Abb. 10.25** Lederbezogene Interieurteile

### Leder

Leder kann als der klassische Werkstoff zur Gestaltung und Individualisierung des Fahrzeuginnenraums bezeichnet werden (Abb. 10.25).

Die Vorteile von Leder sind neben der hohen Qualitätsanmutung, die haptischen Eigenschaften sowie das angenehme „Sitzgefühl" durch die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Aufgrund der hohen Materialkosten und der sehr anspruchsvollen Lederherstellung und Kaschierung von Bauteilen kommt Leder hauptsächlich in gehobenen Mittel- und Oberklassefahrzeugen zum Einsatz. In der Vergangenheit wurde besonders auf die Verbesserung des Schrumpfverhaltens bei höheren Temperaturen sowie einer Optimierung des Fogging- und Geruchsverhaltens geachtet. Das Schrumpfverhalten konnte mit Einführung der chromfreien Gerbung zusammen mit speziellen Trocknungsverfah-

ren deutlich verbessert werden. Fogging- und Geruchsoptimierungen erreichte man durch die Verwendung geruchs- und foggingarmer Hilfsstoffe während der Gerbung. Heute wird Leder zur Erzielung einer möglichst guten Farbegalität und einer makellosen Oberfläche mit einer ca. 25 µm „dicken" Lackschicht lackiert.

Zukünftige Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Kundenwunsch nach Naturleder, d. h. einer stärkeren Betonung des natürlichen Ledercharakters (Geruch, Haptik, Optik) mit möglichst wenig Einbußen in Bezug auf die Alltagstauglichkeit (Verschmutzung, Farbechtheit, Abrieb, …). Hierfür gibt es erste Lösungsansätze aus der Nanotechnologie: Neue Beschichtungssysteme auf Basis anorganisch-organischer Hybridpolymere, die über die chemische Zusammensetzung und Prozessparameter speziellen Anforderungen angepasst werden können, bewirken durch einen 4 µm dünnen Oberflächenschutz eine nahezu unveränderte Gebrauchseigenschaft (natürliche, optische und haptische Eigenschaften) des Leders. Der Vorteil dieser noch in der Entwicklung befindlichen Beschichtung liegt auf der ausgeprägten Hydrophobie bei gleichzeitig hoher Wasserdampfdurchlässigkeit. Die Hybridpolymerschicht besticht durch eine sehr gute Kratzfestigkeit und verbessert neben der Verschleißfestigkeit des Leders auch die Lichtechtheit [70].

10

**Verglasung**

Die Anforderungen an die moderne Autoverglasung sind vielfältig und reichen von den ästhetischen Wünschen des Kunden bis hin zu komplexen Schutzfunktionen. Dementsprechend groß ist die Anzahl der unterschiedlichen Glassorten und Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Materialien. Der Trend geht vor allem in Richtung verschiedener Farbgebungs- und Beschichtungssysteme mit flexiblen und vielfältigen Eigenschaften.

Generell unterscheidet man zwischen Einscheibensicherheitsglas (ESG) und Verbundscheibensicherheitsglas (VSG). ESG wird in einer Stärke von 3,15 mm bis 4,85 mm in Fahrzeugen eingesetzt, die aber aus Gewichtsgründen weiter gesenkt werden soll. Im Gegensatz zu dem ESG ist das VSG deutlich vielfältiger. Auch stehen verschiedene Funktionsintegrationen im Vordergrund des Interesses. Die gängige Dicke des VSG liegt im Bereich 5 bis 6 mm, die sich in zwei Scheiben von je 2,1 bis 2,6 mm und eine dazwischen liegende PVB-Folie (Polyvinylbutyral) aufteilt. Beim Panamera von Porsche wird aus Gewichtsgründen in den Fondtüren eine Glaspaarung von 1,6/1,6 mm eingesetzt. Die gleiche Dickenkombination kam auch bei der Frontscheibe des 3 L Lupos zum Einsatz.

Mechanische sowie aeroakustische Anforderungen, besonders bei Fahrzeugen mit Frontmotorisierung, führen aber wieder zurück zur 2,1/2,1 mm Glaspaarungen. Neuste Serienentwicklungen für den Bereich Dachverglasung vereinen die jeweiligen positiven Eigenschaften von ESG und VSG mit zusätzlichen, wünschenswerten Funktionen, die bisher im Markt so nicht verfügbar waren: So besteht z. B. das ProTec® Glas (Lieferant Fa. Webasto) im Wesentlichen aus einer Glasscheibe und einer speziellen Splitterschutzfolie. Das Glas kommt vor allem bei Dachmodulen zum Einsatz. Bei Fremdeinwirkung, die zum Bruch des Glases führt, werden Glassplitter durch die Folie im Dach gehalten. Die glatte, elastisch stabile Dach-Innenfläche bleibt erhalten. Zudem wird ein hoher Rückhalteeffekt gegenüber Einwirkungen von außen und innen erzielt [75].

Bewegliche Seitenscheiben haben eine Gesamtdicke zwischen 4 und 6 mm, feste Seitenscheiben mindestens eine Dicke von 3,15 mm. Aufgrund der Schichtstruktur der VSG können weitere Funktionen, wie z. B. spezielle Beschichtungen oder Antennen integriert werden. So werden bei besonders hochwertigen Scheiben Metalloxidschichten aufgebracht, die die (nicht sichtbare) Infrarot- Wärmestrahlung des Sonnenlichtes bis zu 60 % reflektieren und so die Aufheizung des Fahrzeuginnenraumes vermindern. Zudem können Metalloxidschichten auch als Scheibenheizung betrieben werden. Die Schichten können außerdem auch als Radio- und TV-Antenne verwendet werden. Gedruckte Antennen werden teilweise durch Feindrahtstrukturen ersetzt, die kaum noch mit bloßem Auge zu erkennen sind.

Auf der Außenseite von Fahrzeuggläsern dienen hydro- und oleophobe Silanbeschichtungen zur Verbesserung des Verschmutzungsverhaltens. Durch die geringe Oberflächenspannung zwischen Glas und Wassertropfen perlt dieser stärker ab, als

bei einer unbehandelten Seibe. Dies führt zu einer besseren Durchsicht bei Regen und zu einer geringeren Neigung gegen Verschmutzen. Häufig werden vordere Türscheiben mit einer langlebigen, hydro- und oleophoben Schicht versehen. Frontscheiben sind weniger für diese Schichten geeignet, da die Scheibenwischer die Oberfläche abtragen und es zu verstärktem Streulicht bei Regen kommen kann.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von Glas mit Polykarbonat. Dabei wird eine dünne Glasscheibe auf eine nicht kratzbeständige, aber leichtere Polykarbonatscheibe als Träger aufgeklebt. Durch diese Kombination ist eine weitere Gewichtsreduktion möglich. Nachteilig ist die dadurch reduzierte Steifigkeit der Scheibe. Die Darstellung solcher Systeme ist z. Z. noch auf zweidimensionale kleinere Formate (DIN A4) beschränkt. Als nächstes Entwicklungsziel ist das Herstellen großer, gekrümmter Scheiben geplant [71].

Die Heckscheibe des Porsche 911 GT3 RS ist ein Beispiel für den Einzug von Polycarbonat in der Automobilverscheibung. Weiterhin sind bereits die hinteren feststehenden Seitenscheiben des Smart 4Two sowie der hintere Teil des Panoramadachs der Mercedes Benz G-Klasse aus Polycarbonat gefertigt. Vorteile dieser Technik sind, neben der möglichen Gewichtseinsparung von bis zu 40 %, eine sehr gute Schlagzähigkeit und eine durch die Spritzgießtechnologie sehr große Gestaltungsfreiheit bei gleichzeitig großer Integrationsfähigkeit (z. B. von Antennenmodulen, Jalousien, Beleuchtungskörpern oder auch Solarzellen) [73].

Kosten, Kratz- und Alterungsbeständigkeit, mechanische Eigenschaften, geringe Schalldämmung, Herstellbarkeit und Qualitätsanmutung sind nur einige Aspekte, die im Vergleich zu Glas ganzheitlich für einen Einsatz im Automobil abgewogen werden müssen.

#### 10.2.2.2 Tribologie

Das Ziel der Tribologie ist es, eine möglichst verlustfreie Energie-, Stoff- und Signalübertragung zu erreichen. Bereits in der Entwicklung kann darauf durch konstruktive Maßnahmen im Bezug auf Geometrie, Kraftfluss und Werkstoffauswahl positiv Einfluss genommen werden.

In einem Tribosystem können Aussagen über das Reibungs- und Verschleißverhalten von Bauteilen oder Stoffen, aufgrund der relevanten Auswirkungen verschiedener Einflussparameter, nicht allein getroffen werden. Es handelt sich dabei nicht um reine Materialeigenschaften, sondern Systemeigenschaften die durch komplexe tribophysikalische und tribochemische Abläufe ausgelöst werden.

Dabei kann ein Tribosystem in Abhängigkeit der Anforderungen extrem unterschiedlich ausgelegt sein. Es werden bezogen auf die Reibung und den Verschleiß aufgabenspezifische hohe und niedrige Werte gefordert. Mit einer gezielten Modifikation der Wirkflächen von Grund- und Gegenkörper ist ein gewünschtes Systemverhalten zu erlangen.

Bei der Entwicklung von Kupplungs- und Bremsbelägen wird ein **hoher Reibwert** gefordert, um eine maximale Kraft zwischen den Reibpartnern zu erzeugen.

Im Gegensatz dazu werden z. B. Gleitlager mit sehr **niedrigen Reibwerten** konzipiert, damit sie nicht hemmend und leistungsmindernd auf das Gesamtsystem in Maschinen, Apparaten, Anlagen oder Fahrzeugen wirken.

**Hoher Verschleiß** wird beim Einlaufvorgang von Gasturbinen gefordert. Der Stator ist mit einer leicht verschleißenden Schicht versehen und wird bei Bewegung der Turbinenschaufel soweit abgetragen, dass ein minimaler Spalt zwischen Druck- und Saugseite entsteht. Daher kann auf zusätzliche Abdichtungen verzichtet werden [76].

**Niedriger Verschleiß** wird bei fast allen mechanisch bewegten, geschmierten und nicht geschmierten, Maschinenteilen verlangt, um einen Ausfall durch verschleißbedingte negative Erscheinungsformen zu vermeiden.

Die Verschleißeigenschaften metallischer Werkstoffe werden in erster Linie durch Legieren und/oder durch eine Oberflächenbehandlung verbessert. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Sintermetallen, die Herstellung von Verbundwerkstoffen oder die Verwendung keramischer Werkstoffe.

**Keramik** Innerhalb der technischen Keramik (Hochleistungs-, Ingenieur-, Industrie-, Konstruk-

tions-, Elektro-, Funktions- oder Strukturkeramik) werden drei Gruppen unterschieden:

***Silikatkeramik*** Zu den bekannten Werkstoffen zählen Porzellan, Steatit, Cordierit und Mullit. Im Fahrzeugbau wird z. B. Cordierit aufgrund seiner hohen Thermoschockbeständigkeit und des niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten trotz niedriger Festigkeiten als Katalysatorträger eingesetzt.

***Oxidkeramik*** Oxidkeramische Werkstoffe sind einphasige, einkomponentige Metalloxide auf der Basis von Aluminium, Magnesium, Zirkon, und Titan oder Mischoxide wie z. B. Aluminiumtitanat oder Bleizirkonattitanat (Piezokeramik). Eingesetzt werden diese überwiegend für elektrische Anwendungen (z. B. Isolatoren, Klopf- und Abstandssensoren, in Lambda-Sonden, etc.).

***Nichtoxidkeramik*** Hauptsächlich auf der Basis von Kohlenstoff, Silizium, Stickstoff und Bor hergestellte Keramik und Sialone (Si-, Al-, O-, N-Verbindungen). Verwendung finden diese als Gleitringe, Lager- oder Isolationsbuchsen z. B. in Wasser- und Kraftstoffpumpen, Abgasregelventilen, etc. Eine weitere mögliche Anwendung ist der Einsatz von Ventilen aus Siliziumnitrid [81]. Die Reibleistung kann mit diesen Ventilen um bis zu 40 % reduziert, gleichzeitig das Verschleißverhalten verbessert und die Geräuschemission minimiert werden. Aufgrund der hohen Fertigungskosten haben sich diese allerdings, trotz nachgewiesener technischer Vorteile, nicht durchgesetzt.

Die Vorteile von technisch relevanten Keramiken sind die hohe Druckfestigkeit und Härte, die hohe Verschleiß- und Hochtemperaturfestigkeit, sowie eine gute Korrosionsbeständigkeit und eine geringe Dichte.

Die Nachteile von Keramik sind die geringe Duktilität, eine hohe Streuung der Werkstoffkennwerte, z. T. eine geringe Thermoschockbeständigkeit, die aufwändige Herstellung und Bearbeitung und die komplizierte Fügetechnik mit anderen Werkstoffen.

Die Einlagerung von Fasern ist derzeit die aussichtsreichste Möglichkeit zur Erhöhung der Bruchzähigkeit von keramischen Werkstoffen und Darstellung von Strukturkomponenten. Keramische




**Abb. 10.26** Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB)

Bestandteile im Verbund sind eine Möglichkeit, die Vorteile der neuen Werkstoffe zu nutzen. Mit der Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB) aus carbonfaserverstärktem Siliziumkarbid (C/SiC) im Porsche 911 GT2 Typ 997 wurde erstmalig ein Serienfahrzeug mit einer Keramikbremsscheibe ausgerüstet (Abb. 10.26). Die PCCB ist leicht und thermisch extrem belastbar. Dabei ist es hart und bruchzäh zugleich, das heißt unempfindlich gegen Thermoschocks und mechanische Schlageinwirkung. Das Gewicht einer derartigen Bremsscheibe beträgt lediglich die Hälfte einer herkömmlichen Graugussscheibe. Das reduziert vor allem die ungefederten Massen, wodurch Fahrsicherheit und Fahrkomfort weiter verbessert werden [82]. Wegen ihrer technischen Vorteile hat sich die Keramikbremse heute im Sportwagen- und hochmotorisierten Oberklasse- und SUV-Bereich etabliert [83].

Neben der Bremse kann Keramik auch für die Kupplung eines Fahrzeugs verwendet werden. Sie wurde beim Porsche Carrera GT zum ersten Mal serienmäßig in einem Sportwagen eingesetzt. Die

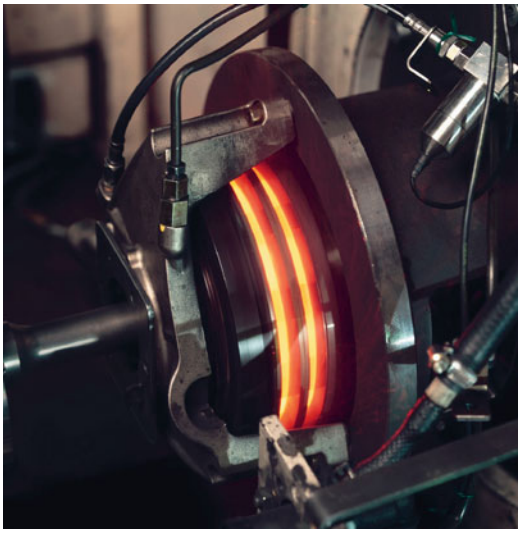


**Abb. 10.27** Porsche Ceramic Composite Clutch (PCCC) [85]

sog. Porsche Ceramic Composite Clutch (PCCC) (Abb. 10.27) kann mit einem Durchmesser von 169 mm ein Drehmoment von maximal 1000 N m übertragen.

Eine immer breitere Anwendung finden keramische Oberflächenbeschichtungen, wie z. B. PVD-, CVD-, sowie thermisch gespritzte Schichten.

Diese Schichten werden auf ein metallisches Bauteil aufgebracht, um die Härte und somit die Verschleiß- und die Temperaturbeständigkeit an der Oberfläche zu erhöhen. Sie sind in der Regel dünn und müssen normalerweise nicht nachbearbeitet werden.

Gerade unter Leichtbaugesichtspunkten sind diese Oberflächenbehandlungen vorteilhaft, da der Werkstoff des Bauteils nicht mehr über die hochbelasteten Randbereiche definiert wird. Die Beschichtung von Zylinderlaufflächen und Lageranwendungen sind dabei die technisch interessantesten Anwendungsgebiete.

**Keramische Werkstoffe für elektrotechnische Anwendungen** Bei mechanisch belasteten Bauteilen und Komponenten macht man sich die hohe Härte und die Verschleißbeständigkeit keramischer Werkstoffe zunutze. Diese Eigenschaften stehen bei elektronischen Bauteilen nicht im Vordergrund. Hier kamen durch die Weiterentwicklung der technischen Keramiken und die Erforschung ihrer physikalischen Charakteristika folgende technisch nutzbare Eigenschaften hinzu:

- elektrische Isolation (z. B. Zündkerzen, elektrische Miniaturschaltungen allgemein),
- hohe Hitzebeständigkeit (z. B. Heizelemente),
- hohe Dielektrizitätskonstanten (Einsatz als Dielektrikum in elektrischen Kondensatoren) und
- piezoelektrische Eigenschaften.

Bereits zu Beginn der Entwicklung der Kraftfahrzeuge wurde mit der Zündkerze eine der bekanntesten Einsatzmöglichkeiten keramischer Werkstoffe als Isolator gefunden, mit der es überhaupt erst möglich war, schnelllaufende Benzinmotoren zu betreiben. Auch in modernen Motoren sind Zündkerzen erforderlich und für eine gezielte Verbrennung unerlässlich. Das in den Zündkerzen als Isolatorwerkstoff verwendete $Al_2O_3$ (Aluminiumoxid) kommt auch als Substratplatte bei Mikrochips in Dickschichttechnik zum Einsatz. So hergestellte Chips eignen sich z. B. zum Einsatz bei erhöhten Betriebstemperaturen in Motorsteuergeräten.

Eine besondere Eigenschaft verschiedener, vor allem keramischer, Werkstoffe, der piezoelektrische Effekt, führt zum Einsatz in zahlreichen unterschiedlichen elektronischen Komponenten in Kraftfahrzeugen. Beim piezoelektrischen Effekt kommt es durch eine von außen wirkende mechanische Kraft (Druck, Zug, Verdrillung, Scherung oder Biegung) zur Deformation des Kristallgitters und damit einhergehend zu einer Ladungsverschiebung aus der elektrisch neutralen Position (siehe Abb. 10.28). Diese Ladungsverschiebung führt makroskopisch zu einer messbaren Spannung am Kristall. Umgekehrt führt eine von außen angelegte elektrische Spannung zur Verformung des Kristalls. Mit einer Wechselspannung kann der Kristall in Schwingungen versetzt werden, was z. B. zur Erzeugung von Schallwellen genutzt wird.

Der piezoelektrische Effekt kommt bei Kraftfahrzeugen in einer Vielzahl von Bereichen zur Anwendung:

- Deformationselemente z. B. zum Auslösen von Airbags oder Gurtstraffern,
- Klopfsensoren am Motorblock,
- Ultraschallsensoren als Einparkhilfe,

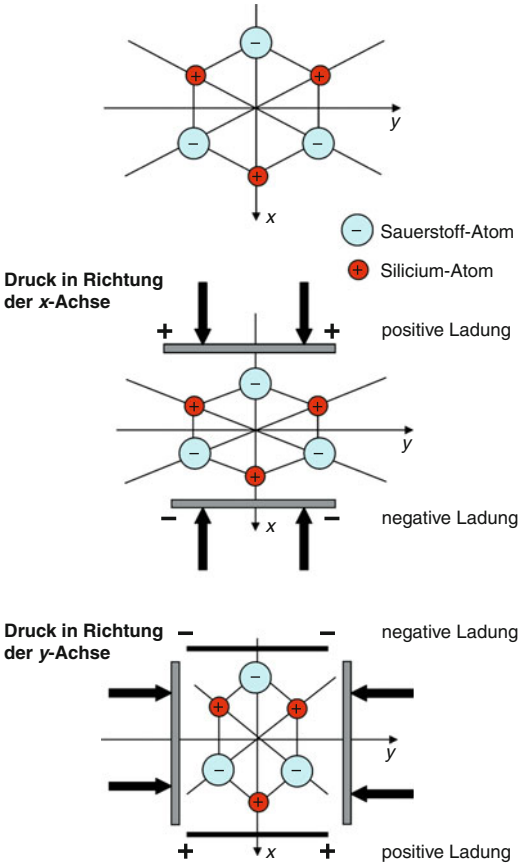



**Abb. 10.28** Schematische Darstellung des piezoelektrischen Effektes am Beispiel des Quarz-Kristalls [86]

- piezoelektrische Einspritzdüsen in Dieselmotoren für Common-Rail-Einspritzsysteme,
- Beschleunigungssensoren.

Typische Vertreter piezoelektrisch wirksamer Werkstoffe sind Quarz (auch bekannt aus den quarzgetakteten Uhren), Turmalin und verschiedene Titanate (z. B. Bariumtitanat). Man verwendet für elektrische Anwendungen hauptsächlich keramische Werkstoffe mit einer sog. Perowskit-Struktur, da diese einen wesentlich stärker ausgeprägten piezoelektrischen Effekt aufweisen als Quarz.

Aufgrund des Stoffverbotes verschiedener Elemente (z. B. Blei oder Barium) gibt es Bestrebungen, alternative Verbindungen zu finden und so die schwermetallhaltigen Titanate durch Verbindung mit vergleichbaren Eigenschaften zu substituieren [87].

### 10.2.2.3 Korrosionsschutz

DIN EN ISO 8044 definiert die Korrosion wie folgt:

„Korrosion ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann. In den meisten Fällen ist die Reaktion elektrochemischer Natur, in einigen Fällen kann sie chemischer oder metallphysikalischer Natur sein."

Der Begriff Korrosionsschutz muss von dem der Korrosionsbeständigkeit unterschieden werden, der als grob qualitatives Maß des Widerstehens eines Metalls gegen den Angriff durch das Korrosionsmedium gebraucht wird. Ein an sich völlig korrosionsbeständiger Überzug, z. B. aus Gold, ist nicht zwingend der absolute Korrosionsschutz. Der Goldüberzug kann porig sein und dann die Korrosion des unedleren Grundmaterials fördern, ohne selbst angegriffen zu werden. Zink als Überzugsmetall auf Stahl verhält sich entgegengesetzt. Bei durchgehenden Verletzungen geht Zink in Lösung und schützt durch Eigenkorrosion das Substrat.

**Werkstoffbeschichtungssysteme** Die Oberflächenbehandlung eines Werkstoffes verfolgt das Ziel, ihn für eine Anwendung zu optimieren oder eine Anwendung zu ermöglichen.

Dies gilt sowohl für die klassischen Beschichtungsverfahren als auch für Umwandlungsprozesse wie Ätzen, Oxydieren oder Implantieren. Wesentliche Anwendungsziele sind Oberflächenfunktionen als Korrosionschutz, Oxidationsschutz, Verschleißschutz, Gleitvermögen, Wärmedämmung, Abdeckung oder das Erzielen eines Oberflächeneffekts. Oft sind mehrere Ziele gleichzeitig zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an eine Oberflächenbeschichtung zum Korrosionsschutz können dekorativ/funktionell oder nur funktionell ausgerichtet sein. Diese Unterscheidung ist wichtig, da dekorative Beschichtungen im Regelfall eine aufwändigere mechanische Vorbehandlung benötigen und damit auch die Beschichtungskosten beeinflusst werden.

Im Interesse eines technisch und wirtschaftlich optimalen Entwicklungsprozesses müssen die Belange einer späteren Oberflächenbeschichtung von Anfang an mit einbezogen werden.

***Elektrolytisch abgeschiedene Metallschichten*** Die Metallabscheidung kann in einem Elektrolytbehälter oder ohne diesen mittels Tampon-Galvanisieren (eingesetzt zum selektiven Beschichten, meist als Reparaturlösung) erfolgen [89]. Das Bauteil ist als Kathode gepolt. Aus der Vielzahl abscheidbarer Metalle finden zum Korrosionschutz folgende Anwendung: Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Silber, Zinn, Gold und Blei. Von den galvanisch abscheidbaren binären Metalllegierungen haben ZnCo, ZnFe, ZnNi an Bedeutung gewonnen. Diese Schichten sind chromatierbar und ersetzen aufgrund ihrer deutlich besseren Korrosionsbeständigkeit die chromatierten Zinkschichten bei Verbindungselementen und Bauteilen im Fahrwerk- und Motorbereich. Zusätzliche organische Dünnschichtüberzüge steigern nochmals den Korrosionschutz und die Temperaturbeständigkeit. Solche Oberflächen finden auch Anwendung in Kontakt mit Magnesiumbauteilen [90].

Bei höchstfesten Stählen ($\geq 1000$ MPa) und elektrolytischer Abscheidung ist immer die Gefahr der Wasserstoffversprödung gegeben [91]. Man denke in diesem Zusammenhang auch an stark kalt umgeformte Blechteile und auch daran, dass bei der kathodischen Tauchentfettung und beim Beizen mit Mineralsäuren Wasserstoff erzeugt wird. Diese Vorbehandlungsverfahren werden häufig für Beschichtungsverfahren eingesetzt, die selbst keine Wasserstoffschädigung verursachen. Dies trifft auch auf die galvanische Abscheidung von Aluminium zu. Bei der Abscheidung aus aprotischen, d. h. wasserfreien Lösungen tritt keine Wasserstoffversprödung auf. Die Aluminierung ist außerordentlich duktil, lässt sich chromatieren und bei Schichtdicken ab ca. 20 µm auch farbig anodisieren. Sie eignet sich z. B. für Schlauchquetschverbinder.

Galvanisch abgeschiedene Schichten sind nicht konturtreu. An Ecken und Spitzen werden aufgrund der höheren Stromdichten dickere Schichten erzeugt. Wegen der begrenzten Streufähigkeit ist das Beschichten von komplexen Geometrien oft nur unter Zuhilfenahme von Zusatz- bzw. Innenelektroden möglich. Bei der Konstruktion der Teile ist auf gute Spülmöglichkeit zu achten. Verschleppte Elektrolyte verteuern den Prozess, am Werkstück zurückbleibende können zur Korrosion führen. Es empfiehlt sich, die Konstruktionsempfehlungen in den Publikationen der Fachverbände zu beachten.

***Außenstromlos abgeschiedene Metalle*** Für den Korrosionsschutz ist es vorzugsweise Nickel. Weitere abscheidbare Metalle sind Kupfer, Silber und Zinn [88]. Die Schichten werden mit Hilfe chemischer Reduktionspartner aus wässrigen Metallsalzlösungen abgeschieden. Daraus resultiert auch die Bezeichnung „Chemisch Nickel" [92]. Besonderer Vorteil ist die Konturtreue im Vergleich zu galvanischen Schichten. Das Verfahren gestattet die Beschichtung innenliegender Flächen. Es kann Stahl und Aluminium beschichtet werden, aber auch auf Graphit, Keramik oder Kunststoffen ist eine Abscheidung möglich, wenn vorher Metallschichten aufgebracht wurden, die eine chemische Reaktion ermöglichen. Die ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit wird durch passiven Schutz gewährleistet, d. h. auf Stahl und Aluminium darf die Schicht keine Poren oder Risse aufweisen, die das Grundmetall freilegen. Bei starker Korrosionsbelastung sind auf Stahl mindestens 25 µm, auf Aluminium höhere Schichten erforderlich. Die Empfindlichkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion von hochfesten Stählen lässt sich durch chemischen Nickel herabsetzen, zum Teil sogar verhindern.

Eine weitere positive Eigenschaft ist das tribologische Verhalten von stromlos Nickel. Durch Einlagerung von PTFE, SiC, und Diamant-Partikeln lässt es sich auch als Dispersionschicht in weiten Bereichen steuern. Stromlos Nickelschichten können die Dauerfestigkeit in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff, der Wärmebehandlung und der Schichtdicke bis zu 60 % verringern.

***Anodisieren*** Umwandeln der Oberflächenschicht eines Metalls in eine oxidische Deckschicht durch anodisches Oxidieren, beim Aluminium meist in schwefelsaurer oder chromsaurer Lösung. Bauteile mit Überlappungen, aus welchen der Elektrolyt nicht entfernt werden kann, dürfen nicht nach dem Schwefelsäureverfahren, Werkstoffe mit mehr als 7,5 % Legierungsanteilen nicht nach dem Chrom-

säureverfahren behandelt werden. Die Schichten weisen nachverdichtet ein ausgezeichnetes Korrosionsverhalten auf, lassen sich zudem einfärben und eignen sich ferner zur Vorbehandlung zum Lackieren. Für den letzten Fall darf dann aber aus Haftungsgründen die Schicht nicht mehr verdichtet werden [93].

Durch „Hartanodisieren" mit gekühlten Elektrolyten bestimmter Zusammensetzung lassen sich Schichtdicken von 50–100 µm erzielen. Diese sind in der Lage, elektrisch und thermisch zu isolieren. Die Schichten sind hart und spröde und bilden unter mechanischer Belastung Risse. Die Dauerfestigkeit wird durch Rissfortschritt ins Grundmaterial erheblich verringert.

***Lackieren*** Lackierungen sind Schutzschichten auf Basis organischer Substanzen, in der Regel auf Basis von Polymeren. Verschiedene Zusätze wie z. B. Zinkchromat, Bleimennige und andere toxische Pigmente sind nicht mehr zulässig oder mit hohen Arbeitsschutzauflagen verbunden. Diese aktiven Korrosionsschutzpigmente waren in der Lage, mangelhafte Oberflächenvorbehandlungen zu kaschieren. Unabhängig von Substrat, Lackchemie und Auftragsverfahren ist eine werkstoffgerechte Oberflächenvorbereitung und Vorbehandlung die Voraussetzung für eine korrosionsbeständige Lackierung. Für Bauteile aus Magnesium gilt insbesondere, dass bei hoher Korrosionsbelastung eine Lackierung keinen Schutz gegen Kontaktkorrosion bietet.

Ein weiterer Punkt, der berücksichtigt werden muss, ist das Setzverhalten organischer Beschichtungen. Vorspannkräfte können erheblich beeinträchtigt werden (Kriechen, vor allem unter Temperatureinfluss). Weitere Beschichtungsverfahren, auf die hier nicht näher eingegangen wurde, sind:

- *Thermische Spritzschichten (Flamm-, Lichtbogen-, Detonations- und Plasmaspritzen),*
- *PVD- und CVD-Schichten,*
- *Schmelztauchschichten,*
- *Walzplattierschichten,*
- *Diffusionsschichten.*

## 10.2.3 Fortschritte in der Fügetechnik

### 10.2.3.1 Schweißen und Löten

Im folgenden Abschnitt sollen ausgewählte Entwicklungen speziell aus den Bereich der Fügeverfahren von im Karosseriebereich eingesetzten Blechen (► Abschn. 10.2.2.1.1) betrachtet werden.

**Widerstandspunktschweißen** Im Bereich der Stahlwerkstoffe ist das Widerstandspunktschweißen nach wie vor das dominante Verfahren. Hierbei hat speziell im Bereich des Karosserierohbaus in den letzten Jahren verstärkt die sog. Mittelfrequenzschweißung (1000 Hz) Einzug gehalten. Durch diese Technik ist es möglich, robotergeeignete Transformatorschweißzangen zu realisieren, die ein erheblich reduziertes Gewicht und kleinere Bauformen gegenüber herkömmlichen 50 Hz Wechselstromschweißzangen aufweisen. Durch ein günstigeres Verhältnis von Effektivstrom zu Spitzenstrom konnte darüber hinaus die Spritzerneigung beim Punktschweißen deutlich reduziert werden. Verbesserte Steuerungen und intelligente Regelungen erlauben heute eine sichere Verschweißung auch höherfester bzw. beschichteter Bleche.

Das Punktschweißkleben, bei dem Klebstoff zusätzlich in der Fügeebene appliziert wird, kann das Tragverhalten solcher Verbindungen gerade auch in Bezug auf die Schwingfestigkeit nochmals verbessern.

**Laserschweißen** Das Laserschweißen, das zunächst Verbreitung im Fahrzeugbau bei den Tailored Blanks (► Abschn. 6.1.3) gefunden hat, kommt zunehmend auch beim Fahrzeugzusammenbau zum Einsatz. Hierbei wird das Tragverhalten speziell von höherfesten Blechen dadurch positiv beeinflusst, dass die Bleche quasi flächig miteinander verbunden sind. Derzeit werden sowohl $CO_2$-Laser als auch Festkörperlaser (Nd-YAG) eingesetzt. Konstruktiv lassen lasergeschweißte Verbindungsbereiche eine Reduzierung der Flanschbreite zu. Auch können Fügungen bei nur einseitiger Zugäng-

lichkeit (z. B. im Dachbereich) mit hoher Sicherheit geschweißt werden. Gestiegene Laserleistungen bei gleichzeitig verbesserten Strahlqualitäten lassen darüberhinaus auch ein Schweißen mit Zusatzdraht zu. Hierdurch lassen sich andere Fügegeometrien, z. B. auch Kehlnähte, realisieren bei gleichzeitig verbesserter Spaltüberbrückbarkeit.

**Löten** Die modernen im Karosseriebau verwendeten Verfahren sind das MIG-, Plasma- und Laserlöten. Der wesentliche Unterschied zum Schweißen besteht darin, dass nur das verwendete Zusatzmaterial, vorzugsweise eine Kupferlegierung, nicht aber der zu fügende Grundwerkstoff aufgeschmolzen wird. Das flüssige Lot benetzt den Grundwerkstoff, dringt in die Oberfläche ein und stellt durch Erzeugung einer Legierung an der Grenzfläche die Verbindung her [94]. Das Verfahren ermöglicht bei Karosserielötstellen aufgrund der Größe des Verbindungsbereichs Festigkeiten, die teilweise über denen des Grundwerkstoffs liegen.

Durch das abgesenkte Temperaturniveau beim Fügevorgang kommt es bei verzinkten Blechen zu einer reduzierten Beeinflussung der Zinkschicht und ggfs. zu einer verminderten Aufhärtung in der Wärmeeinflusszone. Weiterhin ist die Spaltüberbrückbarkeit mit dem verwendeten Zusatzmaterial besser und der Wärmeverzug geringer. Allerdings muss wegen der unterschiedlichen elektrochemischen Potenziale der verwendeten Werkstoffe, speziell im Falle verzinkter Bleche, im Fügebereich ein ausreichender Korrosionsschutz z. B. durch eine einwandfreie KTL-Beschichtung erfolgen.

**Hochfrequenzschweißen** In der Einführung befindet sich derzeit das Hochfrequenzschweißen von Tailored Blanks. Hierbei werden die Platinen mit einem definierten Spalt zueinander gespannt. Der hochfrequente Strom wird mittels Spannschienen direkt über die Platinen geführt. Durch elektrodynamische Effekte konzentriert sich der Schweißstrom an den Blechkanten. Nach Erreichung der notwendigen Temperatur wird der Strom abgeschaltet und die erwärmten Fügekanten werden zusammengepresst. Es lassen sich extrem kurze Schweißzeiten realisieren (1 s/m). Die Anforderungen an die Nahtkantenvorbereitung sind geringer

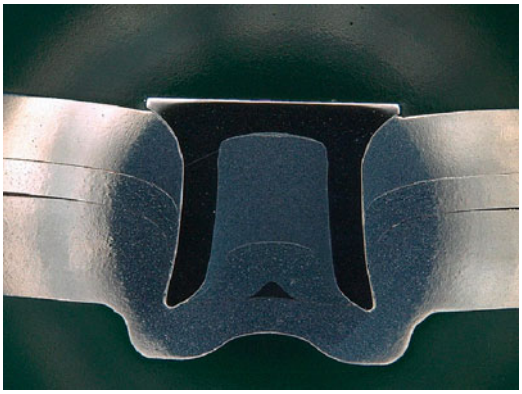


**Abb. 10.29** Dreilagige Aluminiumverbindung im Schliffbild

als beim Laserschweißen, auch nichtlineare Nähte lassen sich leicht realisieren. Als Verfahrensvariante lässt sich das Verschweißen auch bereits umgeformter Bauteile, d. h. also auch konturierter dreidimensionaler Nähte, sehen. Auf diese Weise ist es denkbar, bspw. bei Automobilseitenwänden gleiche Vorderteile mit unterschiedlichen Heckvarianten zu verbinden. Als nachteilig ist jedoch anzusehen, dass die aufgrund des Stauchvorgangs entstandenen Nahtüberhöhungen abgearbeitet werden müssen.

### 10.2.3.2 Mechanische Fügeverfahren

Als Alternative zum Widerstandspunktschweißen bieten sich zunehmend umformtechnische Fügeverfahren wie das Stanznieten und das Durchsetzfügen (Clinchen) an. Das Fügen durch Umformen ist eine Sammelbezeichnung für Fertigungsverfahren, bei denen die Fügeteile und/oder die Hilfsfügeteile örtlich, bisweilen auch ganz umgeformt werden [95]. Mit diesen mechanischen Verfahren lassen sich sowohl unbeschichtete als auch beschichtete Blechformteile verbinden. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass bei den mechanischen Verfahren keine Anwendungsbegrenzung auf Stahlwerkstoffe besteht. Vielmehr lassen sich auch metallurgisch unverträgliche Werkstoffe miteinander verbinden.

**Stanznieten** Beim Stanznieten werden die zu verbindenden Teile ohne Vorlochen mit Nietelementen verbunden (Abb. 10.29 und Abb. 10.30) [98].



**Abb. 10.30** Praxisbeispiel für Stanznietanwendungen: Audi A6-Motorhaube

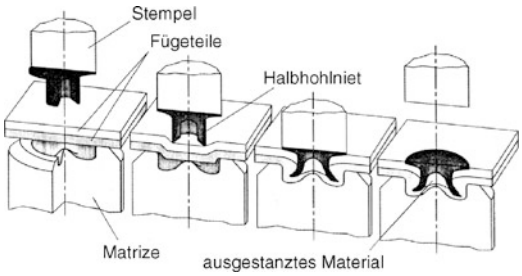



**Abb. 10.31** Arbeitsfolge beim Stanznieten mit Halbhohlniet

Das beim „konventionellen" Nieten erforderliche Vorlochen der Fügeteile wird durch einen entsprechenden Niet-Schneidvorgang ersetzt.

**Stanznieten mit Halbhohlniet** Beim Stanzen mit Halbhohlniet entsteht die Verbindung in einem durchgehenden Stanz- und Umformvorgang (Abb. 10.31) [95]. Die zu verbindenden Blechteile werden auf die Matrize gelegt. Mit dem Vorschub der Setzeinheit erfolgt durch das Aufsetzen der Setzeinheit eine Fixierung der Fügeteile. Mit dem weiteren Vorschub wird der Niet der Fügestelle zugeführt.

Im sich anschließenden Fügevorgang durchtrennt der Stanzniet das obere, stempelseitige Blechteil und verformt bei gleichzeitiger eigener Verspreizung das untere, matrizenseitige Blechteil plastisch zu einem Schließkopf. Die Form des Schließkopfes wird hierbei wesentlich durch die Kontur der Matrizengravur bestimmt.

Das Nietelement bildet im plastisch umgeformten Werkstoff der Fügeteile über eine Spreizung einen Hinterschnitt aus, der ein Maß für die Verbindungsfestigkeit darstellt. Das aus der oberen Blechlage ausgestanzte Material füllt den hohlen Nietschaft aus und wird dabei unverlierbar eingeschlossen [95].

Das Erreichen einer grossen Verspreizung des Nietschaftes ist eine wichtige geometrische Kenngröße. Sie hat wesentlichen Einfluss auf die übertragbaren Scherzug- und Kopfzugkräfte. Außerdem wird der Stanzniet axial und radial verspannt, sodass ein Kraftschluss in die Verbindung eingebracht wird.

**Stanznieten mit Vollniet** Beim Stanznieten mit Vollniet dient das Nietelement als Einweg-Schneidstempel. Er wird jedoch selbst nicht umgeformt. Die verwendeten Werkstoffe der Stanzniete müssen härter sein als die zu fügenden Teile. In der Praxis eingesetzte Werkstoffe sind Stahl, Kupfer, Aluminium und Edelstahl mit verschiedenen Oberflächenbeschichtungen.

**Durchsetzfügen** Beim Durchsetzfügen (Clinchen) handelt es sich um ein umformtechnisches Fügen von Werkstoffen ohne Hilfsfügeteil [96, 97]. Eine Charakterisierung der Durchsetzfügeverfahren ist folgendermaßen möglich:

- nach der Fügeelementausbildung: Durchsetzfügen mit und ohne Schneidanteil,
- nach der Kinematik der Werkzeugteile: ein- und mehrstufiges Durchsetzfügen [95].

**Durchsetzfügen mit Schneidanteil** Beim Durchsetzfügen mit Schneidanteil entsteht das Fügeelement unter der lokalen Wirkung eines kombinierten Scherschneid- und Durchsetzfügevorganges und eines Kaltstauchvorganges. Der aus der Blechebene heraus verschobene Blechwerkstoff wird gestaucht, so dass durch Breiten eine kraft- und formschlüssige Verbindung entsteht. Das Durchsetzen und das Einschneiden begrenzen den Fügevorgang. Je nach Art und Zuordnung der Schneiden bzw. des Durchsetzens und des Stauchens kann zwischen

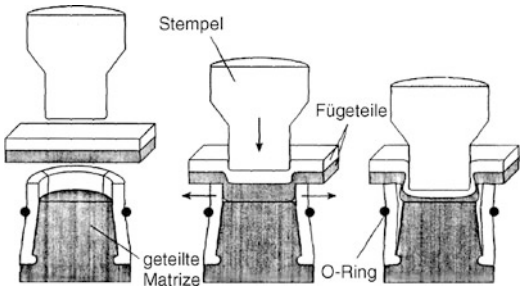
ein- und mehrstufigen Durchsetzfügesystemen unterschieden werden.

- Einstufiges Durchsetzfügen mit Schneidanteil: Einstufiges Durchsetzfügen ist gegeben, wenn die Verbindung während eines ununterbrochenen Hubes eines einzigen Werkzeugteiles entsteht. Diese Verfahrensvariante ist mit einfach wirkenden Fügepressen ausführbar.
- Mehrstufiges Durchsetzfügen mit Schneidanteil: Mehrstufiges Durchsetzfügen ist gegeben, wenn die Verbindung unter Einwirkung nacheinander bewegter Werkzeugteile hergestellt wird. Mit einem mehrteiligen Fügewerkzeug werden die Fügeteile an der Verbindungsstelle partiell eingeschnitten und versetzt [95].

**Durchsetzfügen ohne Schneidanteil** Auf der Grundlage der Durchsetzfügeelemente mit Schneidanteil wurden in den letzten Jahren weitere Fügeelemente entwickelt. Charakteristisches Kennzeichen dieser Fügeelemente ist es, die Verbindungsfestigkeit nicht nur durch Vergrößerung der Scherfläche, sondern durch Verminderung des Schneidanteils zugunsten des Umformanteils zu erhöhen.

Beim Durchsetzfügen ohne Schneidanteil wird in einem kombinierten Einsenk- und Durchsetzvorgang (das Einsenken begrenzt den Fügebereich) sowie einem Kaltstauchvorgang (das durchgesetzte Werkstoffvolumen wird gestaucht) eine kraft- und formschlüssige Verbindung durch Fließpressen erzeugt. Für das ein- oder mehrstufige Durchsetzfügen ohne Schneidanteil sind entsprechende Werkzeugsysteme mit und ohne bewegte Matrizenteile konzipiert worden.

- Einstufiges Durchsetzfügen ohne Schneidanteil (◘ Abb. 10.32): Beim einstufigen Durchsetzfügen ohne Schneidanteil ist der Grundgedanke, ein unterschiedliches Fließverhalten von matrizenseitigem und stempelseitigem Fügeteil zu erreichen. Erst dadurch wird ein nachweisbarer Hinterschnitt und damit eine kraft- und formschlüssige Verbindung möglich.
- Mehrstufiges Durchsetzfügen ohne Schneidanteil: Das mehrstufige Durchsetzfügen ohne Schneidanteil ist durch eine zeitliche Trennung von Durchsetz- und Stauchphase gekennzeichnet. Dadurch ist der Fügekraftbedarf zur Herstellung eines Fügeelementes etwa 20 % geringer als beim einstufigen Durchsetzfügen [95].




◘ **Abb. 10.32** Arbeitsfolge beim einstufigen Durchsetzfügen ohne Schneidanteil




◘ **Abb. 10.33** Beispiel (Schliff) einer Direktverschraubung mit Vorloch im oberen, klemmseitigen Blech

**Direktverschraubung** Die Direktverschraubung kommt als Fügetechnik im modernen Karosserierohbau aufgrund zunehmender Mischbauweise und der vielfach nur einseitigen Zugänglichkeit der Fügestelle, z. B. beim Einsatz von Aluminium Strangpressprofilen, vermehrt zum Einsatz [99].

Je nach Art und Geometrie der Schraube sowie der zu verschraubenden Werkstoffe wird mit oder ohne Vorloch in den Bauteilen gearbeitet. Beim Eindrehen einer loch- und gewindeformenden Schraube wird in den Bauteilen ein Durchzug geformt, der zu einer Anzahl an tragenden Gewindegängen führt (siehe Beispiel ◘ Abb. 10.33).

Der Fügeprozess der Direktverschraubung verläuft wie in ◘ Abb. 10.34 dargestellt: Nach der Zuführung der Schraube und der Positionierung der

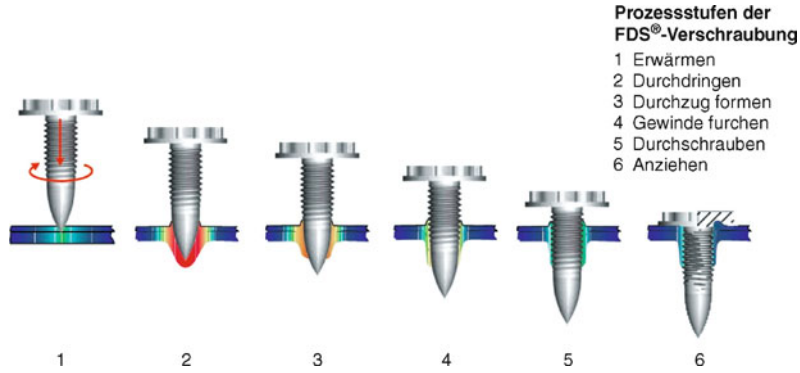



**Abb. 10.34** Schraubvorgang am Beispiel einer FDS-Schraube der Fa. Ejot ohne Vorloch

Schraube auf dem Einschraubbauteil drückt zunächst ein Niederhalter auf die Fügestelle. Einer Spaltbildung zwischen den beiden Bauteilen im Schraubprozess wird dadurch entgegengewirkt. Über eine definierte Andruckkraft und eine hohe Drehzahl wird dann zwischen Schraubenspitze und Blech Reibungswärme erzeugt, die das Ein- und Durchdringen der Schraube durch die Bleche ermöglicht. In den Blechen wird ein metrisches Muttergewinde geformt. Das weitere Einschrauben führt zur Anlage des Schraubenkopfes auf dem klemmseitigen Blech, und die Schraube wird mit einem voreingestellten Anziehdrehmoment angezogen.

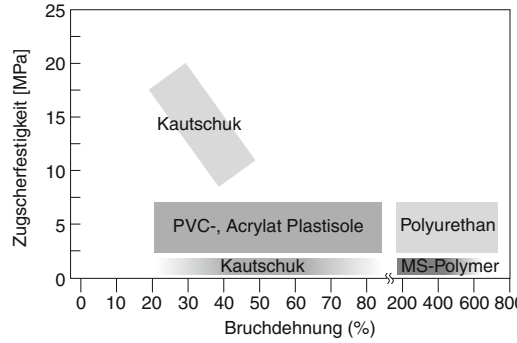



**Abb. 10.35** Klebstoffsysteme

### 10.2.3.3 Kleben

Dem Kleben als eigenständigem Fügeverfahren, vor allem aber in Kombination mit Schweiß- und mechanischen Fügeverfahren, kommt eine zunehmend wichtige Bedeutung zu [102, 104].

Der Einsatzschwerpunkt dieser Technologie liegt heute innerhalb der Automobilindustrie eindeutig im Karosseriebereich, wobei die Klebtechnik in allen Bereichen zur Lösung unterschiedlichster Aufgaben und Anforderungen beitragen kann:

- Verbinden unterschiedlicher Materialien,
- Schall- und Schwingungsdämpfung,
- Gas- und Flüssigkeitsdichtung,
- Erhöhung der Bauteilsteifigkeit,
- Korrosionsschutz (Spaltkorrosion, Kontaktkorrosion),
- verzugsarmes Fügen durch geringe Temperaturbelastung,
- flächige Krafteinleitung [102, 103].

Aus der Vielzahl möglicher Aufgabenstellungen resultiert eine entsprechende Anzahl zur Verfügung stehender Klebstoffsysteme (Abb. 10.35) [101].

Im Bereich der strukturellen Verklebungen dominieren im Automobil heißhärtende, 1 K-Epoxid-Klebstoffe. Ihr Vorteil liegt im Wesentlichen in den hohen mechanischen Kennwerten und dem gut automatisierbaren Klebeprozess sowie dem gutmütigen Verarbeitungsverhalten.

Stehen dichtende, schall- oder schwingungsdämpfende Maßnahmen im Vordergrund, haben sich vor allem PUR- und PVC-Klebstoffe bewährt.

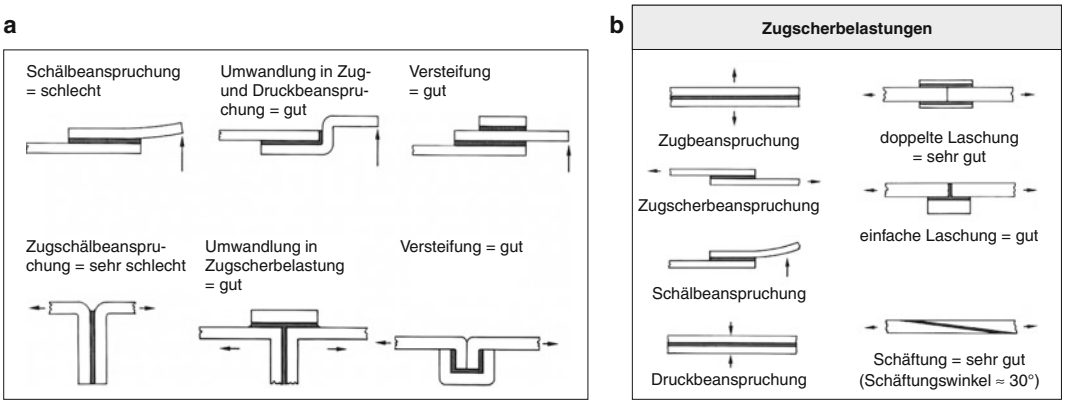



**Abb. 10.36** Konstruktionsbeispiele für Klebeverbindungen

Entscheidende Bedeutung bei allen Klebungen hat die Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner. Bei metallischen Werkstoffen beeinflussen hauptsächlich durch Umformung (Tiefziehöle, etc.) und Transport entstandene Verunreinigungen, aber auch Korrosionsprodukte an der Oberfläche die Fügequalität negativ.

Dagegen spielt bei polymeren Materialien auch die molekulare Struktur und die damit verbundene Polarität der Oberfläche eine entscheidende Rolle. In vielen Fällen ist deshalb vor dem Verkleben eine Reinigung (Entfettung) bzw. im Bereich der Kunststoffe eine Vorbehandlung (Beflammen, Plasmabehandlung) notwendig.

Je nach Anforderung an die Fügestelle können die mechanischen Eigenschaften durch zusätzliche chemische (Haftprimer) oder mechanische Verfahren (Aufrauen, Strahlen) nochmals verbessert werden [105].

Auch durch eine klebstoffgerechte Konstruktion lassen sich geklebte Verbindungen positiv beeinflussen. Am sichersten sind in dieser Hinsicht Scher- und Zugbeanspruchung der Verbindung; am ungünstigsten die Schälbeanspruchung [106]. Einige Konstruktionshinweise zeigt Abb. 10.36a und b.

Da es sich bei allen Klebstoffsystemen um polymere Werkstoffe handelt, müssen, neben den bereits beschriebenen konstruktiven und die Oberfläche betreffenden Einflüssen, auch temperatur- und alterungsbedingte Effekte bei der Auslegung von Klebeverbindungen berücksichtigt werden [106].

Aus diesen Gründen (Krafteinleitung, Temperatur, Alterung) liegt eine Kombination der Klebtechnik mit den bekannten thermischen, aber auch mechanischen Fügeverfahren auf der Hand.

So kann durch Punktschweiß-Kleben die Steifigkeit und die Schwingfestigkeit der Karosserie aufgrund der deutlichen Reduzierung der Mikrobewegungen in den Flanschen bei gleichzeitiger Reduzierung der Zahl der Schweißpunkte deutlich erhöht werden; gleiches gilt für die Kombination von Durchsetzfügen und Kleben [101].

Für eine gleichbleibende und reproduzierbare Verbindungsqualität sind folgende Voraussetzungen notwendig:

- klebegerechte Flanschauslegung und Spaltmaße,
- definierte Klebstoffmenge und Zusammensetzung durch:
  - robotergeführte Auftragssysteme,
  - kontinuierliche Prozessüberwachung (z. B. photographische On-Line-Kontrolle).

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist die Integration der strukturellen Verklebung in bestehende Fertigungslinien bei vielen Automobilherstellern erfolgreich durchgeführt worden (Tab. 10.14). Weitere Entwicklungen zielen in erster Linie auf ein besseres, d. h. praxisgerechtes Verständnis der Alterungsvorgänge und einer weiteren Optimierung der Automatisierung und Prozesskontrolle. In Hinblick auf die Altfahrzeugentsorgung ist weiterhin

**Tabelle 10.14** Exemplarische Klebstoffanwendung in der Serienfertigung von Pkws am Beispiel der AUDI AG [107]

| Einsatzzweck | Materialbasis |
|---|---|
| **Rohbau** | |
| Bördelfalz- und Punktschweißklebstoff | Epoxidharz |
| Bördelfalz- und Punktschweißklebstoff für Aluminium | |
| Strukturklebstoff | |
| Struktur- und Falzverklebung, auswaschbeständig | Kautschuk, Epoxidharz |
| Unterfütterungsklebstoff | Kautschuk, Acrylat, PVC/ Epoxidharz, Polyurethan |
| **Lackiererei** | |
| Feinnahtabdichtung | PVC, Festkörper ca. 97 % |
| Grobnahtabdichtung | PVC, Festkörper ca. 97 % |
| **Montage** | |
| Scheibenklebestoff | Polyurethan (luftfeuchtigkeitshärtend) |
| Glasaktivator* | Silan, Ethanol > 95 % (ca. 1–2 g/Fahrzeug) |
| Glasprimer* | Polyurethan, Acetate und Ketone (ca. 1–2 g/Fahrzeug) |

* Lösemittelhaltige Produkte

das Thema Recycling, d. h. die Trennung von Klebeverbindungen, in die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben mit einzubeziehen (▶ Abschn. 10.2.5).

## 10.2.4 Fortschritte in der Um- und Urformung

### 10.2.4.1 Metalle

#### 10.2.4.1.1 Innenhochdruckumformen

Das Verfahren des Innenhochdruckumformens basiert auf der Aufweitung eines Körpers bis zur Anlage an eine Werkzeuggravur durch die kraftgebundene Wirkung eines flüssigen Mediums unter direktem Kontakt des Mediums mit dem Werkstück. Der kraftgebundenen Wirkung des flüssigen Mediums können andere Kräfte, wie z. B. Axialkräfte und Querkräfte, überlagert werden, die dann eine den Umformprozess unterstützende Funktion haben.

Das Innenhochdruckumformen lässt sich nach der kennzeichnenden Gestaltgebung in vier Verfahrensvarianten unterteilen (Abb. 10.37), die wie folgt beschrieben werden können:

- *Nachprägen*: In der Literatur auch als Kalibrieren bezeichnet. Ein durch Biegen und Andrücken vorgeformtes Werkstück wird durch die alleinige Wirkung des Innendruckes zur Anlage an das Formwerkzeug gebracht.
- *Aufweiten*: Das Material wird in der Wandung abgestreckt und damit die Oberfläche vergrößert.
  Hierbei erfolgt die Umformung allein durch die Wirkung des Flüssigkeitsdruckes. Die mögliche Größe der Ausformung richtet sich nach der Dehnfähigkeit des eingesetzten Werkstoffes in der Umformrichtung.
- *Aufweitstauchen*: Durch axiales Nachschieben wird zusätzlich Werkstoff in die Umformzone eingebracht. Es lassen sich somit geometrisch größere Formelemente gegenüber dem Aufweiten erzielen. Die Lage und die Anzahl dieser Formelemente ist indes begrenzt, da die Axialkräfte den Werkstoff aufgrund der Reibung mit dem Werkzeug nicht über längere Wege, starke Biegungen sowie Querschnittsveränderungen transportieren können.
- *Durchsetzen*: Versetzen der Achse eines Hohlkörpers über eine Teillänge durch ein seitlich dazu wirkendes Werkzeugelement. Durch das zusätzliche Aufbringen einer Querkraft können die Werkstücke in einem Schritt unter Innenhochdruck gebogen und gleichzeitig aufgeweitet werden [108].

Technische Vorteile des Innenhochdruckumformens:

- Bauteile komplexer Geometrien in einem Stück herstellbar,
- Entfall von Verbindungsschweißnähten,
- hohe Form- und Maßgenauigkeit der Bauteile,

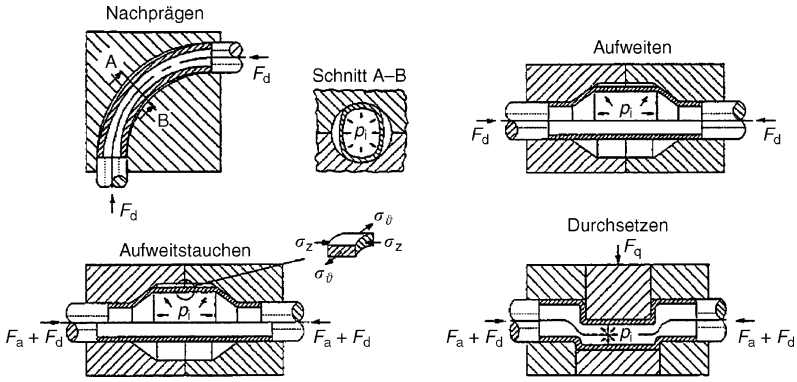



**Abb. 10.37** Prinzipskizzen der Verfahrensvarianten der IHU

- Erhöhung der Bauteilfestigkeit und -steifigkeit durch Kaltverfestigung des Werkstoffes.
- Im gleichen Werkzeug können Rohre mit unterschiedlichen Wanddicken und unterschiedlichen Werkstoffen eingesetzt werden [109].

Technische Nachteile des Innenhochdruckumformens:

- komplizierte, lange Bauteile werden durch Abstreckung geformt, daher nur begrenzte Umfangsunterschiede möglich,
- aufwändige Prototypenwerkzeuge,
- Zykluszeiten relativ langsam,
- komplexe Anlagentechnik.

In der Karosserie steht dabei hauptsächlich die im IHU-Verfahren optimale Bauraumausnutzung, durch den Wegfall von Schweißflanschen und damit eine Gewichtsersparnis bei zugleich hoher Bauteilsteifigkeit, im Vordergrund. Einteilige, durchgängige Längsträger oder Überrollbügel belegen eindrucksvoll die Vorteile dieser Technik. Der Stirnwandquerträger des neuen Porsche Panamera ist erstmalig einteilig mit der Innenhochdruck-Umformung (IHU) in Edelstahl gefertigt und verbindet damit höchste Sicherheitsanforderungen mit hoher Präzision und Wirtschaftlichkeit (Abb. 10.38) [202].

Aber auch im Fahrwerk konnte sich diese Technik in Form einer IHU-umgeformten Hinterachskonstruktion bereits beweisen.



**Abb. 10.38** Stirnwandquerträger im Porsche Panamera

Den klassischen Anwendungsfall im Antrieb stellen Abgaskrümmer in jeglicher Form und Größe dar. Hier war vor allem die komplexe Formteilgestaltung ausschlaggebend für die Auswahl der IHU-Technologie.

#### 10.2.4.1.2 Hydromechanisches Umformen

Im Gegensatz zum herkömmlichen mechanischen Tiefziehen wird beim hydromechanischen Tiefziehen das Werkstück gegen einen Flüssigkeitsdruck in der Ziehkammer geformt. Im Tiefziehteil entsteht hierbei ein dreiachsiger Spannungszustand, der sich günstig auf das Ziehverhalten auswirkt. Im Vergleich zum herkömmlichen Tiefziehen sind Verbesserungen bei Ziehtiefe, Oberflächengüte und geringere Wanddickenreduzierung im kritischen Bereich realisierbar.

Eine Weiterentwicklung des hydromechanischen Umformens ist das Aktive Hydro-Mec-Ver-

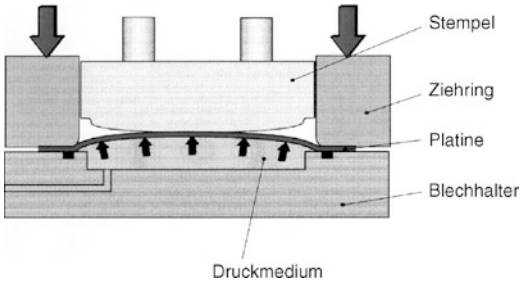



**Abb. 10.39** Hydro-Mec-Verfahrens-Werkzeug geschlossen und Vorreckprozess

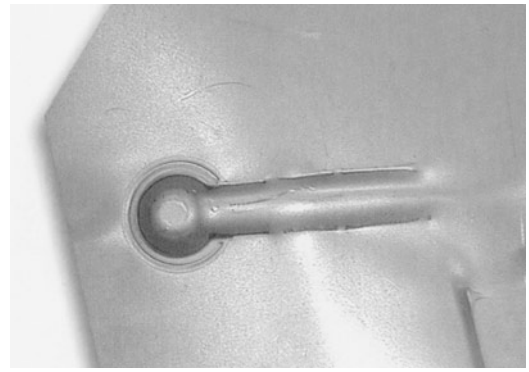


**Abb. 10.40** Platine mit Ausformung durch Dichtstempel

fahren der Firma SMG Engineering. Konventionell hergestellte Motorhauben, Dächer oder Türaußenbleche verfügen bei konv. Umformung je nach Formgebung in der Bauteilmitte nur über eine sehr geringe Beulsteifigkeit. Ursächlich dafür ist der geringe Umformgrad und damit keine ausreichende Materialverfestigung in diesem Bereich [110].

Beim „Aktiven Hydro-Mec"-Verfahren wird die Platine mittels eines gesteuert eingebrachten Druckmediums zunächst vorgereckt, wodurch eine Materialverfestigung stattfindet, dann wird gegen einen einseitigen Formkonturstempel ausgeformt. In Abb. 10.39 ist die Wirkungsweise des Aktiven Hydro-Mec-Verfahrens dargestellt [110].

#### 10.2.4.1.3 Zwei-Platinen-Innenhochdruckumformen

**Verfahrensprinzip** Neben Rohren und Profilen lassen sich auch zwei lose aufeinander liegende oder im Randbereich miteinander verschweißte Blechplatinen durch einen IHU-Prozess umformen. Hierzu werden die Platinen paarweise in das Werkzeug eingelegt. Abhängig von der Bauteilgeometrie gibt es verschiedene Verfahren, über die das flüssige Wirkmedium zwischen die Bleche eingeleitet wird [111]. Als Beispiel ist eine Lanze zu nennen, die zwischen die beiden Bleche reicht. Eine weitere Möglichkeit bietet der halbkugelförmige Dichtstempel, dessen Austrittsöffnung nach dem Schließen des Werkzeugs zwischen den beiden Platinen liegt (Abb. 10.40) [111]. Die untere Platine wird hierzu vorgelocht. Nach dem Schließen des Werkzeugs beginnt unmittelbar mit dem Einbringen des Wirkmediums der Umformvorgang.

Während es bei der IHU-Rohrumformung nötig ist, das Werkstück zu Beginn des Arbeitsgangs zu entlüften, entfällt dieser Schritt bei der Blechumformung, da zwischen den beiden flach aufeinander liegenden Blechen kein Hohlraum vorhanden ist. Die unter Druck zwischen die Bleche zugeführte Flüssigkeit bläst das Werkstück auf. Der Einsatz von Doppelblechen bietet analog zum Tiefziehen die Möglichkeit, speziell zugeschnittene Formplatinen einzusetzen, deren Abmessungen sich über die Länge stark ändern. Das für die Ausformung der Werkzeuggravur erforderliche Material wird also in den jeweiligen Werkstückquerschnitten bereitgehalten.

**Verfahrensvarianten** Bei der Umformung miteinander verschweißter Platinen werden die Flansche von Ober- und Unterteil gleichzeitig in die Formgravur eingezogen. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung von Bauteilen, deren Ober- und Unterschale im Querschnitt in etwa das gleiche Abwicklungsverhältnis aufweisen. Gegenüber dem konventionellen Verfahren, bei dem zwei Halbschalen durch einen Tiefziehprozess hergestellt und anschließend verschweißt werden, bietet das IHU verschweißter Platinen den Vorteil, dass die Bleche im ebenen Zustand und nicht erst nach der Umformung gefügt werden. Bei dieser Verfahrensart werden Bauteile mit dicht geschweißten Flanschen hergestellt, bspw. Kraftstofftanks (Abb. 10.41) [112].

Dabei lässt sich die Prozesskette verkürzen und der Betriebsmittelaufwand reduzieren. Ein weiteres Einsparpotenzial bietet sich im Bereich



**Abb. 10.41** Kraftstofftank aus zwei Aluminiumplatinen



**Abb. 10.42** Kaltfließpressteil aus C45

der Umformwerkzeuge: Während man für das Innenhochdruck-umformen lediglich zwei Werkzeugmatrizen – die obere und die untere Formwerkzeughälfte – benötigt, ist beim Tiefziehen von Bauteilober- und Bauteilunterschale jeweils ein komplettes Ziehwerkzeug bestehend aus Ziehstempel, Blechhalter und Matrize je Werkzeugstufe erforderlich.

Soll mit Hilfe eines IHU-Prozesses ein Bauteil hergestellt werden, dessen Ober- und Unterschale deutlich verschiedene Ziehtiefen aufweisen, so müssen unverschweißte Platinen eingesetzt werden. Die fehlende Schweißnaht erlaubt, dass sich Ober- und Unterteil während der Umformung relativ zueinander bewegen. Dadurch wird die Gefahr der Falten- und Rissbildung weitestgehend eliminiert. Beim Einsatz dieses Verfahrens ist besonders zu beachten, dass die Trennfuge zwischen Ober- und Unterteil ausschließlich durch die Stößelkraft abgedichtet wird. Daher müssen obere und untere Werkzeughälfte sehr sorgfältig durch Touchieren und Feinschleifen aufeinander eingearbeitet werden.

#### 10.2.4.1.4 Kaltfließpressen

Kaltfließpressen ist ein Prozess aus der Reihe der Massivumformverfahren mit einer Umformtemperatur unterhalb der Rekristallisierungstemperatur. Ein Zuschnitt oder Pressrohling wird in einem Gesenk durch einen Stempel, der den notwendigen Druck ausübt, umgeformt. Stempel und Gesenkwände bilden zusammen das Kaliber [113]. Untergliedert wird das Verfahren nach der Richtung des Materialflusses im Werkzeug: a) Rückwärtsfließpressen zur Herstellung von Näpfen, b) Querfließpressen für Fittings und c) Vorwärtsfließpressen zur Querschnittsänderung.

Ursprünglich war das Verfahren nur für die Verarbeitung von Kupfer, Aluminium und kleineren Stahlapplikationen geeignet. Bei der Herstellung von Verbindungselementen aus Stahl, wie bspw. Schrauben und Nieten, wird diese Art der Umformung seit langem erfolgreich praktiziert. Mit fortschreitender Entwicklung der Anlagentechnik erweiterte sich der Werkstoffeinsatz auf Stahlteile mit Stückmassen von bis zu 15 kg (Abb. 10.42) [115].

Dabei ist bei der Werkzeugauslegung darauf zu achten, dass die Flächenpressung ca. 2500 MPa nicht überschreitet.

Kaltfließpressen bietet gegenüber anderen Umformtechniken eine Anzahl von Vorteilen, wie Werkstoffeinsatz, hohe Ausbringung, hohe Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit und optimierte Nutzung der Werkstoffeigenschaften durch den günstigen Faserverlauf bei sehr guter Oberflächenqualität [114].

Der Trend der Kaltumformung geht zu weitestgehend endkonturnah geformten Teilen, die keiner (Net shape) oder die nur noch einer geringen Bearbeitung (Nearnet shape) bedürfen. Die Entwicklung wird durch neue Werkzeugbauwerkstoffe, hochverschleißfeste Beschichtungen und rechnergestützte Prozess- und Werkzeugauslegung unterstützt. Ak-

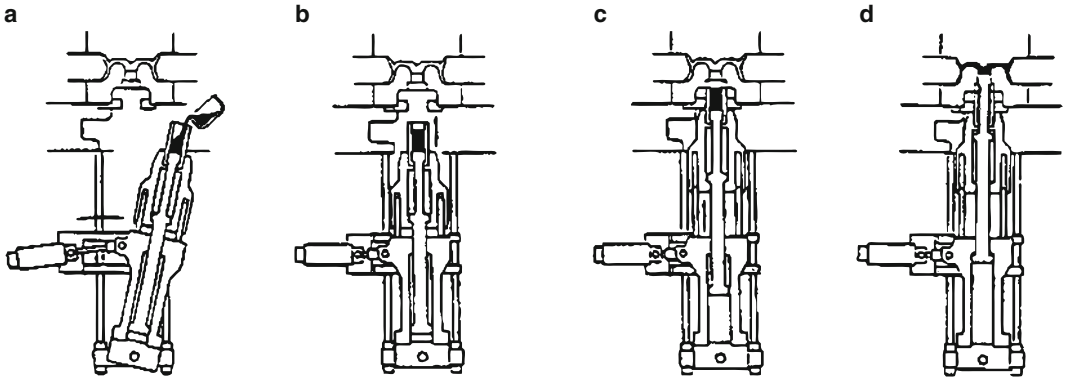



**Abb. 10.43** Gießzyklus beim Indirect-Squeeze-Casting: **a** Dosieren, **b** Schwenken in die Vertikale, **c** Andocken an die Form, **d** Formfüllen und Erstarren

tuelle Anwendungen für das Verfahren sind u. a. Achszapfen, Tripoden und Karosseriebefestigungen, wie Achs- und Stoßfängeraufnahmen.

10

#### 10.2.4.1.5 Gießtechnik

In der Gießtechnik konzentrierten sich die Anstrengungen hauptsächlich auf die Entwicklung neuer und die Optimierung bestehender Verfahren, mit dem vorrangigen Ziel, wärmebehandelbare und schweißbare Bauteile aus Al-Druckguss herstellen zu können. Das entscheidende Merkmal solcher Bauteile besteht in einer möglichst geringen Gasporosität. Als Ergebnis dieser Entwicklungen konnten sich die Verfahren, „Squeeze Casting", „Thixo Casting" und Vakuumdruckguss am Markt etablieren.

***Squeeze Casting*** Squeeze Casting verbindet die wirtschaftlichen Vorteile des Druckgießens mit den besonderen Anforderungen an wärmebehandelbare und schweißbare Gussteile. Der Squeeze Casting Prozess zeichnet sich dabei durch ein abgestimmtes Geschwindigkeitsprofil des Gießkolbens aus, der die Luft aus der Gießkammer und dem Angusskanal verdrängt. Die kontrollierte und geregelte Gießkolbengeschwindigkeit führt, zusammen mit einer optimierten Geometrie von Gießkammer und Angusskanal, zu einer laminaren und damit gasarmen Formfüllung (0,5 ÷ 2,0 m/s Anschnittgeschwindigkeit).

Eine exemplarische Darstellung des Verfahrens zeigt Abb. 10.43 [116].

***Thixo Casting*** Vor dem eigentlichen Thixo Casting, auch unter „Semi-Solid Metal" (SSM)-Guss bekannt, wird zuerst spezielles Stangenmaterial hergestellt und anschließend zu Bolzen geschnitten [117].

Die Herstellung des Stangenmaterials aus der SSM- Legierung erfolgt im Strangguss-Verfahren, kombiniert mit elektromagnetischem Rühren. Der dabei entstehende Gefügezustand (Dendritenbildung) verleiht den Legierungen das thixotrope Verhalten im halbflüssigen Zustand [118].

Die Bolzen werden danach z. B. durch Induktionsspulen auf eine bestimmte Temperatur erhitzt, bei welcher sowohl feste als auch flüssige Aluminiumteile vorhanden sind. Die erweichten Bolzen werden anschließend in die Gießkammer der Druckgussmaschine eingelegt und in die Druckgussform gepresst (Abb. 10.44).

Die aufgeheizten Bolzen behalten ohne äußere Krafteinwirkung die äußere Form und fließen erst unter Druck wie eine Flüssigkeit.

Zurzeit steht nur die Legierung AlSi7Mg zur Verfügung. Weitere Aluminiumlegierungen und Magnesiumlegierungen sind in Entwicklung.

Die von Gasporosität und Schwindungslunkern freien Gussteile sind wärmebehandelbar und schweißbar. An wärmeausgelagerten Bauteilen aus AlSi7Mg werden folgende mechanische Kennwerte erreicht:

Streckgrenze $R_{p0.2}$: $\geq$ 230 MPa
Zugfestigkeit $R_m$: $\geq$ 290 MPa
Dehnung $A_5$: $\geq$ 11 %.

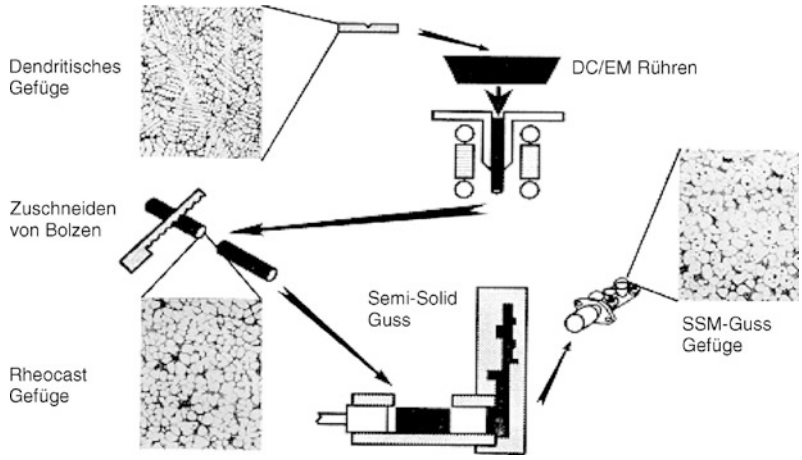



**Abb. 10.44** Verfahrensablauf beim Thixo Casting

***Thixomolding*** Auch bei dem so genannten Thixomolding macht man sich den teilerstarrten und thixotropen Zustand zunutze. Im Gegensatz zum Thixocasting wird bei diesem Verfahren Magnesiumgranulat als Ausgangsmaterial eingesetzt.

Das Thixomolding gleicht in seinem Verfahrensablauf dem Thermoplast-Kunststoffspritzguss (siehe Abb. 10.45) und wurde auf deren Basis Mitte der 70er Jahre am MIT in den USA entwickelt. Das Magnesium-Granulat wird ebenfalls einer Förderschnecke zugeführt und kontinuierlich erwärmt, bis es in den halbfesten/halbflüssigen Zustand übergeht. Die Erwärmung erfolgt dabei hauptsächlich durch Wärmeleitung von Widerstandsbändern oder anderen Heizelementen. Um die teilaufgeschmolzene Masse in der Maschine vor der unkontrollierten Reaktion mit dem Luftsauerstoff zu schützen, wird der Extruder mit Argongas geflutet. Diese Schutzgasatmosphäre muss dabei während der Prozessphasen aufrecht erhalten werden.

Die kontinuierliche Rotationsbewegung der Extruderschnecke schert und homogenisiert die Mas-

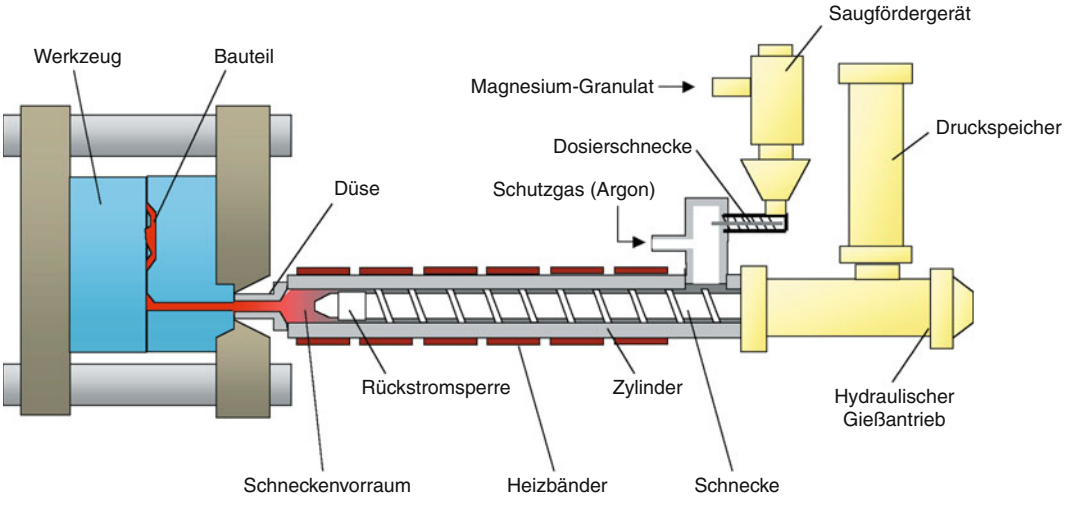



**Abb. 10.45** Schematischer Aufbau einer Thixomolding-Maschine [116]

se, so dass aus dem zu Beginn dendritischen Gefüge der Granulatpartikel eine Schmelze mit gleichmäßig verteilten globularen Partikeln entsteht. Die Größe und Verteilung dieser Partikel wird durch die Schneckenbewegung und die Temperaturführung kontrolliert und bestimmt später die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. In der letzten Phase des Prozesses wird die thixotrope Masse über eine Rückstoßsperre in den Schneckenvorraum transportiert. Durch eine schnelle Vorschubbewegung der Schnecke wird dann die Masse über ein Angusssystem in die Form gepresst. Um das Zurückfließen zu verhindern, ist die Rückstromsperre dabei geschlossen. Nach dem Füllen der Form fährt die Schnecke zurück, die Rückstromsperre öffnet und das Bauteil kann entnommen werden. Am Ende der Maschinendüse bildet sich durch Erstarren der thixotropen Masse ein Pfropfen. Dieser verhindert, dass Material vor dem nächsten Schuss aus der Maschine austritt. Der Pfropfen wird bei jedem Schuss in einen eigens dafür vorgesehenen Pfropfenfänger in die Kavität gespritzt.

Im Gegensatz zum Thixocasting bietet das Thixomolding die Möglichkeit einer kontinuierlichen Prozessführung. Die verwendeten Materialien sind gut handhabbar und benötigen deutlich weniger Sicherungsmechanismen als Beispielsweise das Druckgießen. Darüber ermöglicht das Verfahren durch die niedrigeren Temperaturen und den geringeren Schwund die Fertigung sehr komplexer und genauer Bauteile, die nicht mechanisch nachbearbeitet werden müssen. Verschiedene Quellen berichten außerdem von verbesserten mechanischen Kennwerten in Bauteilen und eine reduzierte Porosität, die, wie auch beim Druckguss, eine gezielte Formauslegung und Prozessführung voraussetzt [118].

Das Thixomolding wird bereits erfolgreich in der Produktion von elektronischen Komponenten, Laptops und Kameragehäusen vor allem im asiatischen Raum genutzt. In Kraftfahrzeugen kommt das Verfahren für Bauteile im Verdeckbereich (GM Corvette C6, Porsche 911 Cabrio Typ 997) zum Einsatz. Prinzipiell eignen sich alle Teile, die auch in Magnesiumdruckguss gefertigt werden. Allerdings limitiert die geringe Anzahl von kommerziellen Anbietern und die von den Maschinenherstellern zur Verfügung gestellte geringe Maschinenschließkraft derzeit die größere Verbreitung des Thixomoldings. Neueste Entwicklungen lassen hier aber eine Verbesserung in den nächsten Jahren erwarten.

***Vakuumdruckguss*** Auch im Vakuumdruckguss können druckdichte, warmaushärtbare und schweißbare Druckgussteile mit hohen Festigkeits- und Dehnungswerten hergestellt werden.

Das entscheidende Verfahrensmerkmal ist die Evakuierung von Druckgussform, Anschnitt und Füllkammer, wobei Werte deutlich unter 100 mbar erreicht werden. Die Zykluszeit verlängert sich nur unwesentlich, so dass die Wirtschaftlichkeit des Druckgießens erhalten bleibt.

Durch die Evakuierung wird die Gasporosität im Bauteil auf ein Maß reduziert, das es ermöglicht, an den Gussteilen eine Wärmebehandlung durchzuführen. An warmausgelagerten Bauteilen aus der Legierung AlSi10Mg werden in Abhängigkeit von Wärmebehandlungsparametern, Bauteilgeometrie und Abkühlbedingungen in der Gießform folgende mechanische Kennwerte erreicht:

Streckgrenze $R_{P0,2}$: $\geq$ 180–260 MPa
Zugfestigkeit $R_m$: $\geq$ 230–320 MPa
Dehnung $A_5$: $\geq$ 6–14 %.

Aus Materialsicht unterliegt dieses Verfahren keinerlei Beschränkungen, so dass sowohl die heute üblichen Aluminium- als auch Magnesiumlegierungen zur Anwendung kommen.

#### 10.2.4.1.6 Schmieden

Unter Schmieden versteht man eine Gruppe von Fertigungsverfahren, die nach DIN 8583-1 überwiegend den Verfahren der Umformtechnik in der Gruppe Druckumformen zuzuordnen sind. Dazu zählen das Freiformen, Gesenkformen, Eindrücken und Durchdrücken. Nach dem Unterscheidungsmerkmal Freiformen und Gesenkformen unterteilt sich das Schmieden in Freiformschmieden und Gesenkschmieden.

Das Freiformschmieden erfordert einfache, im Allg. nicht an die Form des Werkstückes gebundene Werkzeuge. Das Gesenkschmieden erfolgt mit an die Werkstückform gebundenen Werkzeugen.

Das Schmieden wird üblicherweise in einem Temperaturbereich durchgeführt, bei dem im

Werkstoff Erholungs- und Rekristallisationvorgänge ablaufen. Dies dient dazu, das Umformvermögen des Werkstoffes zu erhöhen und Spannungen im Werkstoff abzubauen. Bei einigen Legierungen liegt die Schmiedetemperatur in einem eng begrenzten Temperaturbereich, um unerwünschte Phasenumwandlungen zu vermeiden [122].

#### 10.2.4.1.7 Schmiedestahl

Zum Schmieden werden unlegierte und legierte Stähle, vor allem Einsatz- und Vergütungsstähle verwendet. Das Formänderungsvermögen und damit die Schmiedbarkeit nehmen mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab.

Zum Schmieden wird das Halbzeug abgeschert, auf Schmiedetemperatur erwärmt, plastisch umgeformt und anschließend wärmebehandelt. Die Wärmebehandlung kann aus der Schmiedehitze (energiesparend) oder als weitere Behandlung durchgeführt werden.

Eine Reinigung der Schmiedeoberflächen erfolgt durch Strahlen. Meist werden gesenkgeschmiedete Bauteile anschließend noch an den Funktionsflächen spanend bearbeitet.

Die Vorteile von Schmiedebauteilen gegenüber Gussbauteilen sind z. B. gute mechanische Eigenschaften aufgrund des eingestellten Gefüges und geringere Streuungen in der Produktion infolge einer geringen Häufigkeit innerer Werkstofffehler.

Ein wesentlicher Einsatzbereich von Schmiedeteilen sind hochbeanspruchte und sicherheitsrelevante Bauteile, wie z. B. Pleuel, Kurbelwellen, Schwenklager, Achsschenkel, Getriebegangräder etc.

Trotz allem ist der Anteil von Schmiedestahl rückläufig. Durch Weiterentwicklung der Schmiedeverfahren versucht man, diesen Trend aufzuhalten. Dazu gehören z. B. das Präzisionsschmieden, Halbwarmschmieden, gratlos Schmieden oder das Schmieden unter Schutzgas, um eine Zunderbildung und eine Entkohlung zu vermeiden.

Als weiteres werden die Wärmebehandlungsverfahren unter Ausnutzung der Restwärme weiterentwickelt. Eine Wärmebehandlung direkt aus der Schmiedehitze erfordert auch eine geeignete Anpassung der Legierungszusammensetzung an die Abkühlbedingungen.

### 10.2.4.2 Polymere

Neben der Einführung immer ausgereifterer Maschinentechnik zur Kosteneinsparung wurden auch gesamte Fertigungssysteme betrachtet und so durch Weiterentwicklung bekannter Standardtechnologien, wie z. B. dem Spritzgießen, neue Verarbeitungsverfahren entwickelt.

Zweifarbige Heckleuchten durch Mehrkomponententechnik oder hart-weich-Verbindungen sind nur zwei Beispiele von innovativen Fertigungstechnologien, die in der Automobilindustrie inzwischen Stand der Technik sind.

Kombiniert man unterschiedliche Materialien durch eine geschickte Fertigungstechnik, wie in den folgenden drei Fertigungsverfahren beschrieben, lässt sich das Anwendungsspektrum nochmals deutlich erweitern.

**One-Shot-Technik** Unter der „One-Shot-Technik" versteht man das Verbinden jeglicher Art von Dekormaterial (Stoffe, Leder, Schaumfolien, Lackfolien, etc.) und das gleichzeitige Herstellen des Trägerteils in einem Arbeitsschritt (◘ Abb. 10.46a und b) [123].

Anwendung findet dieses Verfahren z. Zt. größtenteils im Interieurbereich zur Herstellung von Innenverkleidungsteilen (A-/B-/C-Säulen, Instrumententafel, etc.) mit optisch und haptisch anspruchsvollen Oberflächen. Im Exterieurbereich stellt diese Technik noch die Ausnahme dar.

Abhängig von Dekormaterial und Bauteilgröße kommt das Hinterspritzen, das Hinterpressen/-prägen, das Hinterschäumen oder das Hinterblasen zum Einsatz. Das Dekormaterial kann dabei nicht in beliebiger Form vorliegen, sondern muss in Aufbau und Eigenschaften auf den jeweiligen Fertigungsprozess abgestimmt werden [125].

Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind:

- reduzierte Produktionskosten (bis zu 60 %) [124],
- verbesserte Umweltverträglichkeit durch Klebstoffvermeidung, und gleichzeitig
- Reduzierung von Fogging und Fahrgastinnenraumemissionen.

Nachteilig sind die bis zu 30 % höheren Werkzeugkosten, denen jedoch der Wegfall der Kaschier-

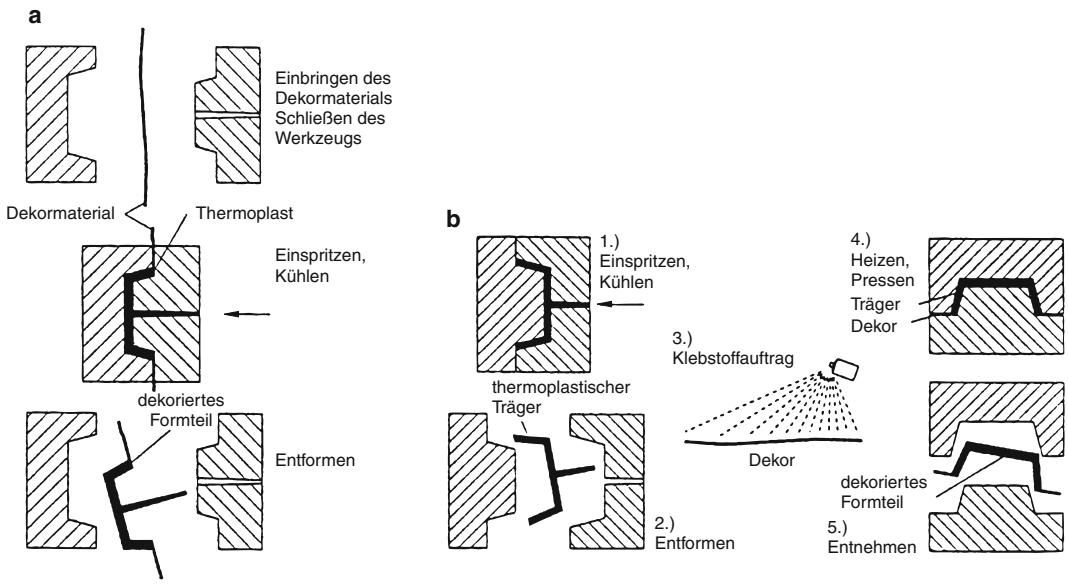



**Abb. 10.46** Verfahrensablauf der „One-Shot-Technik" am Beispiel der Hinterspritztechnik (HST) im Vergleich zur herkömmlichen Kaschiertechnik **a** Hinterspritztechnik, **b** Kaschiertechnik

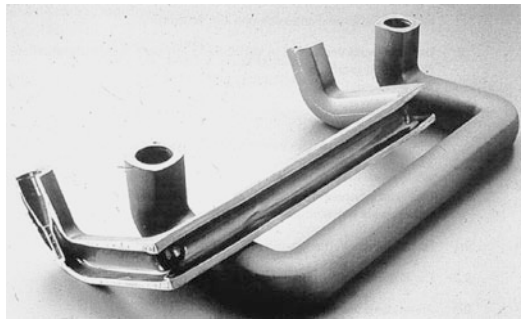


**Abb. 10.47** Dickwandiges Formteil aus Polyamid

werkzeuge gegenübersteht. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die „One-Shot-Technik" in der Automobilindustrie fest etablieren konnte und überall dort zum Einsatz kommt, wo Wert auf eine umweltfreundliche Produktion und emmisionsoptimierte Bauteile gelegt wird, und eine ausreichend hohe Stückzahl das etwas komplexere Fertigungsverfahren und die höheren Werkzeugkosten rechtfertigt.

**Gasinnendrucktechnik (GIT)** Die Gasinnendrucktechnik wird zur gezielten und definierten Erzeugung von Hohlräumen in Spritzgussteilen eingesetzt (Abb. 10.47) [128]. Es handelt sich um eine Art 2-Komponentenspritzguss, wobei es sich bei der zweiten Komponente nicht um ein Polymer, sondern um ein Gas (in der Regel Stickstoff) handelt.

Die Hohlraumausbildung erfolgt mit Hilfe eines unter Druck stehenden (bis max. 300 bar) inerten Gases.

Zu Beginn wird das Formteil geometrie- und verfahrensabhängig zu 50–100 % mit Schmelze gefüllt (Abb. 10.48a und b) [127].

In einem zweiten Verfahrensschritt folgt die Gasinjektion. Durch den Gasdruck wird die Schmelzefront weiter nach vorne getrieben und die Kavität komplett gefüllt, bzw. das überschüssige Material in eine Nebenkavität (Überlauf) oder den Schneckenvorraum zurückgedrückt [127].

Die Gaseinleitung kann sowohl direkt ins Formteil, in den Angusskanal oder über die Maschinendüse erfolgen.

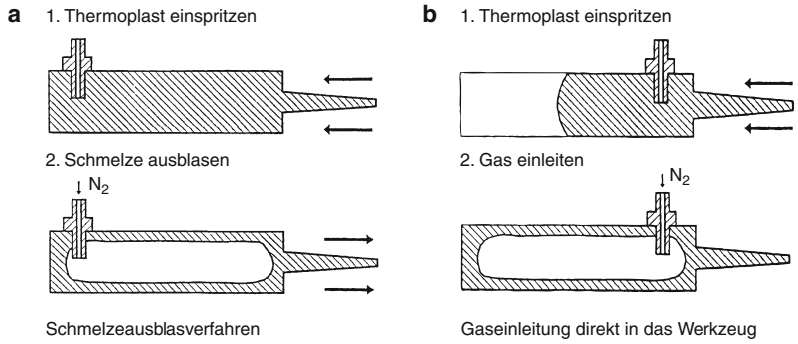



**Abb. 10.48** Prinzipielle Darstellung der Verfahrensschritte der Gasinnendrucktechnik

Betrachtet man die realisierten Bauteile, können drei typische Anwendungsgruppen genannt werden:

a) rohrförmige Bauteile
   Beispiele: Außenzierleisten, Dachhaltegriffe, Kühlwasserverteilerstücke,
b) flächige Teile mit Versteifungsrippen
   Beispiel: Gehäuseabdeckungen,
c) schalenartige, dünnwandige Formteile mit dickwandigen Bereichen
   Beispiel: Außenspiegelgehäuse, Mittelkonsolen, Türtaschen.

Für alle drei Gruppen gelten GIT-spezifische Gestaltungsregeln, die zur Erzielung optimaler Bauteilqualitäten unbedingt einzuhalten sind. Abschließend muss auf die vielen Verfahrensvarianten und -patente hingewiesen werden.

Vor einer Entscheidung für die Gasinnendrucktechnik ist deshalb eine Abklärung evtl. anfallender Lizenzgebühren unerlässlich.

Vor- und Nachteile der GIT können wie folgt zusammengefasst werden:

+ größere Gestaltungsfreiheit bei der Formteilauslegung,
+ kürzere Zykluszeiten bei dickwandigen Formteilen,
+ Steifigkeitserhöhung bei gleichem Gewicht,
+ weniger Verzug, geringere Eigenspannungen,
+ Reduzierung von Einfallstellen,
+ Verringerung der Schließkraft,
− höhere Anlagenkosten,
− anspruchsvollere Prozessführung,
− höherer Aufwand für Qualitätssicherung,
− Mehrfachkavitäten realisierbar, aber aufwendig und empfindlich.

**Hybridtechnik** Eine interessante Technik innerhalb der Kunststoffverarbeitung stellt die Hybridtechnik dar. Die bisher in vielen Anwendungen eingesetzten Stahlbleche versprechen zwar Stabilität, sind aber relativ schwer. Kunststoffe zeichnen sich durch Leichtigkeit aus, besitzen aber oft zu geringe Festigkeits- und Steifigkeitswerte [130]. Die Hybridtechnik dagegen nutzt gezielt die Vorteile der unterschiedlichen, im Wettbewerb stehenden Werkstoffe, um sie in einem Formteil miteinander zu kombinieren [129]. Der Durchbruch dieser Technologie gelang mit der serienmäßigen Einführung des Frontend-Trägermoduls im Audi A6 [131]. Türträgermodule zur Aufnahme von Fensterheber, Lautsprecher und der Scheibenführung sind darüber hinaus ebenso denkbar wie Tragstrukturen von Heckklappen oder Instrumententafelträger.

Um ein Hybridbauteil anzufertigen, wird ein tiefgezogenes und gelochtes Stahlblechteil in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt und mit einem geeigneten Kunststoff umspritzt. Dabei dringt die Kunststoffschmelze durch die eingestanzten Öffnungen des Bleches und bildet so beim Erstarren eine hochbelastbare kraft- und formschlüssige Verbindung. Das Blech benötigt weder einen Haftvermittler noch anderweitige zusätzliche Behandlungen [132].

Mit dieser Technik lassen sich tragende Metallteile sehr dünnwandig auslegen. Hierdurch lassen




**Abb. 10.49** Hybrid-Frontend, Porsche Cayenne (2010)

sich mit der Hybridtechnik Gewichtseinsparungen von bis zu 40 % im Vergleich zu einer ebenso belastbaren reinen Metallkonstruktion erzielen [132]. Kosteneinsparungen können durch Modulbauweise realisiert werden, indem Befestigungselemente, Lagerstellen für Frontklappen und Scheinwerfern, Kabelhalterungen oder Frontverkleidungen in die Bauteile bereits bei der Fertigung integriert werden (Abb. 10.49) [134].

Ein weiterer Vorteil: Der Kunststoff bringt zugleich Farbe in die Hybridbauteile, denn die eingesetzten Thermoplaste sind in einer Fülle von Farbtönen verfügbar. Darüber hinaus wird angestrebt, dass sich die Kunststoffoberflächen mit Textilien bzw. Folien dekorieren lassen, und das in einem Arbeitsgang beim Spritzgießen. Dieses Verfahren wird IMD (In-Mould-Decoration, Patent Bayer AG) genannt [134].

Der typische Nachteil von Verbundbauteilen in Bezug auf die Recyclingfreundlichkeit ist bei Hybridbauteilen nicht zu erwarten. Ausgediente Hybridbauteile lassen sich sehr schnell mittels einer Hammermühle zerkleinern und mit Hilfe von Sieben und Magneten voneinander trennen und danach problemlos wieder verwerten.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Metall/Kunststoff Verbundteile stellen überall dort eine optimale Lösung dar, wo Stabilität, Festigkeit und Funktionssicherheit gefordert sind und/oder ein niedriges Gewicht der Baugruppe Vorteile bringt. Hybridbauteile bieten gegenüber gleichstarken Metallkonstruktionen deutliche Kosten- und Gewichtsvorteile. Diese Vorteile fallen umso größer aus, je höher der Grad der Integration von Zusatzfunktionen in das Bauteil ist.

### 10.2.5 Fortschritte in der Umweltverträglichkeit

In den letzten 30 Jahren ist das Umweltbewusstsein von Gesellschaft und Verbrauchern stark gestiegen. Außerdem wurden die gesetzlichen Regelungen zu verschiedenen Umweltaspekten in vielen Ländern zunehmend ausgeweitet und verschärft. Eine Vorreiterrolle haben dabei oft die EU und einzelne Staaten in den USA gespielt. Dies hat dazu geführt, dass in der Fahrzeugentwicklung die Umweltverträglichkeit eine feste Zielgröße geworden ist. Ein niedriger Kraftstoffverbrauch, Schadstofffreiheit von Werkstoffen, Recyclingfreundlichkeit und der Einsatz von energie- und emissionsoptimierten Fertigungsverfahren sind nicht nur per Gesetz festgelegte Vorgaben, sondern mittlerweile auch ein Wettbewerbsfaktor.

**Einsatz umweltverträglicher Werkstoffe** Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Werk- und Inhaltsstoffen sind die Herstellung der Stoffe, die Fertigung der Bauteile und Fahrzeuge, der Betrieb der Fahrzeuge und die spätere Verwertung und Entsorgung der Altfahrzeuge zu betrachten. Die Verwendung von schädlichen Werk- oder Inhaltsstoffen wird daher auch mit unterschiedlichen gesetzlichen Ansätzen geregelt. Dazu gehören beispielsweise das Gefahrstoffrecht, Gesetze zum Arbeits- und Gesundheitsschutz und Vorgaben zur Verwertung und Entsorgung von Altfahrzeugen.

Grundsätzlich ist die Verwendung von schädlichen Stoffen zu vermeiden oder auf ein Minimum zu reduzieren. Um dies in der Fahrzeugentwicklung ausreichend zu berücksichtigen, wird in der Automobilindustrie seit einigen Jahren eine Negativliste, die sogenannte GADSL (**G**lobal **A**utomotive **D**eclarable **S**ubstance **L**ist)-Liste verwendet [135]. In ihr ist aufgeführt, ob ein Stoff oder eine Verbindung verboten oder zumindestens deklarationspflichtig sind, d. h. sein Einsatz vom Zulieferer dem Fahrzeughersteller mitzuteilen ist. Bei Neuentwicklungen ist durch die Verwendung dieser Liste der Einsatz von schädlichen Stoffen im Rahmen der re-

gulären Entwicklungsaktivitäten vermeidbar. Etwas anders ist dies, wenn sich in der laufenden Produktion die Notwendigkeit ergibt, Werkstoffe auf umweltverträglichere Alternativstoffe umzustellen. In der EU-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG, die im Jahr 2000 in Kraft trat, wurde z. B. die Verwendung von Blei, Quecksilber, Kadmium und sechswertigem Chrom in Neufahrzeugen und Ersatzteilen ab dem 01.07.2003 nur noch mit erheblichen Einschränkungen zugelassen. Sechswertiges Chrom Cr(VI) war in zahlreichen Oberflächen zum Korrosionsschutz enthalten und ist seit dem 01.07.2007 in Neufahrzeugen komplett verboten. Die Umstellung auf Cr(VI)-freie Oberflächen ist der Automobilindustrie auch in der laufenden Produktion gelungen, war aber mit einem erheblichem Entwicklungs- und Erprobungsaufwand und hohen Investitionen verbunden.

Weiter zurückliegende Beispiele aus der Vergangenheit für den Ersatz von schädlichen Stoffen sind die Verwendung von asbestfreien Dichtungen, Brems- und Kupplungsbelägen, FCKW-freien Kältemitteln in Klimaanlagen, kadmiumfreien Kunststoffstabilisatoren und umweltfreundlichen Wasserlacken zur Grundierung der Karosserie.

Meistens sind solche Fortschritte für den Fahrzeugkunden nicht wahrnehmbar. In manchen Fällen profitiert er aber sehr direkt von Verbesserungen. Dies ist bei der Luftgüte im Fahrzeuginnenraum der Fall. Für die Emissionen von Werkstoffen sind im Fahrzeuginnenraum Grenzwerte zu beachten. Um die Innenraumemissionen zu reduzieren, werden z. B. mittlerweile TPO-Schaumfolien als Cockpitkaschierung sowie geruchs- und emissionsoptimierte Polymere verwendet.

Ermittelt werden die Emissionen durch unterschiedliche Messverfahren. Zum einen wird der VOC-Wert (**V**olatile **O**rganic **C**omponents) nach VDA 278 gemessen. Hierbei wird die Konzentration von leicht flüchtigen, gasförmigen Kohlenwasserstoffen untersucht. Zum anderen wird der Fog-Wert gemäß VDA 278 ermittelt. Dieser sagt aus, wie hoch der Anteil schwer flüchtiger Kohlenwasserstoffe im Fahrzeuginneren ist. Desweiteren wird die Formaldehyd-Flaschenmethode nach VDA 275 angewendet. Alle Messverfahren setzen voraus, dass die Prüfungen innerhalb von zwei Tagen durchgeführt werden, da die Emissionen stark von der Lagerdauer der Bauteile beeinflusst werden. Neben den oben aufgeführten, sensorischen Messungen ist der subjektive Eindruck der Nase nicht zu unterschätzen. Experten auf diesem Gebiet ermitteln, wie ein neues Auto riechen muss, damit das Fahrzeug dem Qualitätsanspruch des Kunden auch auf diesem Sektor gerecht wird [136].

**Einsatz nachwachsender Rohstoffe** Zusätzlich zu den bisher in der Automobilindustrie bekannten Werkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe, z. B. HM-PP (Holzmehl gefülltes Polypropylen) oder Holzfaserformstoffe HFFS (Holzfaser mit Bindersystemen auf duroplastischer Basis), werden seit geraumer Zeit vermehrt Werkstoffe aus Naturfasern mit verschiedenen Matrices verwendet.

Primär werden Nawaro (**Na**ch**wa**chsende **Ro**hstoffe) als Bestandteil von Trägerteilen in Fahrzeuginnenräumen, Trägern für Kofferraumauskleidungen oder geschlossenen Laderäumen bei Nutzfahrzeugen eingesetzt.

Neben den bekannten Anwendungen im Fahrzeuginnenraum werden verstärkt auch Teile im Exterieurbereich auf Basis nachwachsender Werkstoffe untersucht. Die Faseraufbereitung erfolgt mit herkömmlichen oder leicht modifizierten Maschinen aus dem Bereich der Textiltechnik [137]. Bei Werkstoffsystemen auf thermoplastischer Basis werden heute zu einem großen Teil Hybridvliese verwendet, die sich aus einer Mischung von Naturfaser und Polypropylenfaser (Mischungsverhältnis 30 %/70 % bis 50 %/50 %) zusammensetzen. Zum Ausgleich von größeren Qualitätsschwankungen bei Naturfasern werden häufig Mischungen verschiedener Fasern hergestellt. Mit einer Mischung können außerdem speziell gewünschte mechanische Eigenschaften gezielt hergestellt werden [138], (◘ Abb. 10.50).

Werden Duroplaste als Matrix-Werkstoff verwendet, kommen neben den seit langem bekannten Polyester- und Epoxid-Harz-Systemen seit kurzer Zeit auch Polyurethan-Systeme zum Einsatz. Auf der Faserseite wird heute primär die Gruppe der Bastfasern Flachs, Sisal und Kenaf eingesetzt. Aus der Gruppe der Hartfasern wird primär Sisal verwendet [139].

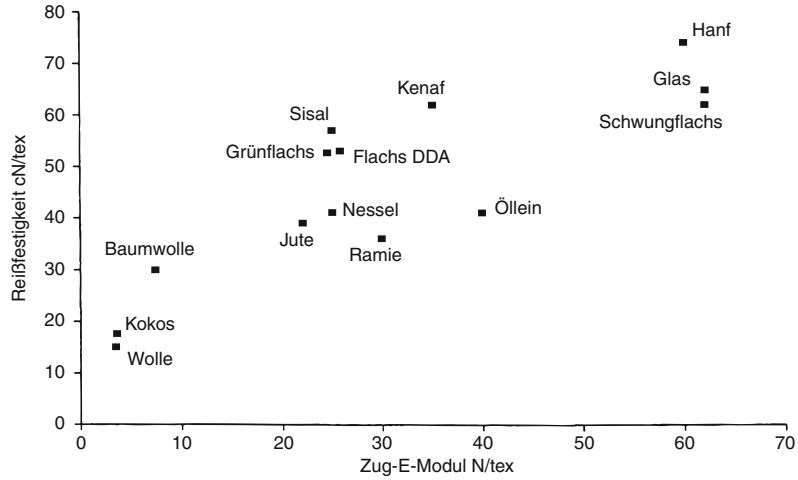



**Abb. 10.50** Vergleich der mechanischen Eigenschaften verschiedener Fasern (Quelle: FH Reutlingen, Institut für angewandte Forschung)

10

Je nach Bauteilgeometrie und verwendetem Werkstoffsystem kommen die bekannten Verarbeitungsverfahren wie das Fließpress- und das Umformverfahren zur Anwendung. Das Spritzgießverfahren mit naturfaserverstärkten Werkstoffen findet derzeit noch keine Anwendung in größeren Serien, ist aber in Erprobung. Ein Problem hierbei ist die wesentlich höhere Belastung bei der Verarbeitung, was zu einer Vorschädigung der Faser führen kann [140].

Ein neueres Verfahren, das bereits für Serienanwendungen eingesetzt wird, ist das Polyurethan-Sprühverfahren. Hierbei werden Naturfasermatten beidseitig mit einem hochreaktiven Polyurethan mittels Roboter besprüht und anschließend sofort in einem Presswerkzeug unter Druck und Temperatur ausgehärtet [141, 142].

Die Vor- und Nachteile der Naturfasern können wie folgt zusammengefasst werden:

+ niedrigere Dichte im Vergleich zu Glasfasern,
+ gute akustische Eigenschaften,
+ gutmütiges Bruchverhalten,
+ $CO_2$-neutrale Verbrennung,
− Wasseraufnahme (bis ca. 15 %),
− Geruchsverhalten,
− Inhaltsstoffe (Fungizide, Pestizide),
− Qualitätsschwankungen.

Ungeachtet dieser Nachteile stellen Naturfasern eine sinnvolle Ergänzung im Materialspektrum dar und konnten bereits in vielen Automobilanwendungen traditionelle Werkstoffe verdrängen.

**Verbesserung der Recyclingquoten** Die Altfahrzeugverwertung und -entsorgung ist ganz wesentlich durch die EU-Altfahrzeugrichtlinie geprägt. Die Situation bei Altfahrzeugen stellte sich zum Zeitpunkt ihres Inkrafttretens im Jahr 2000 wie folgt dar: Etwa ca. 75-Gew.% von Altfahrzeugen (Baujahr 1987 und älter) wurden rezykliert. Im Wesentlichen handelte es sich dabei um alle metallischen Werkstoffe, d. h. Eisen- und NE-Metalle, die im Schredder zerkleinert, sortiert und anschließend einem werkstofflichen Recycling (Stahlwerk, Umschmelzhütte) zugeführt wurden. Die restlichen 25-Gew. %, die sogenannte „Shredderleichtfraktion“ (SLF), landete dagegen auf der Deponie. Sie setzt sich zu ca. 1/3 aus Kunststoffen, aber auch aus Glas, Elastomeren, Holz und Schmutz zusammen.

In der Europäischen Gemeinschaft fielen jährlich zwischen 8 und 9 Millionen Tonnen Abfälle aus Altfahrzeugen an. Das Ziel war daher, Abfälle soweit wie möglich zu vermeiden, Abfälle wiederzuverwenden bzw. nicht wiederverwendbare Teile zu verwerten.

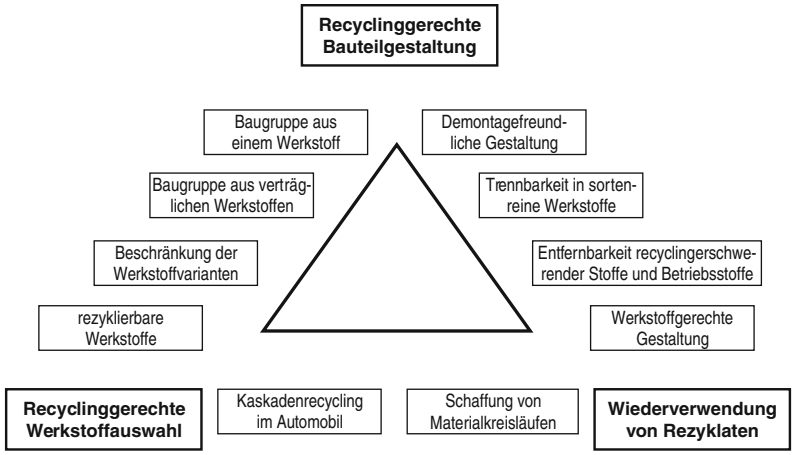



**Abb. 10.51** Recyclingdreieck

Das Europäische Parlament hat aus diesem Grund in der Altfahrzeugrichtlinie die Hersteller dazu verpflichtet, bis spätestens 01.01.2006 eine Wiederverwendung und Verwertung bei allen Altfahrzeugen von mindestens 85 % des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts zu erreichen. Bis spätestens 1. Januar 2015 müssen die Wiederverwendung und Verwertung bei allen Altfahrzeugen auf mindestens 95 % des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts pro Jahr erhöht worden sein.

Die Lösung dieser Anforderungen liegt in der Annäherung an möglichst geschlossene Materialkreisläufe, so wie es sie grundsätzlich beim Metallrecycling schon seit langem gibt. Zur Beurteilung, ob sich eine Aufbereitung prinzipiell lohnt, wurde in der Automobilindustrie auf eine allgemein gültige Formel zurückgegriffen, mit der die Kreislaufeignung (KE) eines Bauteils oder einer Baugruppe grob bestimmt werden kann (1) [143]:

$$\mathrm{KE} = \frac{\text{Kosten (äquivalentes Neumaterial + Entsorgung)}}{\text{Kosten (Demontage, Logistik, Aufbereitungskosten)}}$$

Ist der Quotient größer oder gleich 0,8, kann das untersuchte Bauteil bzw. die Baugruppe wirtschaftlich einem stofflich geschlossenen Materialkreislauf zugeführt werden. Als bestimmende Größe erweisen sich dabei die Demontagekosten, die notwendig sind, um eine sortenreine Trennung der einzelnen Werkstoffe zu erreichen. Demontageanalysen, mit deren Hilfe eine strukturierte Zerlegung und Auswertung des kompletten Fahrzeugs stattfindet, liegen heute bei allen Automobilherstellern vor, liefern wichtige Aussagen über derzeit wirtschaftlich erreichbare Recyclingquoten bestehender Fahrzeuge und zeigen gleichzeitig Optimierungspotenziale für Neukonstruktionen auf. Um eine bessere Wiederverwertung zu erreichen, wird z. B. empfohlen, Klebverbindungen zwischen Bauteilen aus unverträglichen Werkstoffen zu vermeiden und eine möglichst optimale Zugänglichkeit für Demontagewerkzeuge zu gewährleisten. Ebenso sollte angestrebt werden, halogenfreie Flammschutzmittel und Leiterplatten zu verwenden.

Beobachtungen aus der Verwertungspraxis und die Erkenntnisse aus Fahrzeugzerlegungen bilden zusammen mit internen Recyclingnormen der Automobilhersteller bzw. der VDI-Norm 2243 (Recyclingorientierte Produktentwicklung) und der Europäischen Recyclingnorm „Design for Recycling, DFR“ den Grundstock für eine recyclinggerechte und ökonomisch realisierbare Fahrzeugentwicklung. Die inhaltlichen Schwerpunkte lassen sich in einem sog. „Recyclingdreieck“ darstellen (Abb. 10.51) [144].

Messbare Erfolge erkennt man am deutlich gestiegenen Anteil von Kunststoffrezyklaten in Neufahrzeugen bezogen auf den gesamten Kunst-

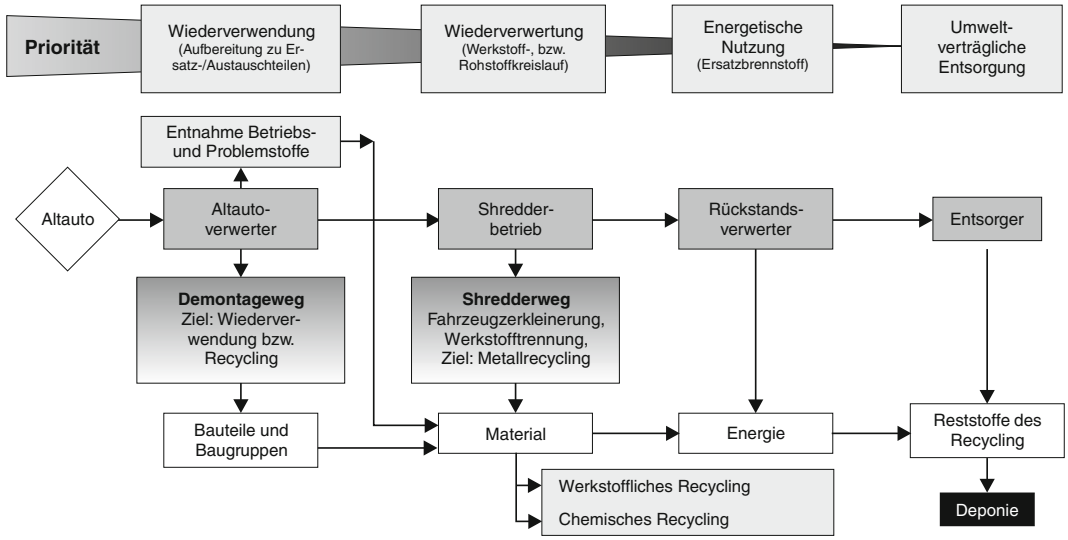



**Abb. 10.52** VDA-Konzept zur Altautoverwertung

10

stoffanteil im Fahrzeug, der verstärkten Freigabe von Rezyklaten und an Bemühungen um „Einstoff-Lösungen", wie sie z. B. an der Schalttafel des Porsche „Boxster" und des Porsche „911 Carrera" – Modelljahr 1997 bis Modelljahr 2004 in Form einer „All-PP-Variante" erfolgreich umgesetzt wurden.

**Energetische Nutzung** Der hohe Kunststoffanteil in der SLF legt nahe, den hohen Energiegehalt dieser Fraktion optimal zu nutzen und energetisch zu verwerten. Diese Verwertung kann man in den meisten Fällen auch als stoffliches Recycling interpretieren, da die für eine Verbrennung notwendige Menge an Primärenergieträgern wie z. B. Öl, Gas oder Kohle durch die SLF ersetzt bzw. reduziert werden kann. Gleiches gilt für den Einsatz als Reduktionsmittel bei der Stahlherstellung. Das Haupthindernis für den Zugriff auf diese Prozesse liegt weniger in der technischen Beherrschbarkeit der Verfahren als vielmehr in der mangelnden umweltpolitischen Akzeptanz, wodurch dieser Lösungsweg bisher in vielen Fällen blockiert wird.

Einen zusammenfassenden Überblick auf das vom VDA entworfene Konzept der Altautoverwertung zeigt (Abb. 10.52) [145].

**Ökobilanz/Energiebilanz** In der Automobilindustrie werden Ökobilanzen seit mehreren Jahren gezielt eingesetzt, um die Umweltverträglichkeit der Produkte zu analysieren und zu verbessern. Das Vorgehen ist in gewissem Maße standardisiert (durch ISO 14040/44) [146, 147]. Damit kann die Umweltverträglichkeit quantitativ bewertet und die Entscheidungsfindung frühzeitig im Entwicklungsprozess unterstützt werden. Dies lässt sich u. a. dazu nutzen, die Auswirkungen und die ökologische Sinnhaftigkeit von Leichtbaumaßnahmen mit Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs zu untersuchen und konkrete, ökologisch begründete Entscheidungen bei der Festlegung von Werkstoffen und Bauweisen zu treffen [148]. Grundsätzlich sind bei der Erstellung einer Ökobilanz alle die Umwelt betreffenden Stoff- und Energieströme als Input- und Outputströme zu berücksichtigen, gegeneinander abzuwägen, zu gewichten und abschließend zu bewerten. Die isolierte Betrachtung einer einzelnen Umweltauswirkung ist nur mit Einschränkungen möglich, weil die verschiedenen Umweltauswirkungen in sehr komplexen Wechselwirkungen miteinander stehen. Eine Sonderrolle kann man aber der Energiebilanz zubilligen. Sie steht in engem

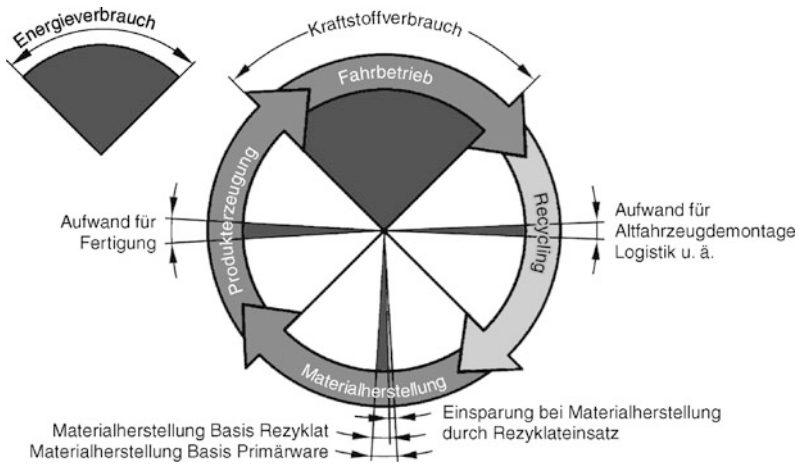



**Abb. 10.53** Prinzip der Energiegesamtbilanz eines Materialkreislaufs

Zusammenhang mit dem Verbrauch eines Fahrzeugs, der als Größe dem Kunden unmittelbar zugänglich ist. Die Energiebilanz ist ein gut geeignetes Instrument zur Bewertung unterschiedlicher Materialien in Verbindung mit speziellen Bauteilen oder Baugruppen zum Beispiel bei der Suche nach einem Optimum für den Leichtbau (Abb. 10.53).

Ein geringeres Fahrzeuggewicht bedeutet in der Nutzungsphase eines Fahrzeugs einen geringeren Kraftstoffverbrauch und ist grundsätzlich positiv zu bewerten. In der ganzheitlichen Betrachtung sind jedoch auch die Herstellung und die Verwertung bzw. Entsorgung zu berücksichtigen. Tendenziell ist die Herstellung von Bauteilen aus Leichtbauwerkstoffen wie CFK, Magnesium oder Aluminium vergleichsweise energieaufwändig. Es ist also jeweils zu prüfen, ob sich der Mehraufwand bei der Herstellung in der Nutzungsphase energetisch auch lohnt, d. h. die Energieeinsparung in der Nutzungsphase größer ist als der höhere Energieeinsatz bei der Herstellung. Ausschlaggebend kann dabei auch die Altfahrzeugverwertung sein. Gelingt ein Recycling und die Bereitstellung von Sekundärwerkstoffen mit einem geringeren Energieaufwand als bei der Herstellung des entsprechenden Primärmaterials, wird dies in der Ökobilanz mit einer Energiegutschrift belohnt.

Die Schließung von Stoffkreisläufen lohnt sich energetisch sehr oft (z. B. im allgemeinen bei Metallen), aber nicht immer (z. B. in einigen Fällen bei Kunststoffen). Sehr hohe Recyclingquoten sind als Vorgabe unter dem Gesichtspunkt des Leichtbaus unter Umständen also kontraproduktiv [149] und nicht für alle Werkstoffgruppen gleich erstrebenswert.

Gesamtfahrzeug- oder Teilökobilanzen werden von den Fahrzeugherstellern vor allem intern in der Entwicklung eingesetzt, um Produktentscheidungen unter ökologischen Aspekten zu treffen. Mittlerweile werden von einigen Fahrzeugherstellern aber auch die Ergebnisse von Gesamtfahrzeugbilanzen nach ISO 14040 veröffentlicht, die recht detailliert Auskunft über vielfältige Umweltauswirkungen des jeweiligen Fahrzeugs geben. Durch Vergleich mit Vorgängermodellen lassen sich deutliche Fortschritte in der Umweltverträglichkeit nachweisen. So ist zum Beispiel beim Vergleich der neuen Mercedes S-Klasse im Jahr 2005 mit dem Vorgängertyp ablesbar, dass zwar die Herstellung etwas energieaufwändiger geworden ist, aber der Gesamtenergiebedarf durch einen erheblich niedrigeren Kraftstoffverbrauch in der Nutzungsphase deutlich reduziert wird [150].

### 10.2.6 Thermoelektrizität und mögliche Anwendungen im Pkw

Unter dem Begriff Thermoelektrizität wird der Zusammenhang von Temperatur und Elektrizität in

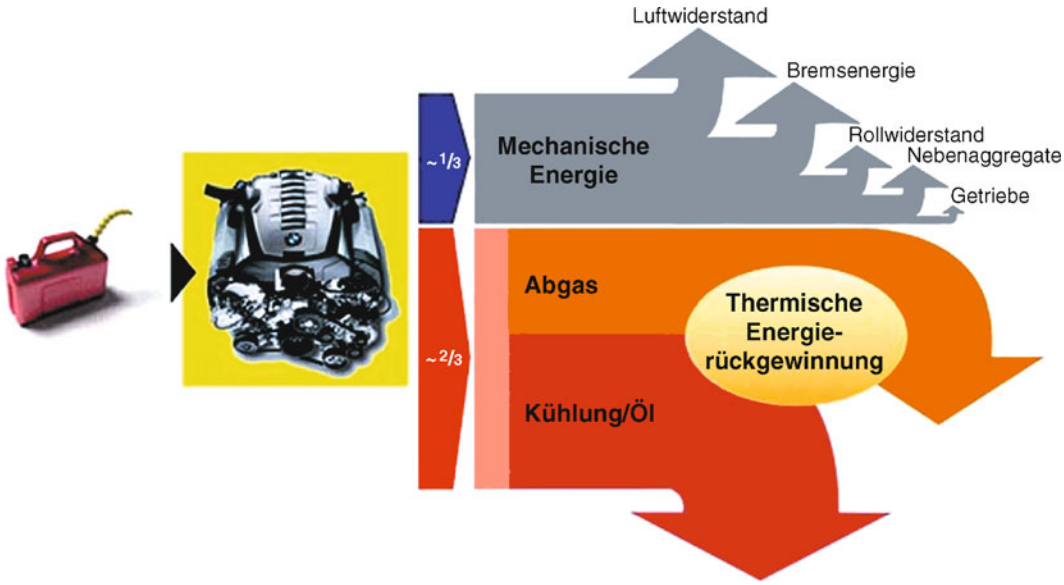



**Abb. 10.54** Thermoelektrisch nutzbarer Anteil der Energiebilanz eines Pkw-Motors [151]

10

Festkörpern zusammengefasst. Dabei werden folgende Effekte unterschieden:

- der Seebeck-Effekt,
- der Peltier-Effekt und
- der Thomson-Effekt.

Beim Seebeck-Effekt kommt es bei einem Leiter, der an seinen Ende unterschiedliche Temperaturen aufweist, zur Entstehung der sog. Thermospannung. Die physikalischen Ursachen für diesen Effekt sind kompliziert. Als vereinfachte Modellvorstellung kann das sog. Elektronengasmodell bei metallischen Leitern verwendet werden: Die Temperaturerhöhung am warmen Ende des oben beschriebenen Leiters verursacht bei den beweglichen Elektronen einen Anstieg der kinetischen Energie ($E = \frac{1}{2}\,mv^2$), was zu einer Bewegung von energiereichen Elektronen in Richtung des kalten Endes führt. Dadurch wird eine Ladungsverschiebung und somit die Ausbildung einer elektrischen Spannung verursacht. Die Größe der Spannung wird durch den sog. Seebeck-Koeffizienten und die Temperaturdifferenz bestimmt. Praktischen Nutzen erfährt der Effekt, wenn zwei unterschiedliche Leiter an zwei Kontaktstellen miteinander in Verbindung gebracht werden. Weisen diese beiden Kontaktstellen unterschiedliche Temperaturen auf, entsteht ein sog. Thermoelement. Aufgrund der Differenz der jeweiligen Thermospannungen der verwendeten Werkstoffe entsteht eine Gesamtspannungsdifferenz. Damit können z. B. Temperaturen gemessen werden. Bei thermoelektrischen Generatoren (TEG) macht man sich dieses Prinzip ebenfalls zunutze. Dabei wird gezielt aus Wärmeenergie elektrischer Strom gewonnen, Abb. 10.54. Bei metallischen Werkstoffen ist der Seebeck-Effekt so gering, dass sich diese nicht für einen Einsatz in thermoelektrischen Generatoren eignen. Aus diesem Grund werden in TEGs Halbleiterwerkstoffe (Bi2Te3; PbTe- und SiGe- Legierungen) verwendet. Der Einsatz von Halbleiterwerkstoffen ermöglicht theoretische Wirkungsgrade zwischen 3 und 8 %. Bisher werden thermoelektrische Generatoren in der Raumfahrt z. B. in Isotopenbatterien genutzt. Im Kraftfahrzeugen laufen erste Versuche zur Nutzung der Abwärme im Antriebsbereich [151]. Das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat dazu ein Versuchsfahrzeug aufgebaut, bei dem die im Motor entstehende Verlustwärme (ca. 2/3 der im Kraftstoff gebundenen Energie wird in Abwärme umgewandelt) genutzt wird. Dazu wurde ein neuer mehrschichtig aufgebauter TEG entwickelt, der bei einer



**Abb. 10.55** Der TEG der DLR im Versuchsfahrzeug [151]

Fahrgeschwindigkeit von 130 km/h eine Leistung von 200 W erreicht. Die DLR erwartet, dass durch die Weiterentwicklung der verwendeten thermoelektrisch wirksamen Werkstoffe bei Geschwindigkeiten von 100 bis 130 km/h etwa 600 bis 700 W erzielbar sein können, Abb. 10.55.

Beim Peltier-Effekt wird der Seebeck-Effekt umgekehrt: durch Anlegen einer äußeren Spannung und dem damit verbundenen Stromfluss wird der Wärmetransport verändert: Je nach verwendeter Werkstoffpaarung kommt es dabei entweder zu einer Abkühlung oder zu einer Erwärmung. Als technische Anwendung sind vor allem Peltier-Kühler interessant. Diese kommen vor allem dort zum Einsatz, wo aufgrund der Platzverhältnisse der Einsatz einer konventionellen Kältemaschine nicht möglich ist, z. B. bei elektronischen Komponenten (Peltier-Kühler für Mikrochips etc.). In Kraftfahrzeugen findet der Peltier-Effekt bislang nahezu keine Anwendung. Lediglich Kühlboxen werden auf diese Weise betrieben. Es besteht die Möglichkeit, beheizte/gekühlte Cupholder mit Hilfe des Effektes zu betreiben.

Der Thomson-Effekt beschreibt die Veränderung des Wärmetransportes in einem stromdurchflossenen Leiter mit einem Temperaturgradienten. Er hat derzeit keine technisch nutzbare Anwendung.

### 10.2.7 Nanotechnologie (im Automobil)

**Definition** Die Nanotechnologie befasst sich mit der definierten Erzeugung von Bauteilen, Schichten und Strukturen auf Atom- und Molekülebene. Der Nanobereich ($10^{-9}$ m = 1 nm) beinhaltet Objekte und Strukturen von der Größe einzelner Atome und Moleküle (Abb. 10.56) [152]. Die Größe eines Atoms beträgt 1/4 bis 1/2 nm, die eines Moleküls ca. 1 bis einige nm. Als Definition für Nanostrukturtechnik gelten Anordnungen, die in mind. einer Dimension 100 nm nicht überschreiten. Die Abmessungen von Bauteilen der Mikrosystemtechnik sind um Faktor $10^3$ größer. Der Lotus-Effekt zum Vergleich, der formal keine Nanostruktur darstellt, wird durch Oberflächenstrukturen der Blätter der Lotuspflanze (*Nelumbo nucifera*) hervorgerufen, die im Bereich von 5–300 µm (1 µm = $10^3$ nm) liegen.

Sie spielt sich in einem Übergangsbereich zwischen individuellen Atomen oder Molekülen einerseits und größeren Festkörpern andererseits ab. In

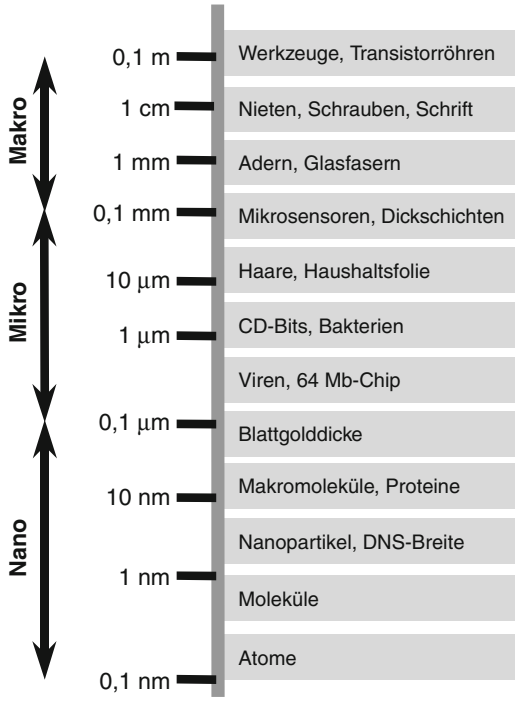



**Abb. 10.56** Von der Nano- zur Makrowelt: Größenbeispiele

diesem Zwischenbereich treten Phänomene auf, die an makroskopischen Gegenständen bislang nicht beobachtet werden konnten (Abb. 10.57). Für Lacke und Farben können z. B. unterschiedliche Farbeffekte durch kontrollierte Änderung der Partikelgröße realisiert werden. Minimale Beimischungen von Nanopartikeln ändern die Eigenschaften eines Festkörpers deutlich, so dass Folien reißfester werden oder Keramiken kaum noch zerbrechen [157].

**Entwicklung der Nanotechnologie** Im Jahr 1981 wurde es möglich, die theoretischen Überlegungen der Nanowelt, die 1959 erstmalig vom Physiker R. P. Feynman veröffentlicht wurden, zu visualisieren. Die feine Spitze eines Rastertunnelmikroskops (Scanning Tunnel Microskope = STM) fährt eine zu untersuchende Oberfläche berührungsfrei im konstanten Abstand ab, dabei gehen durch Quanteneffekte Elektronen von dem Prüfkörper zur Mikroskopspitze über. Dieser Tunnelstrom kann ausgewertet werden und bildlich die Oberfläche darstellen [153].

Ein weiterer Schritt folgte 1985, als nachgewiesen wurde, dass Werkstoffe im nanoskaligen Bereich andere Eigenschaften als im Makroskopischen besitzen: Eine neuentdeckte Erscheinungsform des Kohlenstoffs, welche aus hohlkugelförmigen Molekülen mit 60 oder 70 Kohlenstoffatomen („Buckyballs“, s. Abb. 10.58) besteht und die Vorstufe zu den Nanotubes darstellt. Diese Nanotubes haben die höchste Zugfestigkeit aller bekannten Materialien, sind elektrisch leitend und in der Lage, aufgrund der hohlen Struktur andere Stoffe aufzunehmen.

Mit der Entdeckung des GMR-Effektes (Giant Magnetoresistance) 1988 bei Schichtanordnungen von Eisen und Chrom in atomarer Dimension ist ein zusätzlicher Nachweis erbracht, dass sich Materialeigenschaften auf Molekülebene vom Festkörper unterscheiden, und damit das Gebiet der Nanotechnologie endgültig als Zukunftstechnik etabliert. Der GMR-Effekt beschreibt eine starke Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Schichten vom angelegten Magnetfeld. Diese Wirkung wird heute bei praktisch allen Festplatten-Leseköpfen genutzt und stellt eine der am meisten verbreiteten Nanotechnologieanwendungen dar.

**Industrielle Produktion** Die aus der Nanotechnologie erwachsenden Potenziale stellen die Industrie vor die Aufgabe, Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung schnell in die Praxis umzusetzen, um die Anschlussfähigkeit im internationalen Wettbewerb zu erhalten und auszubauen. Ziel ist, mit neuartigen Verfahren sowohl der Präzisionsfertigung als auch der Mikrostrukturtechnik neue Grenzen im Nanometerbereich (einige hundert nm) zu beherrschen.

Neue Verfahren der Oberflächenbeschichtungen ermöglichen Funktionsschichten, die auf ultradünnen Schichten mit charakteristischen Schichtdicken von weniger als hundert Nanometern beruhen. Die Herausforderung besteht hier, die auf kleinen Flächen reproduzierbar herstellbaren Schichten auf große Flächen aufzubringen, wobei oftmals Toleranzen von wenigen Atomlagen einzuhalten sind.

Bei der Produktion von Nanomaterialien ist zur Sicherstellung einer hochwertigen Qualität darauf zu achten, dass der Werkstoff eine enge Korngrößenverteilung aufweist. Denn je enger die Korn-

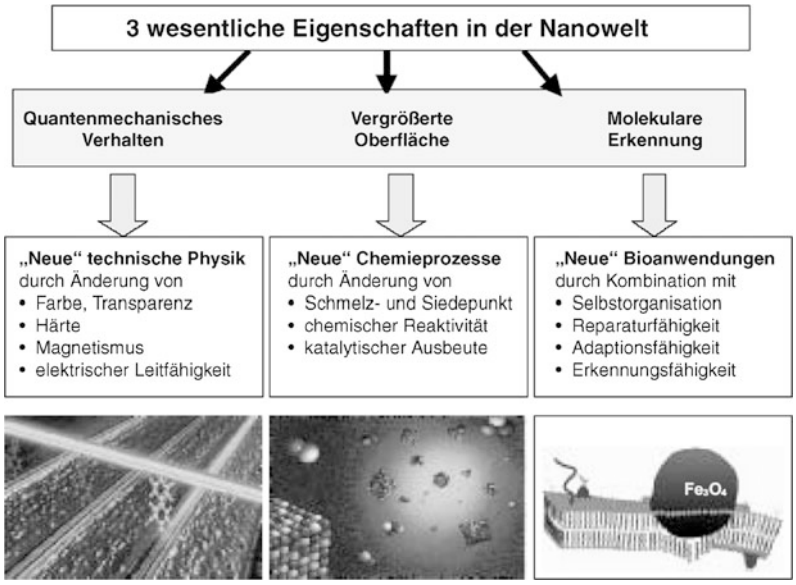



**Abb. 10.57** Wesentliche Eigenschaftsänderungen in der Nanowelt

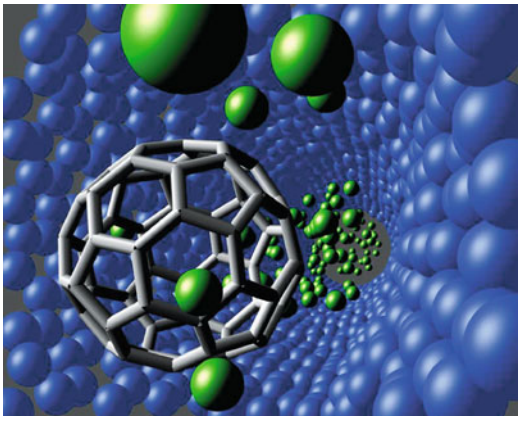


**Abb. 10.58** Buckyballs

größenverteilung ist, desto besser kommen die typischen Eigenschaften der Nanoteilchen, wie optische Eigenschaften, Magnetismus oder chemische Reaktionsfähigkeit, zum Tragen. Die Weiterverarbeitung dieser Nanomaterialien stellt die Industrie vor große Herausforderungen, um neuartige Werkstoffe, wie transparente Keramiken mit besonderen Eigenschaften, herzustellen [157].

Als schwierig erweist sich meist, diese erwünschten Eigenschaften über den nachfolgenden Fabrikationsprozess hinaus zu erhalten. So neigen lose Schüttungen von Nanopulvern vieler Werkstoffe schon bei Raumtemperatur dazu, durch Diffusionsprozesse zu größeren Partikeln bzw. fest verbundenen Agglomeraten zusammenzuwachsen [157].

**Nanomaterialien** Tab. 10.15 gibt einen Überblick über wesentliche physikochemische und biologische Eigenschaften von Nanomaterialien, die sich aufgrund der Nanoskaligkeit gezielt einstellen und optimieren lassen.

Nanostrukturen sind sowohl strukturierte Oberflächen, dünnste Schichtanordnungen als auch nanomechanische Festkörper. Die Eigenschaften der Nanomaterialien basieren auf dem sehr großen Verhältnis von Ober- bzw. Grenzfläche zu Volumen sowie den hier in den Vordergrund tretenden Quanteneffekten. Feste Materialien können aus der Gasphase, aus der flüssigen Phase und aus Festkörpern so hergestellt werden, dass sie in wenigstens einer Dimension nanoskalig (d. h. per Definition kleiner als 100 nm) sind.

**Tabelle 10.15** Beispiele für einstellbare Eigenschaften von Nanomaterialien

| Eigenschaft | Beispiele für Effekte durch nanoskalige Konfiguration |
|---|---|
| Katalytisch | Erhöhte katalytische Wirkung durch stark vergrößerte Oberfläche |
| Elektrisch | Erhöhte elektrische Leitfähigkeit in Keramiken und magnetischen Nanokompositen, höherer elektrischer Widerstand in Metallen |
| Magnetisch | Erhöhte magnetische Koerzitivität bis zu einer kritischen Korngröße (unterhalb dieser Größe Abnahme der Koerzitivität bis zu superparamagnetischen Verhalten) |
| Mechanisch | Erhöhte Härte und Festigkeit von Metallen und Legierungen, verbesserte Duktilität, Härte und Formbarkeit von Keramiken |
| Optisch | Spektrale Verschiebung der optischen Absorptions- und Fluoreszenzeigenschaften, Steigerung der Lumineszens von Halbleiterkristallen |
| Sterisch | Erhöhte Selektivität und Wirksamkeit von Membranen, Anpassung von Hohlräumen für den Transport oder die kontrollierte Abgabe spezifischer Moleküle |
| Biologisch | Erhöhte Durchlässigkeit für physiologische Barrieren (Membrane, Blut-Hirn-Schranke etc.), erhöhte Biokompatibilität |



Für Materialsynthesen aus der Gasphase kennt man mehrere relevante Verfahren. Es handelt sich um die Chemische Gasphasenabscheidung (CVD, Chemical Vapour Deposition), die Physikalische Gasphasenabscheidung (PVD, Physical Vapour Deposition), aerosolbasierte Methoden, wie die Gasphasenkondensation (CVC, Chemical Vapour Condensation), Sputtertechniken und die Flammensynthese. Während letztere Methode nur zur Herstellung von Pulvern geeignet ist, können mit den anderen sowohl Pulver als auch dünne Schichten abgeschieden werden.

Die wichtigsten Verfahren zur Herstellung bzw. Abscheidung von Pulvern und dünnen Schichten aus der flüssigen Phase sind das Sol-Gel-Verfahren und die elektrochemische Abscheidung. Beide Verfahren eignen sich weiterhin zum Aufbau nanoporöser Volumenkörper. Industriell genutzte Anwendungsgebiete für den Sol-Gel-Prozess sind zum Beispiel kratzfeste Lacke, Antireflexbeschichtungen oder hydrophobe (wasserabweisende) Schutzschichten.

Nanoporöse Festkörper lassen sich auch über polymerpyrolytische Methoden realisieren. Ferner lassen sich über Laserstrahlschmelzen ultradünne Oberflächenfilme erzeugen. Ein weiteres bedeutendes Verfahren ist die zerstörungsfreie In-situ-Erzeugung von Nanostrukturen in Volumenkörpern. Hier handelt es sich primär um die gesteuerte Kristallisation amorpher Werkstoffe zu nanokristallinen Kompositen. Diese Methode gewinnt für Metalle und Legierungen stark an Bedeutung. Nanoporöse Festkörper lassen sich beispielsweise über elektrochemische Oxidationsprozesse aus dichten metallischen Volumenkörpern gewinnen [157].

Metalloxide, insbesondere Siliziumdioxid, Ceroxid, Titandioxid, Aluminiumoxid, weisen im Bereich der anorganischen Nanopartikel gegenwärtig die größte wirtschaftliche Bedeutung auf. Im Bereich der Katalyse machen Nanopartikel als poröse Trägerschicht für Autoabgaskatalysatoren den größten Marktanteil aus. Hierbei wird vor allem nanoskaliges Aluminiumoxid verwendet, das als poröser Gerüststoff für den Edelmetallkatalysator dient, der fein verteilt in-situ auf das Substrat abgeschieden wird. Nanostrukturierte Kohlenstoffpartikel finden hauptsächlich Verwendung in Füllstoffen für Gummi und Pigmente, die zum Beispiel bei der Herstellung von Autoreifen eingesetzt werden.

Unter dem Begriff Nano-Kompositmaterialien werden folgende Materialien zusammengefasst:

Polymerbasierte Nanokomposite, Keramische Matrixmaterialien, Metallische Matrixmaterialien, Aerogele sowie Zeolithe.

Im Automobilbereich werden *polymerbasierte Nanokomposite* zur Verbesserung der (thermo)-

mechanischen Eigenschaften (Brandschutz, mechanische Verstärkung) eingesetzt. *Keramische Matrixmaterialien* verbessern vor allem die thermomechanischen Eigenschaften, die Bruchzähigkeit und die Warmumformbarkeit (plastische Verformung) dieser an sich spröden Werkstoffgruppe [157].

Durch Verstärkung von Metallen durch keramische Fasern, insbesondere Siliziumkarbid, aber auch Alumiumoxid oder Aluminiumnitrid lassen sich thermisch hochbelastbare *metallische Matrixmaterialien* mit hoher Festigkeit herstellen. Durch ein nanoskaliges Gefüge der Metall-Matrix-Komposite lassen sich eine höhere Festigkeit und Beständigkeit gegen Materialermüdung und darüber hinaus eine bessere Formbarkeit und Superplastizität erzielen. Auch partikelverstärkte Stähle sind derzeit für den Automobilsektor in der Entwicklung.

*Aerogele* sind hochporöse Feststoffe mit einer inneren Oberfläche zwischen 600 und 1000 $m^2$ pro Gramm. Mit einer Dichte zwischen 0,003 und 0,35 $g/cm^3$ gelten sie als die leichtesten bekannten Feststoffe. Besonders für den Automobilsektor ist neben den anderen herausragenden technisch nutzbaren Eigenschaften die extrem niedrige thermische und akustische Leitfähigkeit von Interesse.

Ähnlich wie Aerogele sind *Zeolithe* hochporöse Festkörper auf Basis von Alumosilikaten, die sowohl in der Natur vorkommen als auch künstlich hergestellt werden, aber für den Automobilbereich eine geringe Bedeutung haben [157].

Durch nanoskalige Schichtsysteme lassen sich viele Effekte durch Beschichtung bzw. Oberflächenfunktionalisierung erzielen, die im Automobilsektor vor allem mit dem Ziel des Verschleißschutzes (kratzfeste Kunststoffoberflächen), des Einsatzes von Antibeschlagschichten und Easy-to-clean-Schichten durch hydrophile bzw. hydrophobe Oberflächen (Lotus-Effekt) sowie der Nutzung optischer Eigenschaften (antireflektierende Gläser) zum Einsatz kommen (sollen). Beim Porsche Carrera (Typ 997) wird bei den Seitenscheiben und den Außenspiegeln die Oberflächeneigenschaft hierdurch beeinflusst. Die Seitenscheibe ist hydrophob (wasserabweisend), der Außenspiegel hydrophil (wasseranziehend), was in beiden Fällen zu einem Selbstreinigungseffekt führt. Interessant für den automobilen Einsatz von nanoskaligen

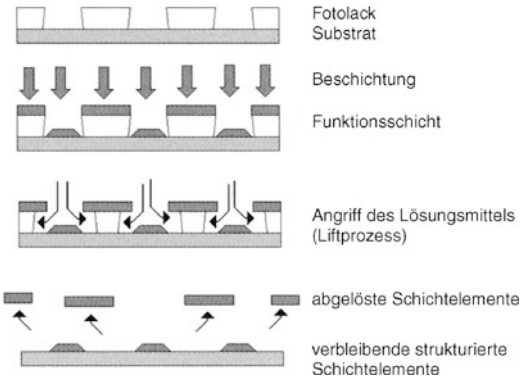



**Abb. 10.59** Lift-off-Verfahren

Schichtsystemen ist aber auch die Verbesserung der thermischen und chemischen Eigenschaften, die sich hierdurch als Korrosionsschutz für Metalloberflächen eignen [157].

Nanoanwendungen, wie bsw. optische Leiter von Displays, Nanomarkierungen oder Leiterbahnen für elektronische Bauteile, werden durch subtraktive und additive Erzeugung von Nanostrukturen hergestellt. Zu den subtraktiven Verfahren zählt das Lift-off-Verfahren (Abb. 10.59). Ein fotolackbeschichtetes Substrat mit Nanofunktionsschicht, wobei der Fotolack die gewünschte Kontur abbildet, wird einem Lösungsmittel ausgesetzt. Am Prozessende bleibt das Substrat mit der definierten Nanofunktionsschicht. Dieses Verfahren eignet sich zur Produktion von optischen Leitern, die als Head up Displays in Windschutzscheiben verwendet werden können (Abb. 10.60). Ein Beispiel der additiven Herstellungsarten von metallischen Nanostrukturen für elektronische Komponenten ist die elektronenstrahlinduzierte Zersetzung von Metallsalzen (Abb. 10.61). Eine Nanobeschichtung aus Palladiumacetat wird mit einem Elektronenstrahl lokal behandelt. Dabei wandelt sich das Palladiumacetat örtlich in metallisches Palladium um. Dieses Edelmetall ist gegen den anschließenden Ätzvorgang resistent [154].

**Nanoprodukte im Automobilbereich** Durch die Nanotechnologie können in der Fahrzeugentwicklung zum einen Innovationen dargestellt und zum anderen bei bekannten Bauteilen Produkteigenschaften kombiniert und verbessert werden.



**Abb. 10.60** Corvette – Head up Display

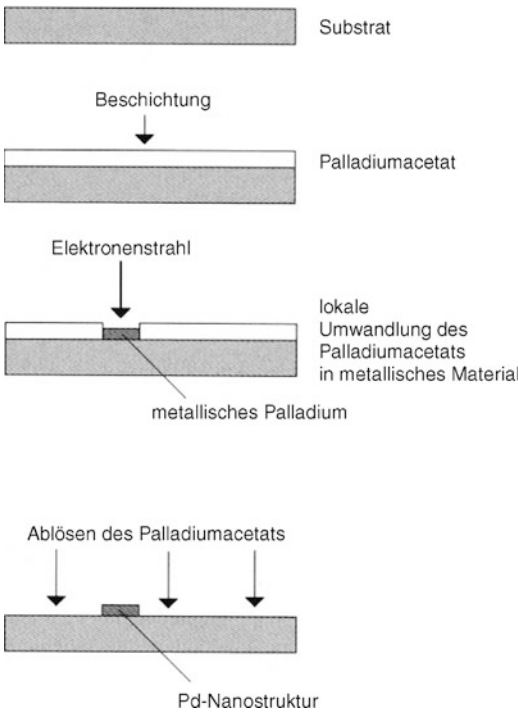



**Abb. 10.61** Elektronenstrahl-induzierte Zersetzung

Das gezielte Einstellen von Oberflächeneigenschaften ist ein Anwendungsgebiet der Nanostrukturtechnik im Automobil. Auf leichte und preiswerte Grundkörper wird mit Nanoverfahren die gewünschte Oberfläche aufgebracht. Die Bedampfung von Scheinwerferelementen mit Aluminium, um daraus Reflektoren herzustellen, ist eine

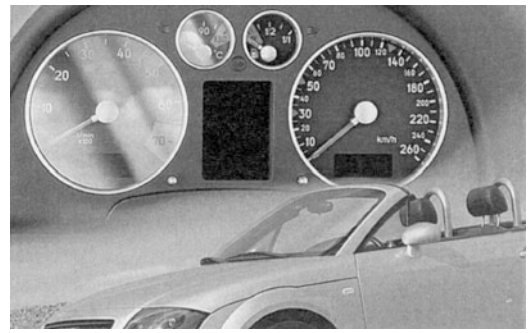


**Abb. 10.62** Instrumententafel Audi TT: *Links* ohne und *rechts* mit Antireflexbeschichtung

klassische nanotechnische Umsetzung. Das Reflexionsvermögen des Aluminiums wird auf eine leichte, nahezu beliebig darstellbare Form eines Scheinwerferreflektors übertragen. Weitere Applikationen mit Serienreife sind u. a. Antireflexbeschichtungen von Instrumenten und hydrophobe Beschichtungen von Verglasungen. Bei Innenspiegeln wird durch elektrochrome Nanobeschichtungen die Transparenz entsprechend der einfallenden Lichtintensität angepasst, wodurch ein automatischer Abblendeffekt erzeugt wird (Abb. 10.62).

Mit der Einstiegschwelle vom Chevrolet Astro und GMC Safari Midsize Van wurde 2001 erstmalig ein Fahrzeug mit einen Außenteil aus Nanocomposit versehen. Dieses thermoplastische Teil besitzt einen Kreidefüllstoff (Smectite) in Nanodimension. Das Ergebnis der größeren interagierenden Fläche zwischen Polymermatrix (TPO) und Füllstoff ist ein Teil mit ca. 8 % verringertem Gewicht bei vergleichbaren mechanischen Kennwerten [155].

Für die nahe Zukunft wird Nanotechnologie bei der Entwicklung von Head-up-Displays für Fahrzeugen von Bedeutung sein. Teiltransparente Bildschirme, die Bestandteile der Frontscheibe sind, stellen dem Fahrer direkt und ohne Umwege über einen Projektor die Informationen der Instrumente in Augenhöhe zur Verfügung.

**Ein Blick in die Zukunft** Das gezielte Einstellen einer Feinstruktur bei Nanophasenmetallen, die ein Mehrfaches an Festigkeit verglichen mit einem herkömmlichen Konstruktionswerkstoff besitzen, bergen durch die mögliche Gewichtsreduzierung für

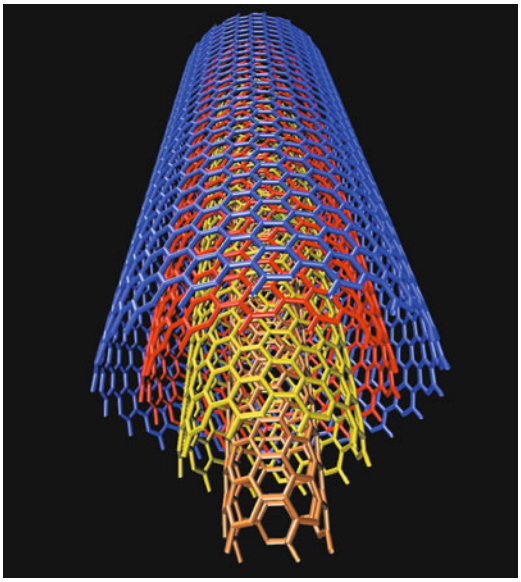


**Abb. 10.63** Nanotubes

die Automobilindustrie ein zukünftiges Potenzial zur Verbrauchsverringerung. Die besondere Eigenschaft von Nanophasenmaterialien ist, dass sie keine Versetzungen (eindimensionale Gitterfehler) bilden und daher um ein vielfaches härter sind und gleichzeitig auf eine duktile Grundstruktur aufgebracht werden können. Im Motorenbau bietet sich der Einsatz von nanotechnischen Applikationen zur Steigerung der Lebensdauer durch reibungsarme Beschichtungen an.

Mit dem Voranschreiten der Entwicklung von Brennstoffzellen wird sich ein weiteres Einsatzgebiet der Nanotechnologie eröffnen. Durch Kompaktierung von Nanopulvern oder alternativ durch Porösitäten in Festkörpern lassen sich makroskopische Bauteile mit großen inneren Oberflächen erzeugen, welche in Brennstoffzellen und bei der Speicherung von Gasen maßgeblich sind. Wasserstoffspeicher aus hohlen Nanofasern (Nanotubes), Abb. 10.63, besitzen eine Kapillarwirkung, die eine Speicherkapazität vom Dreifachen ihres Eigengewichts erreichen kann.

Nanobeschichtete Bleche der Karosserie könnten zukünftig den Korrosionsschutz, der aktuell durch Zinkbeschichtung, Grundierung und Lack gebildet wird, übernehmen. Dabei können die Nanopartikel farblich eingestellt und vor der Umformung aufgebracht werden, so dass der abschließende Lackierprozess entfallen kann. Edelstahlaußenhautflächen an Fahrzeugen wurden aufgrund von optischen Abzeichnungen, die durch Hautberührungen hervorgerufen werden, wenig verwendet. Bei Einsatz geeigneter Nanobeschichtungen wären unversiegelte Edelstahlapplikationen möglich, weil Handabdrücke auf den Flächen nicht mehr sichtbar sind.

Ein weiterer Teilaspekt der Nanotechnologie ist das Fügen von Bauteilen mit Nanooberflächen. Der im Allgemeinen unerwünschte Effekt des Kaltverschweißens von polierten Oberflächen kann zukünftig durch definierte Rauigkeiten kleiner 1 nm genutzt werden. Diese Wirkung, die heute bereits bei Halbleiterelementen eingesetzt wird, kann in der Zukunft makroskopische Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen verbinden, die zurzeit ohne Zusatzmaterial (Kleber oder Lote) nicht fügbar sind.

Unter dem Begriff „MagneRide®“ ist die erste semiaktive Fahrwerksregelung im Jahr 2002 in einem Cadillac Seville STS serienmäßig zum Einsatz gekommen. Es handelt sich hierbei um eine magneto-rheologische Flüssigkeit, die die Eisenpartikel in der Flüssigkeit so ausrichtet, dass dadurch die Dämpferkraft aktiv geregelt werden kann. Das System besteht aus Einrohr-Stoßdämpfern, Sensoren und einem Steuergerät und verbessert sowohl die Fahrdynamik als auch den Fahrkomfort.

Weitere Einsatzfelder von Nanopartikeln sind ebenso die Reifen: Dort verändern sie die innere Reibung, wodurch sich die Lebensdauer erhöht, der Kraftstoffverbrauch und die Abrollgeräusche sich gleichzeitig verringern [156]. Auch Nanobeschichtungen von Fasern sind ein Ansatzpunkt. Die nicht hinreichend alterungsbeständigen und leicht entflammbaren Naturfasern werden so zu feuerbeständigen Konstruktionswerkstoffen, welche auch in Außenbereichen und in Hochtemperaturzonen eingesetzt werden können.

Nicht alle der vorgestellten Einsatzgebiete der Nanotechnologie sind heute bereits serientauglich, jedoch haben viele Einzelaspekte schon in der Konsumgüterindustrie Einzug gehalten. Der zukünfti-

**Tabelle 10.16** Potenzielle Nanotechnologie-Anwendungen im Automobilbau in verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette

| Grundstoffe/-verfahren (Nanomaterialien/Tools) | Komponenten/Systeme | Anwendungen |
|---|---|---|
| **Materialien, Werkstoffe**<br>– Hochfeste Stähle<br>– Metall-Matrix-Komposite<br>– Nanopartikel verstärkte Polymere<br>– Katalytische Nanopartikel<br>– Thermoelektrika<br>– Nano-Klebstoffe<br>– Nanofluide …<br><br>**Verfahren/Tools**<br>– PVD-, CVD-Verfahren<br>– Nanopartikelsynthese<br>– Ionenstrahl-/Plasmaverfahren …<br><br>**Funktionale Schichten**<br>– Ultra-hydrophob<br>– Elektrochrom<br>– Antireflex<br>– Verschleißschutz<br>– Kratzfestigkeit<br><br>**Elektronik und Sensorik**<br>– Magnetoelektronik<br>– WBG-Halbleiter (SiC, GaN)<br>– LED, OLED … | **Fahrwerk**<br>– Reifen<br>– Stoßdämpfer<br>– Sensorik<br><br>**Antriebssystem**<br>– Zündanlage, Einspritzung<br>– Kraftstofftank/-zusätze<br>– Abgasanlage<br>– Brennstoffzelle<br>– Batterien<br>– Schmiermittel, Kühlung<br>– Thermoelektrische Abwärmenutzung<br><br>**Karosserie/Außenhaut**<br>– Tragende Struktur<br>– Scheiben<br>– Lackierung<br>– Außenhaut-Funktionalisierung<br><br>**Innenraum/Ausstattung**<br>– Konsolen/Armaturen<br>– Anzeigen/Displays<br>– Beleuchtungstechnik<br>– Elektronik, DV | **Sicherheit**<br>– Aktive Sicherheit (Bremsen, Scheinwerfer, Sicht (indirekte Sicht, Radar etc.), Fahrverhalten)<br>– Passive Sicherheit (Fahrzeugstruktur, Airbag, Fußgängerschutz)<br><br>**Komfort/Design**<br>– Klimatisierung<br>– Effektlackierung<br>– Selbstreinigende Oberflächen<br>– Unterhaltung/Infotainment (Internet, Videodienste)<br>– Navigations-/Verkehrsleitsysteme<br><br>**Umwelt/Nachhaltigkeit**<br>– Kraftstoffverbrauch<br>– Schadstoffemissionen<br>– Geräuschemissionen<br>– Ressourcenschonende Produktion<br>– Recycling |



ge Erfolg und eine hohe Marktdurchdringung von neuen nanotechnisch-optimierten Bauteilen wird stark davon abhängen, wie schnell großseriengeeignete preiswerte Produktionsverfahren zur Verfügung stehen und vorhandene Lücken der Grundlagenkenntnisse geschlossen werden.

Für die Zukunft wird Kohlenstoffnanoröhren (CNT) ein hohes wirtschaftliches Potenzial prognostiziert aufgrund ihrer außergewöhnlichen molekularen Eigenschaften, wie z. B. extrem hohe Zugfestigkeiten (auf molekularer Ebene eine ca. 100 mal bessere Zugfestigkeit als Stahl) sowie eine hervorragende thermische und elektrische Leitfähigkeit.

Mit Piezofaser-Funktionswerkstoffen ist es gelungen, adaptive Materialien zu entwickeln, die sich an ihre ständig ändernde Umgebung anpassen können. Dieses Anwendungsfeld wird auch als *Adaptronik* bezeichnet und ist ein grundlegender Baustein für die zukünftige Realisierung von „X-by wire"-Techniken. Mit Hilfe von piezoelektrischen Materialien (z. B. Fasern aus Blei-Zirkon-Titanat – PZT), die auf mechanische Umformung reagieren und ein elektrisches Signal erzeugen oder durch Anlegen einer elektrischen Spannung verformt werden, können diese beide Eigenschaften in Bauteile integriert werden. Keramisches PZT wird mittels eines Sol-Gel-basierten Spinnverfahrens hergestellt. Schon mit einem geringen Gehalt an PZT-Fasern lassen sich sehr gute Sensoren realisieren, die auf mechanische Verformungen wie Stoß, Biegung oder Druck reagieren. Aktorische Anwendungen lassen sich mit einem höheren Gehalt an Fasern verwirklichen [159, 160].

Die *Adaptronik* eröffnet vielfältige Anwendungsfelder im Automobilsektor. Prototypen solcher aktiven Bauteile dämpfen z. B. den Lärm in Au-

tos (z. B. durch adaptive Motorlagerungen, Radaufhängungen, Dach oder Kardan- und Antriebswellenwellen). Als elektronisch gesteuerte Injektoren haben sich Piezokeramiken bereits heute in Diesel Common Rail Systeme etabliert [161].

Es ist abzusehen, dass eine nanotechnologische Kompetenz im Automobilbau in Zukunft zu den Kernfähigkeiten gehören wird. Zusammenfassend zeigt ◘ Tab. 10.16, welche Anwendungen der Nanotechnologie im Automobilbau möglich sind.

Neben den umfangreichen Möglichkeiten zur Verbesserung der Produkte werden die Risiken der Nanotechnik, insbesondere die Aufnahme von nanoskaligen Partikeln in den menschlichen Körper diskutiert. Eine endgültige Aussage kann dazu an dieser Stelle noch nicht erfolgen.

## 10.3 Wettbewerb und Zusammenspiel der Werkstoffe

Die erste Dekade des 21sten Jahrhunderts hat weltweit zu spürbaren Veränderungen der Wettbewerbssituation bei Kraftfahrzeugen geführt. Neben den etablierten OEMs aus Japan und Südkorea, die bereits heute eine starke Konkurrenz für die deutschen OEMs darstellen, hat die sich bereits seit vielen Jahren abzeichnende und nachhaltige Industrialisierung der großen Volkswirtschaften China, Indien und Brasilien und der dort ebenfalls vorhandene Wunsch nach individueller Mobilität bereits dazu geführt, dass die USA nicht nur als wichtigster Abnehmer von Kraftfahrzeugen durch China verdrängt worden ist, China holt auch bei der Produktion von Kraftfahrzeugen auf. Allein in China gibt es nahezu 100 Hersteller, von denen aber wahrscheinlich nur sehr wenige überleben werden. Die chinesischen Hersteller haben sich lange im Niedrigpreissegment bewegt, werden aber zukünftig entweder durch Zukäufe oder eigene Entwicklungen auch andere Marktsegmente zu besetzen suchen.

Im Bereich der Zulieferer führten wirtschaftliche Interessen, aber auch die Schwäche einzelner Unternehmen zu Fusionen und Übernahmen und so zu einer reduzierten Anzahl von Anbietern im Markt. Auch hier entstehen weltweit neue Standorte, die eine wirtschaftliche Fertigung ermöglichen.

Die international festgelegten Ziele einer deutlichen Reduzierung der $CO_2$- und der Schadstoffemissionen, insbesondere bei Kraftfahrzeugen, wird sich stark auf die benötigten Techniken auswirken. Die Beschlüsse von Kyoto und den nachfolgenden Klimagipfeln werden bei allen Fahrzeugherstellern und auch den Zulieferern zu verstärkten Anstrengungen führen, die $CO_2$- und die Schadstoffemissionen der Fahrzeuge weiter zu reduzieren. Dies ist auch angesichts der zunehmenden Industrialisierung und aufgrund der steigenden Nachfrage nach individueller Mobilität in den beiden großen Volkswirtschaften in China und Indien notwendig, um die Umwelt und die begrenzten Ressourcen zu schonen. Die weltweite Urbanisierung der Bevölkerung wird den Trend zu emissionsarmen bzw. emissionsfreien Kraftfahrzeugen zusätzlich antreiben. Zahlreiche bereits gestartete nationale Programme zur staatlich bezuschussten Einführung von ZEVs befördern diese Entwicklung zusätzlich.

Für die Kraftfahrzeughersteller bedeutet dies weiter steigende Anforderungen an Werkstoffe und kostengünstige Fertigungsverfahren. Leichtbau wird aufgrund von Emissionsreduzierungen und/oder des Einsatzes von Batteriesystemen für alle Fahrzeugklassen immanent werden und dieser Trend wird sich in der nächsten Dekade fortsetzen. Leichtbauwerkstoffe werden zur Gewichtsreduzierung auf breiter Front (so auch in Kleinwagen) zum Einsatz kommen: arbeitet BMW beim Mega City Vehicle an einer Leichtbaustruktur aus CFK in Kombination mit Aluminiumbauteilen, während Daimler mit der japanischen Firma Toray ein Abkommen über die Entwicklung und Fertigung von Leichtbaukomponenten aus CFK bekannt gegeben hat.

Die Gewichtsreduzierung in Kraftfahrzeugen wird – und das verdeutlicht das Beispiel des Mega City Vehicle – nicht mehr durch die Substitution eines Werkstoffs durch einen anderen erreicht werden, sondern durch das gezielte Zusammenspiel aller aus wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Gesichtspunkten sinnvollen Werkstoffe und Materialien. Das Spektrum der Möglichkeiten ist dabei groß und reicht von den Stählen mit ihren unterschiedlichen Festigkeitsklassen über Leichtmetalle, wie Aluminium oder Magnesium, bis hin zu Kunst-

stoffen bzw. faserverstärkten Werkstoffen und den Keramiken. Neben dem Leichtbau steigen die Anforderungen an die Sicherheit und Langzeitqualität der Fahrzeuge. Weltweit sind Mindeststandards bzgl. passiver Sicherheitssysteme einzuhalten. Dies ist nur durch den Einsatz modernster Werkstoffe und geeigneter Fertigungsverfahren zu erfüllen.

Im Hinblick auf die bereits heute nahezu unüberschaubare Vielfalt an möglichen Varianten während der Fahrzeugentwicklung wird die computerunterstützte Simulation in allen Bereichen immer wichtiger. Schon bei der Entwicklung neuer Werkstoffe sind Simulationen unentbehrlich: In diesem Fall bilden FE-Programme werkstoffphysikalische Prozesse während der Herstellung nach und erlauben so im Vorfeld Aussagen über den Werkstoff. Bei der Fertigungstechnik sind Simulationsprogramme bereits seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz (Bsp: Umformtechnik, Formfüll- und Erstarrungssimulation bei Gussbauteilen). Diese werden aufgrund der ebenfalls kontinuierlichen Steigerung der Rechenleistung verfügbarer Computersysteme immer genauere Prognosen und eine feinere Abbildung von Bauteilen und Prozessen ermöglichen. Allerdings werden reale Versuche weiterhin notwendig bleiben, da die Simulation nur einen Idealfall dargestellt, bzw. das Modell die Realität abzubilden und vorauszusagen versucht.

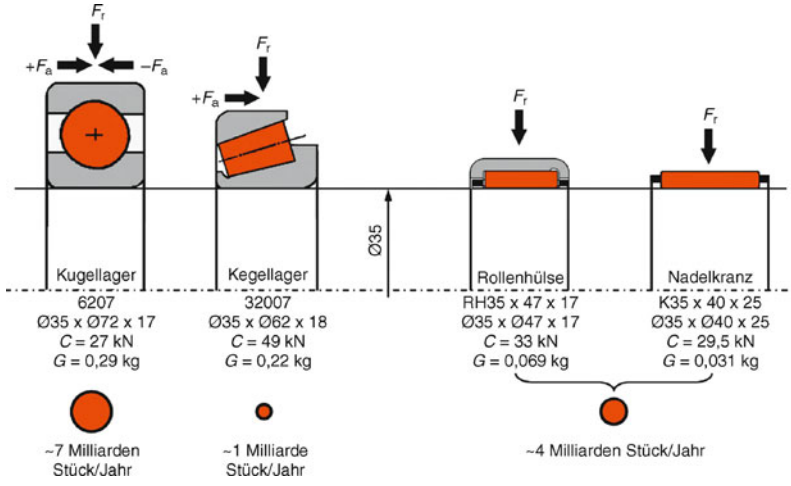
Die Werkstoff- und Fertigungstechnik wird auch in Zukunft eine treibende Kraft des Fortschritts im Automobilbau darstellen. Die steigenden Anforderungen an die Eigenschaften von Komponenten und Bauteilen im Kraftfahrzeug können nur durch die konsequente und kontinuierliche Weiterentwicklung von Werkstoffen und ihren Herstellungstechniken erfüllt werden.

## 10.4 Wälzlager im Fahrzeugbau

### 10.4.1 Einleitung

Wälzlager und jede Art von Rollenlager repräsentieren im Maschinenbau die Technik, um die sich alles dreht: Sie sind der klassischen Erfahrung nach anspruchslos im Schmierstoffbedarf, heikel gegen Verschmutzung und kraft ihrer gigantischen Stückzahlen enorm preisgünstig. Das gilt vor allem für die klassischen Baumuster, deren Stückzahl -zig-Milliarden pro Jahr erreicht (◘ Abb. 10.64): 7 Milliarden Kugellager gefolgt von 4 Milliarden Nadellagern und 1 Milliarde Kegelrollen sind stolze Summen (Stand 2010).

Wälzlager sind per Definition Lager, bei denen zwei zueinander bewegliche Komponenten, der sogenannte Innenring sowie der Außenring, durch rollende Körper getrennt sind. Sie dienen wahlweise als Fest- oder Loslager zur Fixierung von Achsen und Wellen, wobei sie die radialen und axialen Kräfte aufnehmen und gleichzeitig die Ro-




◘ **Abb. 10.64** Wälzlager-Bauarten und jährliches Produktionsvolumen

tation von Welle oder Rad ermöglichen. Zwischen den drei Hauptkomponenten eines Lagers, nämlich Innenring, Außenring und Wälzkörper, tritt hauptsächlich Rollreibung auf. Da die Wälzkörper auf gehärteten Stahlflächen mit optimierter Schmierung abrollen, ist die Tragzahl dieser Lager hoch und gleichzeitig die Rollreibung relativ gering.

Nachdem Verbrauch und detaillierte $CO_2$-Reduktion als Entwicklungsziel in der Fahrzeugentwicklung alle anderen Tendenzen überragen, bieten sich für den Ersatz von konventionellen Gleitlagern zunehmend neue Wälzlager-Technologien an, die für einen bestimmten Einsatzzweck regelrecht „maßgeschneidert" wurden. So übernehmen Radlager der jüngeren Generation mittels aufgesetzter Signal-Sensor-Paarungen die Ermittlung von Raddrehzahlen für die Kontrolleinheiten von ABS, ESP und ASR-Systemen.



**Abb. 10.65** Einreihige Rillenkugellager decken 80 % aller Gebrauchsfälle ab

## 10.4.2 Gebräuchliche Wälzlager-Bauarten

### 10.4.2.1 Einreihige Rillenkugellager

Rillenkugellager (Abb. 10.65) gibt es heute normiert mit Außendurchmessern von 26 bis 90 mm. In der Bedarfs-Struktur dominieren sie weltweit mit mehr als 80 %. Üblich ist ein Nietkäfig aus Stahl, auf Wunsch mit Polyamidkäfig. Die normale Toleranzklasse heißt p6; auf Anfrage auch mit engerer Toleranz p5 lieferbar. Gängige Lager können mit einer oder zwei Spaltdichtungen (Bezeichnung „Z" oder „2Z") sowie mit einer oder zwei Lippendichtungen (Bezeichnung „HRS" oder „2HRS") bestellt werden, auf Anfrage auch mit sehr reibungsarmen nicht berührenden Labyrinthdichtungen (2BRS). Zudem stehen alle Rillenkugellager wahlweise mit größerer (Ausführung C3, C4) oder kleinerer (C2) Radialluft zur Verfügung [162].

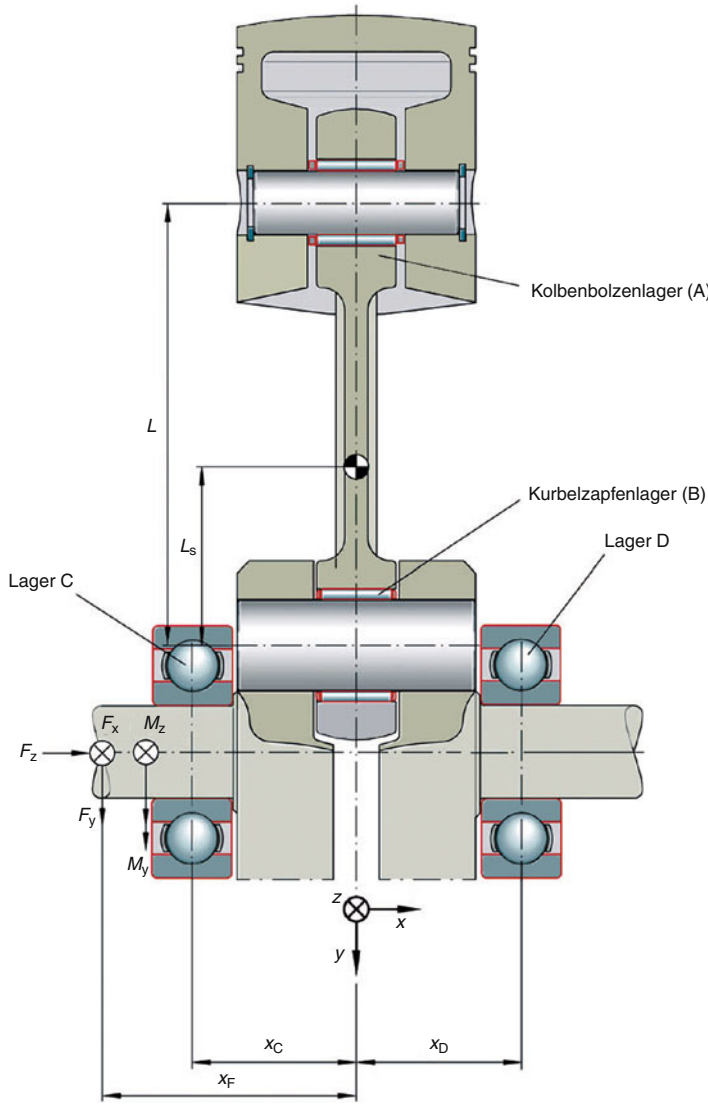
### 10.4.2.2 Nadellager, Nadelkränze

Alle Laufbahnen für die Nadellager müssen jeweils gehärtet, geschliffen und gehont sein. Nadelkränze für Kurbelzapfen sind außengeführt, das heißt, die Pleuelbohrung führt den Käfig radial mit kleinem Spiel. Die radiale Bewegung des Käfigs gegenüber der Pleuelbohrung und den Wälzkörpern ist möglichst gering. Die Käfige sind aus vergütetem Stahl gefertigt, durch Beschichtung verschleißarm, von hoher Festigkeit und haben große, schmiertechnisch günstig gestaltete Führungsflächen [163].

### 10.4.2.3 Kegelrollenlager

Kegelrollen-Wälzlager gibt es für sämtliche Belastungsfälle und Anforderungen. Kegelrollenlager sind zerlegbar, Innenring und Außenring können getrennt eingebaut werden. Da Kegelrollenlager axiale Kräfte nur in einer Richtung aufnehmen können, ist ein zweites, spiegelbildlich angeordnetes Kegelrollenlager zur Gegenführung erforderlich. In dieser Eigenschaft sind sie mit den Schrägkugellagern vergleichbar, weisen jedoch generell eine höhere Tragfähigkeit auf, gleichzeitig eine geringere Drehzahleignung.

Gängige Anwendungen für Kegelrollenlager sind: Radlager in Pkws, Lkws, als Lenkkopf- oder Schwingenlager für Motorräder. Üblich sind Lager in metrischen und auch Zollabmessungen, letztere haben ein völlig eigenes Bezeichnungsschema [164].



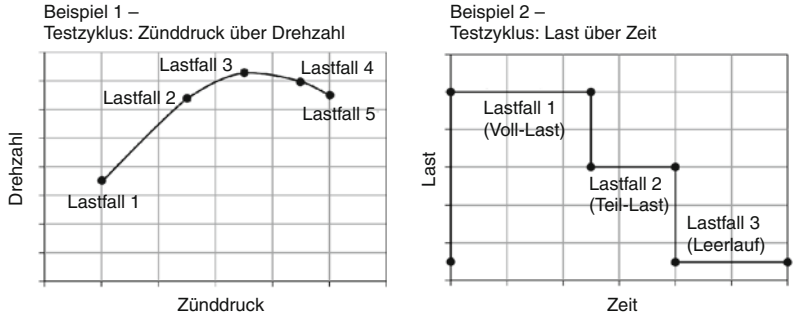




**Abb. 10.66** Rollenlager im Motorenbau sind nicht nur für Motorsägen, Rasenmäher und Mopeds eine gängige Lösung, sondern bieten sich im Zuge weiterer Verbrauchsoptimierung für Automotoren an (siehe ► Abschn. 10.4.4.3.6)

## 10.4.3 Auslegung von Wälzlagern

### 10.4.3.1 Wellen- und Lagerberechnung nach Formelsammlung

Verfahren zur Berechnung der Lebensdauer:

Kenngrößen $L_{10}$ und $L_{100}$ nach ISO 281

Modifizierte Lebensdauer $L_{\mathrm{NA}}$ nach DIN ISO 281 ist seit 1990 nicht mehr Bestandteil der ISO 281, erweiterte modifizierte Lebensdauer $L_{nm}$ nach ISO 281.

Nominelle Lebensdauer (Quelle: DIN ISO 281 Beiblatt 2)
Variable für die Eingaben:

$C$ – dynamische Tragzahl in kN = Tragzahl für gegebenes Lager aus Lagertabelle der Hersteller,

$P$ – dynamische äquivalente Belastung in kN,

$p$ – Lebensdauerexponent, $p = 3$ (für Kugellager), $p = 10/3$ (für alle anderen Lager),

$n$ – Drehzahl in 1/min (Umdrehungen pro Minute)

Ergebnis: $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{p}$

$L_{10}$ – nominelle Lebensdauer in Millionen Umdrehungen, welche von 90 % einer genügend großen Menge gleicher Lager erreicht oder überschritten wird, bevor die ersten Anzeichen einer Werkstoffermüdung auftreten

$$L_{10\,\mathrm{h}} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10} = \left(\frac{16.666}{n}\right) \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^{p}$$

$L_{10\,\mathrm{h}}$ – Nominelle Lebensdauer in Betriebsstunden entsprechend der Definition für $L_{10}$.

Die hier enthaltene Dynamische äquivalente Belastung $P$ ist ein technischer Wert. Er stellt eine in Größe und Richtung konstante Radiallast bei Radiallagern dar, entsprechend einer Axiallast bei Axiallagern.

Eine Belastung mit $P$ ergibt die gleiche Lebensdauer wie die tatsächlich wirkende kombinierte Belastung.

Zur Berechnung gehören folgende Variable für die Eingabe:

$X, Y$ – Radial- und Axialfaktoren aus den Maßtabellen oder der Beschreibung des Produktes. Diese Faktoren sind generell im Lagerkatalog enthalten.

$F_{\mathrm{r}}$ – Radiale dynamische Lagerbelastung in kN.

$F_{\mathrm{a}}$ – Axialkraft dynamische Lagerbelastung in kN.

Formel: $P = x \cdot F_{\mathrm{r}} + y \cdot F_{\mathrm{a}}$

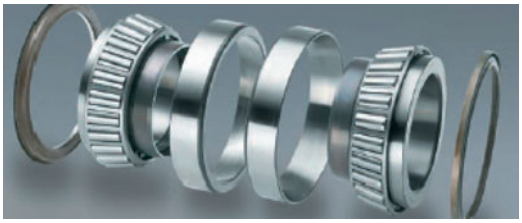


**Abb. 10.67** Kegelrollenlager bewähren sich im paarweisen Einsatz

Ergebnis: $P$ = Dynamische äquivalente Belastung in kN

Nota: Diese Berechnung ist nicht anwendbar für Radial-Nadellager sowie Axial-Nadellager und Axial-Zylinderrollenlager. Bei diesen Lagern sind kombinierte Belastungen nicht zulässig.

Die Lebensdauer für andere Ausfallwahrscheinlichkeiten wird durch Multiplikation von $L_{10}$ mit einem Faktor berechnet:

$L_5 = 0{,}62 \cdot L_{10}$ – in Millionen Umdrehungen bei 5 % Ausfallwahrscheinlichkeit

$L_4 = 0{,}53 \cdot L_{10}$ – in Millionen Umdrehungen bei 4 % Ausfallwahrscheinlichkeit

$L_3 = 0{,}44 \cdot L_{10}$ – in Millionen Umdrehungen bei 3 % Ausfallwahrscheinlichkeit

$L_2 = 0{,}33 \cdot L_{10}$ – in Millionen Umdrehungen bei 2 % Ausfallwahrscheinlichkeit

$L_1 = 0{,}21 \cdot L_{10}$ – in Millionen Umdrehungen bei 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit

Die modifizierte Lebensdauer $L_{\mathrm{NA}}$ kann berechnet werden, wenn neben der Belastung und Drehzahl weitere Einflüsse bekannt sind, etwa besondere Werkstoff-Eigenschaften die Schmierung oder wenn eine von der 90-Prozentigen Definition abweichende Lebensdauer gefordert wird.

Dieses Berechnungsverfahren wurde 2007 in ISO 281 durch die Berechnung der erweiterten modifizierten Lebensdauer ersetzt.

$$L_{\mathrm{NA}} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times L_{10}$$

$L_{\mathrm{NA}}$ – $10^6$ Umdrehungen, Modifizierte Lebensdauer für besondere Werkstoffeigenschaften und Betriebsbedingungen bei einer Erlebenswahrscheinlichkeit von $(100 - n)$ %

$L_{10}$ – $10^6$ Umdrehungen, = Nominelle Lebensdauer

$a_1$ – Lebendauerbeiwert für eine Erlebenswahrscheinlichkeit, die von 90 % abweicht.

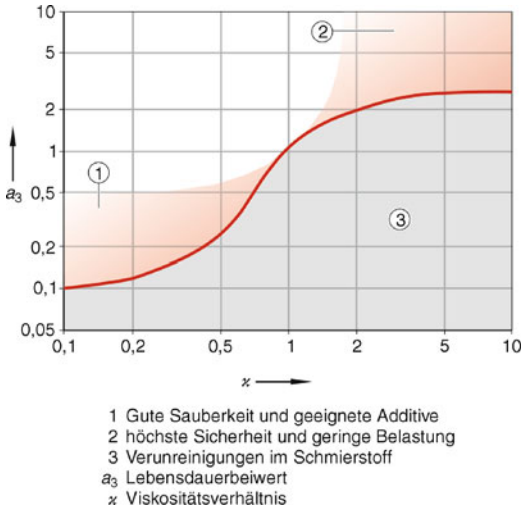



**Abb. 10.68** Wenn die Sauberkeit der Schmierung nicht gewährleistet ist, bleibt von der generell guten Lebensdauer der Wälzlager nicht viel übrig

10

$a_2$ – Lebensdauerbeiwert für besondere Werkstoffbeiwerte, für Standard-Werkzeugstähle $a_2 = 1$

$a_3$ – Lebendauerbeiwert für besondere Betriebsbedingungen, besonders für den Schmierungszustand, gängige Werte reichen von Faktor 10 (sehr sauber, korrekte Additive) bis hinunter zu 0,05 (schlechte Schmierung, Schmutz), siehe hierzu Abb. 10.68 [162].

#### 10.4.3.2 Wellen- und Lagerberechnung mittels spezieller Software

Lagerberechnung und -auslegung ist heute kein Fall mehr für den Rechenschieber, sondern ein klares Aufgabenfeld für die Online verfügbaren Berechnungsmodule, etwa der von Schaeffler. „BEARINX" heißt das hochflexible Berechnungstool [162], das vom einzelnen Lager bis zur komplexen Getriebe-Konstruktion keinen Aufgabenbereich offen lässt. Andere Lagerhersteller verfügen über vergleichbare Mittel zu Unterstützung der Konstruktionsabteilungen und der Hochschulen.

### 10.4.4 Exemplarische Ausführungen aus der jüngeren Wälzlager-Entwicklung

Es steht fest, dass ein Wälzlager im Vergleich zum Gleitlager reibungstechnisch Vorteile hat. Zudem ist der Vorteil der geringen Wartung prägnant: Ein definiert beschaffener Ölnebel – etwa im Pumpenfreien Getriebegehäuse durch Planschen der Zahnräder verfügbar – reicht aus, um ein Rollenlager auf enorme Lebensdauer sicher zu versorgen. Der Komplikationsgrad von Ölkreisläufen für Viertaktmotoren, die heute bereits mittels Register-Ölpumpen auf optimale Effektivität in Druckniveau und Fördermenge getrimmt werden, mag als Indikator dafür gelten, dass dem Rollenlager auch im Motorenbau eine wachsende Verwendungsmöglichkeit offensteht. Neue Entwicklungen für viele Spezialeinsätze werden diese Tendenz künftig weiter verstärken.

So ist heute schon speziell für sehr hohe Drehzahlen der Einsatz von Keramikkugeln sinnvoll. Sie bewirken einen sogenannten „Self-Healing-Bearing"-Effekt. Dabei wird bei einem Rillenkugellager im Kugelsatz eine einzige Keramikkugel integriert. Während so ein Getriebelager im Normalfall an der Oberfläche durch Überrollen von Schmutzpartikeln im üblichen Maß verschleißt, so sorgt die Keramikkugel aufgrund ihrer höheren Härte für einen gewissen Glättungs- oder Politur-Effekt für die metallischen Oberflächen. Das führt zur Verlängerung der Lagergebrauchsdauer. Ausschließlich für die Formel 1 werden seit 2008 aus Gewichtsgründen verstärkt Wälzkörper aus Keramik eingesetzt. Jedoch ist für einen Einsatz in großen Serienstückzahlen die Wirtschaftlichkeit noch nicht gegeben.

Die Idee, Wälzlager im Motorenbau einzusetzen, ist nicht neu. Rollenlager-Motoren existierten seit langem bei Zweitaktmotoren und Motorrädern – etwa bei allen BMW-Modellen vor 1969.

Auch wurden vor dem 2. Weltkrieg viele Flugmotoren komplett in Rollen gelagert. Aufgrund des Potenzials, das ein Wälzlager gegenüber einem Gleitlager hat, kann sich dieses Prinzip künftig stärker verbreiten, sobald die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die Nachfrage zur passenden Stückzahl dafür geschaffen sind.

Die Grenzen hinsichtlich Lager-Belastung und Lebensdauer entwickeln sich durch verstärkte Detailarbeit in höhere Grenzbereiche als jemals zuvor: So hat INA beispielsweise einen Lagersatz entwickelt, mit dem es gelingt, Wartungsintervalle bis zu 200.000 Kilometer für einen Riementrieb zur Nockenwelle von Automotoren zu erreichen und dabei gleichzeitig die Steuerzeiten für Einspritzung und Verbrennung im günstigen Maß zu optimieren.

Eine andere Neuentwicklung liegt im Bereich der Diesel-Einspritzung bei Rolle-Buchse-Bolzen-Einheiten für Common-Rail-Systeme, die bei minimalem Verschleiß und geringer Reibung Einspritzdrücke bis 3500 bar im Dieselmotor gewährleisten. Darüber hinaus werden heute speziell bei Ausgleichswellen zunehmend Wälz- statt Gleitlager eingesetzt, um die Energieeffizienz zu steigern und dadurch einen Beitrag zur $CO_2$-Reduzierung zu leisten.

#### 10.4.4.1 Wälzgelagerter Turbolader

Im Mai 2010 begann die Serienproduktion der Wälzlagerung für den Turbolader im 3,0 l V6 Diesel-Motor von Daimler (Abb. 10.69): Eine Lagerkartusche (Abb. 10.70) enthält zwei Kugellagerreihen mit auf die Welle montierbaren Innenringen, Keramikwälzkörpern in Metallkäfigen und einem einteiligen Außenring. Durch die Wälzlagerung wird das Reibmoment im Turbolader bei Betriebstemperatur gegenüber der gleitgelagerten Variante halbiert; bei niedrigeren Temperaturen fällt der Vorteil sogar noch deutlich höher aus und ist damit für den Bereich des Kaltstarts besonders augenfällig und wirkungsvoll. Im Teillastbereich stellt sich eine gegenüber der gleitgelagerten Ausführung erhöhte Drehzahl des Laders ein, wodurch das Ansprechverhalten bei Lastanforderung wesentlich verbessert wird. An einem 2,2 l Motor wurden neben deutlich verbesserten Emissionswerten ein Verbrauchsvorteil im NEFZ von 2,5 % und unter Volllast sogar von 4 % ermittelt.

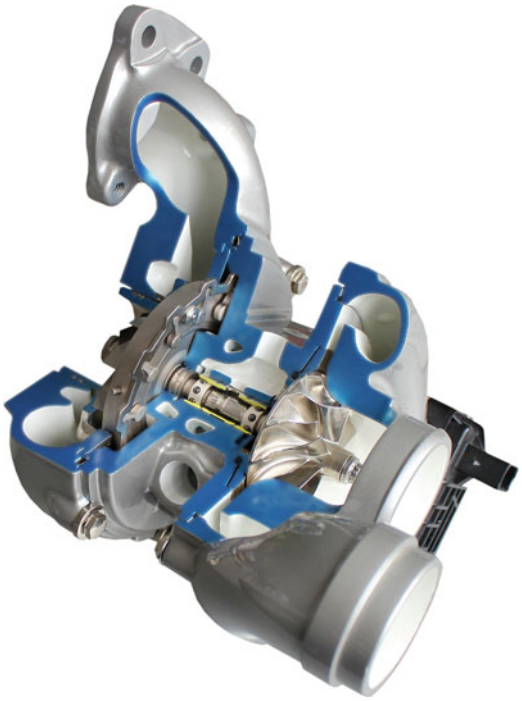


**Abb. 10.69** Erster wälzgelagerter Turbolader in Großserie

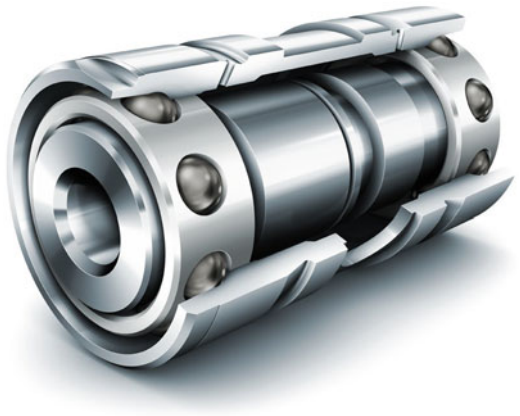
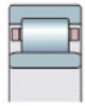
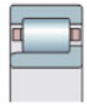
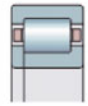


**Abb. 10.70** Wälzlager-Kartusche für Turbolader

#### 10.4.4.2 Radlager

Wurden bis vor etwa 50 Jahren für Radlagerungen von Personenwagen noch angestellte einreihige Kugellager oder Schrägkugellager verwendet, so kamen seit den 60er Jahren hauptsächlich zweireihige Schrägkugellager-Einheiten mit einem ungeteilten

**Tabelle 10.17** Kugellager, Kugelrollenlager, Zylinderrollenlager im direkten Vergleich

| Kriterien | Wälzlager | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Rillenkugellager DIN 625 | Zylinderrollenlager DIN 5412 | | |
| |  |  |  |  |
| | | NU, N | NJ | NUP |
| Radiale Belastbarkeit | + | +++ | +++ | +++ |
| Axiale Belastbarkeit | + | −− | ++ | + |
| Kombinierte Belastung | ++ | −− | − | ++ |
| Wechselnde axiale Belastung | + | −− | −− | ++ |
| Festlager | +++ | −− | + | +++ |
| Eignung für hohe Drehzahlen | +++ | − | − | − |
| Längenausdehnung im Lager | −− | +++ | − | −− |
| Längenausdehnung durch Schiebesitz | + | −− | −− | + |
| Reibungsverhalten | +++ | ++ | ++ | ++ |
| Schmierung (Fettraum) | ++ | ++ | ++ | ++ |

+++ sehr gut
++ gut
+ normal
− mit Einschränkung
−− nicht geeignet




**Abb. 10.71** Standardlager mit Kegelrollen

Außenring und ein bis zwei getrennten Innenringen zum Einsatz. Diese Baumuster müssen im Betrieb nicht mehr nachgestellt werden. Zugleich sind seither alle Einheiten mehr oder weniger fehlerfrei in der Handhabung, so dass ab der Endmontage eine deutlich höhere Betriebssicherheit erreicht wird, als in früheren Zeiten. Alle Bauformen seither sind in O-Anordnung ausgeführt, um eine möglichst große Stützbasis und damit hohe Steifigkeit gegen Seitenkräfte zu erzielen. Die folgende Übersicht wird außerdem von dem Trend geprägt, wonach immer mehr und immer stärkere Fahrzeuge mit Frontantrieb von den Bändern laufen, die zudem eine immer höhere Kippsicherheit des Lagers erfordern.

Es ist weitgehend überholt, von „dem Radlager" zu sprechen. Gebräuchlich sind heute insgesamt sechs Bauformen von Radlagern plus einer siebten Sonderform mit Stirnverzahnung am Ende dieses Kapitels. Alle Baumuster werden heute gleichzeitig und manchmal tatsächlich nebeneinander am gleichen Band verwendet.

Die höher integrierten Einheiten der aktuellsten Generationen mit Sensor-Technologie passen durchweg zu den Premium-Fahrzeugen der weltweiten Märkte, während die einfacheren Modelle in die Kleinwagen oder in solche Modelle gehen, welche vordergründig nach dem Muster der „Intelligent Simplicity" konstruiert wurden, etwa der Dacia Logan und der Tata Nano. Der folgende Abriss der sechs gängigen Baumuster soll helfen, ein wenig Klarheit in die Möglichkeiten der hohen Integration zu bringen.

Standard-Kegelrollenlager (Abb. 10.71) sind zerlegbar, Innenring und Außenring können getrennt eingebaut werden. Da Kegelrollenlager axiale Kräfte nur in einer Richtung aufnehmen können, ist ein zweites, spiegelbildlich angeordnetes Kegelrollenlager zur Gegenführung erforderlich. In dieser Eigenschaft sind sie mit den Schrägkugellagern vergleichbar, bieten dabei bei höherer Tragfähigkeit, jedoch geringer Drehzahleignung.

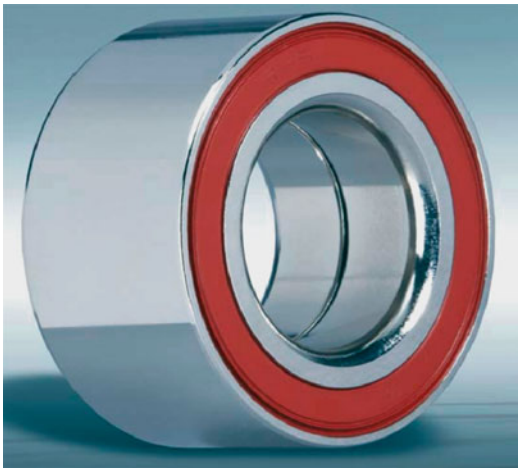


**Abb. 10.72** Radlager der 1. Generation für Pkw mit Schrägkugellager

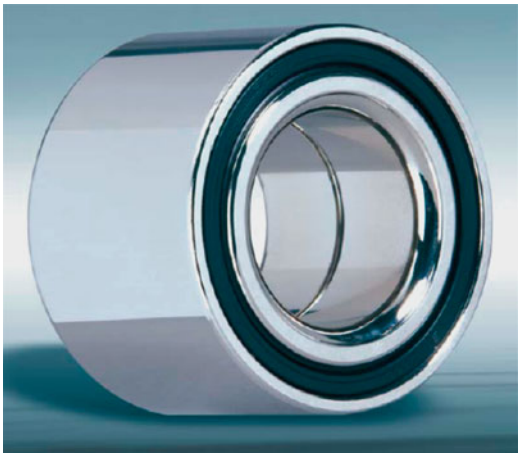


**Abb. 10.73** 1T Generation Pkw: Radlager mit Schrägkugellager

Radlager der 1. Generation sind kompakte Einheiten, die von FAG mit definierter und voreingestellter Lagerluft, „for-life"-Fettschmierung (wartungsfrei auf Lebenszeit = 250.000 km) und Abdichtung ausgestattet werden (Abb. 10.72). FAG hat für Vorderräder und Hinterräder in Pkw-Anwendungen Schrägkugellager mit hoher Momententragfähigkeit zur Abstützung der Seitenkräfte bei Kurvenfahrt entwickelt.

Radlager der sogenannten 1T Generation (Abb. 10.73) sind ebenso wie die Baumuster mit



**Abb. 10.74** Radlager der 2. Generation mit Schrägkugellager

Schrägkugellager sehr kompakte Lagereinheiten. Sie tragen aber anstatt Kugeln Kegelrollen als Wälzkörper. Diese Verwendung von Kegelrollen ermöglicht die Erträglichkeit hoher Achslasten bei gleichzeitig niedriger Seitenbeschleunigung. Unter Einbeziehung der Umgebung wurden hier auf Lebensdauer geschmierte Kegelrollenlagereinheiten ohne Wartungsbedarf mit definierter Lagervorspannung geschaffen.

Die Radlager der zweiten Generation (Abb. 10.74), die seit 1970 im Serieneinsatz laufen, verfügen über einen drehbaren Flansch zur Aufnahme von Bremsscheibe und Felge innerhalb des gemeinsamen Außenringes. Dies spart ein zusätzliches Bauteil pro Radführung ein und verringert die ungefederten Massen.

Gesichert wird so eine Radlagereinheit im Radträger generell mit einem Sicherungsring, der gleichzeitig den Lageraußenring axial verspannt.

Die Baumuster mit Schrägkugellagern der 3. Generation (Abb. 10.75) sind hochintegrierte Radlagereinheiten mit zwei getrennten Flanschen zur Führung von Bremsscheibe und Felge. Sie werden direkt am Radträger befestigt. Im Lager direkt integrierte Drehzahl-Encoder generieren die für die Fahrwerkssteuerung erforderlichen Signale für



**Abb. 10.75** Radlager der 3. Generation mit Schrägkugellager und Zweiflansch-Ausführung

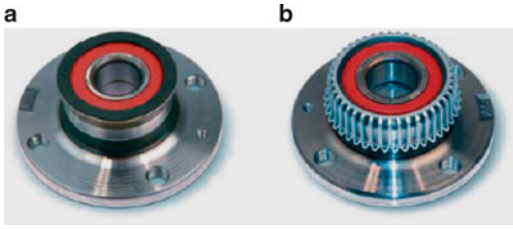



**Abb. 10.76** Technik mit dem integrierten ABS-Impulsgeberring – Radnabe mit ABS-Sensorlager (**a**) und mit konventionellem ABS-Sensorring (**b**)

ABS und ESP-System. Die Lagerklemmkraft wird hier mittels kaltwälzgenietetem Bund aufgebracht. Aus der Zweiflansch-Ausführung rührt ein deutlich vereinfachter Montageaufwand.

Im Fahrzeugbau kommen seit einiger Zeit vermehrt Radlager mit magnetischem ABS-Impulsgeberring (Abb. 10.76) zum Einsatz. Dieser übernimmt die Funktion des früher an Radnaben oder Antriebswellen angebrachten ABS-Sensorringes, der oft als Zahnscheibe ausgeführt war.

In den heute aktuellen Fällen wird ein Signal mit zur Raddrehzahl proportionaler Frequenz erzeugt, welches ein Eingangssignal für die ABS-/ESP-/ASR-Regeleinheiten darstellt. Bei passiven induktiven Sensoren ist die Amplitude des Sinussignals störempfindlich und zudem von der Geschwindigkeit abhängig. Deshalb eignen sich solche Systeme nicht für sicher definierte Regelungsschritte bis hinunter zum Stillstand des Fahrzeuges. Erst mit der Verwendung von aktiven Sensoren, die mit Hall-Differenz-ICs oder magnetoresistiv arbeiten, steht ein stabiles Ausgangssignal bis zu Tempo Null zur Verfügung. Neuere Baumuster besitzen zusätzliche Intelligenz durch Drehrichtungs-Erkennung und sogenannte Luftspaltreserven: Dadurch wird einsetzender Verschleiß am Sensorsystem frühzeitig erkannt. Die Überwachung der elementar wichtigen Systeme ABS oder ESP wird dadurch stark vereinfacht.

Früher wurde für die Montage von Antriebswellen stets die Verzahnung der Gelenkglocke an der Antriebswelle axial in das Radlager geschoben. Die Übertragung des Antriebsmoments erfolgt bei dieser Lösung über eine Längsverzahnung. Diese Montageart hat sich millionenfach bewährt, doch sie birgt auch eine Reihe von Nachteilen: Die recht massive, und damit schwere Konstruktion weist – um die Montage zu erleichtern – ein definiertes Spiel auf. Die übliche Belastung im Fahrbetrieb birgt das Risiko, dass sich der Verband über das Montagespiel hinaus lockert.

Das neue FAG-Radlagermodul mit Stirnverzahnung (Abb. 10.77) dagegen bietet den im Radlager auftretenden Kräften förmlich die Stirn: Für den Kraftschluss zwischen Radlagerträger und Antriebswelle sorgt nunmehr eine Stirnverzahnung. Diese neue Lösung besticht durch einfachste Montage, denn die selbst zentrierende Axial-Verzahnung wird einfach an die Gelenkglocke angelegt und mittels Zentralschraube fixiert. Die Montage erfordert – anders als das bisher notwendige Einschieben von Radialverzahnungen – keinen nennenswerten Kraftaufwand. Im Betrieb bleibt das Lager spielfrei fest und sicher in der Verzahnung; ganz gleich ob 1000 oder 100.000 km zurückgelegt werden. Der Gewichtsvorteil summiert sich an den vier Rädern leicht auf mehr als ein Kilogramm. Da diese Gewichtsersparnis die ungefederten Massen reduziert, kommt sie unmittelbar den Fahreigenschaften zugute. Das niedrigere Gewicht der rotatorischen Massen leistet darüber hinaus aber auch einen Beitrag zur Senkung von $CO_2$-Emissionen [166].



**Abb. 10.77** Neue Bauform der Radlager-Einheit mit Stirnverzahnung – Dieses Radlager ist mittels Stirnverzahnung mit der Gelenkglocke der Antriebswelle nicht mehr radial sondern axial verbunden. So lässt sich das Bauteil bei 10 % weniger Gewicht absolut spielfrei montieren und die Montagekosten am Band fallen deutlich günstiger aus



**Abb. 10.78** Getriebe mit trockener Doppelkupplung haben sich nach dem Zitat der Fachpresse als „die besseren Automatikgetriebe" etabliert und sind dabei, durch den sehr guten Systemwirkungsgrad einen wichtigen Beitrag zur $CO_2$-Reduzierung zu leisten

### 10.4.4.3 Beispiele für richtungweisende Technologien mit Wälzlagerung

#### 10.4.4.3.1 Doppelkupplungs-Systeme

Bedingt durch Bauraumrestriktionen und durch die Festlegung auf ein spezielles Aktorkonzept für die Kupplungs- und Getriebesteuerung, mussten zum Teil unterschiedliche trockene Doppelkupplungs-Anordnungen entwickelt werden (Abb. 10.78). Dies zeigt gleichzeitig, dass die modernen Kupplungstechnologien geeignete Lösungen für fast alle möglichen Anwendungen im Drehmomentbereich von 150–500 Nm bieten. Im Wesentlichen basierend auf intelligent angewandter Wälzlager-Technologie bewegt sich die Weiterentwicklung des Systems in zwei Richtungen. Zum einen werden speziell für kleine Fahrzeuge mit Drehmomenten von 120–180 Nm kompakte, trockene Doppelkupplungssysteme anwendungsreif. Zum anderen müssen in ähnlichen Bauräumen wie die der aktuellen Systeme noch höhere Drehmomente abgedeckt werden. Auch bei der Erweiterung der Antriebsstränge um Hybridfunktionen wie Stopp-Start, elektrisches Fahren sowie Rekuperation in Verbindung mit zusätzlichen Elektromotoren und geeigneten Batterien stellt das sogenannte „trockene DKG mit elektromechanischer Betätigung" eine ideale Ausgangsbasis dar [167].

#### 10.4.4.3.2 Ausgleichswellen mit direkter Wälzlagerung

Da die Kraftwirkung von Ausgleichswellen durch deren Unwucht erzeugt wird, handelt es sich hier um eine mit der Welle umlaufende Kraft: Ihre Wirkrichtung ändert sich bezüglich der Welle selbst nicht. Für das Wälzlager bedeutet dies, dass stets nur diejenigen Wälzkörper Kräfte von der Welle auf das Gehäuse übertragen, die sich gerade auf der Seite der Unwuchtmasse befinden (siehe Abb. 10.79 und Abb. 10.80). Die unbelasteten Wälzkörper in dem Bereich gegenüber der Unwucht werden bei hinreichend schneller Rotation der Welle aufgrund ihrer Fliehkräfte im Kontakt mit der Außenlaufbahn bleiben und haben im Kontakt zur Welle keine kraftübertragende Funktion. Damit ist die Wellenlaufbahn an dieser Stelle eigentlich überflüssig. Allein bei abgestelltem Motor oder aufgrund



**Abb. 10.79** In zwei der drei Lagerstellen laufen die Ausgleichswellen des Mercedes OM 651 direkt auf den geschmiedeten Lagerwangen. Der Gesamtwirkungsgrad des Ausgleichs-Systems wird so zu neuen Höhen geführt (Grafik: Mercedes-Benz)



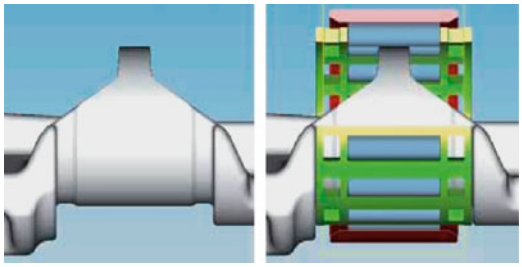


**Abb. 10.80** Eine teilweise Ausprägung der Lagerstellen als Lauffläche der Nadellager reduziert die rotierenden Massen und erhöhte die Effektivität des gesamten Ausgleichs-Systems

von Antriebseinflüssen pflegt eine kraftabstützende Funktion dieses Bereichs notwendig zu sein. Dann jedoch sind die auftretenden Kräfte so gering, dass eine deutlich reduzierte Laufbahnbreite ausreicht.

Dieser Effekt macht bei typischen Anwendungen für Vierzylinder-Motoren zwischen 20 und 40 % der ursprünglichen Masse für die Wuchtgewichte und damit bis zu einem Kilogramm pro Motor aus. Mit der Massenreduzierung der Ausgleichswellen reduziert sich das Massenträgheitsmoment. So ergeben sich im Antriebsstrang geringere Antriebsmomente, die entlastend wirken und zu weniger akustischen Anregungen führen: Weniger Masse läuft leiser.

Ein zusätzlicher Vorteil dieses Prinzips liegt darin, dass durch die schmale Laufbahn der Ölnebel aus dem Motorraum unmittelbar in das Wälzlager gelangt. Damit ist die Schmierung sichergestellt [168, 169].

#### 10.4.4.3.3 Kugelgewinde-Antrieb

Kennzeichnend für die stürmische Entwicklung der Antriebs-Systeme ist das Kapitel der Lenkungen: Zunächst wurden praktisch alle Lenksysteme mit elektrischer anstatt hydraulischer Unterstützung von der Fachpresse überaus negativ beurteilt. Erst mit der Einführung von Kugelgewinde-Antrieben (Abb. 10.81) für die Vermittlung von mechanischen und elektrischen Lenkmomenten und weiteren Maßnahmen stieg die sogenannte Rückmeldung auf ein akzeptables Maß, welches seitens der Fachpresse auch in anspruchsvollen Vergleichen zu den etablierten Systemen als akzeptabel bewertet wurde. Damit waren die Wege zur weiteren Verbreitung offen: Im Fokus steht primär die Entwicklung neuer Lenkungs- und Fahrwerksfunktionen, für die es bislang noch gar keinen Markt gegeben hat: Wank-Stabilisierung, Niveauregulierung, Hinterradlenkung, Radantrieb für E-Mobilität sowie Radkraft-Messung [166].

#### 10.4.4.3.4 CVT-Getriebe

Ein breites Feld der Entwicklung für Wälzlagertechnik bietet das CVT-Getriebe, dessen Technik umfangreiche Aufgaben für die Wälzlagertechnik bereitstellt. Die Tendenz steht heute schon fest: Künftig werden auch die Märkte in Indien und China optimierte Effizienz und Verbrauchs-Reduzierung höhere Bedeutung zumessen. Für diese Märkte wurde das High Value CVT als Konzept entwickelt (Abb. 10.82). Das Getriebekonzept muss hier mit Rücksicht auf die Bandbreite zulässiger Fahrzeuggewichte eine leichte Anpassung der Achsübersetzung ermöglichen. Speziell in Sachen Wirkungsgrad lässt sich das CVT gezielt weiterentwickeln. Gegenüber Handschaltgetrieben sind weitere Einsparungen von mehr als 5 % in Aussicht. Für alle Arten von Antriebssträngen werden Komponenten mit einer hohen Leistungsdichte für reduzierte



**Abb. 10.81** Ursprünglich ein Getriebe aus der Luftfahrt-Technik, gewinnen Kugelgewinde immer mehr Anwendungen im Fahrzeugbau

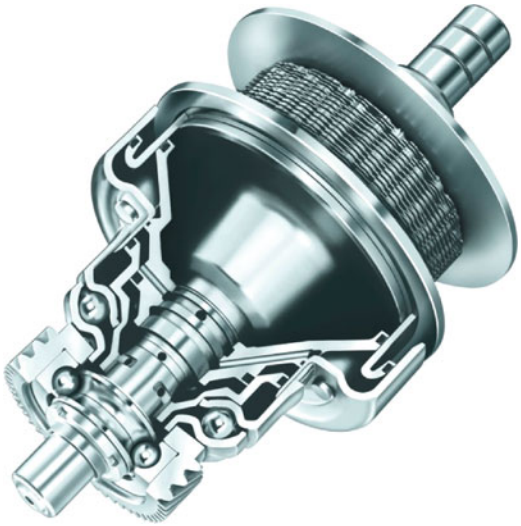


**Abb. 10.82** CVT-Getriebe als Einsatz komplexer Wälzlagertechnik

Bauräume immer wichtiger. Gleichzeitig sind Gegensätze wie Preissensibilität und Zuverlässigkeit zu berücksichtigen. Am Beispiel des High Value CVT zeigt sich, dass die konsequente Weiterentwicklung der Bauteile diesen Forderungen entspricht.

#### 10.4.4.3.5 Leichtbau-Differenzial

Ein neues und besonders vielschichtiges Einsatzgebiet für Rollenlager breitet sich bei der neuen Bauweise für Differentialgetriebe aus: Obwohl noch nicht allgemein eingeführt, zeigen alle vorliegenden Erkenntnisse, dass das Stirnrad-Differenzial bereits heute ein enormes Potenzial gegenüber dem Kegelrad-Differenzial besitzt. Das gilt auch gegenüber verschiedener bewährter Torsen-Konzepte, die bisher wegen ihrer selbstregulierenden Sperrwirkung recht beliebt waren. Das neu entwickelte Stirnrad-Differenzial mit Geradverzahnung zielt durch eine hohe Anzahl von Gleichteilen auf kleinere Stückzahlen und bietet doch gleichzeitig den konventionellen Funktionsumfang des Kegelrad-Differenzials. Das schrägverzahnte Stirnrad-Differenzial (siehe Abb. 10.83) zielt dagegen aufgrund unterschiedlicher Planeten-, Sonnenräder und auch Gehäusehälften sowie der spanlosen Fertigungstechnologie für die Radträger-Elemente auf hohe Stückzahlen.

Gegenüber einem Kegelrad-Differenzial benötigt das Stirnrad-Differenzial deutlich weniger Bauraum und ermöglicht zudem manche Zusatzfunktionen, die bisher nicht in Getrieben in Front-Quer-Anordnung vorgesehen werden konnten. So sind Entwicklungen für zuschaltbare Hinterachs-Abtriebe sowie integrierte Verteiler-Differenziale bereits im Gange. Vor allem stellt das Stirnrad-Differenzial eine fruchtbare Basis für elektrische Achsen dar, wo Addition und Subtraktion von Drehmoment zum ständigen Arbeitsumfang gehört. Auch weil die Stirnrad-Differenziale kleiner und kompakter ausfallen als Einheiten mit Kegelrad, werden sie in den Kompaktfahrzeugen der Zukunft den Trend zu optimiertem Verbrauch optimieren helfen [173].

#### 10.4.4.3.6 Hybridantriebe

Eine besonders aktuelle Entwicklung mit hoch integrierter Wälzlagertechnik sind die modernen Vollhybridantriebe. Durch die erweiterte Funktionalität sowie die Nutzung des Downsizing beim Verbrennungsmotor können heute Verbrauchseinsparungen bis zu ca. 25 % realisiert werden.

Ein Vollhybridsystem mit LuK-Komponenten ist bei Porsche und VW bereits seit 2010 in Serie gegangen (Abb. 10.84). Basis für die Anwendung bildet bei Porsche ein Dreiliter-V6 mit 440 N m abgebendem Kompressor-Benzinmotor in Verbindung mit einem Achtgang-Automatikgetriebe. Für die Er-

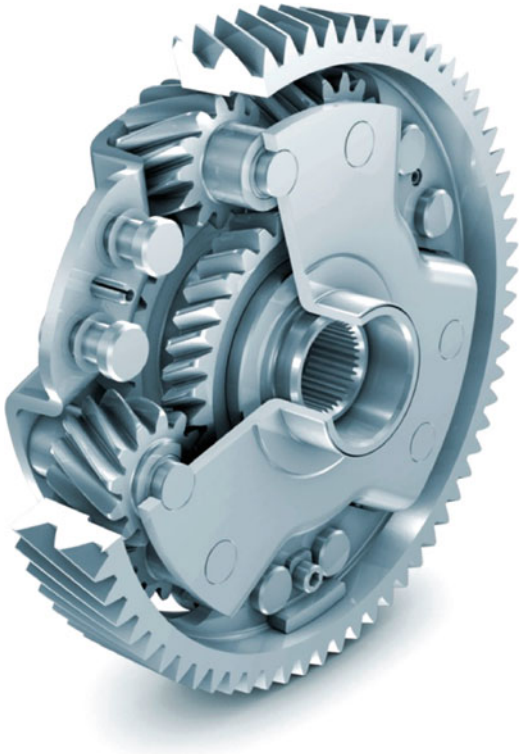


**Abb. 10.83** Leichtbau-Differenzial in Stirnrad-Bauweise

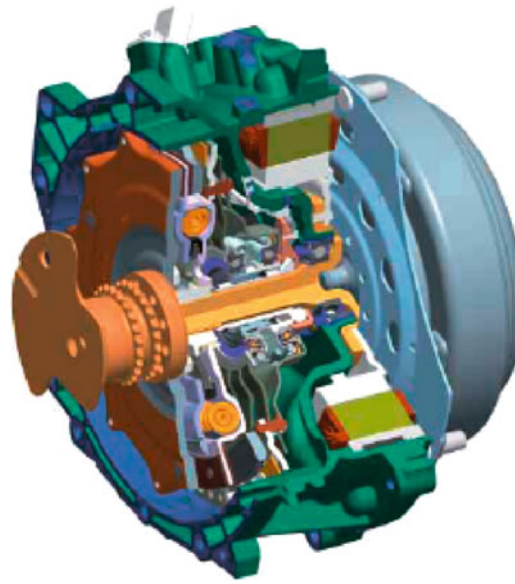


**Abb. 10.84** Hybridantriebe stellen neue Anforderungen an die Technologie der fliegend ausgeführten Rollenlagerung. P2-Hybridmodul des VW Touareg Hybrid



weiterung zum Hybrid wird zwischen Kurbelwelle und Drehmomentwandler eine Einheit, bestehend aus einer elektrischen Maschine mit einer Leistung von ca. 34 kW und der Trennkupplung, integriert. Diese Kupplung ermöglicht die vollständige Hybridfunktionalität wie das Abkoppeln des Verbrennungsmotors im Schub, die Stopp-Start Funktion sowie das rein elektrische Fahren.

Die kritischsten Fahrsituationen für die Akzeptanz des Gesamtkonzepts bietet der Wiederstart des Verbrennungsmotors nach Rollbetrieb im Freilauf – welche immerhin bis zu 150 km/h möglich ist – oder nach elektrischer Fahrt im unteren Geschwindigkeitsbereich. Der Startablauf definiert wichtige Anforderungen für die Trennkupplung. Zunächst wird nach dem Startbefehl die Kupplung mit hoher Dynamik auf das zum „Anschleppen" des Verbrennungsmotors notwendige Drehmoment von ca. 100 N m gesteuert. Hieraus resultiert die Anforderung einer hohen Schließdynamik bei gleichzeitig guter Regelbarkeit der Kupplung in diesem Drehmomentbereich.

Weiterhin muss das Massenträgheitsmoment der Kupplungskomponenten möglichst weitgehend reduziert werden, um den Leistungsaufwand zum Beschleunigen der Kurbelwelle vor dem möglichst ruckfreien Einkuppeln zu minimieren. Der erreichte Wert liegt für den oben beschriebenen Antrieb mit weniger als 0,1 kg m$^2$ (Summe für Schwungrad plus Kupplung) auf gleicher Höhe wie auf der Primärseite aktueller Serienkupplungen mit Zweimassen-Schwungradsystem [167].

#### 10.4.4.3.7 Wälzlagerung des Kurbeltriebs im Verbrennungsmotor

Rollenlager im Motorenbau waren früher schon einmal an der Tagesordnung: Kolbenmotoren für Flugzeuge der 40er Jahre vertrauten ebenso auf diese Bauart wie Zweitaktmotoren für Autos und Motorräder (BMW, DKW, Wartburg, Yamaha). Neu ist das Motiv, den Verbrennungsmotor mittels Wälzlager-Technologie zu besserer Effektivität zu verhelfen. Die folgenden Ausführungen stammen

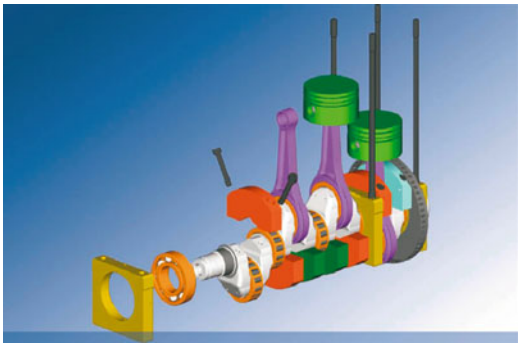


**Abb. 10.85** Versuchsmotor mit Rollenlagerung der Kurbelwelle (Quelle: FEV Motorentechnik GmbH, Aachen)

aus einem Forschungsbericht des FEV-Forschungsinstitutes für Motorentechnik in Aachen. Abb. 10.85 zeigt einen Wälzlager-Demonstrator der ersten Generation.

Den technischen Vorteilen steht ein Mehraufwand in der Produktion gegenüber. Während Fertigung und Montage eines früheren Motors mit gegossener Kurbelwelle und teilbaren Pleuel-Fußlagern weitgehend dem heutigen Standard entsprach, ergeben sich für das optimierte Motorkonzept einige wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Vormontage des Kurbeltriebes und beim Zusammenbau des Bottom-ends. So müssen etwa die einteiligen Pleuel auf die Welle gefädelt werden, bevor die Gegengewichte der Kurbelwelle einzeln aufgeschraubt werden können. In Summe ergeben sich für den Wälzlagermotor der Vorversuchs-Generation etwa 70 € Mehraufwand. Dies entspricht bei einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs in der Größenordnung von 5 % Kosten von 10 bis 14 € je eingespartes Prozent Kraftstoff (Stand 2011).

### 10.4.5 Schmierung und Schmierstoffe für Wälzlager

Allein aus dem Einsatzgebiet eines Kraftfahrzeuges ergibt sich ein gewaltiges Spektrum an Betriebszuständen für jedes Wälzlager an Bord. Temperaturbereiche von minus 40 °C bis plus 200 °C sind an der Tagesordnung. Die höchsten Temperaturen (> 200 °C) ergeben sich durch die stetig wachsende Belastung der Bremsanlagen für die Radlager. Selbstverständlich soll die Schmierung über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs aufrecht erhalten werden. Das Austauschen von Lagern ist unpopulär und wird in Dauertests der einschlägigen Fachpresse über 100.000 km überwacht und im Schadensfall überaus negativ kommentiert.

Das Einfachste vorweg: Auch während der Stillstandszeiten eines Lagers darf sich keine Korrosion bilden. Schon schwieriger: Winterbetrieb mit der gesamten Kondenswasser-Problematik, sowie Schlechtwegestrecke – auch bei intensiv genutzten Geländewagen – müssen selbst für hochbelastete Radlager mit ausschließlicher Fettschmierung kalkuliert verträglich ausfallen. Wälzlager im Getriebe verfügen im Gegensatz dazu wohl über eine definierte Ölnebelschmierung, sind aber dadurch noch nicht allein im Vorteil: Der Trend, immer höhere Betriebsdrehmomente von hoch aufgeladenen Dieselmotoren über immer kleinere Zahnräder zu führen, fordert die Kunst der Tribologen hinsichtlich Additivschmierung immer wieder in den Grenzbereich. Die Wälzlager müssen sich hier gelegentlich mit dem zufriedengeben, was der Getriebe-Verzahnung gut tut, und Widersprüche sind mitunter fast unüberwindbar. Daher macht eine gesonderte Betrachtung der Wälzlager-Schmierung besonderen Sinn, schon um Ausfälle zu vermeiden.

Die isolierte Betrachtung aller im Wälzlager auftretenden Funktionsflächen wird in Abb. 10.86 systematisch dargestellt. Es gilt, auch unter Last möglichst jeden Metallkontakt zu vermeiden und es kommt daher bei der Lager-Auslegung im Wesentlichen darauf an, alle vorhandenen Funktionsflächen durch einen ausreichend dicken Schmierfilm erfolgreich auf Abstand zu halten – oder durch eine physikalisch-chemische oder rein chemische Trennschicht zu separieren.

Die meisten Lager werden fettgeschmiert. Damit muss die Tendenz zu steigenden Anforderungen im Lagerbereich – etwa für Radlager, die unter Einfluss von immer stabileren mechanischen Koppelungen der Bremsaggregate stehen (siehe ▶ Abschn. 10.4.4.2) sowie durch steigende Leistungsfähigkeit der Bremsanlagen – sorgsam ausbalanciert werden. Hier hilft nur die passende Auswahl von

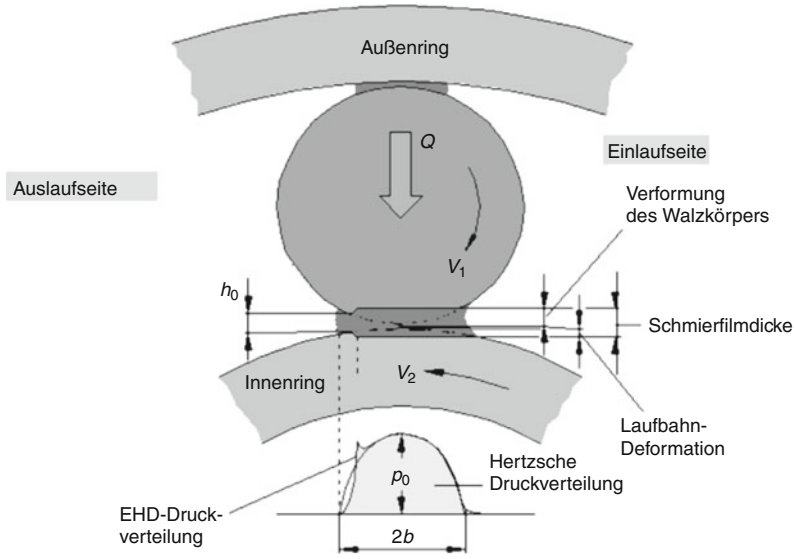



**Abb. 10.86** Elastohydrodynamische Grundlagen bezüglich Druckverteilung und Tribologie im Wälzlager



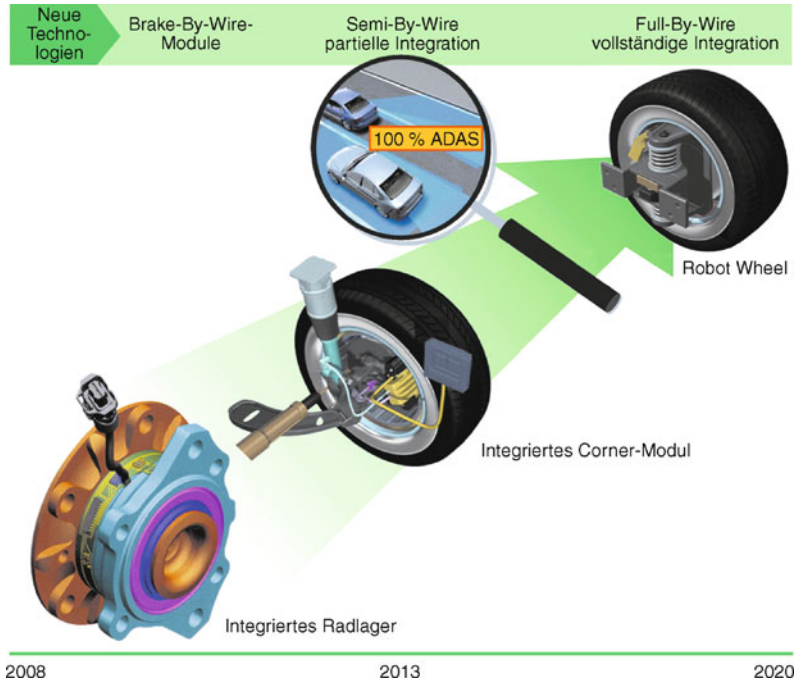



**Abb. 10.87** Höhere Integration von Aufgaben und Funktionen bei der Entwicklung des rollenden Rades hin zum sogenannten Robot-Wheel: Auch für die Wälzlager-Schmierung muss mit immer höheren Aufgaben gerechnet werden

geeignetem Schmierfett, damit die höheren Beanspruchungen auch im Hinblick auf steigende Betriebstemperaturen austariert werden können.

Zugleich gilt es, auch im Zusammenhang mit besserer Geräuschisolierung auf der Antriebsseite und mit thermisch entkoppelten Motorräumen, die kühlenden Fahrtwind nur noch dann einlassen, wenn das Kühlsystem dies erfordert, auf immer höhere thermische Lager-Belastung vorbereitet zu sein.

Bisher werden die Anforderungen bezüglich der unzureichenden physikalischen Trennung der Kontaktflächen im Lagerkörper durch speziell „eingestellte" Eigenschaften der Schmierfett-Qualitäten und deren „Verdicker" ausbalanciert. Grundsätzlich gilt in immer stärkerem Maße, dass jede Lagerstelle einer gesonderten Analyse bedarf, und in immer mehr Fällen auch einer speziellen Lösung.

Die Wälzlager-Hersteller haben in letzter Zeit besondere Prüfmethoden entwickelt, um Lager plus Schmierstoffe in besonderen Auslegungs- und Prüfzyklen auf ihre gesonderte Verwendung konstruktiv einzustellen. Im Zusammenhang mit innovativen Konzepten wie Doppelkupplungs-Systemen, Zweimassen-Schwungrädern mit und ohne Fliehkraft-Tilgern sowie Radnaben-Motoren für elektrische Antriebelemente, z. B. ◘ Abb. 10.87 kommt der dosierten Pflege der Spezialanfertigungen im Wälzlagerbereich eine gehobene Rolle zu. Die beinahe unglaubliche Vielfalt der immer spezieller veranlagten Belastungsprofile lässt diesen Bereichen auch für die Zukunft eine ganz besondere Rolle zukommen [170].

## Literatur

**Literatur zu Abschn. 10.1**

1. Bott, H.: Fortschritte im Automobilbau am Beispiel der Rennwagentechnik. 100 Jahre Automobil. VDI-Berichte. Bd. 595. VDI-Verlag, Düsseldorf (1986)
2. Hediger, F., v. Fersen, H.-H., Sedgwick, M.: Klassische Wagen: 1919–1939. Hallwag AG, Bern und Stuttgart (1988)
3. Gloor, R.: Nachkriegswagen: 1945–1960. Personenautos. Hallwag AG, Bern und Stuttgart (1980)
4. Gloor, R.: Personenwagen der 60er-Jahre. Hallwag AG, Bern und Stuttgart (1984)
5. Werkstoffe im Automobil. ATZextra **1** (2007)
6. Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Gesellschaft 2002–2011, Kunststofftechnik

**Literatur zu Abschn. 10.2**

7. Balelaar, I.D.: ELV treatment in the Netherlands. 10th International Conference, Florence ATA, 2007
8. Lüdke, B.: Funktionaler Rohkarosserie-Leichtbau – Von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an die Rohkarosseriewerkstoffe. In: VDI/FVT Jahrbuch 2001, Fahrzeug- und Verkehrstechnik, S. 90. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
9. N.N.: http://www.project-i.com
10. Gotzmann, G.: Hybridtechnologie für den Automobil-Leichtbau. mobiles, Fachzeitschrift für Konstukteure **28**, 92f. (2002/2003)
11. Steinhauser, D.: Der Porsche Carrera GT – ein innovatives Fahrzeugkonzept. mobiles, Fachzeitschrift für Konstrukteure **30**, 6ff. (2004/2005)
12. Friedrich, H.E.: Leichtbautechnologien im Pkw – die Konkurrenz von Werkstoffen und Bauweisen nimmt zu. 5. Euroforum-Werkstofftagung für die Automobilindustrie, Bonn, 17./18. Februar 1997
13. Adam, H., Osburg, B., Ramm, St.: Die Zukunft der Stahlkarosserie – Evolution und Revolution. mobiles, Fachzeitschrift für Konstukteure **28**, 16ff. (2002/2003)
14. Bleck, W.: TRIP-Stähle – Eine neue Klasse hochfester, kaltumformbarer Stähle. In: 30 Jahre Forschung für die Stahlanwendung. S. 18. Studiengesellschaft Stahlanwendung, Düsseldorf (1998)
15. Thyssen Krupp Stahl AG: Warmband. Qualität in großer Bandbreite. Duisburg. http://www.thyssen-krupp-stahl.com (2002)
16. DIN EN 10346 Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl. Technische Lieferbedingungen, Ausgabe Juli 2009
17. Winkel, J.: Die Gesamtbilanz zählt beim Presshärten. Blech InForm, Varl. Hanser, München (2006)
18. Lenze: Herstellung von Karosseriebauteilen aus warmgeformten höchstfesten Stahlwerkstoffen. Präsentation der ThyssenKrupp Steel, Erlangen 2006
19. Geiger, M., Merklein, M.: Berichts- u. Industriekolloquium der DFG-Forschergruppe FOR 552. 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2006
20. Goppelt: Gusseisen mit ausgezeichneten Materialeigenschaften für Leichtbau. ATZ/MTZ **11**(Sonderausgabe Werkstoffe im Automobilbau), 107 (2005)
21. Radebach: Moderne Gusseisen Werkstoffe für leichte und effiziente Downsizing Motoren. MTZ **2**, 70 (2009)
22. Konstruieren + Gießen **3**, 22 (1997)
23. Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen. Gießerei Praxis **3/4**, 71 (1996)
24. DIN EN 1706, Ausg. Juni 2010: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften
25. Hielscher, U., Sternau, H., Koch, H., Franke, AJ.: Duktile Druckgusslegierung mit geringem Eisengehalt. Gießerei **82**(15), 517–523 (1995)
26. Hielscher, U., et al.: Gießerbrief **5**, 1 (1997)

27. Fa. Rheinfelden: Verarbeitungsmerkblatt Silafont-36
28. Miller, F.: Leichtbau. Fraunhofer Magazin **4**, 8 (2002). Fraunhofer-Gesellschaft, München, http://www.fraunhofer.de/magazin
29. Hausberg, K., Götzinger, B., Friesenbichler, T.: Entwicklung eines Stoßfängerquerträgers mit Crashboxen aus Magnesium. mobiles, Fachzeitschrift für Konstrukteure **28**, 58 (2002)
30. Friedrich, H.E.: Leichtbau und Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **3**, 258 (2002)
31. Steinhauser, D.: Der Porsche Carrera GT – ein innovatives Fahrzeugkonzept. mobiles, Fachzeitschrift für Konstrukteure **30**, 6ff (2004/2005)
32. Innovativer Werkstoffleichtbau in der Rohkarosserie. ATZ/MTZ **11** (Sonderausgabe Der neue BMW 7er), 110 (2008)
33. Eigenschaften und Verarbeitung hochfester Aluminiumbleche. ATZ/MTZ **1** (Sonderausgabe Werkstoffe im Automobilbau), 68 (2007)
34. Hielscher, U., Sternau, H., Koch, H., Klos, R.: Neuentwickelte Druckgusslegierung mit ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften im Gusszustand. Gießerei **85**(3), 62–65 (1998)
35. Enß, J., Evertz, T., Reier, T., Juchmann, P., Schumann, S., Sebastian, W.: Neue Magnesium-Blechprodukte für den Automobilbau. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **02**, 142–145 (2001)
36. Engl, B., Nguyen, D.C.: Erweiterte Anwendungspotenziale für Magnesiumbleche durch eine neue Herstellungstechnologie. In: Wendler-Kalsch, E. (Hrsg.) Zukunftsorientierter Einsatz von Magnesium im Verkehrswesen. S. 34. expert Verlag
37. Vollrath, K.: Magnesiumbleche werden billiger. ke **05**, 46 (2005)
38. Volkswagen Group Research: Multi-material lightweight vehicle structure. Status Final SLC-Body Concept, May 2008, S. 4. http://www.superlightcar.com/public/index.php?option=com_content&task=view&id=28&Itemid=107
39. Grund, S.: Werkstoff Zink im Automobilbau. ATZ/MTZ (Sonderausgabe) (2006)
40. N.N.: Zinkdruckguss für höchste Ansprüche: Initiative Zink kürt Preisträger. Druckguss **03**, (2010)
41. Vollrath, K.: Automobil: Metalldesign für echtes Premium-Feeling. Druckgusspraxis **4** (2006)
42. Banhart, J., Baumeister, J., Weber, M.: Metallschaum – ein Werkstoff mit Perspektiven. ALUMINIUM **70**, 209 (1994)
43. Aluminiumschäume – Konstruktionswerkstoffe mit großem Potential. ALUMINIUM **73**, 336–339 (1997)
44. Banhart, J., Baumeister, J., Weber, M., Melzer, A.: Aluminiumschaum – Entwicklungen und Anwendungsmöglichkeiten. Ingenieur Werkstoffe **7**, 43–45 (1998)
45. Baumeister, J.: Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen. In: Banhart, J. (Hrsg.) Metallschäume, Beiträge zum Symposium Metallschäume, S. 10, Bremen, 6./7. März 1997. MIT-Verlag (1997)
46. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.: Entwicklung von Technologien zur Herstellung von Stahlschäumen (Projekt 431), Berichte aus der Anwendungsforschung, Ausgabe 2/2003, Düsseldorf (November 2003). http://www.stahl-online.de/stahlforschung/1/Aktuelles/Aktuelles.htm
47. Singer, R.F.: Visionen in Metall – leichter, fester, billiger. Beiträge zum Symposium Material Innovativ, 10. März 2005, Nürnberg
48. Repenning: Titan – ein Werkstoff für tribologische Beanspruchungen. Ingenieur Werkstoffe **2**, 14 (1998)
49. Knippscheer, Frommeyer: Intermetallische Leichtbaulegierungen für Motorkomponenten. Ingenieur-Werkstoffe **3**, 32 (1998)
50. Stahl-Informations-Zentrum: Plattierte Werkstoffe – Clever kombinieren macht Stahl leistungsfähiger. http://www.stahl-info.de/aktuelles/pm_plattierte_werkstoffe.htm
51. Friedrich, H.E.: Leichtbau und Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau. ATZ **3**, 258 (2002)
52. Kopp, G., Kuppinger, J., Friedrich, H.E.: DLR, Stuttgart, Fraunhofer Inst. f. Chemische Technologie, Pfinztal: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau. Automobiltech. Z **4**, 111 (2009)
53. Loesch, Giese, Goeckl, Kleinschmidt, O.: ThyssenKrupp, Duisburg: Motorhaube aus steifigkeitsoptimiertem Sandwichwerkstoff. Automobiltech. Z. **11**(Extra Das InCar Projekt von ThyssenKrup), 111 (2009)
54. Beck, G.: Edelmetall-Taschenbuch, 3. Aufl. Degussa AG, Giesel (2001)
55. Mayer, C.: Wirtschaftliche Herstellung von textilverstärkten thermoplastischen Halbzeugen. 28. Internationale AVK-Tagung, 01./02. Oktober 1997. AVK, Frankfurt, S. 3 (1997)
56. Neitzel, M., et al.: Gewebeverstärkte Thermoplaste im Karosseriebau. Autohausspezial **14/15**, 113 (1996)
57. Ostgathe, M., et al.: Organobleche aus Thermoplastpulver. Kunststoffe **1838** (1996)
58. Breuer, U., Ostgathe, M.: Halbzeug- und Bauteilherstellung – Umformverfahren-, Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. expert Verlag, S. 108 (1997)
59. Bürkle, E.: Status quo in der PP-Spritzgießverarbeitung, Fortschritte mit Polypropylen im Kfz-Bereich. Tagung 17./18. Juni 1998, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg
60. Fa. Sutter Kunststoffe AG: Info-Material. http://www.swiss-composite.ch
61. AVK Industrievereinigung: Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung, 3. vollst. überarb. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)

62. AVK Industrievereinigung: Faserverstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010)
63. Hailer, R., Sedlmaier, H., Lohse, H., Schumacher, R.: CFK-Dach M3 CSL Leichtbaustrategie dank Klebtechnik. Adhäsion **48** (2004)
64. Jäger, H., Hauke, T.: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe. Verlag moderne Industrie (2010)
65. Raue, F.: Elastomere vs. TPE. Kunststoffe **12**, 2279–2283 (1998)
66. Stauber, R., BMW: Kunststoffe im Automobilbau: technische Lösungen und Trends. Automobiltech. Z **3**, 109 (2007)
67. Die Branche hat verstanden – Elastomere. Kunststoffe **1**, (2008)
68. Eissler, E., et al.: Einsatz textiler Materialien bei der Mercedes-Benz S-Klasse, Textilien im Automobilbau. VDI-Kongress, S. 18–40, 30./31. Oktober 1991. VDI-Gesellschaft Textil und Bekleidung, Düsseldorf (1991)
69. Francke, G.: Leder – ein klassischer Interieurwerkstoff, Kunststoffe im Automobilbau, S. 337–349. Tagung Mannheim, 25/26. März 1998. VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
70. ORMOCERe für Lederzurichtung, Handout am Ausstellerstand vom Fraunhofer Instituts Silicatforschung (ISC), Würzburg. Symposium Material Innovativ, Nürnberg, 10. März 2005
71. Assmann, K.: Automobilverscheibung – sicherer Durchblick mit Polycarbonat. Kunststoffe **10**, 366–368 (1996)
72. Dauerhaft geschützt – Kratzfestlackierungen von Platten und Fertigteilen. Kunststoffe **8**, 1111–1112 (1996)
73. Assmann, K.: Leichte Scheibensysteme für Automobile. VDI-Z Spezial Ingenieurwerkstoffe (1995)
74. Lehner, E., Aengenheyster, G.: Automobil-Verscheibung aus Polycarbonat – Anforderungen der Automobilindustrie und Lösungen. Beitrag zum Internationalen Kongress „Kunststoffe im Automobilbau", VDI Kunststofftechnik, Mannheim, 9./10. März 2005
75. http://www.webasto.com/press/de/3023_5139.html
76. Vollertsen, F., Haberdank, G., Partes, K.: Maßgeschneiderte Tribologie durch Laseroberflächenbehandlung. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 1. Aufl. Wiley-VCH, Zürich (2008)
77. Czichos, H., Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011)
78. Deters, L., Fischer, A, Santner, E., Stolz, U.: Tribologie. GfT Arbeitsblatt 7, Gesellschaft für Tribologie, Aachen
79. Köhler, E., Lenke, I., Niehues, J.: LOKASIL – eine bewährte Technologie für Hochleistungsmotoren – im Vergleich mit anderen Konzepten. VDI-Bericht, Bd. 1612, S. 35–54. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
80. Eibisch, H., Hartmann, M., Singer, R.F.: Herstellung und Eigenschaften von Kohlenstofflangfaserverstärktem Magnesium im Druckguss, Tagungsband, S. 142–151. Ranshofener Leichtmetalltage, 23.–25. Juni 2004
81. Hoenen, W.: Technische Keramik im Fahrzeugbau, Einzigartige Eigenschaften. Sonderdruck. Automotive Materials **01**, 12–18 (2007)
82. Martin, R.: Neue Werkstoffe für Bremsscheiben. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **12**, 1086 (2000)
83. Renz, R., Seifert, G.: Keramische Hochleistungsbremsscheiben im Sportwagenbereich. DVM-Tag Reifen, Räder, Naben, Bremsen, Berlin, 09.–11. Mai 2007. DVM-Bericht **674**, 85–94 (2007)
84. Kohlenstofflangfaserverstärkte Magnesium-Werkstoffe. Handout am Ausstellerstand von Neue Materialien Fürth GmbH. Symposium Material Innovativ, Nürnberg, 10. März 2005 http://www.nmfgmbh.deh
85. Becker, C.: Klein, stark, schwarz, Christophorus 306
86. Kleber, Bautsch, von Oldenburg, B.: Einführung in die Kristallographie. Verlag Technik (1998)
87. Nientiedt, M.: Piezokeramiken – High Tech im Alltag. Beitrag der Frühjahrstagung Didaktik der Physik, Leipzig, 2002
88. Simon, H., Thoma, M.: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe, 2. Aufl. Hanser, München (1989)
89. Hoch, H.: Tampon-Galvanisieren. Handbuch der Galvanotechnik, Bd. II, Abschnitt 20.1. Hanser, München (1966)
90. Koeppen, H.-J., Laudien, G.: Bewertung von Oberflächenschutzsystemen für Schrauben. Jot **9**, 74–81 (1998)
91. Boss, M.: Wasserstoffversprödung: Verstehen der Ursachen ermöglicht Gegenmaßnahmen. Metalloberfläche **47**, 24–27 (1993)
92. Verfahren mit Zukunft: Chemisch vernickeln. Oberfläche + Jot **10**, 16–21 (1982)
93. Hibben, M., Blecher, A.: Oberflächenbehandlung von Aluminium-Karosserieblechen. Neue Werkstoffe im Automobilbau. Tagung Wolfsburg 30.11./01.12.1995. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 127 (1995)
94. Posch, T., Christiansen, T.: Untersuchung der Einflussparameter beim Laserlöten. 4. BIAS-Anwenderforum, Bremen, 2002
95. Budde, L., Pilgrim, R.: Stanznieten und Durchsetzfügen. Verlag Moderne Industrie (1995)
96. Budde, L., Bold, M., Hahn, O.: Grundsatzuntersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Durchsetzfügeverbindungen aus Stahl. FAT Schriftenreihe, Bd. 89. Frankfurt (1991)
97. Hahn, O., Gieske, D.: Ermittlung fertigungstechnischer und konstruktiver Einflüsse auf die ertragbaren Schnittkräfte an Durchsetzfügeelementen. FAT Schriftenreihe, Bd. 116. Frankfurt (1995)
98. Böllhoff Systemtechnik GmbH & Co. KG: Stanznieten im Karosserieleichtbau. mobiles, Fachzeitschrift für Konstrukteure **27**, 61ff (2001/2002)
99. Bangel, M., Hornbostel, N.: Die Karosserie des neuen Audi TT – Intelligenter Mischbau erfordert innovative Fügeverfahren. 13. Paderborner Symposium Fügetechnik, S. 181–188, 2006

100. Merkblatt DVS/EFB 3440-4, Funktionselemente Loch- und gewindeformende Schrauben, Juli 2006
101. Jost, R.: Punktschweißkleben in der Serienfertigung. In: 6. Paderborner Symposium Fügetechnik, S. 106–112. Druckerei Reike, Paderborn (1998)
102. Hennemann, O.D.: Fügetechniken – Basis für den modernen Leichtbau. In: Neue Werkstoffe im Automobilbau. VDI-Bericht, S. 71–79. VDI-Verlag, Düsseldorf (1235)
103. Bischoff, J.: Fügetechniken im Vergleich. Adhäsion, Kleben **4**, 10–16 (1994)
104. Kötting, G.: Klebetechnik fördert Leichtbau. Automobil-Produktion , 08–110 (1998)
105. Wuich, W.: Metallklebverbindungen mit Kunststoffklebern. Kunststoffberater **7/8**, 27–30 (1984)
106. Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen, S. 308–313. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1986)
107. Peters, N., Nunge, S., Geldermann, J., Rentz, O.: Klebstoffverarbeitung. Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BTV) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland, Bd. 2. Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe (TH) (2002)
108. Lichtenberg, S.: Möglichkeiten und Grenzen des Umformens von Stahlwerkstoffen mit hydraulischen Wirkmedien. Studiengesellschaft Stahlanwendung (1996)
109. Schuler: Handbuch der Umformtechnik, S. 431. Springer (1996)
110. Käsmacher, H.: Innenhochdruckumformen – eine Alternative in der Fertigungstechnik. EFB-Tagungsband, Bd. T16. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover (1996)
111. Birkert, A.R., Sünkel, R.: Hydroforming – Umformen mit Wirkmedien im Automobil. Bibliothek der Technik, Bd. 230, S. 45. Verlag moderne Industrie (2002)
112. Goppelt, G.: Neue Umformverfahren für Aluminium in Kraftfahrzeugen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **12**, 1092 (2000)
113. Landgrebe, D., et al.: Massivumformtechniken für die Fahrzeugindustrie. Bibliothek der Technik, Bd. 213. Verlag moderne Industrie (2001)
114. Schacher, H.D.: Trends and developments of cold forging in the automotive industry, S. 55. 10th Int. Cold Forging Congress. VDI-Berichte, Bd. 1555. VDI-Verlag, Düsseldorf (2000)
115. www.uni-stuttgart.de/ifu/broschuere/6_23.htm. Zugegriffen: 23. Juli 2002
116. Lohmüller, A.: Grundlagen des Magnesiumspritzgießens (Thixomolding), Bd. 35. D82 (Dissertation, RWTH Aachen). Shaker (2002)
117. Goyany, V., Mauk, P., Myronova, O.: Thixomolding. Stand der Technik. Gießerei **02** (2006)
118. Kiess, J.: Untersuchung des Magnesium Thixomolding-Verfahrens durch Gießsimulation und Analyse eines anwendungsnahen Prinzipbauteils im Vergleich zu Druckguss, Bd. 50. D82 (Diss., RWTH Aachen). Shaker (2006)
119. Kaufmann, H.: Endabmessungsnahes Gießen: Ein Vergleich von Squeeze-casting und Thixocasting. Gießerei **11**, 342–350 (1994)
120. Young, K.P.: Semi-Solid Metal Guss – eine neue Technologie von Bühler (ohne Jahresangabe)
121. Hasse, S.: Gießerei-Lexikon, 18. Aufl., S. 1286. Schiele, Berlin (2000)
122. Gräfen, H.: Lexikon Werkstofftechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)
123. Michaeli, W., Galuschka, S.: Hinterspritztechnik, Teil 1: Eine Analyse der Randbedingungen. Plastverarbeiter **3**, 102–106 (1993)
124. Mischke, J., Bagusche, G.: Hinterspritzen von Textilien, Teppichen und Folien. Kunststoffe **3**, 199–203 (1991)
125. Bürkle, E.: Hinterpressen und Hinterprägen – eine neue Oberflächentechnik. Innovative Spritzgießtechnologien – ein Beitrag zur Konjunkturbelebung. Fachtagung Süddeutsches Kunststoffzentrum, S. 23, Würzburg, 01./02. Dezember 1993
126. Imam, Naughton, Toccalino: Dow Automotive, Schwalbach: Polymere Werkstoffe für den Leichtbau von Automobilkarosserie und Automobilinterieur. Automobiltech. Z **111**, 4 (2009)
127. Johannaber, F.: Gas-Injektions-Technik beim Spritzgießen (GIT), Innovative Spritzgießtechnologien – ein Beitrag zur Konjunkturbelebung. Fachtagung Süddeutsches Kunststoffzentrum 01/02. Dezember 1993, Würzburg
128. Ehritt, J., Schröder, K.: Gasinnendruck- und Zweikomponenten-Spritzgießverfahren. Hüthig GmbH, Heidelberg (1995)
129. Goldbach, H., Hoffner, J.: Hybridbauteile in der Serienfertigung. Kunststoffe **87**, 1133–1138 (1997)
130. Ein Werkstoff-Traumpaar für das angestrebte Drei-Liter-Auto. Hybrid-Technologie vereinigt die Vorteile von Metall und technischen Thermoplasten, VDI-Nachrichten, Bd. 50, Heft 35 (1996)
131. Innovative Systemlösungen mit Bayer-Werkstoffen für den Audi A6. Bayer-Broschüre 11/98
132. Stark im Verbund. Hybridtechnologie integriert Zusatzfunktionen beim Herstellprozess. Zeitschrift: Produktion, Landsberg **37**(42) (1998)
133. Kohake, H.: Präzision durch Spritzgießen mit extrem dünnen Wandstärken am Beispiel von Metall-Kunststoffverbindungen. Präzision im Spritzgießprozess. Tagung Baden-Baden, S. 135–140, 7./8. März 2001. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
134. Hybridtechnologie für den Automobil-Leichtbau – Die Entwicklung geht weiter. Böllhoff Bayer AG. mobiles, Fachzeitschrift für Konstrukteure **27**, 8–12 (2001/2002)
135. http://www.gadsl.org
136. Pagani, A., Weidinger, B., Kranner, L.: Emissionen – Messvorschriften und analytische Erfahrungen. 5. Workshop „Geruch und Emissionen bei Kunststoffen“, Kassel, 7.–8. April 2003

137. Schüssler, A.: Automobilinnenteile aus Naturfaservliesen – Verwendung von Naturfasergemischen und PP-Fasern. Kunststoffe **7**, 1006–1008 (1998)
138. Flemming, M., Roth, S., Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices. Springer, München (1997)
139. Einteilung der Fasern gemäß DIN 60001 T1, Textile Faserstoffe, Mai 2001
140. Colberg, H., Sauer, M.: Spritzgießen naturfaserverstärkter Kunststoffe. Kunststoffe **12**, 1780–1782 (1997)
141. Starke Leichtgewichte. Plastverarbeiter **8**, 108–109 (1998)
142. Müller, H., Fries, K.-W.: PURe Natur im Automobil. Kunststoffe **4**, 544–546 (1998)
143. Volkhausen, W.: Methodische Beschreibung und Bewertung der umweltgerechten Gestaltung von Stahlwerkstoffen und Stahlerzeugnissen. Dissertation, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (2003)
144. Mast, P., et al.: Ressourcenschonung durch Recycling von Kunststoffbauteilen aus Automobilen, Kunststoffe im Automobilbau – Anwendung und Wiederverwendung, VDI-K. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)
145. Schäper, S., Haldenwanger, H.-G., Rink, C., Sternau, H.: Materialrecycling von aluminiumintensiven Altfahrzeugen am Beispiel des AUDI A8. VDI-Bericht, Bd. 1235, S. 249–266. VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
146. DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)
147. DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)
148. Krinke, S., Koffler, C., Deinzer, G., Heil, U.: Automobiler Leichtbau unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **112**, 438 (2010)
149. Schäper, S.: Nebenwirkungen der Recyclingquoten der EU-Altautodirektive auf Leichtbaukonzepte sowie auf den Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Pkw. EUROFORUM-Konferenz, Freising, 10./11. Oktober 2000
150. Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse, Herausgeber DaimlerChrysler AG, Mercedes Car Group, Stuttgart (2005)
151. N.N.: Thermoelektrischer Generator wandelt Abwärme in Strom um. NET-Journal **7/8**
152. Bachmann, G.: Innovationsschub aus dem Nanokosmos. Zukünftige Technologien, Bd. 28. VDI-Technologiezentrum (1998)
153. Niggemann, J., Franz, O.: Research-Studie Nanotechnologie. HWAG Hamburg (2001)
154. Köhler, M.: Nanotechnologie – Eine Einführung in die Nanostrukturtechnik. Wiley-VCH, Weinheim (2001)
155. Buchholz, K.: Nanocomposite debuts on GM vehicles. Automot. Eng. Intern. **10**, 56 (2001)
156. Niedermeier, W., Freund, B.: Nanostrukturruße – Eine neue Generation für verbesserte Lkw-Reifen. Kautschuk-Gummi-Kunststoffe **10**, 670 (1999)
157. Luther, W., Malanowski, N., Bachmann, G., Hoffknecht, A., Holtmannspötter, D., Zweck, A., Heimer, T., Sanders, H., Werner, M., Mietke, S., Köhler, T.: Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt Innovations- und Technikanalyse, Bd. 53. VDI-Technologiezentrum im Auftrag des BMBF (Hrsg.) (2004). http://www.bmbf.de/pub/nanotech_als_wachstumsmarkt.pdf
158. Langenfeld, S., Friedrich, H.: Nanotechnology in cars – prospect and venture. Kunststoffe im Automobilbau, S. 299–304. Tagung Mannheim, 13./14. März 2002. VDI Verlag, Düsseldorf (2002)
159. Warzelhan, V.: Innovationspipeline Polymere – Anwendungspotential Nanotechnologie. Symposium Material Innovativ, Nürnberg, 10. März 2005
160. Piezofaser-Funktionswerkstoffe. Handout am Ausstellerstand der Fraunhofer Allianz FhG. Symposium Material Innovativ, Nürnberg, 10. März 2005
161. Michaelis, A.: Neue Materialien für zukünftige Innovationen in Elektronik und Energietechnologie. Symposium Material Innovativ, Nürnberg, 10. März 2005

**Literatur zu Abschn. 10.4**

162. Wälzlager-Katalog der Schaeffler Gruppe, Berechnungsgrundlagen: Ausgabe 2008, 1640 Seiten, 1. Überarbeitete Ausgabe, Vertrieb über die Schaeffler Gruppe, INA (Schaeffler Gruppe) Industriestraße 1–3 (info@schaeffler.com), 91074 Herzogenaurach oder FAG (Schaeffler Gruppe), Georg Schäfer Straße 30, 97421 Schweinfurt, (FAGinfo@schaeffler.com)
163. Nadelkränze für Kurbelzapfen und Kolbenbolzen, Broschüre der Schaeffler Gruppe
164. Broschüre „Radlager“, FAG-AS@Schaeffler.com www.LuK-AS.de
165. Einreihige Kugelrollenlager: Neue Bauform zwischen Kugel- und Rollenlager. Eine Broschüre. FAG-AS@Schaeffler.com. www.LuK-AS.de
166. Kraus, M.: Zukunft der Fahrwerkssysteme: „Schaeffler kann mehr als Lager“. Vortrag zum 9. Schaeffler-Kolloquium 2010
167. Kimmig, K.L., Bührle, P., Henneberger, K., Ehrlich, M., Rathke, G., Martin, J.: Mit Effizienz und Komfort zum Erfolg: Die trockene Doppelkupplung etabliert sich auf dem Automatikmarkt. Vortrag zum 9. Schaeffler-Kolloquium, 2010
168. Solfrank, S., Ihlemann, A., Dombos, L., Mederer, T.: Chancen zur $CO_2$-Reduzierung durch den Einsatz von Wälzlagern im Motor. ATZ-Sonderdruck
169. van Basshuysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Lexikon Motorentechnik. Vieweg, Wiesbaden (2004)
170. Gombert, B.: Vom intelligenten Radlager zum Robot-Wheel. Vortrag zum 9. Schaeffler-Kolloquium, 2010
171. Wagner, U., Reitz, D.: Die Zukunft kommt automatisch: Effiziente Automatikgetriebe als Basis für hybridisierbare Antriebsstränge. Vortrag zum 9. Schaeffler-Kolloquium, 2010

172. Tiemann, C., Kalenborn, M., Orlowsky, K., Steffens, C., Bick, W.: Ein effektiver Weg zur Verbrauchsreduktion Wälzlagerung im Verbrennungsmotor. FEV Motorentechnik GmbH, Aachen
173. Leichtbaudifferenziale schaffen Freiräume. Pressemitteilung der Schaeffler Gruppe vom 24. Juni 2010

**Weiterführende Literatur**

174. Karosserie und Bleche. ATZ Special **09** (2010)
175. Eibisch, H., Hartmann, M., Singer, R.: Herstellung und Eigenschaften von Kohlenstofflangfaserverstärktem Magnesium im Druckguss. 3. Ranshofener Leichtmetalltage 2004, 23.–25. Juni 2004, Ranshofen (Österreich). Druckguss-Praxis **6**, 255–260 (2004)
176. Mordike, B., Wiesner, P.: Fügen von Magnesiumwerkstoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 147 (2005)
177. Lerch: Leicht und fest: Leichtmetalle im Auto. Autotech. **4**, 9 (2004)
178. Tagungsband zum VDI Kongress „Kunststoffe im Automobilbau 2005", Bd. 4270, Mannheim, 9.–10. März 2005
179. Brecher, Kermer-Meyer, Dubratz: Fraunhofer-Inst. f. Produktionstechnologie, IPT, Aachen: Thermoplastische Organobleche für die Grossserie. ATZ/MTZ **11** (Sonderausgabe Karosserie und Bleche) (2010)
180. SKZ (Hrsg.): Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT). Tagungshandbuch. (2006). Fachtagung vom 06.–07.12.2006 in Würzburg
181. Berlin, Stoetzner, Rueegg, Jaggi: Karosserie aus Kunststoff. Kunststoffe **7** (2009)
182. Köth, C.-P.: Megapläne (Artikel zu den Plänen von BMW zum sog. „Megacity-Vehicle"). Automobilindustrie **7–8** (2010)
183. Honsel, G.: Das Auto von der Rolle. Technol. Rev. **12** (2010)
184. N.N.: http://project-i.com. (Marketingseite der BMW AG zum Megacity-Vehicle)
185. Hegenauer, H.: Fachkunde für Leder verarbeitende Berufe, 8. überarb. Aufl. Ernst Heyer, Essen (2001)
186. Brisanter Stoff. Technische Textilien im Automobil. Automobil-Produktion **3** (2005)
187. Schottner, G., Abersfelder, G. (Hrsg.): Fahrzeugverglasung. Expert Verlag (1995)
188. Pollak, M., Teschner, H.: Verglasung heutiger und zukünftiger Fahrzeugdächer. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Automobildesign und Technik. Vieweg, Wiesbaden (2007)
189. Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, 2. erw. Aufl. S. Hirzel, Stuttgart (1998)
190. Jelinek, W.: Praktische Galvanotechnik: ein Lehr- und Handbuch, 5. Aufl. Leuze (1997)
191. Englisch, BMW: Korrosionsschutz und Dichtheit des Gesamtfahrzeugs. ATZ/MTZ **11** (Sonderausgabe Der neue BMW 7er), 110 (2008)
192. Krusche, Volkswagen: Karosseriebezogene Maßnahmen zur Entwicklung des Korrosionsschutzes bei Volkswagen. 3. Braunschweiger Symposium Faszination Karosserie, 2007
193. Schmidt, M.: Hochfrequenzschweißen in der Automobilindustrie. Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech". Universität Clausthal, Clausthal (1998)
194. Emmelmann, C.: Stand der Technik und Entwicklungstendenzen. 3. Euroforum-Konferenz „Lasereinsatz im Automobilbau", Aachen, 13./14. Februar 2001
195. Hahn, O.: Fügen durch Umformen. Dokumentation 707. Studiengesellschaft Stahlanwendung (1996)
196. Hahn, O.: Neue Lösungen mit Stahl beim Automobil-Leichtbau. Studiengesellschaft Stahlanwendung (1997)
197. Füssel: Fügen hochfester Bleche im Automobilbau. ATZ/MTZ-Konferenz 2010; 11. Int. Tagung Karosseriebau Hamburg, Mai 2010
198. Wendt, Donhauser, Schübeler: Mischbauweisen flexibel fügen – Vollstanznieten. ATZ/MTZ **11**(Sonderausgabe Karosserie und Bleche) (2010)
199. Sauer, J.: Automobilkarosserien Kleben. Kunststoffe **3** (2003). Fachartikel
200. BMW: Kleben verbindet – Kleben im Automobilbau. Automobil-Produktion **23**(1/2) (2010)
201. Scheffels: Kleben statt Schweißen. Special Report Fertigung: Kleben und Hybridfügen von Karosserieteilen. Automob.-Ind. **55**, 4 (2010)
202. Stumpp: Fügen und Umformen vereint – Innenhochdruckumformen. Automobil-Produktion **21**, 5 (2008)
203. Simulation von Bauteileigenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Wärmebehandlungsparameter. VDI-Bericht 2007; Gießtechnik im Motorenbau, Tag. Magdeburg, Februar 2007; VDI-Berichte Nr. 1949
204. Gasinjektionstechnik – Verfahrenstechnik, Anlagentechnik, Gestaltungsregeln. Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen (1995)
205. Thermoplastische Hybridstrukturen – Kombination aus wirtschaftlichen Serienverfahren mit lokalen Verstärkungs-Inserts. VDI-Reihe Kunststofftechnik, Kunststoffe im Automobilbau (2010)
206. Michaeli, Hoffmann: Hybride Verbindungen – thermische Fügeverfahren. Kunststoffe **6** (2009)
207. Steinbichler, Egger, Pitschender: Innovationen in der Spritzgießtechnik für das Automobil der Zukunft. VDI-Reihe Kunststofftechnik, Kunststoffe im Automobilbau. (2006)
208. Bauer, H., Haldenwanger, H.-G., Schneider, W.: Recycling von Altfahrzeugen: Kreislaufeignung von Werktstoffen als Funktion der Demontagewirtschaftlichkeit. In: Kunststoffe im Automobilbau – Trends, Technologien, Anwendungen. VDI-Kunststofftechnik, S. 165–179. VDI-Verlag, Düsseldorf (1997)
209. Schlösser, T.: Naturfaserverstärkte Fahrzeugteile. Kunststoffe **9** (1997)

210. Braess, H.-H.: Das Automobil von der Produkt- zur Systemoptimierung – Ziele und Aufgaben des Life-Cycle-Managements. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **12** (1999)
211. Müssig, J.: Untersuchung der Eignung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten – vom Anbau zum Verbundwerkstoff. Fortschr.-Bericht, VDI Reihe 5, Bd. 630. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
212. Senftleben, D.: Verfahren zur Generierung von Leitindikatoren für die ganzheitliche Entwicklung und Beurteilung von Automobilkomponenten. Dissertation, Uni Siegen (2006)
213. Pelster, R., Pieper, R., Hüttl, I.: Thermospannungen – Viel genutzt und fast immer falsch erklärt! PhyDid **1**(4), 10–22 (2005)
214. Bergmann-Schaefer: Elektromagnetismus, 8. Aufl. Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 2. de Gruyter, Berlin (1999)
215. Jänsch, D.: Thermoelektrik: Eine Chance für die Automobil. Expert Verlag (2008)
216. Christ, Öchsner, Nothhelfer-Richter: Nanolacke erschließen neue Anwendungen – Anwendung der Nanotechnologie in Lacken und anderen Beschichtungsstoffen. Met.-Oberfläche **7/8**, 63 (2009)
217. Büthe, Funkhauser, Rau, W., BASF: Kunststoffe für das Automobil der Zukunft: unsichtbarer Beitrag – sichtbarer Erfolg. In: Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Reihe Kunststofftechnik. (2006)
218. Bauer, Haldenwanger, Audi: 10**9 Anwendungen aus dem Nanokosmos im Automobilbau. Gummi Fasern Kunststoffe **9**, 57 (2004)

# Produktentstehungsprozess

*Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess, Prof. Dr.-Ing. Thomas Breitling, Jürgen Weissinger, Dipl.-Ing. Norbert Grawunder, Dr.-Ing. Ulrich Hackenberg, Prof. Dr.-Ing. Volker Liskowsky und Dr.-Ing. Ulrich Widmann*

11.1 **Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess – 1258**

11.2 **Fahrzeugkonzeption in der frühen Entwicklungsphase – 1276**

11.3 **Berechnung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung – 1283**

11.4 **Mess- und Versuchstechnik – 1329**

11.5 **Qualitätsmanagement – 1340**

11.6 **Betrieb und Instandhaltung von Kraftfahrzeugen – 1343**

**Literatur – 1361**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_11

## 11.1 Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess

### 11.1.1 Einleitung

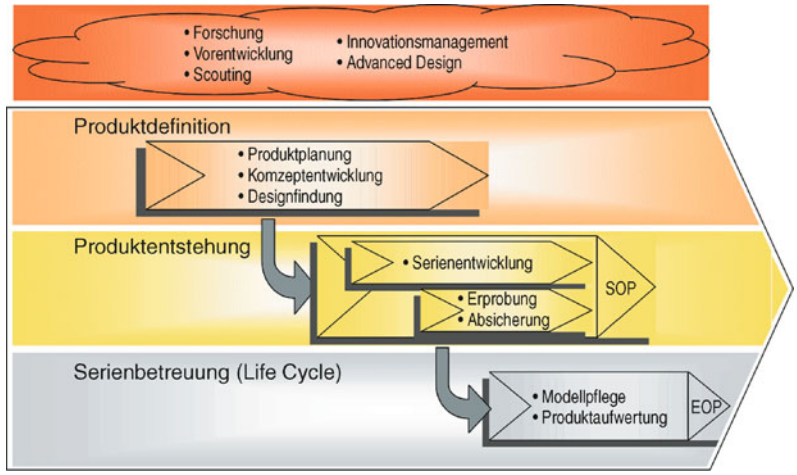
In ihrem Vorwort charakterisieren die Herausgeber die Produktentstehung sehr treffend als einen hochkomplexen Prozess, dessen Gestaltung und Optimierung immer größere Bedeutung gewinnt. Letztendlich muss dieser Prozess termingerecht zu einem Fahrzeug führen, das für die Zielkunden so attraktiv ist, dass sie es zu einem Preis erwerben wollen, der mit den Renditevorstellungen des Automobilunternehmens im Einklang steht und damit dessen Wettbewerbsfähigkeit sichert. ◘ Abb. 11.1 umreißt einen Produktentstehungsprozess schematisch.

Die hohe Komplexität des Produktentstehungsprozesses (im weiteren PEP genannt) beruht auf den vielfältigen Anforderungen an die Produktgestaltung, insbesondere wenn es sich um ein Fahrzeug für den globalen Einsatz handelt. An diesem Prozess sind zahlreiche kreative Mitarbeiter beteiligt, sowohl innerhalb der Organisation des Automobilherstellers (im Weiteren als OEM, Original Equipment Manufacturer, bezeichnet) als auch im Lieferantenumfeld und bei diversen Dienstleistern, die zur Abdeckung von Kapazitätsspitzen heute bei jedem OEM eine wichtige Rolle spielen.

In der Summe können es über 1000 Beteiligte sein, die interdisziplinär und lokal variabel in einem Simultaneous-Engineering-Prozess miteinander vernetzt werden müssen. Bedingt durch globale Beschaffungsstrategien nimmt die lokale Variablität der Prozessbeteiligten ständig zu. Dabei müssen Kultur- und Sprachbarrieren überwunden werden, und es müssen zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort aktuelle, aufeinander abgestimmte Produktdaten verfügbar sein.

Dies alles bedarf einer straffen und durchgehenden Organisation, eines möglichst lückenlosen Regelwerks und eines transparenten Prozess-Controllings. Die Organisation muss den Entwicklungsprozess auf der Basis fest vereinbarter Meilensteine vorantreiben, den qualitativen Fortschritt monitoren und für alle Beteiligten transparent machen. Dabei geht es auch darum, Probleme beim Prozess als auch bei den Produkteigenschaften unmittelbar zu identifizieren und mit gezielten Maßnahmen zu lösen. Meine persönliche Erfahrung sagt: „Ein gefundenes Problem ist ein gelöstes Problem." Deshalb kommt dem offenen und offensiven Umgang mit Problemen innerhalb des PEP eine entscheidende Bedeutung zu.

Im Folgenden möchte ich auf einige unterschiedliche Organisationsformen eingehen, mit de-




◘ **Abb. 11.1** Produktentstehungsprozess: Von der Forschung bis zur Serienbetreuung

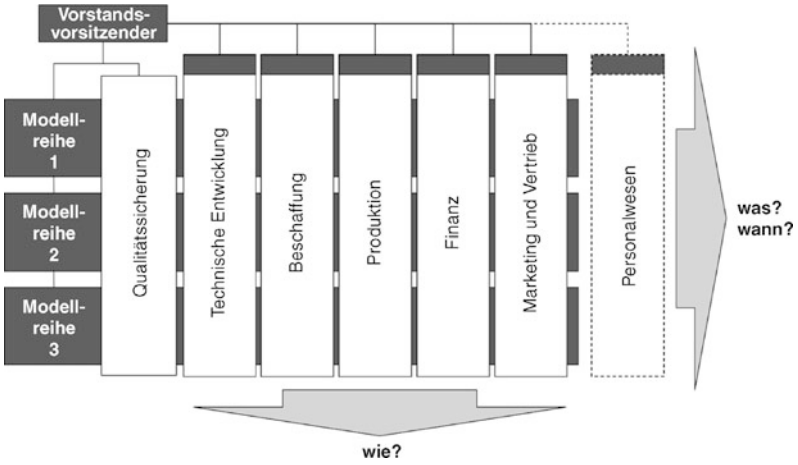



**Abb. 11.2** Beispiel einer Organisationsform: Modellreihen vernetzen die Linienbereiche

nen der PEP bei verschiedenen OEMs geführt wird, und die diversen Prozessabschnitte im Detail beleuchten. Dazu soll die Marke AUDI als Referenz dienen.

## 11.1.2 Produktentstehungsprozess

### 11.1.2.1 Organisationsformen

Nahezu alle großen OEMs sind heute in den Bereichen, die am Produktprozess beteiligt sind, crossfunktional organisiert. Auf der einen Seite stehen die Linienbereiche, die sich an den klassischen Fahrzeugkomponenten wie den Aggregaten, dem Aufbau, der Elektrik und der Eigenschaftsentwicklung des Gesamtfahrzeuges orientieren. Auf der anderen Seite existieren projektorientierte Managementbereiche, die den Produktprozess treiben.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen OEMs liegen darin, wie die Verantwortung zwischen dem Linien- und dem Prozess- beziehungsweise Produktmanagement aufgeteilt ist. Die Bandbreite bei den Produktmanagern reicht hier von einer reinen Prozess- oder Projektverantwortung mit dem Schwerpunkt Koordination bis hin zur vollen Produktverantwortung mit ganzheitlicher Entscheidungsbefugnis über das Eigenschaftsspektrum des Fahrzeuges. In letzterem Fall spricht man von heavy product management.

Im ersten Fall – der traditionellen Vorgehensweise – sind die am Prozess beteiligten Fachleute disziplinarisch den einzelnen Linien zugeordnet, und die Eigenschaftsverantwortung liegt beim Linienmanagement (siehe Abb. 11.2). Die verantwortliche Beauftragung von Dienstleistern obliegt ebenfalls den Linienmanagern. Die Aufgabe der Projektmanager besteht darin, die Vernetzung der Linienbereiche zu organisieren und den Projektfortschritt zu treiben und zu monitoren.

Im zweiten Fall – beim heavy product management – sind alle Mitarbeiter disziplinarisch dem Produktmanager unterstellt, der dann auch die Einhaltung der Produkttargets (Ziele) und der Produkteigenschaften verantwortet. Die Linienmanager organisieren in diesem Fall lediglich die Bereitstellung kompetenter Fachkapazitäten und haben hinsichtlich der einzelnen Projekte eine „Betreuungs"-Verantwortung. Denkbar ist in diesem Fall auch die Beauftragung externer Entwicklungsteams unter der Verantwortung des Produktmanagements.

Zwischen diesen Extremformen stehen zahlreiche Mischformen. Alle Organisationsformen sind mit den richtigen Menschen und Systemen an Bord arbeitsfähig und können zu wettbewerbskonformen Produkten führen, solange bewusst mit den systembedingten Besonderheiten umgegangen wird. Die linienorientierte Organisation birgt die

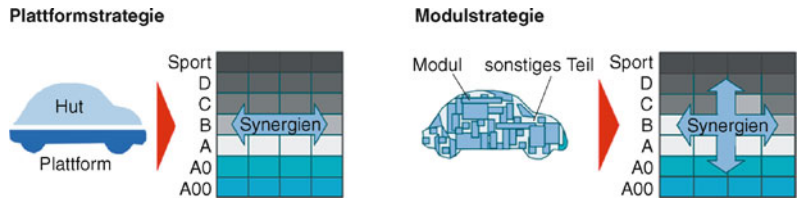



**Abb. 11.3** Plattform- und Modulstrategie: Große Hersteller müssen komplexe Aufgaben meistern

Gefahr längerer Entscheidungszyklen und einer starken Belastung der Entscheidungsträger in der Linie; ihre Stärke ist die hohe Durchgängigkeit technischer Lösungen und Eigenschaften.

Heavy-product-management-Organisationen, wo mehrere autarke Projektorganisationen mit unabhängiger Entscheidungsverantwortung parallel ablaufen, bringen einen entgegengesetzten Schwachpunkt mit sich: Hier muss dem Auseinanderlaufen und der Verselbstständigung der Projektmannschaften entgegengewirkt werden, sonst können Synergien zwischen den einzelnen Produkten auf der Strecke bleiben und die Markenidentität der Produkte leiden.

Eine nächste Ebene an Organisationskomplexität wird notwendig, wenn ein Konzern über mehrere Marken mit eigener Markenidentität und entsprechend unterschiedlichen Eigenschaftsspektren der Fahrzeuge verfügt. Beim Volkswagen-Konzern mit seinem breiten Marken-Portfolio beispielsweise ist dies der Fall. Für die Entwicklung der Karosserien („Hüte“) gelten hier bei den einzelnen Marken Organisationsformen nach den oben beschriebenen Mustern. Hinsichtlich der Plattformen und Komponenten-Baukästen sind jedoch zentrale Verantwortlichkeiten zu definieren, die, zeitlich aufeinander abgestimmt, einen Entwicklungsverbund mit den Entwicklungen der einzelnen Marken eingehen.

Im VW-Konzern liegen die Entwicklungsverantwortung und das Produktmanagement für die Quer-Plattformen – die Plattformen mit quer zur Fahrtrichtung eingebautem Antrieb – in der Verantwortung der Marke Volkswagen. Nutzt beispielsweise AUDI als Ersteinsetzer eine neue Quer-Plattform, so stellt VW sie als Basisentwicklung termingerecht dem AUDI-Projekt zur Verfügung. Die markenspezifische Eigenschaftsentwicklung liegt anschließend bei AUDI. In gleicher Weise handelt AUDI, wenn es darum geht, dass die Marke Volkswagen eine – bei AUDI entwickelte – Längs-Plattform nutzen will.

Die hohe Flexibilität von Fahrzeugkonzepten, die heute existiert, führt zu der Gefahr, dass es bei den Hüten zu einem Wildwuchs an Komponentenkomplexität kommen kann. Um dem entgegenzuwirken, haben sich in den großen Mehrmarken-Konzernen inzwischen sogenannte Modulmanagement-Organisationen etabliert, die die Verfügbarkeit von Komponenten verantworten (Abb. 11.3).

Im VW-Konzern beispielsweise werden die sogenannten Roadmaps der Fahrzeugkomponenten für alle Marken über vier Managementbereiche hinweg verantwortet. Bei den vier Roadmaps handelt es sich um die Aggregate, das Fahrwerk, die Elektrik/Elektronik und den Aufbau. Auf diese Art ist ein verbindlicher Komponentenbaukasten entstanden, der innerhalb eines Regelwerks für alle Marken des Konzerns zugänglich ist. Da die Mehrzahl der Komponenten von Zulieferern hergestellt und auch von ihnen mitentwickelt werden, ist deren Einbindung eine der zentralen Aufgaben im Prozess.

Die gemeinsamen Komponentenbaukästen sind für alle größeren OEMs zur Grundlage der Modellpolitik und der Entwicklungsarbeit geworden. Sie bringen zahlreiche Vorteile mit sich: Sie sparen Entwicklungszeit und Entwicklungskosten, sie senken über die erhöhten Stückzahlen und die damit möglichen Scale-Effekte die Einkaufspreise drastisch, und sie ermöglichen es, ein bewährtes Zusammenspiel der Bauteile auf neue Modelle zu übertragen.

Noch in den 90er Jahren vollzog sich diese Strategie bei den Herstellern in Grenzen, die durch die tragenden Teile der Karosserie und die Fahrwerkskonstruktion – also die Blech-Plattformen – starr

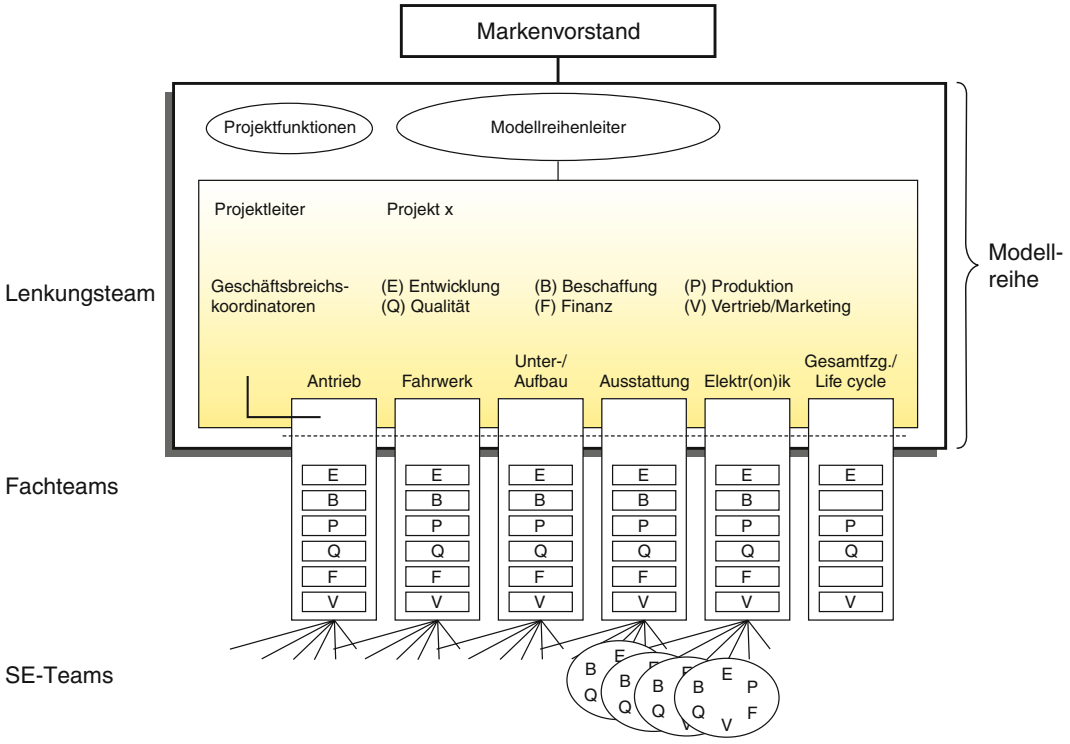



**Abb. 11.4** Typische Projektorganisation eines OEM: Linienbereiche und Fachteams arbeiten eng vernetzt

vorgegeben waren. Die Flexibilisierung und Dynamisierung, die in der Zwischenzeit im gesamten PEP stattgefunden hat, versetzt die Ingenieure heute in die Lage, die Plattformen so flexibel zu nutzen, dass starke Differenzierungen zwischen den Modellen möglich sind.

Auf einem weltweiten Automobilmarkt, auf dem sich die wenigen Fahrzeugklassen von einst in hohem Tempo immer weiter aufsplitten, sichert diese Flexibilität dem OEM die Zukunft. Sie macht es ihm möglich, mehr Produkte in kürzerer Zeit zu geringeren Kosten in besserer Qualität und höherer Komplexität auf den Markt zu bringen.

#### 11.1.2.2 Projektorganisation eines OEM

Unabhängig von den Zuständigkeiten bei der Produktverantwortung ist es für eine Projektstruktur notwendig, alle am PEP beteiligten Unternehmensbereiche umfassend abzubilden. Das höchste Entscheidungsgremium ist eine Runde, die aus den Vorständen der Marke und dem Top-Management besteht. Unterhalb dieses Gremiums trifft das Produktteam, abgestuft nach dem Level der Aufgabe (Eigenschaften, Kosten, Aufwand, Termine), die anstehenden Entscheidungen selbst.

Abb. 11.4 zeigt eine typische Projektorganisation eines OEM. Die Leitung des Fahrzeugprojekts liegt in den Händen eines Produktmanagers. Er ist außerhalb der Linienbereiche angesiedelt, berichtet direkt an die Unternehmensleitung und arbeitet damit bereichsneutral. Ihm sind weitere Mitarbeiter unterstellt, die Unterprojekte führen oder unterstützende Aufgaben wahrnehmen. Der Produktmanager führt ein zentrales Produktteam aus Vertretern der Linienbereiche. Sie arbeiten zu 100 % für das Projekt, gehören jedoch disziplinarisch ihren Linien an. Dieses Team treibt das Projekt, monitort seinen Fortschritt und bereitet gegebenenfalls Vorlagen zur weiteren Entscheidungsabfolge vor.

Die Simultaneous-Engineering-Struktur, die unterhalb dieser Ebene liegt, ist auf sogenannte Fachteams aufgeteilt. Dies sind die Fachteams Ag-

gregate, Fahrwerk, Karosserie, Ausstattung, Elektrik/Elektronik und Gesamtfahrzeug. Die komponentenbezogenen Teams bearbeiten Produkteigenschaften, Kosten, Termine und Ähnliches. Gleichzeitig behandelt das Fachteam Gesamtfahrzeug die Gesamtfahrzeugeigenschaften (beispielsweise Gewicht), den Fahrzeugbau innerhalb der Produktentstehung – Stichwort Prototypen, Vorserien – und die Fahrzeugerprobung. Die sogenannten SE (Simultaneous Engineering)-Teams sind feste Größen im PEP und bereichsübergreifend besetzt. Ihre Aufgabe ist die Umsetzung auf Bauteilebene. In Summe existiert eine feste Struktur von ca. 50 SE-Teams, die sich für die Projekte immer wieder neu bilden.

Für die Vernetzung ist es sehr hilfreich, wenn die Projektmitarbeiter räumlich nahe beieinander angesiedelt sind, um die Kommunikationswege kurz zu halten und den Teamgedanken zu fördern. Ein Beispiel für eine solche moderne Organisation ist das Elektronik-Center von AUDI. Auf dem Gelände der Technischen Entwicklung angesiedelt, werden alle Kompetenzen der Marke auf diesem Gebiet unter einem Dach gebündelt. Hier arbeiten mehrere hundert Mitarbeiter aus der Elektronik-Entwicklung, aus verschiedenen Einkaufsbereichen, aus der Produktionsvorbereitung und Qualitätssicherung, aus dem Kundendienst und dem Controlling zusammen.

Die jeweiligen Projektteams kooperieren bereichsübergreifend. Sie können räumlich zusammengefasst werden, ohne dass dafür größere Umbauten nötig wären. Da sich das Feld Elektronik, das AUDI als Schlüsseltechnologie und Kernkompetenz betrachtet, mit hoher Dynamik entwickelt, besitzen effiziente Prozesse und flache Hierarchien hier besondere Bedeutung.

#### 11.1.2.3 PEP-Ablauf und Meilenstein-Definition

Damit sich derart komplexe Organisationsformen auf die Sache, also den Produktfortschritt konzentrieren können, ist ein durchgängiger PEP-Ablauf mit einer entsprechenden Meilenstein-Struktur Grundvoraussetzung. Die PEPs der einzelnen OEMs sind sich prinzipiell ähnlich, unterscheiden sich allerdings im Detail aufgrund der Kompetenzstrukturen und der Aufteilung zwischen Kerneigenleistung und Fremdleistung. Eine große Rolle spielt auch die Frage, wie sicher ein Entwicklungsbereich mit virtuellen Entwicklungsmethoden umgehen kann. Ich möchte mich hier auf das Beispiel AUDI konzentrieren.

Der PEP bei AUDI setzt sich aus den Prozessen Produktplanung, der eigentlichen Produktentstehung (Serienentwicklung) und der Produktpflege (Serienbetreuung, Modellpflege) über den Lebenszyklus des Fahrzeugs zusammen. Während die Produktplanung schon sehr früh beginnen kann – wichtig ist, dass sie zum vereinbarten Stichtag steht und in sich „feasible" (durchführbar) ist –, dimensioniert AUDI den Prozess der Serienentwicklung terminlich so knapp wie möglich.

Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- Eine späte Designentscheidung ist ein Garant für ein hochaktuelles Design. Der „goldene Schuss" zu Beginn eines Projekts ist die absolute Ausnahme. Ein gutes Design muss reifen, und nach meiner Erfahrung kommen die besten Designideen immer – fast zu – spät.
- Die Serienentwicklung ist kostenintensiv, es besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen Zeit und Kosten.
- Die Serienentwicklung bindet eine Vielzahl von Mitarbeitern, die möglichst schnell wieder für Folgeprojekte frei werden müssen.

Bei einem Premiumhersteller wie AUDI spielt das Design eine entscheidende Rolle, weil es Charakter und Prestige der Marke vermitteln muss. Die Herausforderung liegt darin, sowohl Proportionen aus allen Betrachtungswinkeln, als auch spezielle Technikelemente, wie etwa die LED-Leuchten, mit der spezifischen Formensprache von Audi in Einklang zu bringen. In traditioneller Manier startete die Arbeit der Designer mit Bleistift und Zeichenblock, wie in ◘ Abb. 11.5 dargestellt.

Grundsätzlich beginnt die Serienentwicklung bei AUDI mit der Designentscheidung und erstreckt sich über einen Zeitraum von zirka 2 Jahren bis zum Start of Production (SOP). Dieser Zeitraum ist als Idealablauf definiert, er kann sich bei besonders guten, aber späten Ideen der Designer auch noch einmal reduzieren – das ist fast die Regel.

Voraussetzung für derart kurze Abläufe ist, dass alle nicht Design-relevanten Entwicklungsumfänge – zum Beispiel die Plattformen oder Neuent-



**Abb. 11.5** Designskizzen: markante Front- und Heckpartie des Audi A4

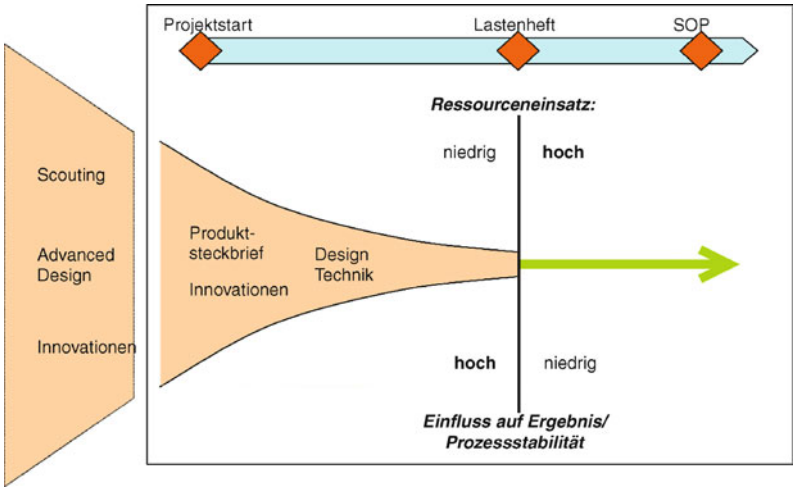



**Abb. 11.6** Frühe Prozessorganisation: Überschaubarer Ressourceneinsatz führt zu hoher Prozesssicherheit

wicklungen aus den Bereichen Aggregate, Fahrwerk oder Elektronik – einen beherrschbaren Umfang nicht überschreiten. Die Voraussetzungen dafür müssen bereits früh, im Rahmen der Produktplanungsphase, definiert und verbindlich verabschiedet werden. Deshalb kommt dieser frühen Phase eine signifikante Bedeutung hinsichtlich der späteren Prozessbeherrschung zu.

Die exakte Organisation der Prozesse in einem möglichst frühen Stadium ist ein Prinzip, das im gesamten PEP immer höhere Bedeutung gewinnt. Wird es konsequent angewendet, so lassen sich in der Planungsphase mit einem relativ geringen Einsatz der Gesamtressourcen die wesentlichen Kriterien zur Prozessstabilität festlegen, wie Abb. 11.6 zeigt. Dieses Prinzip kommt nicht nur in der Produktplanungsphase zur Anwendung, sondern auch in den folgenden Unterabschnitten des Entwicklungsprozesses.

### 11.1.3 Produktplanung

Der Kunde ist das Maß der Dinge. Deshalb beginnt jede Produktplanung mit einer Analyse der zukünftigen Kundenbedürfnisse, wie sie sich zum Zeitpunkt des SOPs darstellen werden. Diese Analysen sind sehr tiefgreifend. Sie nutzen das in der eigenen Organisation erarbeitete Know-how, beziehen sich aber auch auf Szenarienforschungen einschlägiger Institute.

Wesentliche Fragestellungen lauten beispielsweise:

- Wie verändert sich die allgemeine Wirtschaftslage?
- Wie entwickeln sich die globalen Märkte?
- Wie entwickelt sich die Verfügbarkeit von Öl und damit Kraftstoffen?
- Welche alternativen Antriebsarten setzen sich durch?

- Wie verändert sich die Steuerpolitik?
- Welchen Einfluss hat die Alterspyramide auf das Kaufverhalten? Beispielsweise legen ältere, kaufkräftige Kunden mehr Wert auf komfortable Ausstattungen.
- Wie entwickeln sich soziale Strukturen der Kunden? Wie nimmt die Bedeutung des Markenprestiges zu?
- Wie verändert sich das Wettbewerbsumfeld? Auf welche Wettbewerber wird das neue Auto treffen?
- Und viele Fragen mehr.

Diese Szenarien werden für alle bedeutenden Märkte erarbeitet und ergeben einen Spiegel des zu erwartenden Kundenverhaltens. Natürlich sind die Ergebnisse nicht absolut, deshalb arbeiten die Analysen mit gewissen Bandbreiten – sie definieren Leitplanken, innerhalb derer das Kundenverhalten zu erwarten ist.

Eine weitere Steuergröße ist die Unternehmensstrategie. Hier nehmen strategische Fragestellungen zur langfristigen Ausrichtung des Unternehmens Einfluss auf die Produktdefinition:

- Wie sieht die Wachstums-Strategie des Unternehmens aus? Das Wachstum muss über alle Bereiche klar definiert sein. Dabei beginnt man rückwärts mit dem Marktpotenzial und kommt über die Handelskette, die Fertigungskapazitäten und die Entwicklungskapazitäten zur Produktdefinition.
- Welche Volumen- und Renditeziele soll das neue Fahrzeug erfüllen?
- Sind die Ziele des Unternehmens mit der vorhandenen Modellpalette erreichbar oder muss in neue Segmente investiert werden?
- Und viele Fragen mehr.

Wenn es um die Definition eines Nachfolgemodells geht, können sich die Produktplaner auf die Erfahrungen vom Vorgängermodell stützen und schwerpunktmäßig die bestehenden Kunden und das Wissen der Vertriebsorganisation in ihre Analyse einbeziehen. Dieses Vorgehen ist eher konservativ und zielt darauf ab, den bestehenden Kunden eine attraktive Produktfortführung anzubieten. Bei Premiummarken kann man von einer hohen Loyalitätsrate ausgehen. Die Kunden sind in der Regel weniger experimentierfreudig und erwarten eher einen evolutionären Produktfortschritt.

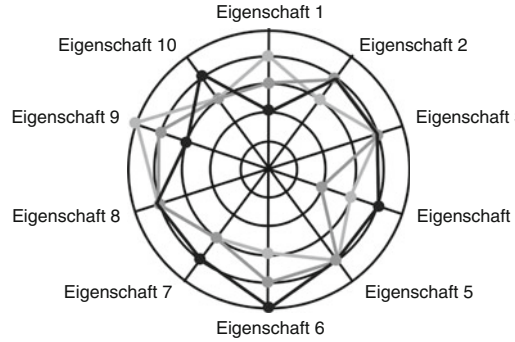



**Abb. 11.7** Eigenschaftsspinne: Unterschiedliche Fahrzeugprofile bei drei Herstellern

Steht jedoch die Kreation neuer Modelle im Vordergrund, um neue Marktsegmente und Kunden zu erobern, dann sind erweiterte Techniken notwendig. Sie lassen sich unter dem Begriff „Scouting" zusammenfassen und meinen eine Art von Trendforschung. Beispielsweise werden Teams von Produkt- und Marktspezialisten in Märkte mit Trendcharakter entsandt. Dort sollen sie die potenziellen Kunden und deren Bedürfnisse kennen lernen und analysieren, um daraus die entsprechenden Schlüsse für Produktideen oder -ausprägungen zu ziehen.

Die Produktideen fließen in ein Eigenschaftsspektrum des zu entwickelnden Fahrzeugs ein. Es orientiert sich auf der einen Seite an den kurzfristigen Kundenbedürfnissen, muss aber auf der anderen Seite auch die langfristigen Ziele der Marke absichern – die Kernwerte, die etwa bei AUDI Sportlichkeit, Prestige und progressive Technik heißen. Vom Kunden erlebbar, müssen sich diese Kernaussagen in jedem neuen Produkt wiederfinden, um die Glaubwürdigkeit der Marke langfristig sicherzustellen. Autos wie der A8 und der TT sind für die Markenidentität von AUDI absolut glaubwürdig, ein gewerblicher Lieferwagen hingegen würde dem Markenimage schaden.

Auf diese Art entsteht ein Eigenschaftsspiegel, der – wie in Abb. 11.7 dargestellt – in Form einer Eigenschaftsspinne visualisiert werden kann. Bei der Definition der Produktinhalte bietet eine solche Kategorisierung Entscheidungshilfen bei der Frage,

welche Bereiche hinsichtlich Kosten und Aufwendungen Priorität erhalten sollen.

Eine wichtige Frage innerhalb der Produktplanungsphase ist, ob und inwieweit die notwendigen Komponenten bereits im Unternehmen verfügbar sind, oder ob ihre Entwicklung zeitsynchron noch angestoßen werden muss. Hier können sich die Produktplaner auf die Vorentwicklungs-Roadmaps der einzelnen Linien beziehen. Gegebenenfalls müssen sie aber auch die entsprechenden Entwicklungen anstoßen.

Am Ende einer Produktfeasibility ist das Fahrzeug hinsichtlich der Inhalte und Eigenschaften beschrieben, die einzelnen Kostenblöcke sind zugeordnet und targetiert, und der planerische Nachweis der Rentabilität ist erbracht. Die Organisation, die den weiteren PEP zu verantworten hat, muss von diesem Punkt an in der Lage sein, sich den erarbeiteten Targets zu unterwerfen und das Produkt mit den verfügbaren Kapazitäten wie beschrieben zu entwickeln.

### 11.1.4 Innovationsmanagement

Über die Attraktivität eines Fahrzeuges entscheiden neben der zielgenauen Positionierung im angestrebten Kundensegment hinsichtlich Markenimage, Design, Produkteigenschaften und Preis nicht zuletzt die innovativen Technikinhalte. Besonders bei Technologie-orientierten Marken sind Innovationen ein „added value" (zusätzlicher Wert) für die Glaubwürdigkeit der Markenaussage. Wichtige Innovationen, die bis heute den Markenwert von AUDI prägen, waren zum Beispiel der quattro-Antrieb, die vollverzinkte Karosserie und der Aluminium Space Frame. Bei Volkswagen spielten der TDI-Antrieb oder das Doppelkupplungsgetriebe DSG wichtige Rollen.

Zur Stärkung einer Marke ist es wichtig, dass die oft mit viel Aufwand und Ingenieurskunst etablierten Innovationen konkret und nachhaltig mit der Marke identifiziert werden. Innovationen wie ABS und ESP haben sich inzwischen klar im Markt durchgesetzt, werden vom Kunden jedoch nicht mehr mit einem bestimmten Hersteller assoziiert und sind deshalb markenneutral etabliert. Es reicht also nicht, Innovationen zu generieren – sie müssen auch gepflegt und immer wieder mit der Marke in Zusammenhang gebracht werden.

Innovationen sind kein Zufallsprodukt. Sie müssen vielmehr langfristig geplant werden und bedürfen eines geregelten Ablaufes im Vorfeld des PEP. Die Basis einer Innovation ist die Idee; das technologische Umsetzen und die erfolgreiche Markteinführung machen aus der Idee eine Innovation. Ein Automobilunternehmen ist auf Ideen und deren Umsetzung zu Innovationen angewiesen, um sich im Wettbewerb zu behaupten. Deshalb wird das Generieren von Ideen heute systematisiert, und zwar mit dem Focus auf die Kernaussagen der Marke und damit auf die Eigenschaftsprofile der Fahrzeuge.

Die Systematisierung beginnt bereits mit der Angewandten Forschung, in der naturwissenschaftliche Erkenntnisse hinsichtlich automobiler Anwendungen erarbeitet werden. Auf dieser Basis werden Tools wie Brainstorming, Ideenwettbewerbe und Innovations-Workshops genutzt. Dieser Prozess läuft kontinuierlich und permanent, unabhängig von Fahrzeugmodell-Zyklen.

Der nächste Schritt ist die Integration der neuen Lösung in eine Fahrzeugumgebung. Sie findet im Rahmen einer Vorentwicklung statt. In dieser Phase werden die Komponenten fahrzeuggerecht gestaltet und in einem Fahrzeugumfeld erprobt. Ziel ist es, die Eigenschaftspotenziale der Innovation im Fahrzeug und ihre Fähigkeit zur Serienentwicklung zu überprüfen und nachzuweisen. In dieser Phase ist es wichtig, die Verantwortung zumindest teilweise schon an die Serienentwickler mitzuübertragen.

Der serienverantwortliche Entwickler muss die Serienentwicklungsfähigkeit bestätigen, um eine verbindliche Zusage für die Umsetzung im Fahrzeug geben zu können. Deshalb muss sich die Vorentwicklungsphase am Zeitplan des Zielfahrzeuges orientieren. So kann die vorentwickelte Komponente in den Komponentenpool beziehungsweise Baukasten aufgenommen werden, der den Konzeptentwicklern zur Verfügung steht. Dieser Ablauf bedarf einer produktorientierten Steuerung und Verfolgung.

**Lieferanteneinbindung** Innovationen entstehen heute zu einem großen Teil in Zusammenarbeit mit Lieferanten. Für die Lieferanten bedeutet

ein Produktangebot mit Innovationspotenzial einen strategischen Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz. Eine für einen OEM attraktive Produkteigenschaft oder ein Produktinhalt mit Wettbewerbsvorteilen hinsichtlich „time to market" stärkt die Position des Zulieferers gegenüber dem OEM.

Der Zulieferer kann sich sozusagen für eine gewisse Zeit eine Monopolstellung erarbeiten, die ihm das Verhandeln von Preisen und Lieferbedingungen erleichtert. Innovationsstärke ist somit gerade für Zulieferer hinsichtlich der Zukunftsabsicherung von strategischer Bedeutung. Häufig suchen potente Lieferanten und OEMs nach strategischen Partnerschaften, in denen gemeinsam erarbeitete, langfristige Innovations-Roadmaps die Grundlage für gemeinsame Wachstums-Szenarien bilden.

Auch die Einbindung von Lieferanten in Innovationsprozesse muss kontinuierlich getrieben werden, um langfristig erfolgreich zu sein. Es bedarf eines Managements, um den Austausch zu initiieren und operativ am Leben zu erhalten. Als hilfreich haben sich hier Lieferanten-Roadshows und -Workshops erwiesen, die organisatorisch auf Top-Management-Ebene initiiert und thematisch auf zu erwartende Szenarien ausgerichtet sind. In ihnen definieren beide Seiten die Leitplanken für die gemeinsamen Kreativitätsziele.

Konkreter und auch näher an der Projektintegration sind sogenannte Konzeptworkshops, zu denen in Frage kommende Zulieferer eingeladen werden. Hier wird über die industrielle Umsetzung eines konkreten Innovationsansatzes diskutiert. Für solche Konzeptworkshops bewerben sich in der Regel mehrere Lieferanten im gegenseitigen Wettbewerb.

Gegenseitiges Vertrauen und eine stabile Unternehmenskultur des OEM sind Grundvoraussetzungen, damit alle Lieferanten ihre besten Ideen in diesem Wettbewerb offen legen und ein Technologievorsprung nicht über den OEM gleichgerichtet wird. Nach Festlegung der Leitplanken ist die frühzeitige Einbindung des Lieferanten eine Grundvoraussetzung, um dessen Kompetenzen für die weitere Gestaltung des Fahrzeuges zu nutzen.

### 11.1.5 Produktinhalte, Lastenhefte, Gesetze

Die Eigenschaften, die in der Phase der Produktplanung definiert worden sind, werden in der nächsten Arbeitsphase in sogenannten Eigenschaftsprofilen hinterlegt. Ausgehend von einer technischen Produktbeschreibung werden diese Profile auf die Ebenen der einzelnen Bauteile heruntergebrochen, so dass funktionale Lastenhefte definiert werden können. Sie bilden die Basis für detaillierte Bauteil-Lastenhefte, deren technische Zielwerte während der Entwicklungsphasen kontinuierlich validiert (überprüft) werden. Wenn beispielsweise – wie beim AUDI TT – der Aspekt „Sportlichkeit" in der Eigenschaftsspinne hohen Stellenwert genießt, fließt er auch in die funktionalen Lastenhefte ein. Die Fahrwerksingenieure bekommen damit das Ziel gesetzt, eine entsprechende Konstruktion zu erarbeiten. Das Gleiche gilt auch für die anderen Entwicklungsbereiche.

Ebenfalls müssen die Vertriebsmärkte definiert werden, wobei die Zulassungskriterien wie die Gesetze und Normen, die in den einzelnen Ländern gelten, zu berücksichtigen sind. Zugleich werden jetzt das Aggregate-Programm für die Länder sowie die gewünschten Serien- und Sonderaustattungen festgelegt. Bei den gesetzlichen Vorgaben ist zwischen Produktgesetzen (Abgasnormen, Crash- und Beleuchtungsvorschriften) und Auflagen zu den Produktionsverfahren zu unterscheiden. Ergänzend zu den Gesetzesvorgaben ist aus Produkthaftungsgründen der sogenannte „state of the art" in den Lastenheften zu berücksichtigen; das heißt, dass alle definierten Anforderungen mindestens dem Stand der Technik entsprechen müssen.

Parallel zu den funktionalen Lastenheften entstehen Projekt-Lastenhefte. In ihnen werden die technischen Produkteigenschaften mit finanziellen Kennzahlen und Targets, Qualitäts- und Service-Anforderungen und Angaben zur terminlichen Zielerreichung zusammengeführt. Die Projektlastenhefte müssen zum Ende der Konzeptphase zur Verfügung stehen; sie geben die Rahmenbedingungen für eine geordnete Serienentwicklung vor.

### 11.1.6 Konzeptentwicklung

Die Aufgabe der Konzeptentwicklung ist es, das Fahrzeug im Rahmen der vielfältigen Anforderungen zu definieren und die Umsetzbarkeit seines Konzepts nachzuweisen. Die Konzeptdefinition beginnt schon sehr früh, parallel zur Produktplanungsphase. Initiiert durch die Produktidee werden auf der Basis von Analysen und Benchmarks erste Konzeptideen erarbeitet und als Input in die Produktplanung eingesteuert. Nachdem das Fahrzeug im Rahmen der Produktplanung beschrieben wurde und die Wirtschaftlichkeit auf Basis von Unternehmens-Szenarien und Untersuchungen zu den Renditezielen nachgewiesen wurde, wird das Projekt zur weiteren Konzeptdetaillierung freigegeben.

Die Konzeptentwicklung muss ein gesamtheitlicher Prozess sein, an dem alle wertschöpfenden Bereiche aktiv und simultan beteiligt sind. Das Konzeptteam soll sich aus spezialisierten Konzeptingenieuren zusammensetzen und Fachingenieure aus allen Bereichen, die im PEP Verantwortung tragen, einbinden. Diese frühe Integration der für die Serienentwicklung verantwortlichen Bereiche aus der Entwicklung, der Produktion, dem Kundendienst und der Qualitätsabsicherung ist besonders wichtig, da ein gutes Konzept von gelungenen Kompromissen lebt. Sie sind zwar in der Konzeptphase zu erarbeiten, müssen aber später im weiteren Entwicklungsprozess bis hin zur Produktabsicherung und schließlich vor dem Kunden getragen werden.

Im Zeitalter der Derivatisierung von Fahrzeugsegmenten kommt der Konzeption von Plattformen und Baukästen eine immer stärkere Bedeutung zu. Der Grundstein für eine Plattform beziehungsweise einen Baukasten wird in der Phase der Konzeptdefinition gelegt. Dazu muss bekannt sein, welche Ausprägung die zu integrierenden Fahrzeugderivate haben sollen. Wichtige Eckdaten sind die Rädergrößen, die Aggregatestränge und die Grundabmessungen, insbesondere in der Breite und der Höhe. Auch die Dimensionierung des Bordnetzes mit der Vernetzungsarchitektur und seine späteren Ausbaustufen sind in dieser Phase festzulegen.

Die Konzeptdetaillierung startet zeitgleich mit dem Beginn der Designarbeit. Im Fall des AUDI A8 gehörte es zu den wichtigen Prämissen, eine Langversion des Fahrzeuges anbieten zu können. Daraufhin wurden zwei unterschiedliche Radstände festgelegt. Ferner definierte die Konzeptentwicklung wichtige Parameter wie die Kapazität des Tanks und den Einsatz der Luftfederung.

**Technikmodell** Grundsätzlich stehen die Konzeptentwickler vor der Aufgabe, ein Package zu erarbeiten, das die Realisierung des zuvor beschriebenen Eigenschaftsspektrums zulässt. Früher umfasste das Grundpackage wenig mehr als die wesentlichen Außen- und Innenabmessungen, die den Designern als Vorgabe für ihre Modellentwürfe dienten. Heute jedoch starten die Konzeptentwickler mit einem sogenannten Technikmodell, das – noch unabhängig vom Design – ein virtuelles Gesamtfahrzeug darstellt (► Abschn. 4.2).

Es handelt sich um eine Zusammenstellung von Schnitten und Strukturknoten, deren Konstruktionssystematik in Berechnungsprogrammen niedergelegt ist, wie ◘ Abb. 11.8 illustriert. Die Programme beinhalten das methodische Know-how, mit dem die Konstrukteure eine Fahrzeugstruktur auslegen. Gekoppelt an die Karosseriestruktur werden auch die Anbauteile wie Türen und Klappen sowie die Anbauteile des Interieurs dargestellt.

Dieses Technikmodell dient den Designern als Vorgabe für ihre diversen Modellentwürfe. Es ist so aufgebaut, dass es sich den Daten der sich ändernden Designmodelle parametrisch anpasst. Die wesentlichen Konzeptschnitte sind im Technikmodell als Konstruktionsgrundlagen programmiert, so dass Formänderungen aus dem Designprozess unmittelbar zu einer Anpassung der Konstruktion führen, die auch die Nachbarbereiche selbsttätig einbezieht. Die Integration von Mindestquerschnitten und der Verbund mit Simulationstools zur Strukturberechnung zeigen auf, wenn eine neue Designlösung durch die Architektur der Konstruktion nicht mehr abgebildet werden kann.

Die Daten des Technikmodells bilden auch die erste Basis für den virtuellen Nachweis der Fahrzeugeigenschaften, die in der Produktplanungsphase definiert worden sind. So lässt sich ständig kontrollieren, ob das Eigenschaftsprofil weiterhin erreicht wird, wenn sich die Designausprägungen ändern,

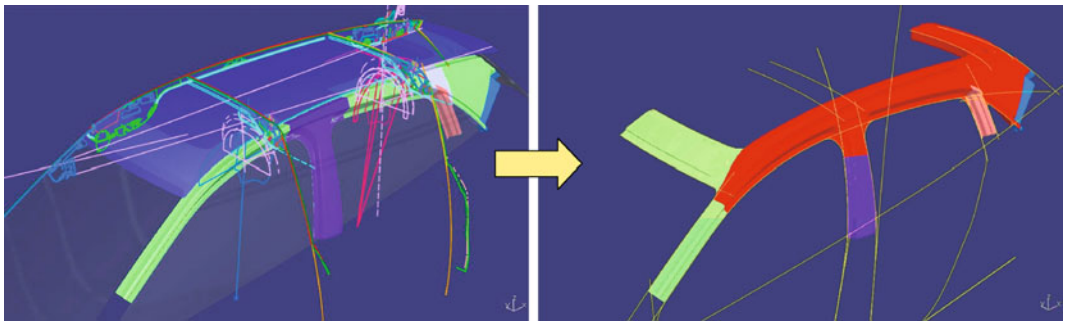


**Abb. 11.8** 3D-Technikmodell: Schnitte eines Dachrahmens

was besonders in der Frühphase des Projekts oft intensiv der Fall ist.

Da das Technikmodell die wesentlichen kostentreibenden Bauteile des Fahrzeugs beinhaltet, kann es auch als Basis für erste Kostenkalkulationen dienen, die dann analog zur weiteren Detaillierung des Modells in ihrer Qualität reifen.

Je nach Detaillierung des Technikmodells ist es im Lauf der Konzeptphase möglich, jene Hardware zu generieren, mit der sich Entscheidungen absichern lassen. So haben zum Beispiel Sitzkisten auch im Zeitalter der virtuellen Entwicklung nach wie vor hohe Bedeutung, um das subjektive Raumgefühl und die Komfortsubstanz des Fahrzeuginnenraums zu überprüfen. Bei allem Grundwissen, das die Konzeptausleger besitzen, gibt ihnen eine Sitzkiste zusätzliche Sicherheit. Hier können sie den Entwurf durch Personen beurteilen lassen, die einen unterschiedlichen Körperbau und unterschiedliche Subjektivität mitbringen, und können ihn im Bedarfsfall noch korrigieren (► Abschn. 6.4.1).

Ich persönlich lege zur Absicherung eines Konzeptentwurfs großen Wert auf ein echtes, fahrbares Konzeptfahrzeug, das sich aus den Konstruktionsdaten des Technikmodells ableiten lässt. Als erstes reales Fahrzeug innerhalb des PEP dient es ganz wesentlich der Entscheidungssicherheit und -disziplin. Eine reale Abnahmefahrt gibt den Kompetenz- und Entscheidungsträgern aus allen Unternehmensbereichen Gelegenheit, ihre Kritik zu formulieren oder ihre Akzeptanz zu bestätigen. So stehen sie schon in der Frühphase des Projektes in der direkten Verantwortung für die Konzeptentscheidung.

### 11.1.7 Produkt Daten Management (PDM)

Wenn die Erarbeitung des Fahrzeugkonzepts beginnt, entstehen projektbezogene Daten, die, zeitlich aufeinander abgestimmt, allen Beteiligten im Projekt zur Verfügung stehen müssen. Im Produktdatenmanagement (PDM) geht es darum, die Verfügbarkeit dieser Daten strukturiert zu sichern. Das Ziel liegt darin, zu jeder Zeit zusammenarbeitsfähige Daten zur Verfügung stellen zu können, und zwar für interne (Geschäftsbereiche des OEM) und externe Nutzer (Lieferanten, Dienstleister).

Die operativen Engineering-Prozesse und Aufgaben werden im PDM durch eine Vielzahl von Methoden (zum Beispiel Konstruktionsmethoden) und Werkzeugen (CAD-, CAE, CAM-Anwendungen) unterstützt. Diese durchgängig rechnergestützten Aufgaben werden unter den Begriffen „digital engineering“ beziehungsweise „virtual engineering“ zusammengefasst.

Eine wesentliche Basis für das PDM-System ist die sogenannte Produktstruktur, auch Stückliste genannt. In der frühen Phase des PEP beginnt sie zu reifen, sie muss erstellt und kontinuierlich gepflegt werden. Zu Beginn ist sie nach Konstruktionsbelangen aufgebaut; sie bildet zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Reifegrad des Fahrzeugs ab. Von der Produktstruktur profitieren Werkzeuge wie das digitale

Datenmodell DMU (Digital Mock-up), das regelmäßig aktualisiert wird, und die Prototypen, und zwar sowohl die virtuellen als auch die physischen Prototypen.

Die Produktstruktur ist ein zentrales Werkzeug der Entwicklung. Sie stellt das Kommunikationsmedium mit den anderen Fachbereichen dar und darf nur durch die Entwicklung geändert werden. Die Produktstruktur ist die verbindliche und transparente Sicht auf das Fahrzeug für alle am PEP beteiligten Organisationseinheiten. Zugleich dient sie als Bindeglied beziehungsweise Integrationsmedium zu den anderen Geschäftsbereichen des OEM und zu den Lieferanten und Dienstleistern.

Die Produktstruktur ermöglicht die Filterung und Konfiguration des Fahrzeugprojekts und seiner Inhalte nach den Anforderungen und Informationsbedürfnissen der beteiligten Organisationseinheiten. Die Struktur und ihre Inhalte werden zu definierten Zeitpunkten und Intervallen den beteiligten Geschäftsbereichen, zum Beispiel der Produktionsplanung und Produktion, vorgelegt. Änderungen werden abgeglichen und in entsprechende Planungs- und Produktionsinstrumente überführt.

Im Verlauf des PEP verändert sich die Produktstruktur: Mit der Zeit findet ein Übergang von der Entwicklungsstückliste zur Fertigungsstückliste statt. Die Entwicklungsstückliste enthält die Entwicklungsfreigabe, die Fertigungsstückliste die Produktionsfreigabe im jeweiligen Werk.

### 11.1.8 Product Lifecycle Management (PLM)

Die Idee des Product Lifecycle Managements (PLM) ist noch relativ jung. Als Lösung zum Management der Daten und Prozesse über den Produktentstehungsprozess hinaus setzt sie sich erst seit einigen Jahren durch. Der PLM-Ansatz stellt das Produkt – als wichtigste Wertschöpfungsquelle des Unternehmens – sowie alle darauf bezogenen Prozesse ins Zentrum aller Betrachtungen.

Im Rahmen der Engineering-Prozesse werden Produkte und deren Realisierung, Herstellung, Nutzung und Verwertung überwiegend von Ingenieuren geplant, konzipiert, definiert, verifiziert und dokumentiert. Die meisten Aktivitäten finden am Anfang des Produktlebens vor dem Realisierungs-/Herstellungsstart statt. Sie enden aber nicht mit dem Tag des Produktionsbeginns (SOP), vielmehr begleiten sie das gesamte Produktleben.

Die wichtigsten Methoden im Product Lifecycle Management sind:

- Methoden zum Datenmanagement (zum Beispiel Suche, Verteilung, Visualisierung, Archivierung von Daten),
- Methoden zum Prozessmanagement (zum Beispiel Strukturierung, Planung und Steuerung von Prozessen),
- Management der Anwendungsintegration (zum Beispiel Schnittstellen zu CAD-, CAE-, CAM-Systemen).

Zusätzlich zu diesen Methoden gehören zum PLM-Kern auch weitere prozessübergreifende Methoden, zum Beispiel das Zugriffsmanagement.

Das Product Lifecycle Management beginnt mit der ersten Produktidee und führt bis zum Ende des Lebenszyklus des Fahrzeugs.

Der schonende Umgang mit Ressourcen wird als eine ganzheitliche Aufgabe gesehen. Die daraus resultierenden Anforderungen werden frühzeitig in den Entwicklungsprozess eingebracht und umgesetzt. Interne Checklisten und Vorgaben wie z. B. Umweltnormen unterstützen alle Beteiligten bei der umweltgerechten Entwicklung der Bauteile, um schon heute den Anforderungen der Zukunft gerecht zu werden.

Dabei gilt es unter Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus, d. h. von der Auswahl umweltgerechter Werkstoffe, der Technologieprozesse und Fertigungsverfahren bis hin zum Recycling und Rückführung in den Materialkreislauf durch effiziente Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen und niedrige Emissionen die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren.

Da die Gesamtenergiebilanz eines Fahrzeuges durch den Fahrbetrieb dominiert wird, werden verbrauchssenkende Maßnahmen entsprechend der Fahrwiderstandsgleichung wie z. B. der Reduzierung der Fahrzeugmassen durch konsequenten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen – höchstfeste Stähle, Aluminium/Magnesium oder Nichteisenmetalle, Kunststoffe – und Wirkungsgradverbesserung

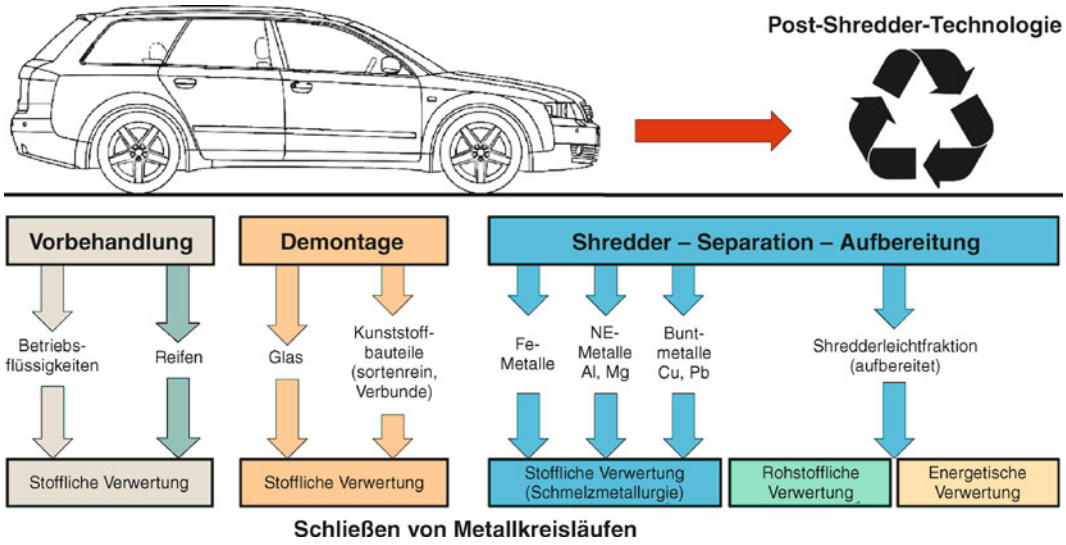



**Abb. 11.9** Verwertungsprozess

der Antriebssysteme umgesetzt und weiterentwickelt. Auch das Fahrzeugrecycling liefert bei der ganzheitlichen Betrachtung einen sehr nützlichen Beitrag. Obwohl das Fahrzeug erst in 20 Jahren oder später in die Verwertung kommt, wird bereits vor Markteinführung das Gesamtfahrzeug auf praxisorientierte Recyclingprozesse hin untersucht (Abb. 11.9), (▶ Abschn. 10.2.5).

Nach der Markteinführung läuft das PLM kontinuierlich weiter. Gesetzliche Vorgaben wie die Substitution von z. B. Cr6 und anderen umweltkritischen Werkstoffen werden im Serienänderungsprozess frühzeitig eingebracht und umgesetzt.

Im Rahmen des PLM werden auf allen Märkten bedarfsgerecht neue Motorisierungen, Karosserie- und Ausstattungsvarianten sowie Optionen eingeführt, mitunter als Reaktion auf veränderte gesetzliche Vorgaben. Auch die Modellpflege, die das Fahrzeug für die zweite Hälfte seines Zyklus am Markt frisch hält, entsteht innerhalb des PLM.

Gleichzeitig fließen Erkenntnisse aus dem PLM natürlich auch in die Planung und Entwicklung der Nachfolgegeneration mit ein. Erfahrungen mit der bisherigen Technologie und mit dem Kaufverhalten der Kunden sind wichtige Grundlagen für die Ausplanung des zukünftigen Angebots. Im Rahmen eines frühen Variantenmanagements können so Varianten vorgehalten werden, die auch zukünftig die Bedürfnisse der Kunden erfüllen und andere Varianten entfallen, die diesen voraussichtlich nicht mehr entsprechen. Von zentraler Bedeutung für diesen Prozess sind ebenso sich abzeichnende Trends, die die OEMs mit Hilfe des Marktforschungsinstruments der Kunden-Klinik analysieren.

Hierfür kann es durchaus sinnvoll sein, die Reaktion potenzieller Kunden an einem physischen Modell zu testen bis hin zur Vorstellung eines Showcars, mit dem Elemente der nächsten Fahrzeuggenerationen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Der OEM wertet die Reaktionen auf solche Studien sorgfältig aus und lässt sie gegebenenfalls in den späteren Entwicklungsprozess des Serienmodells einfließen. Bevor die Entscheidung über den Bau einer Variante fällt, werden allerdings alle wesentlichen Parameter wie Kosten und Absatzvolumina in einem Business Case dargestellt.

## 11.1.9 Serienentwicklung

### 11.1.9.1 Strak

Mit der Konzeptentscheidung und der Designfestlegung beginnt die Erarbeitung des sogenannten Serien-Straks. Der Begriff Strak, der ursprünglich aus dem Schiffsbau stammt, meint eine mathema-

tische Beschreibung der Designflächen sowie die Detailkonstruktion und Auslegung der Karosseriefügungen und der Anbauteile. Für Exterieur- wie Interieur-Oberflächen werden Konstruktionsdaten mit Visualisierungsdaten vernetzt. Bei AUDI werden in jedem Entwicklungsprojekt zwischen 600 und 800 Oberflächen-Bauteile „gestrakt".

Ab dem Meilenstein Designfestlegung gilt es, das Modell möglichst ohne Entwicklungsschleifen und Verzögerungen zum Serienanlauf zu bringen, denn ab diesem Zeitpunkt altert das Design. Weitere Designschleifen verursachen zudem Terminprobleme und erhebliche Kosten. Deshalb gehört der Prozess der Strak-Erarbeitung zu den dichtesten Entwicklungsphasen, bezogen auf die Komplexität der Entscheidungen.

#### 11.1.9.2 Datenkontrollprozess

Im PEP ist Datenkontrolle ein weiterer wesentlicher Meilenstein. Seine Verabschiedung bedarf der Unterschrift der wichtigsten Entscheidungsträger. Auf dem Weg zu ihm sind alle physikalischen und ästhetischen Bedingungen einander gegenüber zu stellen, zu bewerten und zu beurteilen. In dieser Phase findet die eigentliche virtuelle Entwicklung des Fahrzeugs statt. Sie umfasst sowohl die Eigenschaftsnachweise der Fahrzeugphysik als auch die Fragen der Herstellbarkeit mit den freigegebenen Anlagen und Betriebsmitteln der Fabriken – die gesamte fahrzeugseitige Kompetenzkette des Unternehmens wird abgefragt.

Auf das Fahrzeug bezogen, geht es in diesem Abschnitt beispielsweise um die Simulation der Aerodynamik und Aero-Akustik, um die Optimierung von Strömungsabrissen zur Vorhersage von Windgeräuschen, um die Simulation von Regen- und Schmutzbeaufschlagung oder um die Membranschwingungen von Außenhautflächen. Für die spätere Produktion erfolgen unter anderem Methodensimulationen zur Ziehbarkeit der Blechteile, Fließsimulationen von Kunststoffspritzverfahren, Simulationen von Fügeprozessen in der Karosseriebaufertigung und die Lackier-Simulation.

Eine wesentliche Voraussetzung für stabile Entscheidungen sind die Visualisierungstools. Sie beginnen mit einem in Schaum gefrästen Referenzmodell und führen zu virtuellen Projektionstechniken. Welches dieser Tools als Entscheidungsgrundlage Anwendung findet, hängt vom Prozess des OEMs und von der Komplexität der Formensprache ab (► Abschn. 11.3).

#### 11.1.9.3 Planungsfreigabe

Nach der Datenkontrolle wird die sogenannte Gussfreigabe erteilt. Die Serienkonstruktion der Außenhaut geht in die Vorbereitung auf den nächsten wichtigen Schritt, die Planungsfreigabe. Zur Planungsfreigabe ist das Fahrzeug einmal komplett durchkonstruiert. An diesem Punkt ist die Auslegung der Pressen und der Werkzeuge definiert, die Ziehbarkeit der Bleche ist nachgewiesen, der Montageablauf ist beschrieben, die Montagezeiten der einzelnen Bauteile sind definiert und als Target an den Konstrukteur weitergegeben. Der komplette Fertigungsablauf ist im Rahmen von Simulationen durchgeplant (digitale Fabrik), der Prozess der Fertigungsplanung damit abgeschlossen.

Die Fertigungsplanung bildet das Bindeglied zwischen Produktentwicklung und -fertigung. Bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung werden konkrete Fertigungskonzepte ausgearbeitet, die aus vorher festgelegten Modell-übergreifenden Standards ausgewählt werden. Hierbei spielen die eingesetzten Füge- und Verbindungstechniken sowie die Aufbaureihenfolgen des Fahrzeugs entscheidende Rollen.

In diese Planungsphase fließen Prozessinnovationen ein, die neue Funktionalitäten ermöglichen und für eine noch wirtschaftlichere Fertigung sorgen. Schon am Design-Modell wird die technische Umsetzbarkeit einzelner Konstruktionsvarianten geprüft. Dieser Prozess stellt sicher, dass notwendige Produktänderungen zu einem Zeitpunkt der Entwicklung erfolgen, zu dem sie noch möglichst kostenneutral umgesetzt werden können.

In der frühen Phase kommt der Reduzierung von Varianz und Komplexität im Produkt eine Hauptrolle zu, während in der Umsetzungsphase der Schwerpunkt auf einer fertigungsgerechten Konstruktion von Modulen und Bauteilen liegt. Tools wie die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, eine analytische Methode, um Schwachstellen zu finden) und die Toleranzkette-Analyse versetzen die Fertigungsplaner in die Lage, die konstruktive Ausprägung qualitativ zu beurteilen. Über die komplette Planungszeit hinweg kommen virtuelle

Planungstechniken zum Einsatz, um unterschiedliche Fertigungsszenarien zu simulieren und damit die optimale Prozessgestaltung sicherzustellen.

In der Phase der Umsetzungsplanung werden die Prozesse in den Bereichen Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage inklusive der zugehörigen Logistik im Detail geplant. Hierzu zählt auch die Gestaltung der Betriebsmittel und Fertigungseinrichtungen. Die Herstellung der Betriebsmittel übernehmen in der Regel sowohl externe als auch interne Lieferanten, wobei die Fertigungsplanung die Projektarbeit koordiniert und die Sicherstellung des Anlaufs gewährleisten muss. Ihr obliegt ferner die Verantwortung für die anfallenden Investitionen. Im Mittelpunkt ihrer Aktivitäten steht eine wirtschaftliche Fertigung mit möglichst geringen laufenden Kosten.

#### 11.1.9.4 Virtuelle Entwicklung

Mit dem Planungsfreigabestand hat das Fahrzeug eine erste Entwicklungsschleife durchlaufen, jetzt ist seine Baubarkeit unter Berücksichtigung der fertigungstechnischen Einrichtungen sichergestellt. Der Status des Eigenschaftsspektrums wird zu diesem Zeitpunkt rein virtuell abgeleitet – mit Ausnahme des singulären Konzeptfahrzeugs und von Design-Modellen sowie Sitzkisten. Geeignete Werkzeuge hierfür sind DMUs (Digital mock-up) und sogenannte Virtuelle Prototypen. Im DMU lassen sich Kriterien wie die Baubarkeit, die Freigängigkeit der Aggregate sowie die Montageabläufe in der Fabrik und später in der Werkstatt darstellen.

Der Begriff Virtueller Prototyp meint eine mathematische Beschreibung des Konstruktionsstandes und eine mathematische Beschreibung der Fahrzeugeigenschaften. Der Konstruktionsstand bezieht sich auf die Oberflächen – innen und außen –, auf alle zu konstruierenden Bauteile sowie auf die Überprüfung der Positionierung und Bewegungsfreiräume im Fahrzeug. Die Beschreibung der Fahrzeugeigenschaften umfasst alle Eigenschaften, die sich simulieren lassen. Zwischen den Herstellern kann sich die Matrix der operativen Simulationsverfahren, bedingt durch Kompetenz und Verfügbarkeit der Tools, stark unterscheiden.

Im Volkswagen-Konzern sind im PEP inzwischen mehrere hundert Simulationsverfahren im operativen Einsatz, beginnend mit der Struktur- und Crashberechnung über Gesamtfahrzeug-Schwingungen, Aerodynamik, Akustik, elektromagnetische Verträglichkeit, Klima- und Sitzkomfort bis hin zur fahrdynamischen Abstimmung des Fahrwerks (► Abschn. 11.3). Der Begriff „operativer Einsatz“ bedeutet, dass diese Verfahren als Entwicklungsinstrumente der spezifischen Eigenschaften genutzt werden, teilweise als Ersatz für Hardware-Methoden und teilweise in Ergänzung zu diesen. In der sogenannten „Cave“ beispielsweise (◘ Abb. 11.10) bewegt sich ein Ingenieur mit 3D-Brille und virtueller Hand in einer vom Rechner erstellten Karosserie.



◘ **Abb. 11.10** Die „Cave“: Hier kann sich der Ingenieur im virtuellen Raum bewegen

Der Vorteil der Simulationen liegt auf der Hand: Was auf virtueller Ebene konstruiert, zerstört, geprüft, verändert und dargestellt werden kann, muss später von der Hardware nur noch bestätigt werden. Bei einer Crash-Analyse kann der Computer bis zu zweieinhalb Millionen Elemente berechnen und dabei den Ablauf in kleinste Zeiteinheiten bis 250 ms zerlegen (siehe ► Abschn. 11.3). Die Abläufe im Rechner lieferten Aufschlüsse über die Belastung der Passagiere, die den späteren Resultaten im Versuch bereits sehr nahe kamen.

Mit jedem Projekt kommen neue Verfahren hinzu. In ihrer Einführungsphase werden sie parallel zur Hardware-Erprobung eingesetzt. Wenn der Nachweis gelingt, dass sie entscheidungsstabile Erkenntnisse generieren, können sie die Hardware-Methode ersetzen. Diese Vorgehensweise spart Kosten für die Hardware und insbesondere Zeit und erlaubt es, den Optimierungsprozess mit höherer

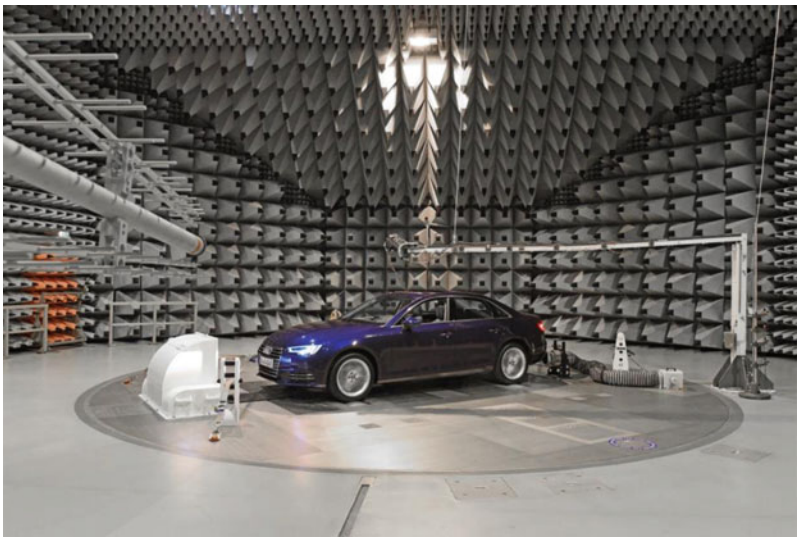


**Abb. 11.11** EMV-Labor: In der Halle werden die Fahrzeuge starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt

Qualität zu betreiben. Allerdings entstehen in der Installationsphase einer neuen Methode auch höhere Kosten, da virtuelle und Hardware-Erprobung nebeneinander laufen.

Die virtuellen Methoden erlauben es heute, mit nur einer Prototypen-Baustufe auszukommen; bei AUDI basiert sie auf der Planungsfreigabe. Die Hardware-Prototypen erlauben es, die virtuellen Eigenschaften gegen die Hardware-Eigenschaften abzugleichen und die Simulationsmodelle fein zu trimmen. So können die weiteren Optimierungen auf Basis der virtuellen Verfahren weiterbetrieben werden. Die endgültige Absicherung und Dokumentation der Eigenschaften – die auch gegenüber dem Gesetzgeber Hardware-bezogen ausgelegt sein muss – erfolgt dann mit den Vorserienfahrzeugen, die schon mit serienfallenden Bauteilen aufgebaut werden.

Eine solche Vorgehensweise bedarf einer exakten Festlegung der virtuellen Methoden zu Beginn der Serienentwicklung, so dass der Erprobungsprozess entsprechend geplant werden kann. Stets entscheidet der für eine Eigenschaft verantwortliche Entwickler zu Beginn eines Projektes, ob er für seine Beschaffungs-Freigabe noch eine Hardware-Baustufe benötigt oder ob das virtuelle Verfahren genügt. Die virtuellen Methoden kommen auch nach der erteilten Freigabe zum Einsatz und werden weiter gepflegt.

Sollten Bauteile später ein unerwartetes Verhalten zeigen, so steht im Absicherungsprozess ein analysefähiges Werkzeug zur Verfügung.

#### 11.1.9.5 Fahrzeugerprobung

Die Hardware-Prototypen dienen auch zu vielfältigen Versuchen (▶ Abschn. 11.4). In das Elektronik-Center von Audi ist eine sogenannte Absorberhalle integriert, in der die elektromagnetische Verträglichkeit des Fahrzeugs ermittelt wird, also die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen aus der Umwelt und die Störungen, die das Fahrzeug etwa mit der Audio- und der Telefonanlage selbst aussendet. Die sogenannte EMV-Halle ist metallisch abgeschirmt und im Inneren mit pyramidenförmigen Absorbern ausgekleidet, die Reflexionen der Funkwellen vermindern. Große Antennen schicken elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz bis 3 GHz auf die Fahrzeuge (Abb. 11.11 und Abb. 11.12).

Auch beim Windkanal (Abb. 11.13) handelt es sich um eine Anlage auf dem jüngsten Stand der Technik. Eine Turbine mit vier Metern Durchmesser und 2,6 MW Antriebsleistung beschleunigt die Luft auf bis zu 250 km/h. Für spezielle Unter-

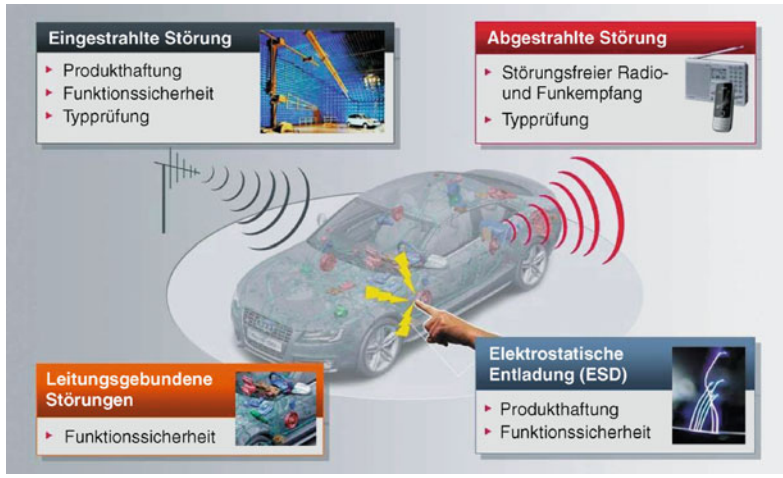



**Abb. 11.12** EMV-Analyse: Die Versuche klären sowohl die Einstrahlung ins Fahrzeug als auch die Abstrahlung aus ihm heraus



**Abb. 11.13** Windkanal: Prototypen und Vorserienexemplare des Audi Q3 wurden intensiv optimiert

suchungen der Kühlluftströmung stehen Thermo-Windkanäle zur Verfügung. Hier lässt sich der bis zu 240 km/h schnelle Luftstrom auf maximal 50 °C aufheizen. Auch der Boden der Messstrecke ist beheizbar, um warme Straßenoberflächen abbilden zu können.

Auch wenn der Anteil der Hardware-Erprobung mehr und mehr durch virtuelle Methoden und Prüfstände ersetzt wird, stellt die physische Erprobung nach wie vor das Salz in der Suppe der Fahrzeugentwicklung dar. Dies gilt insbesondere für die Fahrerprobung, für die mehrere Millionen Testkilometer absolviert wurden. Die ersten Prototypen werden von einem Team aus Entwicklern und Fertigungstechnikern aufgebaut. Sie nutzen diesen Arbeitsschritt, um Entwicklungsprobleme zu identifizieren und Montageprozesse abzusichern. Das Duplizieren der Prototypen erfolgt dann durch die Vorserienteams, die daraus Erkenntnisse zur Prozessoptimierung ziehen.

Die Erprobung hat den Nachweis der Eigenschaften zum Ziel, orientiert an den vielfältigen Einsatzbedingungen des Fahrzeugs auf seinen unterschiedlichen Zielmärkten. Kernerprobungen sind die Winter- und Sommerfahrten, bei denen die Eigenschaften unter klimatischen Extrembedingungen überprüft werden, am Polarkreis bei Temperaturen bis −40 °C.

Bestimmte Materialien wie Kunststoffe, Gummi und Öle, aber auch elektronische Komponenten verhalten sich bei extremer Wärme und Kälte sehr unterschiedlich. Aus Komplexitätsgründen und auch aufgrund des nicht planbaren Einsatzspektrums durch den Kunden können sie nicht in vollem Umfang maßgeschneidert werden. Weitere klimabedingte Erprobungen sind Regenfahrten und Staub-Tests. Sie sind einer virtuellen Berechnung nicht in vollem Umfang zugänglich, werden aber auf der Basis von Laborversuchen bereits vorerprobt.

Alle Festigkeitserprobungen laufen inzwischen auf speziellen Prüfständen. Trotzdem werden die Prototypen in harten Dauerläufen überprüft, um

das Zusammenspiel der vielen Komponenten und Eigenschaften im Gesamt-Fahrzeug abzusichern. Es ist sehr komplex und lässt sich über den Fahrversuch nach wie vor am besten und kostengünstigsten erproben.

#### 11.1.9.6 Änderungsmanagement und Launch-Freigabe

Obwohl das Prinzip der möglichst frühen Prozessorganisation bei allen OEMs immer größere Bedeutung gewinnt, lassen sich späte Änderungen nicht vermeiden. Sie resultieren ebenso aus den Resultaten der Erprobungen als auch aus Erkenntnissen, die auf dem Gebiet der Fertigung gewonnen werden. Alle Änderungen fließen letztendlich in eine finale Überarbeitung des Fahrzeugs ein, die hinsichtlich des Umfangs sehr effizient gemanagt werden muss.

In dieser Phase zählt Geschwindigkeit, denn die Bauteile befinden sich bereits in der Werkzeugerstellung. Zugleich sind Änderungen zu diesem Zeitpunkt kostenintensiv und müssen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit gründlich durchleuchtet und bewertet werden, bevor die Entscheidung erfolgt. Grundsätzlich gilt: Je später eine Änderung erfolgt, desto teurer wird sie. Bei allen wünschenswerten Änderungen findet deshalb ein detaillierter Abgleich von Aufwand und Nutzen statt.

Das Änderungs-Management verfolgt und steuert die notwendigen Änderungen mit Abschluss der Lieferanten-Vergaben und stellt sicher, dass die Werkzeugerstellung beim Lieferanten durchgängig verfolgt werden kann.

Etwa ein Jahr vor dem Start of Production (SOP) wird eine sogenannte Launch-Freigabe ausgesprochen. Diese Freigabe hat den Herstellungsstart der Vorserienfahrzeuge im Focus und muss sicherstellen, dass die dafür benötigten serienfallenden Bauteile verfügbar sind. Auf Basis der Launch-Freigabe beginnen die Aktivitäten zur Vermarktung des Fahrzeuges.

#### 11.1.9.7 Meisterbock

Vorbereitend zum Aufbau der Vorserienfahrzeuge wird die Passgenauigkeit der Bauteile an sogenannten Meisterböcken analysiert und optimiert; dies sind Leiterrahmen aus Aluminium, auf denen die Komponenten montiert, vermessen und bewertet werden. Bei der Struktur- und Außenhaut ist ein Außen-Meisterbock im Einsatz, bei der Innenausstattung ein Innen-Meisterbock. Für den Einbau der Aggregate und der Unterboden-Mechanik (Abgasanlage, Tank, Leitungen und Ähnliches) werden Unterboden-Böcke genutzt. Die Meisterböcke sind ein wichtiges Optimierungs-Werkzeug für die Prozessstabilität in der Fertigung. Sie garantieren die Vermeidung von Nacharbeit und eine hohe Anmutungsqualität der Passungen.

#### 11.1.9.8 Breitenabsicherung

Die Vorserienfahrzeuge werden zum einen zum Einrichten der Fertigungsanlagen genutzt, sind zum anderen aber auch unerlässlich, um die Dokumentationsversuche für die Zulassung durchführen zu können. Darüber hinaus dienen sie dazu, um auf der Basis von einzelnen Baulosen aus den Serienwerkzeugen eventuelle Abweichungen der Serienteile zu den Prototypenteilen zu identifizieren. Baulose können sich durch Toleranzen unterscheiden – auch solche Phänomene lassen durch eine intensive Erprobung aufhellen. Diese Erprobung geschieht durch kundennahe Fahrer, die die Fahrzeuge nach einem Profil bewegen, das dem Kunden-Einsatz stark ähnelt.

Wenn Optimierungen an den Werkzeugen notwendig werden, dann veranlassen Task Forces sie bei den Lieferanten. Sie operieren im Rahmen eines Production Readiness Managements mit kürzesten Entscheidungswegen. In dieser Phase konzentriert sich die gesamte Analysekompetenz des Unternehmens auf die Eventualitäten des Anlaufes. Identifizierte Probleme werden als Erfolge betrachtet, denn es wäre viel schlimmer, wenn sie erst beim Kunden auftreten würden.

### 11.1.10 Serienbetreuung

Nach dem SOP ist die Arbeit keineswegs beendet. Im Rahmen des Product Lifecycle Managements (PLM) betreuen die Ingenieure das Fahrzeug in der laufenden Serie weiter. Im Mittelpunkt dabei steht der Kunde mit seinen sich ändernden Wünschen – sie können neue Motorvarianten ebenso betreffen wie modifizierte Ausstattungen oder neue verfügbare Lösungen, insbesondere im schnell wachsen-

den Bereich der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik und der Assistenzsysteme. Über den Lifecycyle des Produkts hinweg ist auch damit zu rechnen, dass sich auf den jeweiligen Märkten die gesetzlichen Regelungen – wie Abgas- oder Zulassungsvorschriften – ändern können. Der OEM muss auf all diese Einflüsse schnell und flexibel reagieren können.

Im Rahmen des PLM fließen Verbesserungen in der Qualität ebenso in die Produktion ein wie Optimierungen bei den Produktionskosten und bei den Abläufen der Fertigung. Allerdings sind in der laufenden Serie, wenn die Fertigungsplanung bereits abgeschlossen ist, erheblich geringere Änderungen zu erwarten als bei einer Neuentwicklung.

### 11.1.11 Ausblick

In einem Ausblick auf die nächsten Jahre lassen sich mehrere wichtige Linien identifizieren, an denen entlang die weitere Entwicklung aller Voraussicht nach verlaufen wird. Die Entwicklungszeiten dürften sich weiter verkürzen, weil „time to market" einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil darstellt und immer mehr virtuelle Tools zum Einsatz kommen werden. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Entwicklungszeit noch vor wenigen Jahren üblicherweise bei 36 Monaten lag, und das bei viel geringerer Komplexität der Fahrzeuge.

Auch die möglichst frühzeitige Organisation der Prozesse, die eine exakte Steuerung gewährleistet, dürfte noch erheblich an Bedeutung gewinnen. Ein weiteres großes Ziel, auf das alle OEMs hinarbeiten, ist eine zusätzliche Verkürzung der Fertigungszeiten in der Serie. Sie lässt sich erreichen, indem die Beteiligten im PEP die Aspekte des Serienbaus von vornherein noch stärker berücksichtigen. Auch die konsequente Targetierung der Montagezeiten für die einzelnen Bauteile wird stark zur weiteren Straffung beitragen.

Das Produktdatenmanagement (PDM), das die Verfügbarkeit aller Daten für alle Beteiligten strukturiert sicherstellt, hat als zentrales Tool im Entwicklungsprozess eine hohe Bedeutung gewonnen. Gleiches gilt für das Product Lifecycle Management (PLM), in dem das Datenmanagement, das Prozessmanagement und die Anwendungsintegration über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs inklusive des nötigen Änderungsmanagements zusammengefasst werden.

All diese verfeinerten Werkzeuge und Methoden werden die OEMs in die Lage versetzen, ihre Produkte noch genauer auf die Kundenwünsche zuzuschneiden, die auf den jeweiligen Märkten existieren. Die Matrix der Vernetzung wird noch feiner werden, beginnend von Ausstattungsinhalten über Motorvarianten bis hin zu Karosserieversionen, die speziell für einzelne Märkte aufgelegt werden. Gleichzeitig werden die großen Mehrmarken-Konzerne oder strategische Kooperationspartner ihre modularen Komponenten- und Fahrzeugarchitekturbaukästen noch gezielter nutzen, um für die verschiedenen Marken differenzierte Varianten schnell, effizient und mit hohem Anlaufreifegrad zu entwickeln.

## 11.2 Fahrzeugkonzeption in der frühen Entwicklungsphase

### 11.2.1 Einführung

#### 11.2.1.1 Definition

Die Entwicklung eines Fahrzeuges lässt sich unabhängig davon, ob es sich um eine Nachfolgeentwicklung oder um eine neue Produktidee handelt, in zwei Hauptphasen gliedern:

1. die **Konzeptphase** (die frühe Entwicklungsphase) und
2. die **Serienentwicklungsphase**.

Die Konzeptphase beginnt üblicherweise mit einem top-down gesetzten Auftrag zur Realisierung einer **Produktvision** (mit entsprechenden Zieldefinitionen) und endet mit dem **Fahrzeuglastenheft**.

In der Serienentwicklungsphase werden ausgehend von den in der frühen Phase festgelegten Konzepten und Inhalten Spezifikationen für alle Fahrzeugumfänge verbindlich vereinbart und im weiteren Prozess umgesetzt. Der Serienentwicklungsprozess endet mit dem „Job Nr. One" – dem ersten kundenfähigen Fahrzeug aus Serienproduktionsanlagen.

#### 11.2.1.2 Zielsetzung der frühen Entwicklungsphase

Diese Phase ist hauptsächlich dadurch gekennzeichnet, dass ein Lösungsangebot an Konzeptalternativen erarbeitet wird, die den Zielsetzungen der Produktvision und dem damit verbundenen „Business-Case" entsprechen kann. Die Beschreibung von zukünftigen gesellschafltichen Entwicklungen und Trends [12] sowie der Kundenanforderungen [13], beides in der Regel auch regional spezifisch betrachtet, ist dafür eine wichtige Grundvoraussetzung, damit der Zielraum für ein neues Fahrzeug beschrieben werden kann. Es gilt hierbei einen Abgleich zwischen den funktionalen, den vertrieblichen und den betriebswirtschaftlichen Zielen auf der einen Seite und den realen Lösungsmöglichkeiten auf der anderen Seite zu schaffen. Ergebnis dieses Iterations- und Integrationsprozesses ist ein Konzept- oder in weiterer Detaillierung dann das (Grob-)Lastenheft.

Es wird damit das **Gesamtfahrzeugkonzept** und damit die wichtigsten Hauptmerkmale wie Fahrzeugcharakter, Proportionen, Fahrzeugarchitektur, Hauptmasse, Crashtauglichkeit, Fahrleistungen, Gewicht, Ausstattungsinhalte, Wertanmutung, Innovationen, vor allem aber auch die Herstellkosten maßgeblich determiniert. Das zu diesen Anforderungen passende Antriebsstrangportfolio ist dabei eine wesentliche Eingangsgröße für die Erarbeitung des neuen Fahrzeugkonzepts. Speziell die aktuell nachhaltige Verbreitung „Alternativer Antriebe" und die damit verbundenen steigenden Anforderungen an Packageräume im Fahrzeug, zwingen Hersteller dazu künftige Fahrzeugkonzepte völlig neu zu denken. Verbunden mit dieser Beschreibung wird eine detaillierte Festlegung des Entwicklungsablaufes mit den entsprechenden Reifegradzielen festgelegt.

Spätere Konzeptänderungen (in der Serienentwicklungsphase) sind in der Regel mit hohem technischem Risiko und finanziellem Zusatzaufwand verbunden. Daher ist der Anspruch an die Aussagequalität in dieser frühen Phase in den letzten Jahren enorm gestiegen. Dieser Erkenntnis Rechnung tragend, sind diese Aktivitäten der Konzeptfindung und -evaluierung wie auch die Toolentwicklung für diese Phase heute von besonderer Bedeutung und stellen einen strategischen Erfolgsfaktor dar.

#### 11.2.1.3 Fahrzeugkonzeptinhalte der frühen Phase

Wesentliche Voraussetzung für ein änderungsresistentes und damit stabiles Lastenheft ist die Ausarbeitung von Konzeptalternativen, die hinsichtlich der geforderten Produktziele (z. B. Innenraumgröße, Variabilität, Komfort, Fahrdynamik, Fahrleistung, Verbrauch, Sicherheit, Herstellkosten, …) mit ausreichender Prognosesicherheit bewertbar sein müssen. Häufig werden in bestehenden Marktsegmenten bereits bekannte Grundkonzepte (Limousine, Kombi, etc.) weiterentwickelt. Wenn jedoch die Produktziele so nicht erreichbar sind, wird ein neues Konzept nötig. Dies ist besonders eindrucksvoll bei dem Anspruch an urbane Mobilitätsbedürfnisse mit dem Konzept des Smart fortwo gelungen (◘ Abb. 11.14). Hier wurde Mitte der 90er Jahre ein neues Grundkonzept vorgestellt und mit einer neuen Marke erfolgreich in den Markt eingeführt. Dieses neue Marktsegment hat sich als nachhaltiger Trend bestätigt und wird mittlerweile in der 3. Generation fortgeführt. Dies nennt man ein „purpose-design" Konzept. Eine solche Anforderung kann auch aus innovativen Antriebstechnologien resultieren, wie es z. B. die monolithische Unterbodenbatterie eines Tesla Model S gezeigt hat. Dabei ist dieses Fahrzeugkonzept, das sich in wesentlichen Punkten von der Art konventionelle Fahrzeuge zu bauen unterscheidet, gleichzeitig eine technologische Notwendigkeit (Batterieintegration) und gestalterisch Chance (Nutzung freiwerdender Räume).

Das Gesamtfahrzeugkonzept wird aus Einzelkonzepten zusammengesetzt, die sich entweder durch direkte Übernahme von vorhandenen Komponenten oder durch Modifikation erprobter Standardkonzepte als zielführende Lösung anbieten. Ergänzt werden diese Basiskonzepte durch Technologien, Innovationen und neuartige Lösungsansätze, die den zum Markteinführungstermin geltenden gesetzlichen Anforderungen Rechnung tragen und den neuesten Stand, bzw. die Attraktivität des Produktes sicherstellen sollten. Um die Risiken



**Abb. 11.14** Smart fortwo

bei Neukonzepten beherrschen zu können, werden diese meist in den Innovationsstrategien (der Fahrzeughersteller und Systemlieferanten) verankert und können somit im Vorfeld außerhalb des kritischen Pfades eines Fahrzeugprojektes abgesichert werden.

Darüber hinaus müssen vom sogenannten Leadfahrzeug gegebenenfalls noch Aufbauvarianten abgeleitet und abgesichert werden.

Dabei wird das Fahrzeugkonzept schrittweise konkretisiert und so zu einem **Groblayout** verdichtet, das alle erforderlichen Komponenten in ihrer räumlichen Ausdehnung und Anordnung erfasst werden und gleichzeitig die funktionalen Anforderungen bzgl. der systemischen Verknüpfungen und auch der notwendigen Freiräume erfüllt werden.

Diese erste dreidimensionale Beschreibung des Fahrzeugs erlaubt nun einen ersten Abgleich mit den wesentlichen geometrischen, physikalischen und auch funktionalen Zielgrößen. Darüber hinaus dient diese Datensammlung als Basis für eine erste **Produktbeschreibung**, die wiederum die Grundlage einer ersten wirtschaftlichen Bewertung liefert.

Die Gestaltung des Exterieurs beschränkt sich in dieser frühen Phase auf Proportionsstudien und Ideenskizzen, da die endgültige Festlegung der Form (Design-Freeze) so spät wie möglich erfolgen sollte. Für die Interieurgestaltung gilt sinngemäß dieselbe Logik. Hier sollten frühzeitig die Fahrerpositionen (inkl. Verstellfelder), die wichtigsten Innenraummaße und das Bedien- und Anzeigenkonzept festgelegt werden. Da die Anmutungsqualität im Interieur einen wichtigen Kostenaspekt abbildet, sollte das Material- und Oberflächenkonzept ebenfalls in der frühen Konzeptphase definiert werden. Die eigentliche Formfestlegung des Interieurs erfolgt dann aber aus Gründen der Marktnähe so spät wie möglich.

## 11.2.2 Vorgehensweise

### 11.2.2.1 Prozess

Das Entwicklungsteam nähert sich dem gesetzten Ziel, das zu diesem frühen Zeitpunkt nur in Form einer grob beschriebenen Produktvision vorliegt, wie eingangs erwähnt, durch einen iterativen Optimierungsprozess. Dieser Prozess der Konzeptsynthese ist gekennzeichnet durch die vergleichende Bewertung von konkurrierenden Konzeptvarianten auf Teilsystemebene und deren konstruktive Integration und Adaption in das Fahrzeuggesamtkonzept.

Die Bewertung dieser Konzeptalternativen erfolgt nach technischen, funktionalen und wirtschaftlichen Kriterien unter dem Einsatz effizienter Methoden und Tools.

### 11.2.2.2 Digitaler Prototyp

Der digitale Prototyp bündelt alle CAE-Berechnungsdisziplinen, um die Funktionen eines Fahrzeugs schon sehr früh im Entwicklungsprozess in einer virtuellen Abbildung darzustellen, zu testen und zu verbessern.

Wesentliche Fahrzeugfunktionen sind z. B.:

- Fahrleistung, Verbrauch, Schadstoffemissionen,
- Struktursteifigkeit,
- Schwingungen/Vibrationen/Geräusche,
- Betriebsfestigkeit/Lebensdauer,
- aktive Sicherheit (Fahrdynamik, Assistenzsysteme),
- passive Sicherheit (Crashtauglichkeit, Insassenschutz/Rückhaltesysteme, Fußgängerschutz),
- Strömungen (Aerodynamik/Aggregate-Kühlung/Klimatisierung, Energiemanagement [14]).

Sofern es sich um einfachere Berechnungsprobleme handelt, wie es z. B. bei Fahrleistung- und Ver-



**Abb. 11.15** Digitaler Prototyp

brauchsprognosen der Fall ist, können diese mit PCs oder Workstations erledigt werden.

Komplexe, 3-dimensionale Gesamtfahrzeugsimulationen benötigen hingegen eine größere Rechenleistung, die über Workstations oder Berechnungscluster zur Verfügung gestellt werden. Das sind Hochleistungsrechner oder neuerdings Cluster einzelner Rechnereinheiten, die mit einer hohen Anzahl von Prozessoren und Speicher ausgestattet sind.

Der Rechnerbedarf richtet sich nach der Berechnungsdauer einer jeweiligen Problemstellung.

Ziel ist es, die komplexen Simulationen „über Nacht" zu rechnen, damit das Ergebnis schon am nächsten Arbeitstag für eine Analyse bereitsteht.

Die rasante Entwicklung der Rechnertechnik ermöglicht heute Probleme mit Modellgrößen von mehreren Millionen Finiten-Elementen (FE) zu simulieren. Die Modellgenauigkeit hat sich in den letzten 15 Jahren um den Faktor 100 erhöht, so dass Modellstände Datenmengen von mehreren Tausend Gigabytes umfassen (Abb. 11.15).

Um den Entwicklungsstand erlebbar zu machen, stehen den Ingenieuren neben den Berechnungsmethoden zusätzlich moderne Simulatortechniken zur Verfügung, die mit Virtual Reality-Methoden virtuelle Probefahrten ermöglichen, noch bevor reale Prototypen aufgebaut sind. Ergonomieuntersuchungen können mittels modernen Simulationstools (z. B. RAMSIS [15]) zunächst virtuell bewertet werden. Diese Tools berücksichtigen dabei nicht nur geometrische Aspekte sondern können auch Kraftbedarfsniveaus und damit „Bequemlichkeitsindizes" für Einstiegs- oder Bedienaufgaben bewertbar machen. Falls nötig können mit Ergonomieprüfständen Maßkonzepte von Fahrzeugtypen sehr schnell dargestellt und variiert werden. Testfahrer nehmen darin Platz und absolvieren vorgegebene Fahraufgaben. Ergonomen und Psychologen beobachten die Probanden, um den Sitz- und Sichtkomfort sowie den Umgang mit Bedien- und Anzeigesystemen bewerten zu können. Die VR-Technik animiert in Echtzeit die aktuelle Fahrzeugumgebung mit Straßen-, Städte- und Landschaftsbildern. Ein Fahrdynamikmodell stellt die physikalische Grundlage für die Fahrzeugbewegung, welches interaktiv in Echtzeit die Steuerungsparameter von Lenkung, Pedalerie und Gangschaltung verarbeitet und an die Bildprojektion übermittelt. Dies kann man dann als 3D-Information bewerten, z. B. in einer Cave, einem Raum, in dem um den Betrachter herum bis zu 5 Projektionsflächen das Eintauchen in die virtuelle Welt des Fahrzeugs ermöglichen [16].

Des Weiteren gibt es Fahrsimulatoren, die die Bewegung eines Fahrzeugs während einer Probefahrt über komplexe Bewegungssysteme nachstellen. (Abb. 11.16). Dabei unterscheidet man im Wesentlichen 2 Bereiche der Fahrzeuganregung.

Der eine Bereich befasst sich mit dem Fahren (Ride) ohne Lenkungseinfluss vom Fahrer. Das Fahrzeug wird in diesem Fall hauptsächlich durch die Beschaffenheit der Fahrbahnoberflächen angeregt. Der Frequenzbereich liegt bei ca. 0,2 bis 30 Hz.

Der andere Bereich der Fahrzeuganregung wird „Handling" genannt, indem die Effekte der vom Fahrer induzierten Lenkmanöver, wie Spurhalten, Kurvenfahren, analysiert werden. Hier liegt der Frequenzbereich zwischen 0 und 5 Hz.

Der Proband erfährt dabei an seinem Körper Kräfte und Beschleunigungen, wie bei einer realen Probefahrt.

Die Fahrzeugdaten im Zusammenspiel mit den Informationen der Beschaffenheit realer Teststrecken ermöglichen es den Ingenieuren das neue Fahrzeugmodell wirklichkeitsgetreu „fahren" zu können. Dazu legen Experten mehrere tausend Kilometer an Probefahrten auf virtuellen Teststrecken zurück. Mit Hilfe des DPT können so relevante Fahr- und Bremsmanöver im Computer abgespult werden, bevor sicherheitskritische Fahrversuche mit realen Prototypen durchgeführt werden [17, 18].

Diese Vorgehensweise spart Entwicklungszeit, reduziert den Prototypenaufbau und hilft Zielkonflikte bei einer Gesamtkonzeptauslegung zu erken-

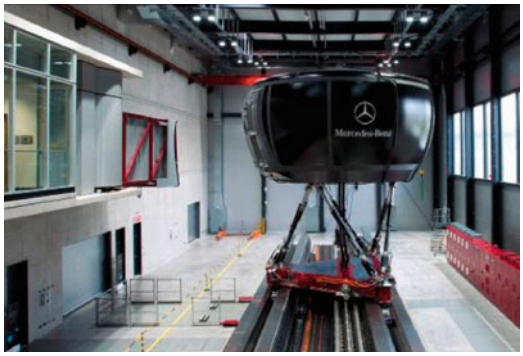


**Abb. 11.16** Der moderne Daimler Fahrsimulator

nen und Ideen zur Konfliktbeseitigung frühzeitig zu bewerten.

#### 11.2.2.3 Tools

Der Tooleinsatz in der frühen Phase unterscheidet sich von der Serienentwicklungsphase dadurch, dass die Konstruktion auf Basis vieler Unbekannten im System beginnen muss. Vom Groben zum Feinen vorgehend ist es daher wichtig, auf effiziente Weise Package-, Geometrie- und Rechenmodelle zu kreieren, mit denen entsprechende Eigenschaftsbereiche aller Fahrzeugfunktionen wie z. B. das fahrdynamische Verhalten, Fahrkomfort, Kühlung, Klimatisierung und Bauteiltemperaturen abgesichert werden [19]. Dabei gilt es den in dieser Phase schnellen Änderungszyklen gerecht zu werden. Einfache Handformeln wie beispielsweise der Static Stability Factor (siehe ► Abschn. 11.2.3.1) und auch die geometrische Ableitung zur Ermittlung der Crashenergiebilanz, dienen als Basis zur Erstellung neuer Methoden und der konzeptionellen Grundbewertung. Tools mit parametrischen Funktionen ermöglichen durch die Variation von z. B. wichtigen Haupt- u. Komfortmassen den schnellen Aufbau von alternativen Fahrzeugvarianten [20].

Das Zusammenwirken zwischen Geometrie und Physik stellt die Hauptherausforderung dar. Aktuelle Systeme zur frühen Konzeptbeschreibung und -berechnung, z. B. SFE Concept, bieten die Chance zur schnellen Beschreibung und Bewertung von Konzeptalternativen [21]. Die am vielversprechendsten Konzepte werden dann mittels CAD-Systemen und den Funktionalitäten zur Parametrisierung von Geometriemodellen detailliert aufgebaut. Die Veränderung von einzelnen, wenigen Parameterwerten bewirken eine komplette 3D-Konstruktionsänderung, die automatisch ausgeführt wird. Die geänderte Geometrie wird über Schnittstellen an Vernetzungsprogramme übergeben, die je nach Aufgabenstellung die Vernetzung des Modells automatisch durchführt. Rand- und Zwangsbedingungen zu Krafteinleitung und Lagerung komplettiert das vernetzte Modell zu einem Eingangsdatensatz für eine physikalische CAE-Funktionsanalyse [22].

Die verwendeten Simulationstools werden sowohl in der Konzept- als auch in der Serienentwicklung eingesetzt. Einzige Unterschiede liegen in der Detaillierung der Inputdaten. So werden bei Fahrleistungs- und Verbrauchsanalysen künftige Motorleistungen von existierenden extrapoliert und vorhandene Grobgewichtswerte eingesetzt. Bei der Fahrdynamikbetrachtung werden die Grobschwerpunktwerte und erste Achskinematiken zugrunde gelegt und für die Modelle Analogien (kinematische oder elastokinematische Kennwerte der Achsauslegung) aus anderen Fahrzeugen verwendet. Die jeweiligen Grenzwerte sind konzeptspezifisch und berücksichtigen den Spielraum der zugrunde gelegten Achskonzepte [23].

Steifigkeits-, Festigkeits-, Schwingungs- und Crash-Berechnungen greifen abhängig vom Entwicklungsablauf auf Fahrzeugdaten (Inputdaten) zurück, die viel Erfahrung der Ingenieure bei der Interpretation der Ergebnisse erfordern.

Der physikalische Modellstand eines Fahrzeugs wird digitaler Prototyp DPT genannt, der sukzessive verfeinert und komplettiert wird. Das Ergebnis des digitalen Prototyps ist die funktionale Bewertung aller relevanten Fahrzeugfunktionen unter Verwendung bekannter Randbedingungen und Kennwerte zu einem festgeschriebenen Fahrzeug-Modellstand. Im späteren Verlauf der Fahrzeugentwicklung werden diese sukzessiv durch physische Prototypen ersetzt, um reale Erprobungen (z. B. Fahrversuche, etc.) durchführen zu können.

Moderne Optimierungsverfahren (Topologie-, Wanddickenoptimierung, …), Sensitivitätsanalysen bis hin zu multidisziplinären Methoden unterstützen und stabilisieren den Konzeptfindungsprozess und tragen zur Erhöhung des Konzeptreifegrads bei.

## 11.2.3 Beispiele

### 11.2.3.1 Fahrdynamik

Die Aktive Sicherheit und das fahrdynamische Verhalten werden heute in allen relevanten Fahrsituationen genau analysiert.

Um die wichtigsten Fahrzustände abzudecken, werden in der Fahrzeugentwicklung viele verschiedene Fahrmanöver durchgeführt, um die relevanten Kennwerte und das Fahrverhalten eines Fahrzeugs zu ermittelt.

Während die klassische Fahrverhaltensanalyse sich hauptsächlich auf Messdaten aus Versuchsfahrten abstützt, kann das Fahrverhalten in einer frühen Phase der Fahrzeugentwicklung nur über modellbasierte Ansätze erfolgen.

Einen ersten wichtigen Anhaltspunkt für das fahrdynamische Verhalten liefert der Static Stability Factor (SSF), der die Spurweite $w$ und die Schwerpunkthöhe $h$ ins Verhältnis setzt.

$$\mathrm{SSF} = \frac{w}{2h}$$

und die statische Kippstabilität eines Fahrzeugs beschreibt.

Weitere wertvolle Kennwerte für die erste Charakterisierung des Fahrverhaltens hinsichtlich Reifen-, Fahrwerkseigenschaften und Lenkungselastizitäten werden über die stationäre Kreisfahrt auf konstanten Radius gewonnen:

- Eigenlenkgradient,
- Achsseitenkraftkennlinien,
- Wankwinkelgradient,
- Schwimmwinkelgradient.

Der Eigenlenkgradient EG beschreibt das Verhältnis der Lenkwinkeländerung zur Änderung der Querbeschleunigung bei zunehmender Fahrtgeschwindigkeit und weist darauf hin, ob das Fahrzeug bei hohen Kurvengeschwindigkeiten eher unter- oder übersteuert [19], (Abb. 11.17).

$$\mathrm{EG} = \frac{m}{l_\mathrm{l}}\left(\frac{l_\mathrm{h}}{c_\mathrm{v}} - \frac{l_\mathrm{v}}{c_\mathrm{h}}\right) = \left[\left.\frac{\partial\delta}{\partial a_\mathrm{q}}\right|_{a_\mathrm{q}\ll g} - \frac{\partial\delta_\mathrm{A}}{\partial a_\mathrm{q}}\right].$$

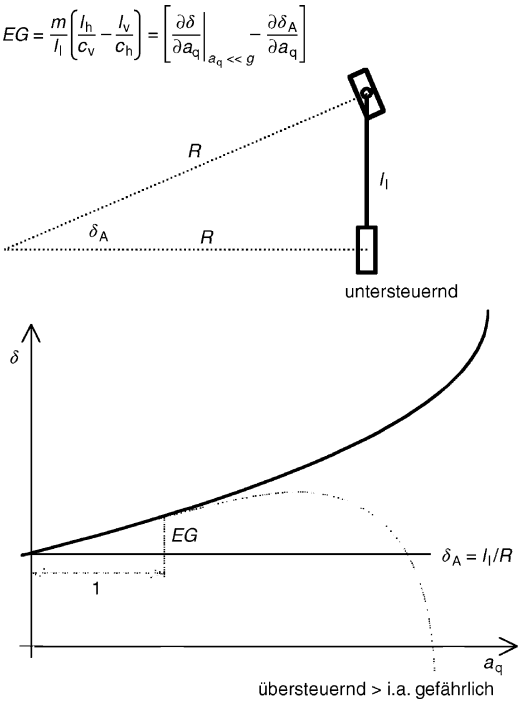



**Abb. 11.17** Eigenlenkgradient

Die Simulation weiterer Fahrmanöver kann dann über die Eingabe weiterer Lenkradwinkeln und Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt und ausgewertet werden (Abb. 11.18).

Eine Variantenabsicherung erfolgt, indem neben Standardbeladungszuständen auch kritische Fahrzeugbeladungen (z. B. Dachlast, max. Kofferraumlast, Anhänger) abgeprüft werden. Nur die in

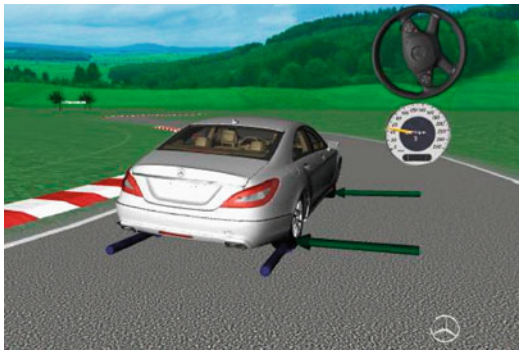


**Abb. 11.18** Fahrdynamiksimulation CLS

der Simulation als kritisch identifizierten Beladungen werden dann im Fahrversuch nochmals gesondert abgeprüft.

Darüber hinaus werden die Chassiskonzepte in Verbindung mit Komfort- und Fahrdynamik-Regelungssystemen in den Modellen abgebildet.

Besondere Bedeutung kommt dabei der Integration der Regelalgorithmen zu. Diese können in Form von Software in die Rechenmodelle integriert werden (Software-in-the-Loop SIL) oder es werden die Steuergeräte direkt angebunden (Steuergeräte-Hardware-in-the-Loop Simulation HIL).

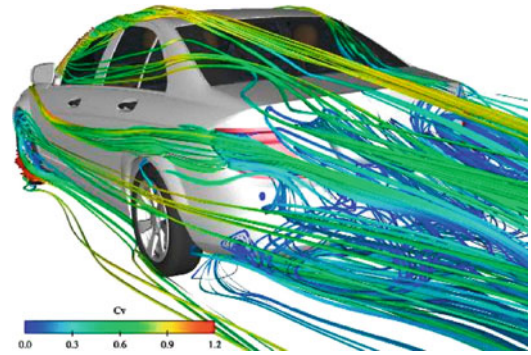
#### 11.2.3.2 Passive Sicherheit – Betriebsfestigkeit

Sobald erste Konstruktionsmodelle von Gesamtfahrzeugen in CAD vorliegen, können automatisiert 3D-Netzmodelle generiert werden, die je nach Berechnungsaufgabe (Insassenschutz, Fußgängerschutz, Crashtauglichkeit, Betriebsfestigkeit) unterschiedliche Detaillierungsgrade aufweisen. Auf Basis der Geometrie, in Form der 3D-Netzmodelle, wird zusammen mit geeigneten Materialmodellen, Rand- bzw. Zwangsbedingungen sowie Belastungen ein numerisches Modell der Gesamtfahrzeugstruktur erzeugt. Mit Hilfe leistungsfähiger Finite-Elemente-Programmen kann der Entwicklungsstand des Fahrzeugs hinsichtlich Crash, Betriebsfestigkeit, Noise/Vibration/Harshness (NVH) etc. bewertet werden. Die enge Kommunikation von Konstruktion und Berechnung ermöglicht eine effektive und kontinuierliche Verbesserung der Fahrzeugstruktur [22, 25, 26].

#### 11.2.3.3 Aerodynamik

Auch hier gilt, sobald 3D-Geometriemodelle vorliegen, können numerische Simulationsverfahren eingesetzt werden, um dem Ingenieur einen Einblick in das Strömungsverhalten und über Optimierungspotenziale zu geben (◘ Abb. 11.19).

Aufgrund der Komplexität der numerischen Verfahren wird die finale Modelloptimierung nach wie vor im Windkanal durchgeführt.




◘ **Abb. 11.19** Aerodynamiksimulation Mercedes C-Klasse

#### 11.2.3.4 Fahrleistung und Verbrauch

Diese lassen sich auf Basis der gewonnenen Konzeptdaten bereits relativ exakt berechnen. Mit zunehmender Reife erhärten sich die Werte für Gewicht, Aerodynamik, Motorkennfeld, Getriebe und Achsübersetzungen und Rollwiderstand [27].

### 11.2.4 Ausblick

Die außerordentliche Bedeutung der Konzeptphase haben die Bemühungen um die Verbesserung von effizienten Tools und den Einsatz von parametrischen Methoden in den Mittelpunkt der Weiterentwicklung gestellt. Dazu werden vor allem wissensbasierte und parametrische Funktionen in Konstruktionstools integriert (z. B. Verwendung von Templates in Catia V5 [28] zur Konstruktion und funktionalen Absicherung). Darauf ausgerichtete Datenbankmanagementsysteme (Engineering Data Managementsysteme EDM) bilden das Rückgrat dieser Produktentwicklung. Die verbesserte Integration von CAD und CAE und insbesondere die Verwendung Multidisziplinärer Optimierungs-Verfahren (MDO) [29] ist ein entscheidender Erfolgsfaktor für eine weitere Prozessbeschleunigung in der Zukunft. Dabei werden in Zukunft neben den klassischen Konstrukteursdisziplinen auch Methoden und Tools zur Kostenprognose in der frühen Phase eine zunehmend wichtige Rolle spielen.

## 11.3 Berechnung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung

### 11.3.1 Einleitung

Neben Faktoren wie Qualität und Innovation entscheidet heute in immer stärker werdendem Maße auch die Zeit von der Idee bis zur Serienreife über den Erfolg eines Produktes. Zusätzlich ist der Automobilmarkt von einer fortschreitenden Kundenorientierung geprägt, die mit einer stark ansteigenden Komplexität einhergeht. Somit müssen immer mehr und immer komplexere Fahrzeuge in immer kürzerer Zeit entwickelt werden. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist es von entscheidender Bedeutung, dass Zielkonflikte bereits in der frühen Phasen der Entwicklung entdeckt und gelöst werden können.

Vor diesem Hintergrund wächst der Einsatz von computerbasierten Berechnungsmethoden (Computer Aided Engineering, CAE) kontinuierlich. Kunden führen als primären Kaufgrund von Automobilen das Design an, gefolgt von den Eigenschaften des Fahrzeugs. Dies sind insbesondere Wirtschaftlichkeit, Fahrleistungen, Sicherheit, Schwingungskomfort, Akustik und Assistenzfunktionen. Während die virtuellen Techniken für Designpräsentationen noch am Anfang stehen, da bislang in der Simulationsumgebung die ästhetischen Effekte für die Designbeurteilung nur unzureichend abgebildet werden konnten, haben sich für die Eigenschaftsauslegung mittels CAE-Methoden in den vergangenen Jahrzehnten sehr erfolgreich Berechnungsverfahren entwickelt [30, 31]. Diese werden in ihren Grundzügen anhand von aktuellen Beispielen aus der Fahrzeugentwicklung dargestellt. Neben den schon klassischen Disziplinen wie der Finite Elemente (FE) Berechnung, Simulation von Mehrkörpersystemen (MKS) sowie Strömungen (CFD) haben sich durch die zunehmende Elektrifizierung im Automobilbereich auch Simulationsmethoden für Elektrik und Elektronik etabliert. Weiterhin stehen Verfahren zur Berechnung von Bauteilherstellungsprozessen und die Lösung multidisziplinärer Problemstellungen im Fokus.

Während sich die Berechnungsmethoden versuchsbegleitend entwickelt haben, steht heute mehr und mehr der Konzept-Entwurf in den frühen Entwicklungsphasen im Fokus von CAE. Aufgabe dieser Art von Eigenschafts- und Funktionsauslegung ist es, zusammen mit Design, Package, Konstruktion und Versuch funktionale Konzepte zu bewerten, Zielkonflikte aufzudecken, alternative Lösungen zu erarbeiten und die Zielerreichbarkeit im Konzept festzustellen. Dabei gilt es, die Anforderungen an Bauteile aus dem Verhalten im Gesamtsystem abzuleiten. Aus diesem Grund wird die Einbindung der Simulation in den Entwicklungsprozess zum entscheidenden Faktor. Wegen der phasenabhängig etwas unterschiedlichen Herangehensweise wird einführend der CAE-Prozess im Unternehmensprozess skizziert.

### 11.3.2 CAE-Prozess und notwendige Infrastruktur in der Produktentstehung

Beim Einsatz von CAE ist zum einen eine hohe Ergebnisgüte, d. h. eine gute Nachbildung der Physik durch die verwendeten Modelle, zum anderen die optimale Einbindung in den phasenabhängigen Entwicklungsprozess wichtig, um einen möglichst hohen Nutzen zu generieren.

Dementsprechend werden die CAE-Methoden in enger Abstimmung mit dem jeweiligen Projektzeitplan ausgewählt und mit der fortschreitenden Produktdefinition verfeinert. In der sehr frühen Phase erfolgt die Untersuchung und Auswahl der Konzepte anhand von Handformeln. Typische Beispiele sind die Achslastverteilung, die Abschätzung der Wankneigung oder die Größe der benötigten Kühlernetze. Mit zunehmender Detaillierung werden Rechenmodelle für unterschiedliche Disziplinen aufgebaut.

Die Produktentstehung gliedert sich in zwei Hauptphasen: die Konzept-, die Serienentwicklungs- und die Erprobungsphase. Beide Phasen beinhalten Meilensteine, zu denen wichtige Produktentscheidungen getroffen werden. Die Meilensteine dienen der Synchronisation des Entwicklungsprozesses zwischen den einzelnen Fachbereichen. Der wichtigste Meilenstein der virtuellen Phase ist das Ende der Konzeptphase. Die Ergebnisse der Auslegung zu diesem Meilenstein finden sich

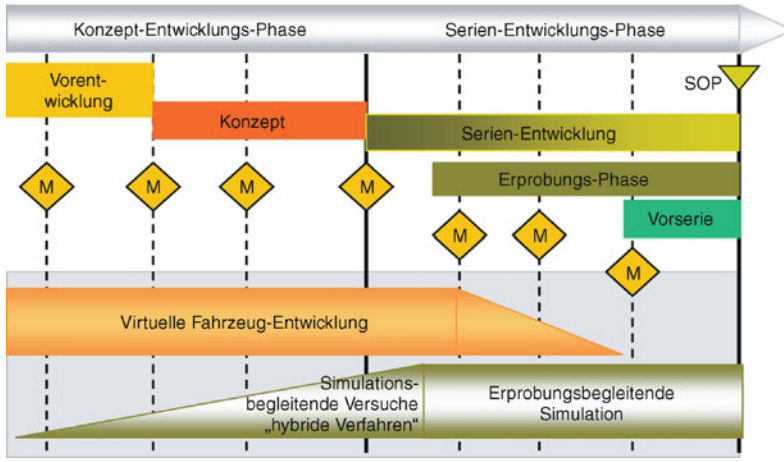



**Abb. 11.20** Phasenabhängiger Einsatz der Simulation im Produktentstehungsprozess (PEP) und Meilensteine (M) zur Synchronisation des Entwicklungsprozesses (Design-Reviews)

später in den physischen Prototypen wieder (Abb. 11.20).

Um die Produktreife möglichst rasch zu steigern und damit die späteren Änderungskosten niedrig zu halten, wird in Auslegungsgesprächen der Reifegrad der Konstruktion kontinuierlich entwickelt. Deshalb ist es sinnvoll, dass zu den frühen Meilensteinen eine synchronisierte Bewertung der Eigenschaften stattfindet und auf die jeweiligen Geometriestände der Konstruktion referenziert wird. Da die „virtuelle Welt" bestimmte Bearbeitungszeiten (ca. 4–6 Wochen) benötigt, müssen vor einem Review-Meilenstein CAD-Stände „eingefroren" und als Basis für das CAE-Modell genutzt werden. Zum Meilenstein wird dann üblicherweise ein geometrischer Reifegrad über den Prozess des DMU (Digital Mock Up) und ein funktionaler Reifegrad über die Berechnung berichtet. Ein unternehmens- bzw. konzernweit vernetztes Datenmanagement ist hierfür unentbehrlich (s. ▶ Abschn. 11.3.2.2). Da die Entwicklung von Assistenzfunktionen und Steuergerätesoftware weitgehend geometrieunabhängig abläuft, ist der Prozess auch vom DMU entkoppelt und wird mit eigenen Meilensteinen und Reifegraden durchgeführt.

#### 11.3.2.1 CAE-Einsatz in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen

**Konzeptphase** War früher der Produktentwicklungsprozess von Beginn an vor allem durch die Geometrie bzw. die Konstruktion getrieben, so steht heute zunehmend die Auslegung von Eigenschaften und Funktionen im Vordergrund. Wesentliche Eigenschaften des Produktes wie Crashperformance, Verbrauch und Fahrkomfort werden in der Konzeptphase definiert und detailliert. Da zu diesem frühen Zeitpunkt noch keine exakten Konstruktionsdaten vorliegen, hat die simulative Auslegung mittels Konzepttools und vereinfachten virtuellen Modellen eine große Bedeutung.

Die Herausforderung in dieser Phase besteht darin, aus den zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Daten (Übernahme/Extrapolation von Vorgängern, Erfahrungswerte, Expertenschätzungen), die noch eine relativ große Varianz aufweisen, bereits möglichst gute Prognosen über das zukünftige Produkt zu erstellen. Darüber hinaus muss eine Vielzahl von möglichen Varianten betrachtet und bewertet werden, um auf Basis dieser Ergebnisse die Konzeptentscheidungen treffen zu können. Hierbei hel-

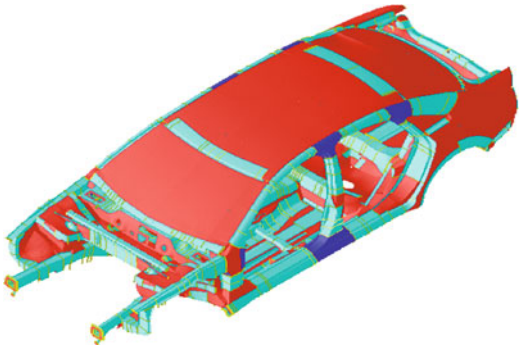


**Abb. 11.21** Beispiel eines parametrisierten Karosserie-Modells in der Konzeptphase (Quelle: AUDI AG)

fen Tools, mit denen man aus schnell austauschbaren bzw. parametrierbaren Prinzipmodellen, die auf Kennfeldern oder einfachen Formeln basieren, ein Gesamtsystem aufbaut und daraus grobe Ergebniswerte erhält, die zumindest Relativvergleiche und somit Entscheidungen erlauben.

Im Bereich der Geometrie bietet sich die Verwendung parametrisierter Konzeptmodelle – auch Technikmodelle genannt – an, die es erlauben, das modulare Fahrzeugkonzept durch wenige (Größenordnung 1000) Parameter zu beschreiben (Abb. 11.21). Jeder dieser Parameter kann interaktiv geändert werden. Die geänderte Konstruktion wird automatisch in den durch diese Veränderung beeinflussten Nachbarbereichen der Geometrie angepasst. So lässt sich zum Beispiel die komplette B-Säule innerhalb weniger Minuten um 5 cm nach hinten verschieben; ein Prozess, der im konventionellen CAD-Ansatz mehrere Tage in Anspruch nehmen würde. Durch integrierte Gittergeneratoren lassen sich Netze für die numerische Simulation erzeugen. Der Nachteil, dass die Modelle nur zu einem bestimmten Grad die Details des geplanten Fahrzeugs wiedergeben, wird durch die Geschwindigkeitsvorteile aufgewogen [30, 32, 33]. In späteren Phasen der Entwicklung werden exaktere Karosserie-Modelle erstellt und durch Kopplung mit Fahrwerksmodellen zu einem Gesamtfahrzeug erweitert (s. ▶ Abschn. 11.3.3.2).

Zur Verbesserung der Prognosegüte der Simulation in der Konzeptphase kommen immer häufiger „hybride“ Verfahren zum Einsatz. Hierbei werden durch die Berechnung begleitete Komponenten- oder Ersatzversuche durchgeführt, mit denen neu zu entwickelnde Konzepte oder Materialien abgesichert werden. Beispiele sind Materialuntersuchungen für Werkstoffe mit hohem Versagensrisiko, Kenngrößen von Feder- und Dämpferelementen aber auch die Erstellung von Teil-Hardwaremodellen, die experimentell untersucht werden, um die Berechnungsmodelle möglichst früh zu kalibrieren. Dadurch können in erheblichem Umfang Prototypenversuche eingespart, und die Erprobungsprozesse verkürzt werden. Ein Beispiel dafür ist das Modell einer einzelnen B-Säule, das für Festigkeits- und Steifigkeitsuntersuchungen verwendet werden kann. Weitergehend gibt es für die Konzeptauslegung hinsichtlich Seitencrash eine Ersatzkarosserie, die mit zusätzlichen Massen zur Modellierung der Innenausstattung versehen wird.

**Serienentwicklungs- und Erprobungsphase** In der Serienentwicklung erfolgt die Feinabstimmung der Komponenten des Fahrzeugs entsprechend des gewählten Konzeptes. Während in den Konstruktionsabteilungen durch Visualisierung der CAD-Daten in Form von DMU-Reviews und Einbausimulationen die Baubarkeit von virtuellen Prototypen betrachtet wird, zielen die Berechnungsmethoden auf die Absicherung von Funktionen und Eigenschaften, die auch an Hardware-Prototypen getestet werden (z. B. Schwingungskomfort, passive Sicherheit, Lebensdauer). Generell liegen in dieser Phase exaktere Daten vor, so dass mittels Simulation auch Aussagen zu Absolutwerten getroffen werden können.

Da im Gegensatz zur Konzeptphase nun auch detaillierte Konstruktionsdaten verfügbar sind, können dreidimensionale, geometriebasierte Modelle etwa für FE- und Strömungssimulationen aufgebaut werden (Abb. 11.22). Dies erfolgt weitgehend automatisiert durch die Vernetzung der benötigten Bauteile aus dem CAD-System. Für die richtige Zusammenstellung der Fahrzeugkonfiguration bzw. Parametrierung sowie die Ergebnisreferenzierung ist ein konsistentes Datenmanagement und ein abgestimmter Prozess erforderlich (siehe folgender Abschnitt). Ähnlich können auch die nicht geometriebasierten Simulationsmodelle nun genau entsprechend der festgelegten Architektur aufgebaut und berechnet

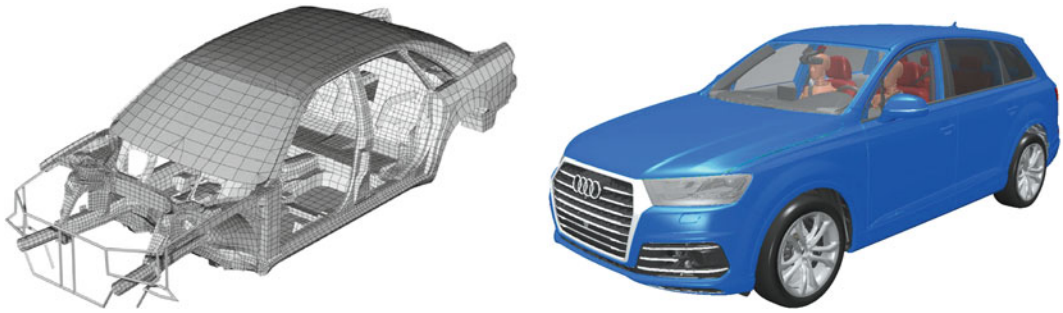


**Abb. 11.22** Typisches FE-Modell gestern und heute. Während vor einigen Jahren grobe FE-Modelle aufgebaut wurden, sind heute Gesamtfahrzeugmodelle zur Bewertung zahlreicher Detailprobleme im Einsatz (Quelle: AUDI AG)

werden. Dies betrifft vor allem die elektronischen bzw. mechatronischen Systeme. Hier ergibt sich die Besonderheit, dass für die virtuelle Entwicklung dieser Systeme zunächst die Modelle für die beteiligten Komponenten vorhanden sein müssen, die Simulationsprozesse also optimal aufeinander abgestimmt werden müssen.

Prinzipiell ist der Ablauf der Serienentwicklung ein iterativer Prozess. Durch die Simulationen erhält man immer genauere Ergebnisdaten, die dann wiederum als Eingangsdaten für die folgenden Berechnungen herangezogen werden können. So erhöht sich der Reifegrad des Produktes im Laufe der Serienentwicklung immer weiter bis zum SOP.

In der Erprobungsphase ist es Aufgabe der Simulation, das Systemverständnis zu erleichtern und den Versuch im Feinabgleich von Parametern ggf. mit Variantenrechnungen zu unterstützen. Das Experiment dient im Idealfall als physikalische Bestätigung der vorangegangenen virtuellen Bauteilentwicklung und zur endgültigen Bauteil- bzw. Systemfreigabe. Für die Simulation ist es nun wichtig, dass Modelle zur Verfügung stehen, die bis ins Detail mit dem Versuch abgeglichen werden können. Diese Modelle finden dann später Eingang in nachfolgende Entwicklungsprojekte. Zur Validierung von Simulationsmethoden und -modellen durch Simulationsergebnisse werden auch nach Abschluss des Entwicklungsprozesses und nach dem Beginn der Produktion noch Berechnungen durchgeführt und mit realen Ergebnisdaten verglichen. Damit können die Methoden und Modelle für Simulationen in zukünftigen Fahrzeugprojekten weiter verbessert werden.

#### 11.3.2.2 Digitale Prototypen

Die breite Verankerung von CAE-Methoden und -Prozessen im Produktentwicklungsprozess stellt die Organisation eines Unternehmens vor große Herausforderungen, bietet aber auch neue Möglichkeiten. Zur besseren Synchronisation der virtuellen Aktivitäten im Sinne eines Simultaneous Engineering ist es sinnvoll, die Simulationsmethoden und -prozesse thematisch zu Digitalen Prototypen (DPT) zu bündeln, z. B. Akustik und Schwingungskomfort, Elektroantrieb oder Lichtsimulation (s. ▶ Abschn. 11.2.2.2). Diese stehen stellvertretend für einzelne oder eine Kategorie von gewissen Produkteigenschaften und -funktionen, die mithilfe der dort verankerten virtuellen Methoden entwickelt und abgesichert werden. Die DPT sind aber nicht nur als begriffliche Kategorien zu verstehen, sondern dienen auch als organisatorische Struktur unabhängig von der klassischen Gliederung des Unternehmens in Fachbereiche (Abb. 11.23). Analog zur Entwicklung mit realen Prototypen werden die Simulationsergebnisse zu definierten Zeitpunkten im Entwicklungsprozess an den Eigenschaftsverantwortlichen berichtet. Der DPT-Verantwortliche hat die Aufgabe, das Portfolio der zugeordneten Methoden und Prozesse optimal weiterzuentwickeln und mit den anderen DPT zu vernetzen. Der DPT „Elektroantrieb" enthält etwa Methoden aus dem Bereich Antrieb (z. B. Kopplung mit der Verbrennungskraftmaschine), Elektronik (Steuerung), Aufbau (Energiespeicher) und ist vernetzt mit dem DPT „Fahrleistung und Verbrauch". Hierbei wird auch der große Vorteil gegenüber der hardwarebasierten Entwicklung deutlich. Die Modelle und

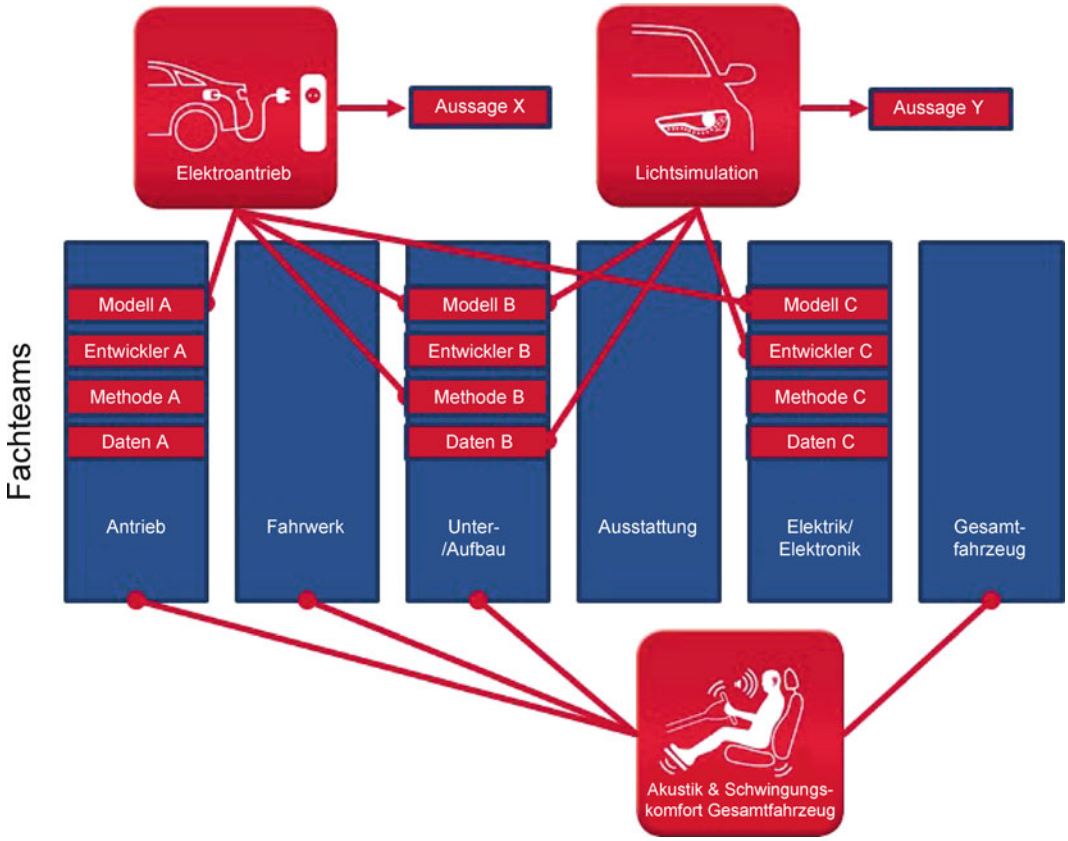



**Abb. 11.23** Digitale Prototypen und ihre Beziehung zur Organisationsstruktur im Unternehmen. Beispielsweise können DPT mehrere Modelle aus unterschiedlichen Fachteams verwenden (A, B und C) oder mehrere DPT dieselben Modelle (B)

Methoden der DPT sind wesentlich flexibler einsetzbar und können viel schneller erzeugt, verändert und ausgetauscht werden. Um die Synergien der gemeinsamen Verwendung von Daten und Modellen nutzen zu können, sind allerdings zum einen gut abgestimmte Prozesse, zum anderen ein intelligentes Datenmanagement erforderlich (s. auch ► Abschn. 11.1.2).

Auch zukünftig ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Simulation und Versuch unerlässlich, um effektiv und effizient entwickeln zu können. Zwar wird in Zukunft die Simulation weiter an Bedeutung gewinnen und reale Prototypen verdrängen, ganz wird sie sie aber in absehbarer Zeit nicht ersetzen können, so dass eine optimale Symbiose der beiden Welten sichergestellt werden muss.

**CAE-Datenmanagement** Die große Modellvielfalt kombiniert mit immer kürzeren Modellzyklen erfordert einen dynamischen Produktentstehungsprozess mit einer starken Ausrichtung auf die digitale, prototypenlose Absicherung. Während im CAD seit über 20 Jahren Konstruktionssoftware wie auch entsprechendes Produktdatenmanagement etabliert sind, ist die Situation im CAE-Bereich deutlich komplexer. In den verschiedenen Disziplinen (z. B. Absicherung von Komfort und Betriebslasten durch Mehrkörpersimulation, Crash durch FE-Simulationen) lassen sich mit unterschiedlicher Simulationssoftware spezielle Aussagen für bestimmte Teilaspekte der Fahrzeugeigenschaften treffen. Die Herausforderung, die sich dort stellt, ergibt sich aus der Vielfalt an Formaten,

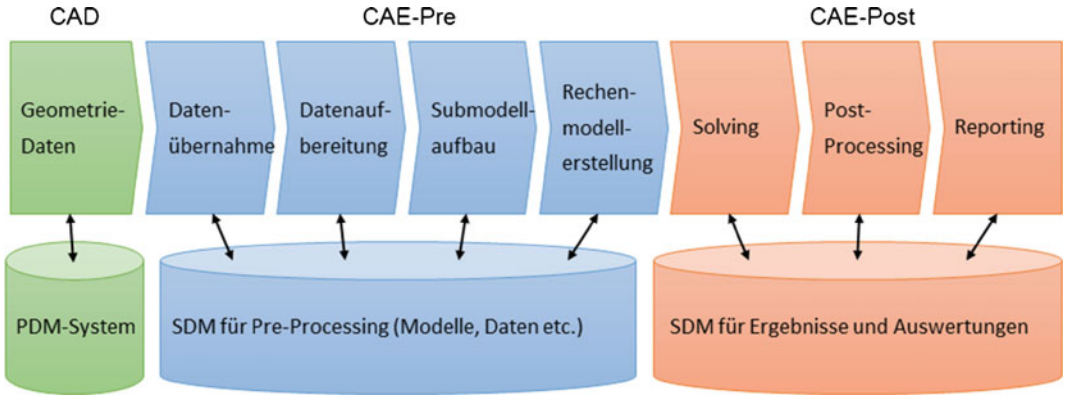



**Abb. 11.24** Verknüpfung von Prozess- und Datenmanagement (Quelle: AUDI AG)

die von den verschiedenen Simulationssoftware-Produkten für Modelle, Eingangs- sowie Ergebnisdaten verwendet werden.

Dieser Komplexität haben sich in den letzten Jahren Frameworks für das Prozess- und Simulationsdatenmanagement (SDM) angenommen (Abb. 11.24). Diese erlauben eine übersichtliche Verwaltung, Sicherung und Freigabe von Modellen sowie deren Ein- und Ausgangsdaten. Durch automatisierte Workflows lassen sich effizient die gewünschten Ergebnisse erzeugen. Der zentrale Aspekt eines SDM ist dabei die Speicherung der Zusammenhänge zwischen Modell, Parametrierung und den mittels Simulation abgeleiteten Ergebnissen, um die Nachvollziehbarkeit jederzeit zu gewährleisten. Um die dadurch entstehenden enormen Datenmengen beherrschen zu können, ist auch ein systematisches, automatisiertes Löschkonzept mit entsprechenden Löschregeln erforderlich. Eine zusätzliche Herausforderung stellt die Zusammenarbeit von unternehmensinternen Entwicklern und externen Dienstleistern dar. Nur durch ein intelligentes Rollen- und Rechtesystem lassen sich Konflikte im Prozess vermeiden.

Während sich innerhalb der Simulationsdisziplinen (z. B. FEM, MKS, CFD) solche SDM-Frameworks etablieren, ist für eine holistische, digitale Produktentwicklung mehr notwendig: ein durchgängiges Anforderungsmanagement bricht die Anforderungen auf die verschiedenen Fachbereiche herunter. Diese starten pro Entwicklungsphase auf einem konsistenten disziplin-übergreifend abgestimmten und freigegebenen digitalen Entwicklungsstand. Das Fahrzeug wird dabei iterativ ausgelegt, während die Modellierungstiefe und damit der Detailgrad der Simulation von den ersten Ideen bis zum SOP zunehmen.

#### 11.3.2.3 Computer Ressourcen für CAE

Generell kann man verschiedene Anwendungsfälle innerhalb CAE unterscheiden. Zum einen die Konzeptentwicklung, bei der mithilfe vereinfachter Modelle schnell viele Varianten durchgerechnet werden, zum anderen die Absicherung mittels detaillierter 3D-Gesamtfahrzeugmodelle, bei denen hohe Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden. Dementsprechend variieren die Anforderungen an den Simulationsprozess und somit auch an die Computer-Ressourcen.

Konzept- und Auslegungstools müssen nahezu in Echtzeit Ergebnisse erzeugen, welche auch unmittelbar am Rechner des Entwicklers verfügbar sein sollten, um einen flüssigen Entwicklungsprozess zu gewährleisten. Dafür eignen sich leistungsstarke CAE-Workstations, die lokal am Arbeitsplatz aufgestellt und je nach Anwendungsfall mit spezieller leistungsstarker Hardware ausgestattet sind (z. B. Hochleistungs-Grafikkarten). Durch die Weiterentwicklung der Prozessorarchitekturen verfügen inzwischen auch Arbeitsplatzrechner bereits über Mehrkern-Prozessoren, die parallelisierte Berechnungen ermöglichen, aber auch entsprechende Programmierung der CAE-Software erfordern.

Komplexe, detaillierte Simulationen hoher Genauigkeit erfordern eine längere Rechenzeit, liefern Ergebnisse aber optimalerweise am nächsten Arbeitstag, damit der Absicherungsprozess nicht ins Stocken gerät. Bei sehr komplexen Problemstellungen ist auch eine Rechenzeit von mehreren Tagen vertretbar. Für diese Art der Simulationen werden dementsprechend große Rechnersysteme verwendet. Traditionell waren die CAE-Berechnungen eine Domäne der Supercomputer mit ihren speziellen Recheneinheiten (Vektor-CPUs) und Großrechner-Betriebssystemen – meist Unix, aber auch proprietären Systemen. Seit einigen Jahren zeigt sich ein deutlicher Wandel in der Systemarchitektur. Dies ist auf den enormen Leistungszuwachs im Floating Point Bereich der Desktop-Prozessoren zurückzuführen. Das sehr günstige Preis-Leistungs-Verhältnis ermöglicht das Zusammenschalten vieler Prozessoren zu sog. Clustern [34]. Da bei Automobilunternehmen nach durchschnittlich etwa 24–36 Monaten die Rechneranlagen erneuert werden und ein großer Teil der CAE-Simulationen gut parallelisierbar ist, nutzt auch die Automobilindustrie diesen Trend. Bei diesen Systemen fällt dabei die Wahl des Betriebssystems üblicherweise auf Linux, welches über eine ausgezeichnete Stabilität verfügt. Da dieses Betriebssystem eigentlich ein klassisches Unix System ist, können auch die vielfältig vorhandenen Batch-Tools und Prozessdefinitionen genutzt werden. In letzter Zeit drängt aber auch Windows auf den HPC-Markt, so dass zunehmend auch solche Systeme im Einsatz sind.

Den erzielten hardware- und solverspezifischen Leistungssteigerungen stehen kontinuierlich steigende Modellgrößen der Simulationen gegenüber. Heutzutage umfassen die Modellgrößen für Crashanalysen bis zu 8 Mio. Elemente und man rechnet Vorgänge bis zu 250 ms Dauer. Eine typische Frontcrash-Berechnung auf 64 Cores benötigt etwa 24 h. NVH-Modelle sind von ähnlicher Größe und ein typischer Rechenlauf zur Dynamik-Auslegung einer massenausgestatteten Karosserie dauert etwa 2,5 h auf 1 Prozessor. Für CFD benutzt man Modellgrößen bis 100 Mio. Zellen. Ein typischer Rechenlauf dauert etwa 48 h auf 512 Cores. Die fortschreitende Rechenleistung erlaubt immer feiner werdende Modelle.

### 11.3.3 Anwendungsgebiete und Methoden

Die Einsatzfelder der numerischen Simulation sind in den vergangenen Jahren kontinuierlich gewachsen. Im Folgenden wird auf die standardisierten Verfahren etwas ausführlicher eingegangen und deren Nutzen anhand von Beispielen illustriert. Tab. 11.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen CAE-Einsatzgebiete in der Produktentwicklung und bewertet deren Prognosefähigkeit.

Die ersten CAE-Methoden, die in der Automobilindustrie eingesetzt wurden, basierten auf der Methode der Finiten Elemente und dienten der Optimierung der Statik von Karosseriebauteilen. Heute werden mittels FE-Methoden sämtliche Fragestellungen zur Strukturauslegung behandelt. Die Berechnung hochgradig dynamischer, nichtlinearer Vorgänge erfolgt mit expliziten Lösungsmethoden [35]. Für andere Analysen, wie z. B. Modalanalyse, also die Ermittlung der stationären Eigenfrequenzen, werden implizite Methoden eingesetzt [35]. Die wesentlichen Auslegungsmerkmale sind zunächst die bauteilbezogenen Größen Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauer sowie die Verbindungstechnik.

Im Gesamtfahrzeug liegen die Schwerpunkte der Auslegung auf Fahrleistung und Verbrauch, Fahrdynamik, Aerodynamik, Schwingungskomfort, Festigkeit, Akustik und Crash-Berechnung. Die kinematische Auslegung des Fahrwerks erfolgt auf Basis von MKS-Simulationen. Die Einsatzgebiete für Strömungssimulationen reichen von der Aerodynamik bis hin zur Zylinderinnenströmung. Die Berechnung von Elektrik und Elektronik im Fahrzeug gewinnt immer mehr an Bedeutung und umfasst ein breites Spektrum an Methoden. Auch multidisziplinäre Fragestellungen werden im Sinne einer ganzheitlichen Entwicklung gelöst.

#### 11.3.3.1 Finite Elemente Berechnungen

**Finite Elemente Methode (FEM)** Eine statische oder dynamische Belastung einer Struktur bewirkt eine Formänderung und daraus resultierende Spannungen. Diese hängen von den Steifigkeiten und den Lagerbedingungen ab. In einem Finite Elemente Modell werden diese Zusammenhänge, die durch

**Tabelle 11.1** Einsatzgebiete und Bedeutung der Simulationstechnologie

| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| **Aufbau** | | | |
| Steifigkeit global, lokal | X | | |
| Festigkeit, Spannungen | X | | |
| Niederfrequente Akustik | X | | |
| Hochfrequente Akustik | X | | |
| Modalanalyse | X | | |
| Türen, Klappen | X | | |
| Klappern, Quietschen | | | X |
| Lebensdauer | | X | |
| Crash-Struktur | X | | |
| Sensorik | X | | |
| Fußgängerschutz, Typschaden | X | | |
| Insassenschutz | X | | |
| Interieurbauteile | X | | |
| Sitz | X (Festigkeit/Crash) | | X (Komfort) |
| Tiefziehsimulation | X | | |
| Gießsimulation | X | | |
| Verbindungstechnik | X (Dynamik) | X (Crash, Lebensdauer) | |
| Dichtungen, Steifigkeit | X | | |
| **Aggregate** | | | |
| Festigkeit, Spannungen | X | | |
| Modalanalyse | X | | |
| Steuertriebsdynamik | X | | |
| Schallabstrahlung | | X | |
| Kühlung | X | | |
| Ansaug- und Abgastrakt | X | | |
| Hydraulik (Öl-, Kraftstoffsystem) | X | | |
| Ladungswechsel | X | | |
| Aufladung (Turbolader) | X | | |
| Zylinderinnenströmung, Gemischaufbereitung | X | | |
| Verbrennung | | X | |

A – im Einsatz, hohe Prognosegüte; B – im Einsatz, entwicklungsbegleitend; C – beschränkter Einsatz, unvollständige Methode

**Tabelle 11.1** (Fortsetzung)

| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| **Gesamtfahrzeug** | | | |
| Fahrdynamik | X | | |
| Fahrkomfort | | | X |
| Fahrleistung, Verbrauch | X | | |
| Schwingungen | X | | |
| Aerodynamik | X | | |
| Aeroakustik | | | X |
| Motorraumdurchströmung | X | | |
| Klimatisierung | X | | X (Komfort) |
| Energiemanagement | | X | |
| Wärmemanagement | | X | |
| **Elektrik/Elektronik** | | | |
| E/E-Architektur | | X | |
| Scheinwerfer/Leuchten | X | | |
| EMV, Antennen | | X | |
| Audioqualität | | X | |
| Batterie | | X ((Ent-) Laden) | X (Alterung) |
| Brennstoffzelle (chemisch/thermisch) | | X | |
| Kathodische Tauchlackierung | X | | |
| Induktives Härten | X | | |
| Elektromagnetik | | X | |
| **Fahrwerk** | | | |
| Kinematik, Elastokinematik | X | | |
| Festigkeit, Spannungen | X | | |
| Lebensdauer, Betriebsfestigkeit | | X | |
| Fahrerassistenzsysteme | | | X |
| Aktives Fahrwerk | | X | |
| Abgasanlage | | X | |

A – im Einsatz, hohe Prognosegüte; B – im Einsatz, entwicklungsbegleitend; C – beschränkter Einsatz, unvollständige Methode

Differentialgleichungen mathematisch beschrieben werden können, näherungsweise gelöst. Dazu wird das Bauteil in Finite Elemente diskretisiert. Die Elemente sind an sog. Knoten miteinander verbunden, an denen Kräfte und Momente übertragen werden. Im Berechnungsprozess werden nun die Knotenverschiebungen und -verdrehungen bestimmt und über kinematische Beziehungen und Materialgesetze die resultierenden Spannungen aufgrund äußerer Kräfte berechnet. Dabei werden die zugehörigen Werte eines Elements mit denen des Nachbarelements interpoliert. Je nach Struktur können Balken-, Stab-, Membran-, Scheiben-, Platten-, Schalen- oder Volumenelemente eingesetzt werden.

Eine qualitativ hochwertige Modellierung durchzuführen, ist die große Herausforderung für den Berechnungsingenieur. Wesentliche Fehlerquellen können Idealisierung, wie bspw. Annahmen zur Topologie der Struktur, Randbedingungen, Belastungen und Materialgesetzen, als auch Mängel bei der Diskretisierung, bspw. die Wahl des Elementtyps, die Elementgrößen und die Netzqualität, sein. Darüber hinaus können Berechnungsfehler (z. B. Lösungsmethode, Solverspezifika) und Einflüsse der Computer-Hardware (z. B. Rundungsfehler, Speicherverwaltung) eine Rolle spielen [30, 36, 37].

#### 11.3.3.1.1 Statik und Dynamik

**Steifigkeit** In der statischen Auslegung von Fahrzeugkomponenten werden die Komponenten so ausgelegt, dass sie den im Betrieb auftretenden Lasten bei möglichst geringem Gewicht und Herstellungskosten standhalten. Die Steifigkeit von Strukturkomponenten wird von Materialeigenschaften und den geometrischen Parametern der Struktur bestimmt. Die berechneten Spannungen erlauben es, das Bauteil geometrisch so zu verändern, dass Spannungskonzentrationen vermieden werden.

Ein klassisches Beispiel aus dem Karosseriebereich für die Steifigkeitsauslegung anhand statischer Ersatzlastfälle stellt die Grundauslegung der Türen und Klappen dar. Hier werden statische Torsions- und Biegelastfälle, aber auch Türabsenkung, Türüberdrückung und Gasfederlastfälle von Klappen berechnet. Das erforderliche FE-Modell entsteht aus den CAD-Daten unter Berücksichtigung von Materialkenndaten und Wandstärken. Bei der Modellbildung werden bereits in frühen Projektphasen Datenstände der Gesamtkarosserie inklusive der Scharniere für die Anbindung von Türen und Klappen einbezogen. Auch Nichtlinearitäten wie Kontakte, Reibung und Plastifizierung werden in der Modellbildung berücksichtigt. Weitere Beispiele neben den Karosseriebauteilen sind Aggregatehalter und Fahrwerksbauteile wie Achsbauteile, Lenksäule und Fußhebelwerk.

Als etablierte Ersatzgröße für einen guten Gesamtfahrzeug-Schwingungskomfort gilt die statische Torsionssteifigkeit der Karosserie. Hierbei wird die Karosserie gelagert und über eine entgegengesetzte Krafteinleitung verwunden. Je geringer die Verwindung, desto höher ist die statische Steifigkeit. Die statische Torsionssteifigkeit wird auch zur Ermittlung der Leichtbaugüte verwendet [38].

Häufig erfolgt die Ermittlung der statischen Torsionssteifigkeit über ein dynamisches Extrapolationsverfahren. Hierbei wird das Fahrzeug auf Luftfedern gelagert und über eine gegenphasige Shakeranregung zum Schwingen gebracht. Die Steifigkeit wird dann analytisch über eine Extrapolation auf 0 Hz errechnet. Dieses Verfahren bietet deutliche Vorteile bzgl. Messtoleranzen und Messgeschwindigkeit gegenüber der konventionellen Statik.

**Festigkeit und Lebensdauer** Die Lebensdauer eines zyklisch belasteten Bauteils setzt sich aus zwei Bereichen zusammen. So wird unterschieden zwischen der Lebensdauer bis zum technischen Anriss des Bauteils und der sich anschließenden Restlebensdauer. Die Berechnung der Anrisslebensdauer ist von großer Bedeutung, weil der Bruch eines sicherheitsrelevanten Bauteils sicher vermieden werden muss.

Zur Bestimmung der Lebensdauer werden die betrieblichen Bauteilbelastungen und die Wöhlerkennlinien benötigt [39]. Belastungen auf ein Bauteil im System können über eine Simulation im Mehrkörpersystem definiert werden. Hier lassen sich mit den Systemeingangsgrößen die auf ein Bauteil oder Baugruppen einwirkenden Randbedingungen und Schnittgrößen ermitteln (s. ► Abschn. 11.3.3.2). Aus den physischen Eigenschaften (Form,

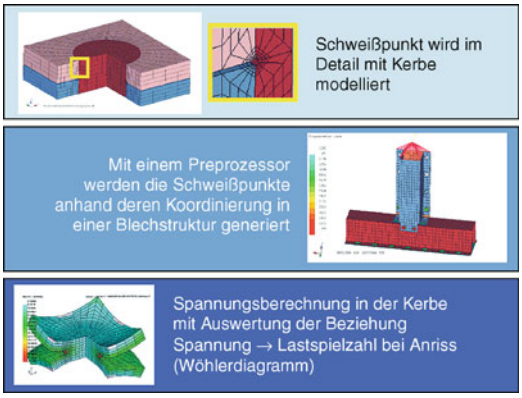



**Abb. 11.25** Prinzipielle Vorgehensweise bei der Lebensdauerberechnung von Schweißpunkten [30, 39, 40]

Material) ergibt sich nun ein Nennspannungskollektiv, das den Spannungszeitverlauf für die Berechnung darstellt.

Nach dem Stand der Technik sind die Berechnungswerkzeuge zur Bewertung der Funktionalität und der Lebensdauer z. T. noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Gründe hierfür sind z. B., dass die Aussagegüte der Simulation stark von Annahmen zur lokalen Bauteilfestigkeit abhängt, die z. T. erheblich durch die Fertigung beeinflusst wird. Bauteilgebundene Bewertungsansätze bieten hier eine höhere Zuverlässigkeit bei der Auslegung [39]. Abb. 11.25 beschreibt das prinzipielle Vorgehen der Auslegung mit einem speziellen Elementtyp zur Berechnung der Kerbspannungen an Schweißpunkten in der Karosserie.

Das Ziel der Simulation ist es, durch Relativvergleiche den Erprobungs- und Versuchsprozess deutlich zu entlasten. Am Ende der Absicherungsphase steht allerdings nach wie vor der experimentelle Betriebsfestigkeitsnachweis. Methodische Herausforderungen sind zum Beispiel die Berücksichtigung von Korrosions- und Alterungsprozessen, Werkstoffmodelle für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe und auch verbesserte Berechnungsmethoden für die eingesetzten Fügeverfahren.

Auf Basis der Steifigkeitsmodelle können weiterhin die Objekttemperaturen von Karosserien während der Lacktrocknungsprozesse berechnet (s. ▶ Abschn. 11.3.3.5) und thermomechanische Strukturanalysen durchgeführt werden. Nach dem Mehrfachnutzerprinzip werden somit Kosten für einen separaten Modellaufbau eingespart.

**Schwingungskomfort und Akustik** Die schwingungstechnische Grundauslegung des Fahrzeugs besteht darin, die Resonanzen aller Subsysteme möglichst gut zu entzerren oder von der Anregung zu isolieren. Überlagerungen von Resonanzen führen zu erhöhten Schwingpegeln, die für den Insassen negativ wahrnehmbar sind und vermieden werden müssen (s. ▶ Abschn. 3.4). Dieses Themengebiet wird auch als NVH (Noise, Vibration, Harshness) bezeichnet.

Mittels FE-Berechnungen werden die Eigenschwingungen der Subsysteme im Fahrzeug bestimmt. Aufgabe ist es, die Eigenfrequenzen dieser Systeme möglichst zu entzerren und die Punkte, an denen Kräfte in die Karosserie eingeleitet werden, so zu legen, dass sie nahe an Schwingungsknoten liegen, weil hier die Amplituden geringer sind bzw. dort weniger Vibrationsenergie in die Karosserie eingeleitet werden kann. Der Energieeintrag kann weiterhin durch hohe lokale Steifigkeiten an den Koppelstellen zwischen Karosserie und Achsen sowie Antrieb verringert werden. Ein Impedanzsprung zwischen steifer Karosserie und weichem Elastomerlager entkoppelt, reflektiert also Energie (Abb. 11.26).

Die Eigenfrequenzentzerrung (nach Frequenzlandkarte des Fahrzeugs), Schwingformen und hohe lokale Steifigkeiten erlauben die Grundauslegung auf Komponentenebene, z. B. für die Karosserie allein. Eine Feinabstimmung und absolute Bewertung der Schwingpegel können nur im FE-Gesamtfahrzeugmodell stattfinden. Hier gilt es, die aus dem Fahrwerk eingeleiteten Kräfte zu berücksichtigen. Dies geschieht wirkungsvoll durch die Kopplung von MKS-Simulationen (s. ▶ Abschn. 11.3.3.2) mit FE-Berechnungen. Geeignete Lastfälle für die Bewertung im Gesamtfahrzeugmodell sind die Radunwucht und die Vier- Stempelanregung auf dem Hydropuls-Prüfstand, weil sie gut reproduzierbar und standardisierbar sind.

Für die Bewertung der Fahrzeugakustik im Innenraum haben sich abhängig vom jeweiligen Zielfrequenzbereich zwei Verfahren entwickelt. Die niederfrequente Akustik bis ca. 100 Hz kann mit




**Abb. 11.26** Beispielhafte Aufgabenübersicht in der CAE-Auslegung Schwingungskomfort, Akustik [41]

der FEM unter Verwendung eines gekoppelten Fluid-Struktur-Modells prognostiziert und optimiert werden. In diesem niedrigen Frequenzbereich sind die akustischen Phänomene von einzelnen Moden der Subsysteme geprägt. Schalldruckmaxima entstehen z. B. bei Resonanzfrequenzen des Hohlraums und einzelner, großer Blechflächen. Zur Berechnung der Abstrahlung in Luftschall kann alternativ die BEM (Boundary Element Method) eingesetzt werden, die sich sehr gut mit FEM koppeln lässt [42]. Mit der Frequenz steigt die Dichte der Moden so stark an, dass der Rechenaufwand für die FEM nicht mehr vertretbar ist. Stattdessen kann für hochfrequente Akustik ab 500 Hz mit statistischen Methoden (Statistische Energieanalyse SEA, [43, 44]) auf Basis von Energie und Leistungsbilanzen gearbeitet werden. Für die mittelfrequente Akustik werden gekoppelte FEM und SEA-Verfahren eingesetzt. Die Struktur und die Hohlräume der Karosserie und die umgebende Luft werden bei der SEA in Subsysteme (ca. 100–500) zerlegt, die Energie dissipieren und untereinander austauschen. Als Last werden Schall-Leistungen in einzelnen Subsystemen eingegeben. In den Kavitäten, wo sich die Köpfe der Insassen befinden, kann der daraus resultierende Schalldruck ermittelt werden. Da sich mit der Methode die Schalltransferpfade erschließen, können konstruktive Maßnahmen zur Beeinflussung des Schalldrucks gezielt analysiert und optimiert werden. Die Schwierigkeit des Verfahrens liegt in der korrekten Ermittlung der Kopplungs- und Dämpfungsverlustfaktoren sowie geeigneter Substrukturen. Meist müssen sie experimentell an Prototypen ermittelt werden. In einigen Fällen ist es bereits gelungen über Erfahrungswerte eine hohe Prognosegüte zu erzielen [30].

Um die Frequenzlücke zwischen SEA und FEM zu schließen, werden derzeit Anstrengungen unternommen, eine sinnvolle Kombination beider Verfahren zu generieren. Ein Ansatz ist es, die Kopplungs- und Dämpfungsverlustfaktoren für die SEA über die FEM mit geeigneten Mittelungsalgorithmen zu gewinnen [45]. Eine alternative Methodik ist die DEA (Dynamic Energy Analysis), deren strahlenbasierter Ansatz eine direkte Übernahme der FE-Netze erlaubt. Dadurch wird auch die Berechnung komplexer Geometrien ermöglicht, deren Analyse im mittleren Frequenzbereich weder mit FEM noch mit SEA ohne numerische oder qualitative Einschränkungen möglich ist [46].

In der niederfrequenten Akustik mit der FEM gibt es ebenfalls noch Handlungsbedarf. Die Darstellung der Massenausstattung und der dämpfenden und absorbierenden Wirkung der poroelastischen Innenausstattung (Sitze, Himmel, etc.) wird kontinuierlich verbessert. Die Prognose der durch Fahrwerk und Antriebsstrang in die Karosserie eingeleiteten Kräfte bietet auch Verbesserungspotenziale. Zur Vorhersage der Kräfte aus dem Aggregat wird an Methoden gearbeitet, die Kombinationen aus MKS und FEM-Systemen darstellen. Die Übertragungseigenschaften der Achsen lassen sich mit der FEM bereits heute gut darstellen. Wesentliche Arbeitspunkte sind noch die Reifeneigenschaften, die Abbildung der komplexen Interaktion zwischen Fahrbahn und Reifen und die virtuelle Ermittlung von dynamischen Eigenschaften der Elastomerlager. Bis diese Methoden entwickelt sind, wird man auf den hybriden Weg setzen, indem Eigenschaften komplexer Komponenten (Reifen, Dämpfer, Elastomerlager etc.) messtechnisch erfasst werden, und im Gesamtmodell virtuell „nur“ das Zusammen-

spiel aller Komponenten analysiert und optimiert wird.

Zur weiteren Verbesserung des Schwingungskomforts bietet die gezielte Auslegung des Sitzes mit FE-Methoden noch Potenzial. Ziel ist die Abbildung der schwingungstechnischen Eigenschaften des Gesamtsitzes im Zusammenspiel von Struktur, Schaum, Bezug und Insasse. Als Nebenprodukt ergibt sich daraus die Möglichkeit zur Vorhersage wichtiger Ergonomiegrößen (s. ▶ Abschn. 6.4.1), wie des H-Punktes, und statischer Komfortparameter, wie der Druckverteilung zwischen Insasse und Sitz [30].

Eine besondere Herausforderung stellt die Berechnung des Antriebsstrangs dar, da hier ein besonderes Augenmerk auf starke Nichtlinearitäten, dynamische Lasten und thermomechanische Effekte gelegt werden muss. Zur Auslegung von Motor- und Getriebekomponenten werden daher integrierte Simulationsmodelle verwendet, in denen FE-, Mehrkörpersystem- und Elastohydrodynamik-Modelle gekoppelt werden [47–49].

**Akustik E-Motor** Der Einsatz von Elektromotoren (s. ▶ Abschn. 4.3.1) als Antriebsmotoren in Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie die immer höher werdenden Anforderungen bezüglich Akustik erfordern hochgenaue Simulationswerkzeuge. Durch eine Kopplung von elektromagnetischer, strukturdynamischer und akustischer Analyse können die Festigkeit und die Akustik des Elektromotors simuliert und optimiert werden.

Das zeit- und ortsabhängige Magnetfeld wird in einer transienten Elektromagnetiksimulation berechnet. Die aus dem Magnetfeld resultierenden Kräfte werden auf das strukturmechanische FE-Modell aufgeprägt. Je nach Ziel der Berechnung kann nun eine statische oder dynamische, lineare oder nichtlineare oder akustische Simulation durchgeführt werden. In den frühen Phasen der Entwicklung werden typischerweise linear-statische Strukturberechnungen eingesetzt, während mit steigendem Detaillierungsgrad komplexere nichtlineare Analysen, beispielsweise zur Kontaktberechnung von Baugruppen oder für elastisch-plastische Analysen, durchgeführt werden.

Da bei Elektromotoren nicht nur der konstruktive Entwurf, sondern auch die Regelung eine entscheidende Rolle für die Lebensdauer und Akustik des Motors hat, werden die oben genannten Simulationsmethoden auch für die Optimierung der Regelung eingesetzt [50].

**Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe (FVK)** Neben metallischen Werkstoffen werden in modernen Fahrzeugen zunehmend Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe eingesetzt (s. ▶ Abschn. 6.2.4.4 und ▶ Abschn. 10.2.2.1.4). Die Simulation von Kunststoffen ist seit geraumer Zeit Bestandteil der Eigenschaftsauslegung von beispielsweise Interieurbauteilen, Frontend und Spiegelgehäusen [51]. Für die Berechnung und Optimierung dieser Werkstoffe werden spezielle Simulationsverfahren eingesetzt [52].

Bei langfaserverstärkten Kunststoffen werden die einzelnen Fasern zu Rovings und anschließend zu Matten zusammengefasst, welche in mehreren Lagen übereinandergelegt werden und mithilfe der eingespritzten Matrix aushärten. Aufgrund der Rechenzeiten werden in der Simulation von solchen Bauteilen die einzelnen Fasern nicht explizit modelliert. Stattdessen wird jede einzelne Faserlage verschmiert mit äquivalenten Materialeigenschafften dargestellt. Aufgrund der Anisotropie des Werkstoffes werden der verschmierten Faserlage in alle Raumrichtungen unterschiedliche Materialkennwerte zugewiesen.

Bei der Auslegung von FVK-Bauteilen muss eine große Anzahl von Designparametern bestimmt bzw. optimiert werden. So gilt es, neben der Anzahl der Lagen auch die Richtung, die Dicke und das Fasermaterial jeder Einzellage an jeder Stelle des Bauteils zu bestimmten. Daher kommen bei der Auslegung von FVK-Bauteilen üblicherweise komplexe Optimierungsprogramme zur Anwendung. Ein besonderes Augenmerk muss auch auf die Fertigbarkeit gelegt werden. So dürfen beispielsweise einzelne Faserlagen nicht beliebig enden, und auch die Orientierung der Fasern kann sich im Bauteil nicht beliebig ändern.

Aufgrund der orthotropen Materialeigenschaften ergeben sich verschiedene Arten des Materialversagens: Delamination, Faserbruch und Zwischenfaserbruch. Für die verschiedenen Arten des Materialversagens gibt es diverse Versagenskriterien mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen,




**Abb. 11.27** Vergleich der Materialscherwinkel eines Drapiervorganges mittels kinematischer CAD-Simulation (**a**), Experiment (**b**) und FE-Simulation (**c**) [54]

welche für die Auslegung verwendet werden können und vom Benutzer vor der Optimierung definiert werden müssen. Beispielhaft seien hier die Kriterien von Puck und Tsai-Wu genannt, welche eine weite Verbreitung finden. Das Kriterium von Puck zählt zu den differenzierenden Kriterien und unterscheidet zwischen verschiedenen Versagensmoden. Im Gegensatz dazu gehört das Kriterium von Tsai-Wu zu der Gruppe der Pauschalkriterien und unterscheidet somit nur pauschal zwischen Versagen oder Nichtversagen [53].

Die Herstellung von 3-dimensional geformten Faserverbundbauteilen aus ebenen Fasermatten ist eine komplexe Aufgabe, da sich die Fasermatten bei der Verarbeitung zu 3D-Bauteilen verziehen. Da sichergestellt werden muss, dass an jeder Stelle des Bauteils die richtigen Fasern mit der richtigen Orientierung liegen, werden aufwändige Drapiersimulationen des Herstellungsprozesses durchgeführt.

Für die Drapiersimulation gibt es zwei verschiedene Ansätze: der rein kinematische Ansatz und der Finite Elemente Ansatz. Der kinematische Ansatz berücksichtigt lediglich die rein geometrische Verformung der Fasermatten durch die Form des finalen Bauteils. Der FE-Ansatz berücksichtigt weitere physikalische Effekte wie beispielsweise Kräfte, Reibungen, Geschwindigkeiten sowie die Verlegewerkzeuge, wodurch eine deutlich genauere Abbildung des Herstellungsprozesses ermöglicht wird. Zu beachten ist hierbei die korrekte Implementierung eines Materialmodells, welches das Verformungsverhalten von nicht getränkten Fasermatten richtig abbildet. Der Unterschied zwischen kinematischem Ansatz, Experiment und Finite Elemente Ansatz ist in Abb. 11.27 dargestellt. Die roten Bereiche in den Simulationsergebnissen in Abb. 11.27 sind hierbei besonders kritisch bzgl. Faltenbildung während des Drapiervorgangs. Ergebnisse der Drapiersimulation sind die Faser- und Scherwinkel, Spannungen und Dehnungen der Fasern und eventuell auftretende Drapierdefekte in den Fasermatten [54–56].

Bei kurzfaserverstärkten Kunststoffen werden die kurzen Fasern mit der Matrix gemischt und durch Spritzguss vergossen. Die Orientierung der Fasern und somit auch die anisotropen Materialeigenschaften sind daher vom Fertigungsverfahren abhängig. Daher wird für die Auslegung solcher Bauteile die Spritzgusssimulation mit der strukturmechanischen Simulation gekoppelt.

Isotrope Kunststoffe können ähnlich simuliert werden wie metallische Werkstoffe. Allerdings muss vor allem bei nichtlinearen Simulationen wie beispielsweise Crash-Simulationen darauf geachtet werden, dass das Materialmodell das spezielle Verhalten von Kunststoffbauteilen ausreichend genau abbildet [57].

Während metallische Fahrzeugstrukturen bei einem Crashlastfall die Energie primär durch plastische Deformation absorbieren, kann bei axialer Belastung einer FVK-Struktur ein kontinuierlicher progressiver Versagensprozess initiiert werden. Hierbei wird durch gezielte Materialzerstörung wie Faserbrüche, Delaminationen, Matrixbrechen sowie Reibung innerhalb der Bruchfront eine Energieaufnahme erreicht. In Abhängigkeit vom verwendeten Material, der Geometrie und der Belastungsart weisen die erreichbaren Kennwerte eine große Streubreite auf, wobei die maximale gewichtsspezifische Energieabsorption (SEA)

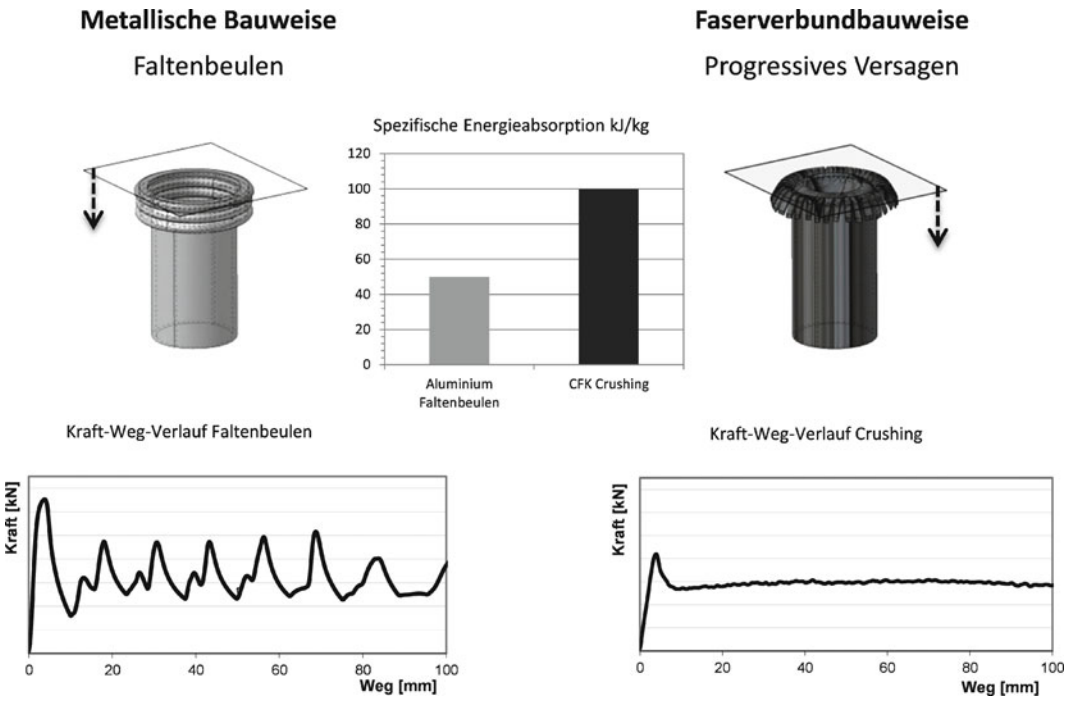



**Abb. 11.28** Vergleich des charakteristischen Energieabsorptionsverhaltens von metallischen und Faserverbundstrukturen und typischen spezifischen Kennwerten [59]

bei FVK teilweise deutlich über vergleichbaren Aluminium- oder Stahlstrukturen liegt [58]. Im Gegensatz zum Faltenbeulen bei Metallen existiert beim progressiven Zerstörungsmechanismus keine Verblockungslänge, d. h. eine Restlänge, in der keine weitere Energie aufgenommen werden kann. Dadurch ist es möglich, die gesamte Bauteillänge zu nutzen und eine höhere Leichtbaueffizienz zu erzielen. In Abb. 11.28 ist schematisch das Faltenbeulen einer metallischen Struktur sowie das progressive Zerstörungsverhalten eines FVK-Bauteils mit typischen spezifischen Kennwerten und Kraft-Weg-Verläufen dargestellt [59].

Für die Auslegung solcher energieabsorbierenden Strukturen werden vorrangig numerische Berechnungsverfahren eingesetzt, wodurch kostenintensive Komponenten- und Prototypenversuche minimiert werden. Während die Analyse des Crashverhaltens von metallischen Strukturen seit vielen Jahren in konventionellen FEM-Programmen etabliert ist, stellt die mikromechanische Charakteristik des energie-absorbierenden Verhaltens von FVK-Elementen die numerische Simulation vor neue Herausforderungen [59].

#### 11.3.3.1.2 Sicherheit

Die steigende Anzahl an Sicherheitsanforderungen lässt den Entwicklungsaufwand kontinuierlich steigen (s. ▶ Kap. 9). Insbesondere in der Crash- und Insassensimulation ist diese Herausforderung nur mit dem Einsatz von Simulationsmethoden beherrschbar [60].

Es kommen fast ausschließlich nichtlineare explizite Finite Elemente Codes zum Einsatz (Abb. 11.29), welche in der Insassensimulation aufgrund der deutlich reduzierten Rechenzeiten teilweise durch MKS-Codes (s. ▶ Abschn. 11.3.3.2) unterstützt werden.

Neuerdings werden auch reduzierte FE-Modelle eingesetzt, in denen nur die für den Lastfall relevanten Module mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. Diese vereinen die Rechenzeitvorteile von MKS-Methoden mit der Genauigkeit aktueller FE Methoden.



**Abb. 11.29** FE-Modell nach Offset-Crash (Quelle: AUDI AG)

**Crash-Strukturauslegung** Bei einem Aufprall handelt es sich um eine Fortpflanzung einer Stoßwelle in der Struktur mit Körperschallgeschwindigkeit, die elastische und plastische Verformungen verursacht [61]. Die Berechnung innerer Spannungen und äußerer Kräfte sowie die Einhaltung der Materialgesetze (z. B. Fließbedingung) und der Randbedingungen (z. B. Kontakt), werden für jeden Zeitschritt auf Elementebene ausgeführt. Mit einigen effizienten Vereinfachungen ermöglicht diese Methode eine effiziente Behandlung der Crashlastfälle. Die Vielzahl der Crash-Lastfälle ist in Abb. 11.30 zu sehen. Zur Gewährleistung der Stabilität der zumeist eingesetzten expliziten Integrationsverfahren sind sehr kleine Zeitschritte erforderlich, die sich an der kleinsten Elementkantenlänge orientieren. So muss diese bei der Diskretisierung der Struktur begrenzt werden, um die Rechenzeit in einem akzeptablen Bereich zu halten (s. a. ▶ Abschn. 9.10).

Die meisten Crashlastfälle ergeben sich aus Gesetzesanforderungen und Verbrauchertests, wobei die Verbrauchertests (z. B. Euro- oder US-NCAP) in der Regel strengere Anforderungen darstellen. Zur Sicherstellung der Funktionen werden bei einer Fahrzeugentwicklung Crashlastfälle für Front-, Seiten-, Heckcrash, Dachstabili-



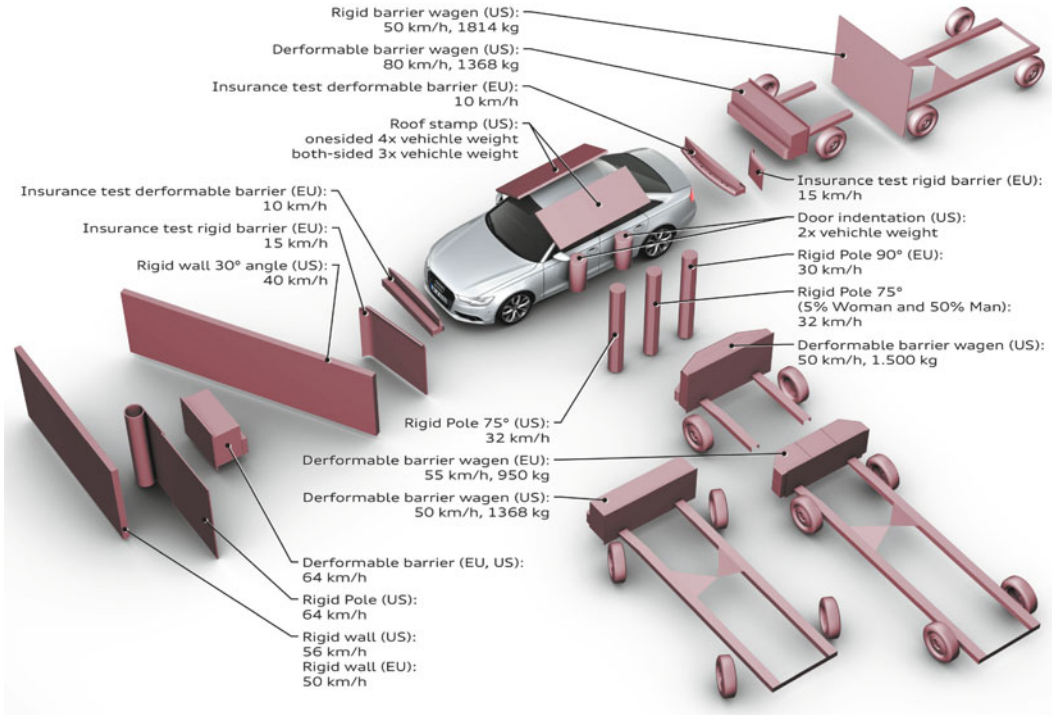



**Abb. 11.30** Crash-Lastfälle (Quelle: AUDI AG)

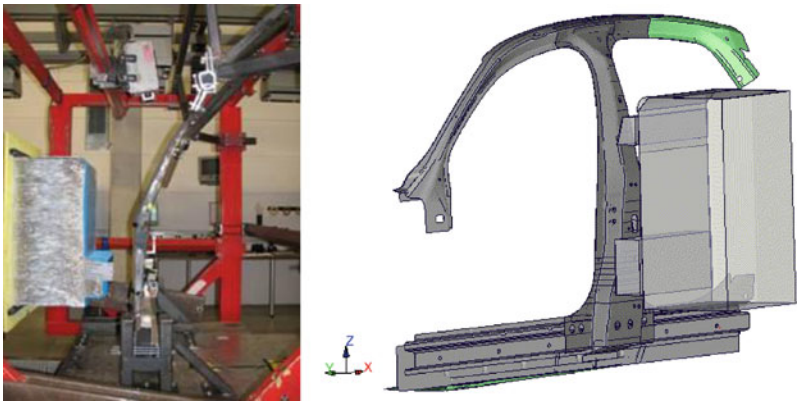


**Abb. 11.31** Komponentenversuch am Prüfstand und in der Simulation (Quelle: AUDI AG)

tät, Reparatur-Verbrauchertests bzw. Stoßfängertests und Partnerschutz (Kompatibilität und Fußgängerschutz) simuliert. Die Integration der Bauteilvorgeschichte in die Funktionsauslegung kann im Zusammenwirken mit Umform-, Gieß- und Fügesimulation ermöglicht werden und verbessert die Prognosesicherheit in stark verformten Crash-Regionen der Karosserie [62], siehe auch ▶ Abschn. 11.3.3.5.

Handlungsbedarf besteht in validierten Modellen für die Behandlung von Bauteil- und Verbindungsversagen (Schweißen, Nieten, Kleben etc). Materialmodelle für neue Werkstoffe wie Kunststoffe, Schäume sind Gegenstand von Untersuchungen [30].

Zur Absicherung von Teilkomponenten der Karosserie und zum Validieren der Versagensmodelle werden gezielt Komponentenversuche eingesetzt. Hierbei wird ein Ersatztest numerisch ausgelegt, um das Verhalten des Gesamtfahrzeuges im Crash abzubilden (Abb. 11.31). Mit dieser Vorgehensweise können schnell Maßnahmen erprobt und validiert werden.

**Insassen- und Fußgängerschutz** Im Insassenschutz werden die Belastungswerte der Dummys beim Crash analysiert. Ziel ist die optimale Auslegung der Rückhaltesysteme (RHS) wie der Gurte, Airbags etc., welche in ihrem Zusammenspiel mit dem Fahrzeug abgestimmt werden. Neben den reinen Gesetzesanforderungen sind Verbrauchertests sowie die aus Unfallforschungsdaten abgeleitete Anforderungen im Felde zu beachten. Beim Fußgängerschutz ist das Ziel, die Fahrzeugfront und die Motorhaube so zu gestalten, dass die Verletzungen eines angefahrenen Fußgängers minimiert werden. Dies kann über eine Gestaltung der äußeren Geometrie und über eine Anpassung der Steifigkeiten der Fahrzeugfront und der Motorhaube erfolgen (s. ▶ Kap. 9).

In der Regel werden Insassen- und Fußgängerschutzsimulationen an Teilmodellen durchgeführt. Beim Frontcrash wird dazu die Zelle samt Interieur (Sitz, Gurt, Cockpit, Lenkrad) und Dummys betrachtet. Die aus dem Strukturcrash vorliegenden Ergebnisse – Verformung der Zelle und Bewegung (Puls) über der Zeit – werden aufgeprägt. Bei der Simulation von Fußgängerunfällen werden nur die relevanten Bauteile der Fahrzeugfront simuliert. Auf diese Weise ist eine effektive und ressourcenschonende Simulation des Gesamtvorgangs möglich. Zudem werden durch diesen Ansatz die Anteile, welche die Struktur und welche die Rückhaltesysteme zu bringen haben, klar getrennt. Von der Struktur werden das Einhalten bestimmter zulässiger Verformungen und eine bestimmte Beschaffenheit des Verzögerungspulses verlangt.

Bei der Simulation werden zum einen Modelle verwendet, welche die in realen Versuchen verwendeten Crashtest-Dummys möglichst genau abbilden, um hier die Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Versuch herzustellen (Abb. 11.32). Zum anderen werden Menschmodelle eingesetzt, bei denen versucht wird, den Menschen möglichst reali-

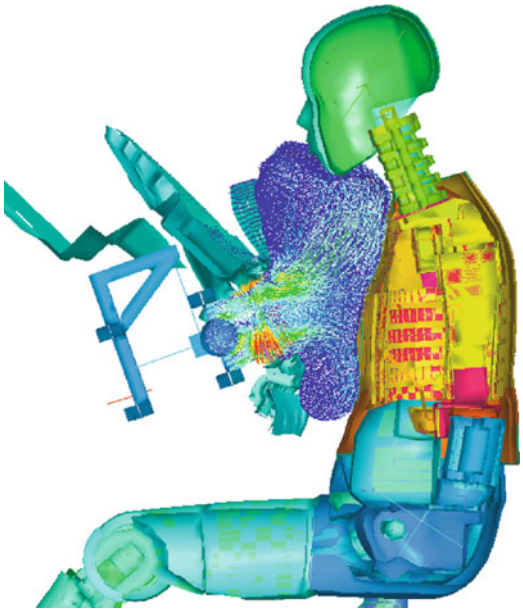


**Abb. 11.32** Berechnung der Airbag-Entfaltung mit Gasdynamik (Quelle: AUDI AG)



tätsnah darzustellen (Abb. 11.33). Die für die Simulation verwendeten Menschmodelle basieren entweder auf einem Mehrkörpersystem oder werden mittels Finiter Elemente diskretisiert. Die MKS-Modelle werden aus mehreren Starrkörpern, welche mit Massen und Trägheiten versehen sind, zusammengesetzt. Moderne FE-Mensch-Modelle beinhalten neben der genauen Modellierung des Skelettes und der detailgetreuen Modellierung der inneren Organe auch eine Modellierung der Muskeln mittels aktiver Elemente, welche während der Simulation aktiviert (Muskel wird angespannt) und deaktiviert (Muskel wird entspannt) werden können (Abb. 11.33).

Welche Modellierung verwendet wird, hängt vom simulierten Lastfall und dem Ziel der Simulation ab. Ist für die Simulation die Kinematik des Modells von primärem Interesse, wird aufgrund der geringeren Rechenzeiten auf MKS-Modelle zurückgegriffen. Spielt aber die Interaktion zwischen Mensch und Umgebung sowie das genaue Verletzungsbild des Menschen eine entscheidende Rolle, werden die komplexeren FE-Modelle verwendet. Da immer mehr Detailaussagen gefordert werden, werden zunehmend mehr FE-Modelle eingesetzt [63, 64].

**Auslegung Interieurbauteile** Die zentrale Rolle bei der Auslegung sicherheitsrelevanter Interieurbauteile nimmt der Kopfaufprall ein. Hierbei werden zum einen das Cockpit und die Mittelkonsole mittels eines starren, halbkugelförmigen Pendels angeschlagen, zum anderen werden die Säulen und der Himmel mittels eines frei fliegenden Dummy-Kopfs beschossen. In allen Fällen wird die am Messinstrument auftretende Beschleunigung gemessen und bewertet. Ziel ist es, den Innenraum weich, d. h. energieabsorbierend, zu gestalten.

Als Vorauslegung für den Knieaufprall der ungegurteten Personen werden die Knieschutzsysteme mittels spezifischer Impaktoren vorabgestimmt. Erst wenn bestimmte Voraussetzungen bezüglich

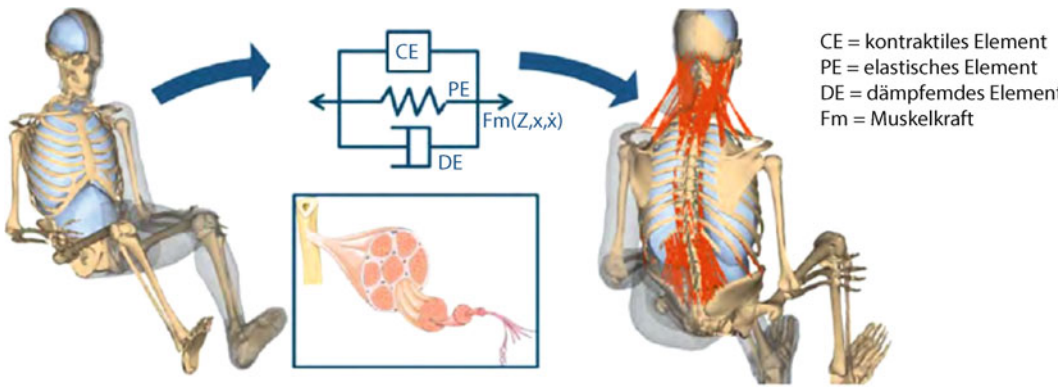



**Abb. 11.33** Muskelmodellierung bei einem Aktiven FE-Menschmodell [64]

des Verformungsverhaltens erfüllt sind, werden die Stände an die Frontschutz-Simulation übergeben und im Zusammenspiel mit allen Rückhaltesystem-Komponenten bewertet. Auch dem Sitz kommt eine erhebliche Bedeutung in der Sicherheitsauslegung zu. Schutz vor Ladung, Schutz vor einem Schleudertrauma beim Aufprall des Kopfes auf die Nackenstütze (Whiplash) und die Lehnenverlagerung beim Crash sind typische Lastfälle, nach denen mittels FE-Rechnungen ausgelegt wird.

Eine weitere Anforderung im Innenraum stellt die Simulation der Airbag-Öffnung dar. Dies umfasst sowohl die Simulation der Schalttafel, welche den Airbag freigibt, als auch die Reaktionskräfte an der Modulbefestigung. In der Simulation müssen entsprechend der Realität gefaltete Airbags eingesetzt werden. Dazu wird in einer eigenen Vorsimulation der Faltungsprozess abgebildet. Um die Prognosefähigkeit der Airbag-Analysen zu steigern, muss die Gasströmung berücksichtigt werden [30]. Es entsteht eine Kopplung der Gasdynamik mit dem mechanischen Problem. Damit lässt sich insbesondere die Impulsübertragung durch das Gas in den ersten 5–10 ms der Entfaltung deutlich verbessern (◘ Abb. 11.32).

Einen breiten Raum für Verbesserungen bieten nach wie vor die Materialmodelle, insbesondere wenn sie die Vorhersage des Materialversagens und die im Innenraum eingesetzten Kunststoffe betreffen. Neben der Entwicklung immer komplexerer Modelle darf die Materialcharakterisierung nicht vernachlässigt werden. Im Projekteinsatz müssen sich alle Werkstoffkennwerte innerhalb kurzer Zeit bestimmen lassen.

**Sensorik** Die Charakteristik der bei einem Crash auftretenden Beschleunigungs- oder Drucksignale sind entscheidend für die Aktivierung der Rückhaltesysteme. Deshalb steht auch die Simulation von Sensorsignalen im Mittelpunkt und bietet die Chance für die Bewertung der Integrierbarkeit verschiedener Sensoren.

Airbagsteuergeräte werten die hochfrequenten Signalanteile der verwendeten Druck- und Beschleunigungssensorsignale aus. Die Beschleunigungssignale können von den FE-Methoden im Gesamtfahrzeug unter Berücksichtigung der auftretenden Toleranzen nicht gut prognostiziert werden. Deshalb zielen die eingesetzten FE-Methoden auf die Vorhersage des Geschwindigkeitssignals am Sensor. Hauptaugenmerk ist die richtige Positionierung der Sensoren im Fahrzeug. Neuerdings werden die berechneten Signale mittels moderner Data Mining Methoden zur Vorauslegung von Crashklassifizierungs-Algorithmen herangezogen [65].

**HV Komponenten** In den heutigen Crashmodellen werden alle hochvoltführenden Komponenten modelliert und numerisch bewertet. Die Auslegungskriterien beziehen sich auf die Integrität des Gehäuses bzw. der Schutzmaßnahme und einer Grenzbetrachtung der ertragbaren Beschleunigungen. Ziel ist es, die Hochvoltzellen verformungsfrei zu halten und damit einen Elektrolytaustritt zu vermeiden. Es gibt aktuell auch hochaufgelöste Modelle, die die Interaktion der Zellmodule im Gehäuse inkl. Kontaktierung abbilden können. Die Schutzmaßnahmen werden sowohl in der Einzelkomponente als auch im Gesamtfahrzeugmodell simuliert und getestet.

#### 11.3.3.2 Mehrkörpersystem-Simulationen

**Mehrkörpersystem (MKS)-Methode** Mit der Starrkörpersimulation wird ein mechanisches System in ein rechnerisch relativ leicht abbildbares Modell aus Starrkörpern abgebildet, welches aus den am Prozess beteiligten Elementen besteht. Die Massen bzw. Massenträgheitsmomente, die aktiven Kräfte und Momente sowie die Bindungs- und Kontaktbedingungen der einzelnen Starrkörperelemente, welche die Zahl und Art der Freiheitsgrade bestimmen, beeinflussen im Wesentlichen das dynamische Verhalten der physikalischen Realitäten und somit auch des Simulationsmodells [66].

Ein MKS-Programm setzt aus den geometrisch definierten Zwangsbedingungen eigenständig das Gleichungssystem zusammen und berechnet die Kinematik oder Dynamik im Zeitbereich. Als Ergebnis stehen die kinematischen Größen der Einzelkörper und die Kräfte zur Verfügung. Die Bauteilbelastungen (Dehnungen und Spannungen) können nicht im MKS-Programm berechnet werden. Dazu ist ein Rücktransport der Berechnungsergebnisse in ein FE-Programm notwendig. Allerdings ist es üblich, flexible Strukturen, deren Eigenfrequenzen und Eigenformen relevant für den betrach-

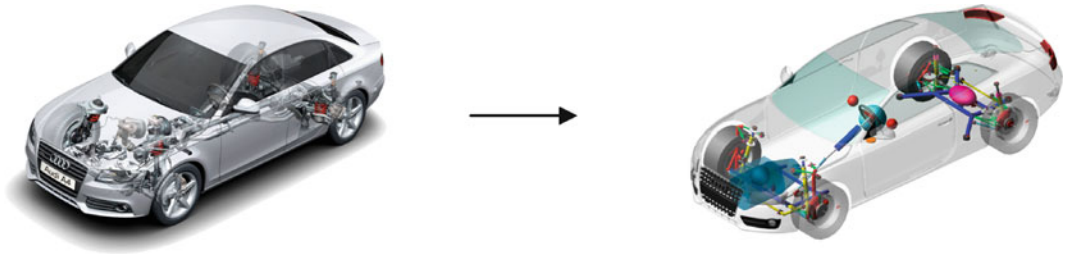


**Abb. 11.34** Schematische Transformation eines mechanischen Fahrzeugs in ein MKS Modell, inkl. Reifen, Achsen, Lenkung, Bremsen, Antriebsstrang, Aufbau, Fahrermodell (Quelle: AUDI AG)

teten Frequenzbereich sind, als modal reduzierte Superelemente direkt in das MKS-Modell einzubinden. Dies wird speziell für die Karosserie sowie bestimmte Wellen und Träger durchgeführt, wobei es möglich ist, die Superelemente aus vorhandenen FE-Modellen zu extrahieren [67].

Die Mehrkörpersystem-Analyse wird immer dann verwendet, wenn Bewegungen kompakter Körper simuliert werden sollen. Das kann der Kopf eines Dummys sein, der beweglich auf dem Rumpf sitzt, oder ein Kolben, der sich im Motorblock auf und ab bewegt. So lassen sich zum Beispiel Bewegungsabläufe im Motor optimieren, Fertigungstoleranzen festlegen und Stoßfedern einpassen.

Hauptanwendungsgebiete sind die Berechnung von Antriebsstrangbauteilen/-modulen, Gesamtfahrzeugdynamik und -komfort, Stuckern und Zittern, die Aggregatebewegung, die Simulation auf virtuellen Teststrecken zur Ableitung von dynamischen Lasten für die Festigkeitsauslegung und die Berechnung von Fahrwerksbauteilen, insbesondere die Auslegung der Elastokinematik der Achsen [68–70].

**Elastokinematik und Gesamtfahrzeugdynamik** Mittels MKS-Verfahren werden bereits in der Konzeptphase die kinematischen Positionen des Fahrwerks und die dynamischen Radhüllkurven berechnet und zur Auslegung der Freigänge zur Karosserie herangezogen. Nach der elastokinematischen Grundauslegung von Vorder- und Hinterachse werden Gesamtfahrzeugberechnungen durchgeführt. Abb. 11.34 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise [30, 71]. Dazu werden Gesamtfahrzeugmodelle aufgebaut, die aus Vorder- und Hinterachse, Karosserie, Lenkung, Aggregat/Antriebsstrang und Reifen bestehen. Zusätzlich zu den in den Achsen verbauten elastischen Lagern müssen insbesondere die Eigenschaften der Reifen exakt modelliert werden. Für schnelle dynamische Manöver müssen zusätzlich zu den Massen und deren Lage die Trägheitsmomente im Aufbau bekannt sein. Bei den Fahrmanövern wird zwischen „open-loop" und „closed-loop" unterschieden, wobei bei letzterem ein Fahrermodell als Regler erforderlich ist. Die Simulation errechnet die Zeitsignale der Fahrzeugeigenschaften, und durch deren Auswertung werden die Handlingeigenschaften bewertet. Die erreichten Genauigkeiten sind ausreichend, um z. B. das Verhalten in einer stationären Kreisfahrt und auch transiente Phänomene bis zu Frequenzen von ca. 8 Hz vorauszubestimmen. Bewertungskriterien sind die Aufbaubewegungen, Stuckern/Zittern, Wank/Nick-Neigung des Fahrzeugs und das Eigenlenkverhalten (s. ▶ Abschn. 7.4 u. ▶ Abschn. 7.5).

**Fahrkomfort-Simulation** Fahrkomfort-Analysen mit MKS zielen auf Effekte im Frequenzbereich bis zu 50 Hz (Abb. 11.34). Dabei wird zwischen der Überfahrt diskreter Hindernisse, wie positive oder negative Kanten, und stochastischer Fahrbahnanregung unterschieden. Auch das Verhalten auf der Hydropuls-Vierstempelanlage wird simuliert. Beschleunigungssignale werden an allen komfortrelevanten Punkten, wie bspw. Sitzschiene, Lenkrad und Kopfstütze, und an Punkten der Krafteinleitung bestimmt. Die Untersuchung benötigt eine modale Repräsentation der Karosserie, eine Abbildung der amplituden- und frequenzabhängigen Eigenschaften der relevanten Komponenten, wie bspw. der Lager und Dämpfer, sowie ein Reifenmodell, das den Fahrbahnkontakt nachbildet. Durch

Bewertungsmodelle und Kennwerte, die aus Korrelation von Beschleunigungssignalen und subjektiven Beurteilungen aus Vorgängermodellen ermittelt wurden, kann eine objektive Bewertung des Fahrkomforts vorgenommen bzw. subjektive Bewertung des Fahrkomforts abgeschätzt werden [30, 68, 71].

Um die Prognosegüte der Fahrkomfortsimulation zu optimieren, werden heutzutage zwei weitere Ansätze verfolgt: zum einen werden schwingungsdynamische Fahrermodelle entwickelt und als MKS-Struktur der Simulation hinzugefügt, um mögliche Kopplungen der Fahrzeug- mit den biomechanischen Eigenformen zu erfassen und den gesamten Transferpfad von der Anregung bis zum Fahrer zu berücksichtigen [72, 73]. Zum anderen werden die durch MKS ermittelten Beschleunigungssignale direkt auf einen Schwingungs- bzw. Ride-Simulator aufgeprägt, in dem Experten die Schwingungseigenschaften subjektiv, jedoch ohne Prototyp bewerten können [74, 75].

**Simulation der Aggregatebewegung** Ein Hauptaugenmerk in der Entwicklung des Aggregates und des Antriebsstrangs gilt dem Verhalten bei Lastwechseln [30, 76]. Drehschwingungen beim Anlass- oder Abstellvorgang des Aggregats wie auch Drehungleichförmigkeiten beim Verbrennungsvorgang bewirken Schwingungen des Fahrzeugaufbaus. Die wichtigsten Lastfälle für die Simulation sind: Drehschwingungen des Aggregats, Ampelstart bzw. Motor-Start-Stop-Automatik, Volllastbeschleunigung, Handling in Slalomstrecken, Lastwechsel bei Kurvenfahrt und Hindernisüberfahrt. Diese Simulationen erfordern eine detaillierte Abbildung von Aggregat, Kupplung, Getriebe, Schwungrad, Differential inklusive aller torsionalen Elastizitäten und Spiele. Besonders wichtig sind die genaue Abbildung der Lager und Dämpfer und bei virtuellen Fahrmanövern das verwendete Reifenmodell. Die Bewegungsinformation aus den Simulationen kann ebenfalls genutzt werden, um die dynamischen Hüllkurven für Freigangsuntersuchungen im Vorderwagen zu liefern.

**Betriebslastensimulationen** Viele der bei der Fahrkomfortuntersuchung beschriebenen virtuellen Manöver und Straßenfahrten werden ebenfalls zur Ermittlung der auftretenden Bauteilbelastungen verwendet. Damit sowie durch spezielle Analysen wie Schlagloch- oder Bordsteinkantenüberfahrten lassen sich Ziele bzw. Aussagen für die Konstruktion der einzelnen Baugruppen ableiten und Lebensdauer- sowie Missbrauchsanalysen abschätzen [77]. Weiterhin im Fokus steht die Beanspruchung der Lager, speziell des Aggregats, die für die Auslegung im Spannungsfeld zwischen Festigkeit, Schwingungen und Akustik eine wesentliche Rolle einnimmt [78]. Bei der Betriebslastenermittlung ist neben der korrekten Fahrzeugmodellierung im niederfrequenten Bereich bis ca. 8 Hz ebenfalls eine möglichst realitätsnahe Nachbildung des Fahrverhaltens notwendig, da dies die auftretenden Lasten maßgeblich beeinflusst. Zu diesem Zwecke werden entweder MKS-integrierte längs- und querdynamische Fahrermodelle eingesetzt oder eine direkte simulative Kopplung der MKS mit vorhandenen fahrdynamischen Regelalgorithmen realisiert. Virtuelle Validierung und Absicherung der simulierten Last-Zeit-Verläufe, Power Spectral Density (PSD) Kurven und Summenschädigungen erfolgen durch Abgleich mit Mess- oder Referenzdaten vergleichbarer Fahrzeuge.

#### 11.3.3.3 Strömungssimulation

**CFD-Methoden (Computational Fluid Dynamics)** Zur Strömungsberechnung (CFD) sind heute üblicherweise numerische 3D-Verfahren im Einsatz, die auf einer Finite Volumen Diskretisierung der Navier-Stokes Gleichungen aufbauen. Diese Gleichungen drücken für jedes Volumenelement in einer Strömung das Gleichgewicht aller wirksamen Kräfte aus; dieses sind die Massenträgheits-, die Druck- und die Reibungskräfte. Die hiermit aufgestellte Kräftebilanz bildet zusammen mit der aus dem Satz von der Erhaltung der Masse abgeleiteten Kontinuitätsgleichung die Basis des Verfahrens. Für Temperaturberechnungen oder kompressible Strömungen muss noch die Energiegleichung hinzugenommen werden. Der Einfluss der Kompressibilität kann jedoch bei der Umströmung bis etwa 250 km/h vernachlässigt werden. Neben den Finite Volumen Verfahren haben sich auch Verfahren, die auf einem Lattice-Boltzmann Ansatz beruhen, bewährt [79]. Dabei wird das Fluid durch idealisierte Partikel modelliert, die sich in einem kubischen Gitter mit dis-

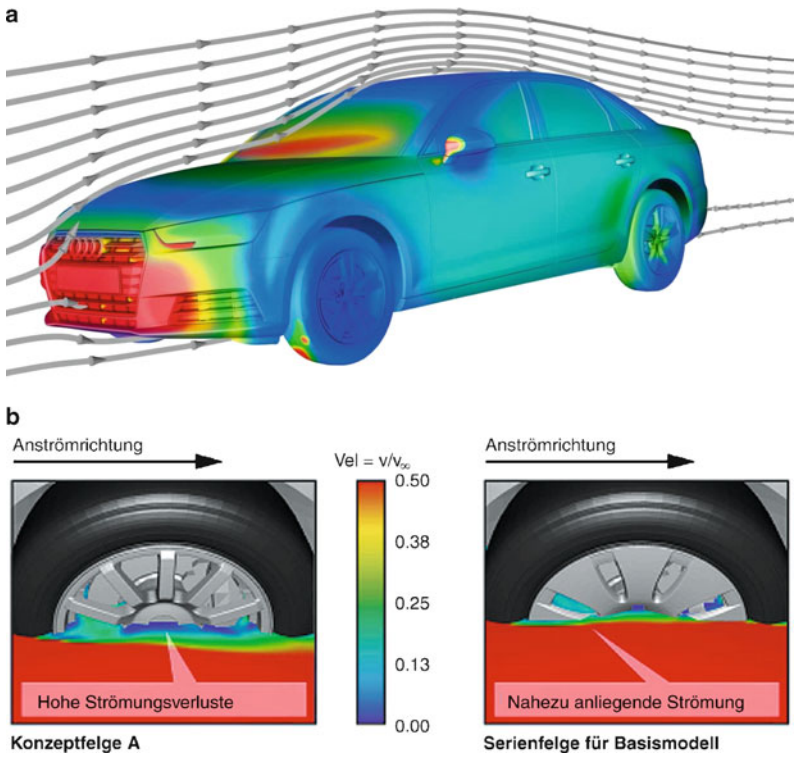



**Abb. 11.35** **a** Beispiel einer statischen Druckverteilung auf der Fahrzeugoberflache des Hinterwagens und Stromfäden im Mittelschnitt und **b** relative Strömungsgeschwindigkeiten an Felgen (Quelle: AUDI AG)

kreten Geschwindigkeiten in diskreten Zeitschritten bewegen. Vorteil dieser Methode ist die relativ einfache Anwendbarkeit auf komplexe Geometrien. Daneben werden vor allem in der Konzeptphase auch 1D-Verfahren insbesondere bei Rohrströmungen oder rohrähnlichen Strömungen angewendet. Druckverluste infolge Drosselung, Umlenkungen, Verzweigungen u. ä. werden durch Näherungsformeln oder aus vorliegenden Messwerten abgeleitet [79–81].

**Aerodynamik** Eine Grundaufgabe von CFD in der Aerodynamik ist die Bewertung von verschiedenen Designrichtungen in der frühen Projektphase. Die Berechnung ersetzt hier in vielen Fällen schon die Windkanalversuche an verkleinerten Modellen und unterstützt durch Erkenntnisse über das Strömungsfeld die experimentelle Optimierung. Zusätzlich zu diesem klassischen Einsatz zur Ermittlung der aerodynamischen Beiwerte für Widerstand ($c_W$) und Abtrieb ($c_A$) des Fahrzeugs dient CFD in der Aerodynamik auch dazu, die konstruktive Auslegung von diversen Bauteilen zu unterstützen (s. a. ▶ Abschn. 3.2, ▶ Abschn. 6.1.1.2.2, ▶ Abschn. 11.2.3.3 u. ▶ Abschn. 12.5).

Der große Vorteil von CFD besteht darin, dass man nicht nur integrale Größen wie Kräfte und Momente erhält, sondern darüber hinaus detaillierte Informationen über das gesamte Strömungsfeld. Anhand der statischen Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche (Abb. 11.35a) werden die aerodynamischen Kräfte, die auf der Motorhaube, den Türen oder einem Schiebedach wirken, mit hoher Genauigkeit berechnet und dienen somit als Basis für die Festigkeitsauslegung dieser Bauteile mittels Finiter Elemente (s. ▶ Abschn. 11.3.3.1).

Im Motorsport spielt die genaue Berechnung der gesamten aerodynamischen Kräfte (Abtrieb und Widerstand) eine große Rolle in der Auslegung, während der Fokus bei normalen Serienfahrzeu-

gen mehr auf der Optimierung des Widerstandes liegt.

Das Wischverhalten von Scheibenwischern wird von den Druckverhältnissen im Scheibenbereich beeinflusst. Die Auslegung der Wischerblattposition erfolgt heutzutage unter Zuhilfenahme der rechnerisch ermittelten Oberflächendrücke. Ebenso werden die zur Be- und Entlüftung des Fahrgastraumes notwendigen Öffnungen mittels berechneter Oberflächendruckverteilung bestimmt.

Ein Einsatz der Berechnung ist besonders dort interessant, wo man mit den bisherigen, experimentellen Methoden auf Schwierigkeiten stößt. Der $c_W$-Wert des Fahrzeugs wird stark von den Vorderrädern bzw. den dort montierten Reifen beeinflusst. Eine Formoptimierung der Räder ist im Experiment sehr schwierig, besonders wenn – physikalisch richtig – mit drehenden Rädern gemessen wird (◘ Abb. 11.35b). Für die Berechnung ist diese Aufgabe leichter zu lösen [82]. Bei der Designoptimierung muss beachtet werden, dass die Luftführung auch eine ausreichende Kühlung der Bremsen ermöglicht. Außerdem können mit der CFD-Simulation die Kühlluftmassenströme in einfacher Weise und in guter Genauigkeit bestimmt werden.

Die Prognosegüte heutiger CFD-Rechnungen kann als brauchbar, insbesondere für Relativaussagen, bezeichnet werden. Allerdings werden die Strömungsdetails nicht immer richtig wiedergegeben, auch wenn die berechneten Gesamtkräfte und Momente in guter Übereinstimmung mit Messergebnissen stehen [79–81].

**Aeroakustik** Die numerische Simulation aeroakustischer Phänomene (Computational Aeroacoustics, CAA) befindet sich noch weitgehend in der Phase der Methodenentwicklung, d. h. sie wird derzeit noch nicht als gängiges Entwicklungswerkzeug eingesetzt. Jedoch haben trotz der o. g. Einschränkungen Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet innerhalb der letzten Jahre zu einigen Ansätzen geführt, die den Einsatz von CAA-Verfahren in der Praxis handhabbar machen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um sog. Hybridverfahren, in denen die Berechnung der Strömung und die der Akustik voneinander entkoppelt werden [83].

Die Berechnung der Schallquellen auf der Oberfläche eines vereinfachten Fahrzeug-Außenspiegels ergibt mit ausreichend hoher Gitterauflösung gute Ergebnisse für die Oberflächendruckverteilung und die Strömungstopologie. Aus den berechneten Schallquellen kann bei angemessener Gitterauflösung auch das abgestrahlte Geräusch bis etwa 300 Hz gut vorhergesagt werden.

Wummerphänomene entstehen bei der Umströmung von offenen Seitenscheiben oder Schiebedächern. Hierbei induzieren Wirbel, die sich an der Vorderkante der Öffnung ausbilden, niederfrequente Druckschwankungen im Fahrgastinnenraum. Für Automobile sind die zu betrachtenden Wummerfrequenzen normalerweise mit $< 25$ Hz sehr gering. Die Schalldruckpegel erreichen bis zu 130 dB und sind äußerst störend. Untersuchungen konnten zeigen, dass für derartige Problemstellungen die numerische Berechnung einen sinnvollen Beitrag leisten kann [84]. Ein weiteres Anwendungsgebiet des Verfahrens ist die akustische Berechnung der Klimaanlage.

**Wärmemanagement** Um dem anhaltenden Trend zu effizienteren Fahrzeugen gerecht zu werden, rückt der Bereich des Wärmemanagements zunehmend in der frühen Entwicklungsphase in den Blickpunkt. Für die konzeptionelle Auslegung des Wärmehaushalts von Motor, Getriebe, Klimaanlage und Heizung kommen rechnerische Methoden zum Einsatz [79, 82].

Typischerweise gehören hierzu die Fahrt bei Höchstgeschwindigkeit sowie die Bergfahrt mit Hänger. Zusätzlich werden einige kritische „offdesign"-Punkte, z. B. plötzlicher Stop aus schneller Fahrt und Handling betrachtet. Diese Betriebspunkte werden zunächst stationär, dann aber, wie bei „Stop and Go" und Handling, auch transient untersucht. Interessant ist dabei der Effekt des Nachheizens, da bei fehlender Kühlung durch den Fahrtwind die Wärmestrahlung der dominierende Faktor wird.

Das Wärmemanagement des Antriebsstrangs, d. h. die Aggregatekühlung, umfasst sowohl die Auslegung der Kühlluftströmung durch die Kühlungskomponenten als auch die Auslegung des Kühlwasserkreislaufes. Im Entwicklungsprozess werden 1D-Simulationen des Luft- und Wasserkreislaufes und des damit vorhandenen Wärmeübergangs wie auch die 3D Strömungssimulation der Kühlluft herangezogen. Beide Methoden

erfordern Eingabegrößen und Kennfelder der Aggregate und Kühlkomponenten, welche teilweise nur durch die Einbindung von Fahrzeug- und Prüfstandsmessungen ermittelt werden können. Der Versuch ist somit ein wichtiger Bestandteil der Simulation. Es ist inzwischen aber auch möglich, den kompletten Motor bzw. den Wassermantel thermisch zu berechnen (s. a. ► Abschn. 3.3).

Während die Konzeptauslegung für die Wärmetauscheranordnung und -größe für Kühlwasser, Ladeluft, Motor- und Getriebeöl und den Kühlflüssigkeitskreis in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses mit 1D-Modellen auf Basis des Vorgängermodells erfolgt, wird die 3D Strömungssimulation anhand detaillierter Designmodelle und Kühlkomponenten in einer späteren Phase durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt ein Abgleich der 1D-Modelle mit der 3D Strömungssimulation als auch mit weiteren Messungen aus der Serienentwicklung, so dass eine konsequente Detailoptimierung der Systeme möglich wird.

Durch die zunehmende Einführung alternativer Antriebstechnologien ergeben sich neue Herausforderungen für die Auslegung der Kühlsysteme, da zusätzliche Komponenten wie E-Motoren, Leistungselektronik und Hochvoltspeicher sowie Brennstoffzellen auch Kühlung benötigen. Zudem muss mangels Motorabwärme der Innenraum elektrisch beheizt werden.

Eine weitere Herausforderung des Wärmemanagements stellt die Vermeidung lokaler Überhitzungen (Hot Spots) an Bauteilen [30], wie beispielsweise dem Scheinwerfer dar. Trotz der aktuellen hocheffizienten LED-Technologie entstehen durch die große Leistungsdichte auf engem Raum hohe Temperaturen, die ohne geeignete Gegenmaßnahmen die Lebensdauer der LEDs deutlich reduzieren. Eine physikalische Besonderheit beim Temperaturverhalten von Scheinwerfern ist der dominierende Einfluss der Wärmestrahlung. Bei numerischer Simulation muss ein Strahlungsmodell sowohl die diffuse Infrarotstrahlung als auch die sichtbaren, gerichteten Strahlungsanteile berücksichtigen. Diese überfordert die meisten kommerziellen Strömungssimulationsprogramme. Zur Lösung des Problems wird meist eine Berechnungsmethode angewandt, die auf der Kopplung eines Strömungssimulationsprogramms mit einem Raytracing-Strahlungsmodul basieren. Mit Hilfe dieser Methode gelingt es, die exakte Lage der lokalen Überhitzungen an Bauteilen und deren Temperaturniveaus zuverlässig zu bestimmen. Methodische Herausforderungen bestehen noch in der Integration zusätzlicher Umgebungsbedingungen wie Fahrtwindanströmung, Motorwärme und Sonnenanstrahlung in die thermische Analyse des Scheinwerfers.

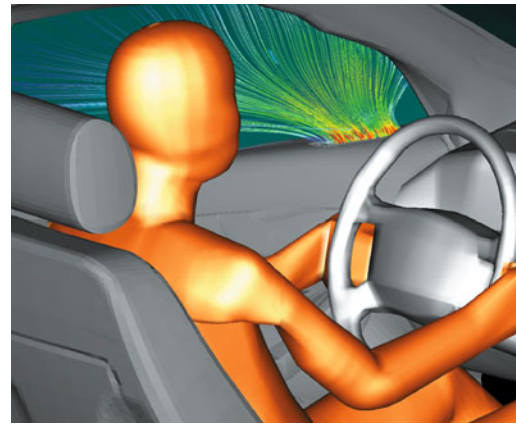


**Abb. 11.36** Beispiel für ein Simulationsmodell der Luftführung zur Seitenscheibe (Quelle: AUDI AG)

**Klimatisierung** Im Bereich Klimatisierung gibt es eine Reihe von Anwendungen, die mit numerischen 3D-Methoden behandelt werden [79, 82]. Die gezielte Führung der Luft über die Strecke vom Wasserkasten durch das Klimagerät und die Luftführungen in den Innenraum zählen zur Standardanwendung von CFD. Die Auslegung dient der Minimierung der Druckverluste, um bei möglichst geringer Leistung des Klimagerätes eine ausreichende Luftzufuhr zum Innenraum sicherzustellen.

Eine rechnerische Ermittlung der Luftströmung im System Klimagerät und den zugehörigen Luftführungen ist in Abb. 11.36 dargestellt. Als Schnittstelle zum Innenraum sind die Personenanströmer zu positionieren und zu optimieren. Die Auslegung zielt neben einer schnellen Abkühlung darauf, den Komfort der Insassen nicht durch Zugerscheinungen zu beeinträchtigen. Im Allgemeinen wird CFD hier auch deshalb erfolgreich eingesetzt, weil eine

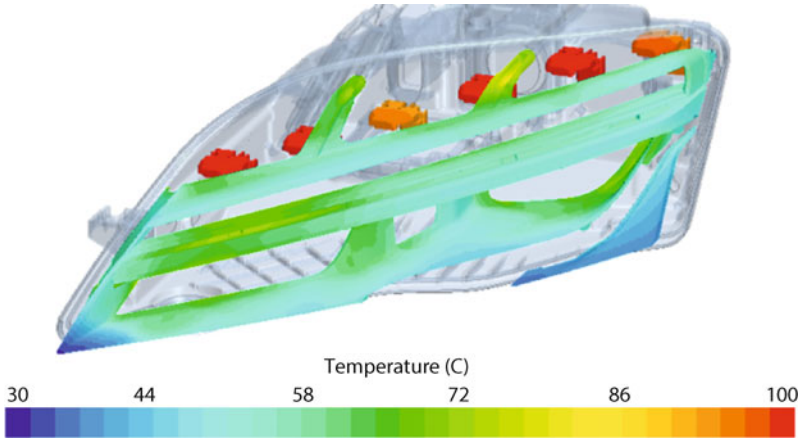



**Abb. 11.37** Temperatur-Simulation im R8 LED Scheinwerfer – Temperaturverteilung am Abblendlicht und am Grundlicht-Kühlkörper und an den Blenden (Quelle: AUDI AG)

versuchstechnische Ermittlung des Strömungs- und Temperaturfeldes in diesem Bereich nur mit hohem Aufwand durchzuführen ist.

Die Beurteilung des Komforts unterliegt in der Regel subjektiven Empfindungen, sie muss gefühlt und erlebt werden. Modelle zur Objektivierung der kundenorientierten Bewertung der Luftbewegung in der Fahrgastzelle sind Gegenstand aktueller Forschungen [85].

Eine weitere zentrale Aufgabe der Berechnung, die zur Erhöhung der Fahrsicherheit beiträgt, ist die Simulation der Front- und Seitenscheibenenteisung bzw. -enttauung. Basierend auf einer zeitlich-konstant angenommenen Innenraumströmung wird meist eine zeitabhängige Temperatursimulation mit einem Enteisungs- bzw. Luftfeuchtemodell durchgeführt (Abb. 11.36).

Die gleiche Problemstellung ergibt sich bei der Enttauung der Scheinwerfer, welche über Belüftungsöffnungen zur Wärmeabfuhr verfügen, durch die Feuchtigkeit eindringen kann. Bei der Abkühlung legt sich die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit dann an die zuerst abkühlenden Flächen ab. Dieser physikalisch nicht zu verhindernde Effekt erzeugt einen sichtbaren Belag auf der Innenseite der Abdeckscheibe, den man durch geeignete Gestaltung der Scheinwerferdurchströmung abbauen will. Zu diesem Zweck wird bei der Simulation ein bestehender Beschlag als Anfangswert angenommen und dessen Abbau berechnet. (Abb. 11.37 und Abb. 11.38)

**Strömungssimulation Aggregate** Die CFD-Simulationen im Bereich der Motorenentwicklung werden inzwischen für sämtliche Bauteile und Funktionen des Motors angewandt. Hierbei ist eine wesentliche Herausforderung, unterschiedliche physikalische Anforderungen in den Simulationen abzubilden. Dies gilt sowohl für die verschiedenartigen Fluide wie z. B. Luft, Abgas, Kraftstoff, Kühlwasser, Öl als auch für die enormen Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen. Der Geschwindigkeitsbereich reicht hier von minimalen Geschwindigkeiten bei freier Konvektion im Kühlwasser bis hin zu über 1000 m/s bei Druckwellenausbreitungen in dynamischen Hydraulik-Simulationen. Zudem können Temperaturen von −30 °C (Kaltstart) bis über 2000 °C (Verbrennung) auftreten. Die CFD-Simulationen für Motoren müssen weiterhin in der Lage sein, unterschiedliche physikalische Effekte bei Mehrphasenströmungen (Einspritzung, Ölabscheidung), chemischen Reaktionen (Verbrennung, Abgasnachbehandlung), bewegten Systemen (Ventile, Kolben, Kurbelgehäuse, Kompressor, Turbolader, Pumpen), Wärmeübertragung (Kühlung, Brennverfahren), Gasdynamik (Abgasströmung, Akustik) u. v. m. abzubilden.

**Motorkühlung** Die Auslegung der motorinternen Kühlung ist seit vielen Jahren fester Bestandteil der CFD-Simulationen im Bereich Motor. Ziel ist es dabei, die lokale Bauteil- und Kühlwasserüberhitzung zu vermeiden sowie eine gleichmäßige

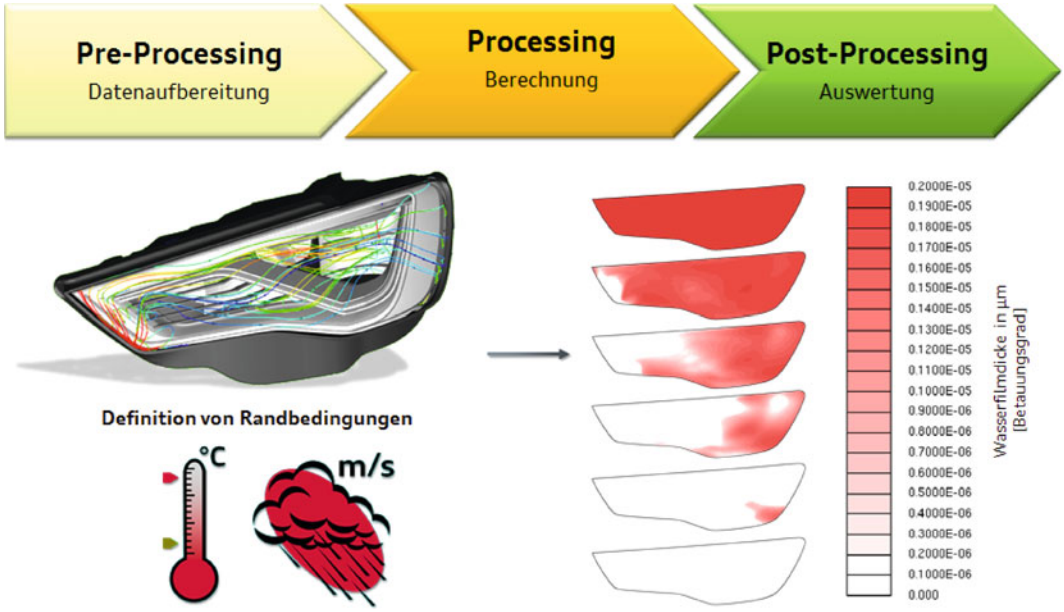



**Abb. 11.38** CFD-Simulation der Scheinwerfer-Durchströmung mit Berechnung der resultierenden Wasserfilmdicke (Quelle: AUDI AG)

11

Kühlung aller Zylinder und geringe Druckverluste der Kühlwasserströmung zu realisieren. Neben der komplexen Wassermantelgeometrie eines modernen Hochleistungsmotors werden dabei auch alle Komponenten – Wasserpumpe, Ventile, Kühlmittelregler – simuliert. Beispielsweise wird bei Turbomotoren die Abgasführung in den Zylinderkopf integriert („Integrierter Abgaskrümmer"). Die enge Kopplung der heißen Abgase mit dem Kühlwasser, die großflächig durch wenige Millimeter Aluminium getrennt sind, machen sogenannte „Conjugate Heat Transfer"-Simulationen erforderlich, da eine separate Betrachtung von Strömung und Struktur eine zu starke Vereinfachung darstellt [86] (Abb. 11.39). Bei diesen Simulationen werden in einem Modell die Abgas-, Kühlwasser- und ggf. Zylinderinnenströmung mit der Wärmeleitung und -abstrahlung der Motorbauteile gekoppelt simuliert.

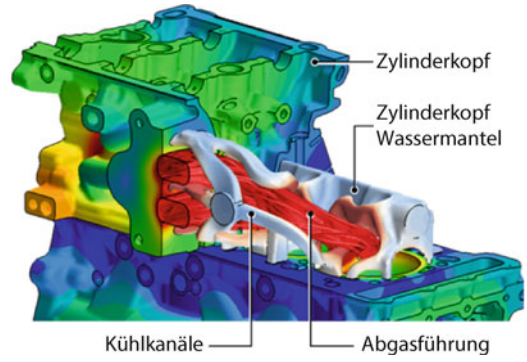



**Abb. 11.39** „Conjugate Heat Transfer"-Simulation der Abgas- und Kühlwasserströmung sowie der Bauteiltemperaturen in einem direkteinspritzenden Ottomotor mit integriertem Abgaskrümmer. Dargestellt ist die Bauteiltemperatur [87]

**Ansaug-/Abgastrakt** Ziel der Simulationen im Bereich Ansaugtrakt ist vor allem die konsequente Entdrosselung, was einen direkten Einfluss auf die Motor-Performance hat. Sowohl bei Saug- als auch bei Turbomotoren können hier CFD-Methoden sehr effizient zur Steigerung der Entwicklungsgüte und -geschwindigkeit eingesetzt werden. Im Abgastrakt sind typische Themen weiterhin die Optimierung von Katalysator- und $\lambda$-Sonden-Anströmung, die i. d. R. voll transient (bei Turbomotoren unter Berücksichtigung der Turbinenströmung) simuliert werden (Abb. 11.40). Hier kann die Si-

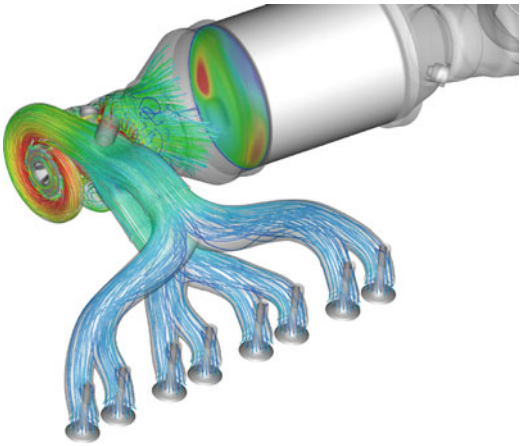


**Abb. 11.40** Simulation der Abgasströmung zur Bewertung der Katalysator- und Lambdasondenanströmung für einen Reihen-Vierzylindermotor. Dargestellt ist die Strömungsgeschwindigkeit (Quelle: AUDI AG)

mulation einen wesentlichen Beitrag zur Auslegung des Katalysators oder der Partikelfilter sowie zur Positionierung der Sonden liefern. Auch die Simulation der Energieprozesse im Abgas ist für niedrige Emissionen des Motors essenziell. Dies betrifft zum einen die Aufheizung der Abgasanlage (ggf. unter Berücksichtigung von Sekundärluftsystemen) und zum anderen die chemischen Reaktionen im Katalysator.

**Hydraulik (Ölkreislauf/Kraftstoffsystem)** Neben klassischen, stationären Simulationen zur Optimierung von Druckverteilung und Durchfluss haben sich inzwischen hochtransiente Dynamiksimulationen sowohl für die Ölkreislauf- als auch die Kraftstoffsystementwicklung etabliert. Durch Absenkung von Druckniveau und Durchfluss im Ölkreislauf aus Verbrauchsgründen einerseits und steigenden technischen Anforderungen, z. B. Geschwindigkeiten der Nockenwellenversteller, andererseits haben sich hier die Anforderungen an die Simulation erheblich verschärft. Dadurch können ohne zielgerichtete, rechnerische Optimierung in modernen Motoren erhebliche Druckspitzen auftreten, die zur Schädigung von Bauteilen führen.

**Ladungswechsel** Bei den Ladungswechselsimulationen werden in einem 1D-Modell sämtliche kurbelwinkelaufgelösten Strömungsvorgänge des Motorprozesses simuliert. Bei Saugmotoren ist das Ziel, durch geeignete Druckwellen die Füllung der Zylinder zu optimieren. Dies kann durch Optimierung von Bauteilgeometrien (z. B. Saugrohr, Krümmergestaltung) sowie durch die Ventil-Öffnungs- und -Schließzeiten erreicht werden. Auch in diesem Themengebiet hat sich mit der kontinuierlichen Steigerung des Einsatzes von Turbomotoren ein erheblicher Wandel vollzogen. Bei diesen kommt der maßgeschneiderten Auslegung des Abgasturboladers für den Motor und des Zusammenspiels von Turboaufladung, Brennverfahren des Motors und Ladeluftkühlung eine besondere Bedeutung zu. Inzwischen ist es aber möglich, durch Kombination von 1D- und 3D-CFD-Simulationen mit empirischen Modellen die motorische Performance hinsichtlich Leistung, Drehmoment und transientem Verhalten in guter Genauigkeit vorherzusagen und damit die Entwicklung maßgeblich zu beeinflussen.

**Aufladung/Turbolader** Die CFD-Simulation des Abgasturboladers (Abb. 11.41) eines Motors wird durch die stark transiente Abgasströmung deutlich komplexer als beispielsweise die stationäre Betrachtung einer Turbinenstufe. Im Nennleistungsbereich eines Vierzylinder-Turbomotors treffen hier pro Sekunde ca. 200 Abgaspulse mit stark schwankenden Geschwindigkeiten bis in den transsonischen Bereich und Temperaturen über 1000 °C

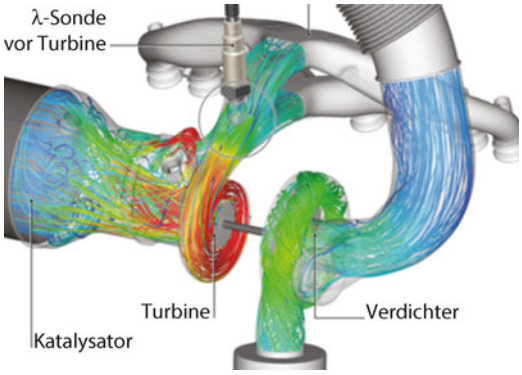



**Abb. 11.41** Simulation der Turboladerströmung in einem direkteinspritzenden Vierzylinder-Turbomotor mit integriertem Abgaskrümmer. Dargestellt ist die Strömungsgeschwindigkeit [88]

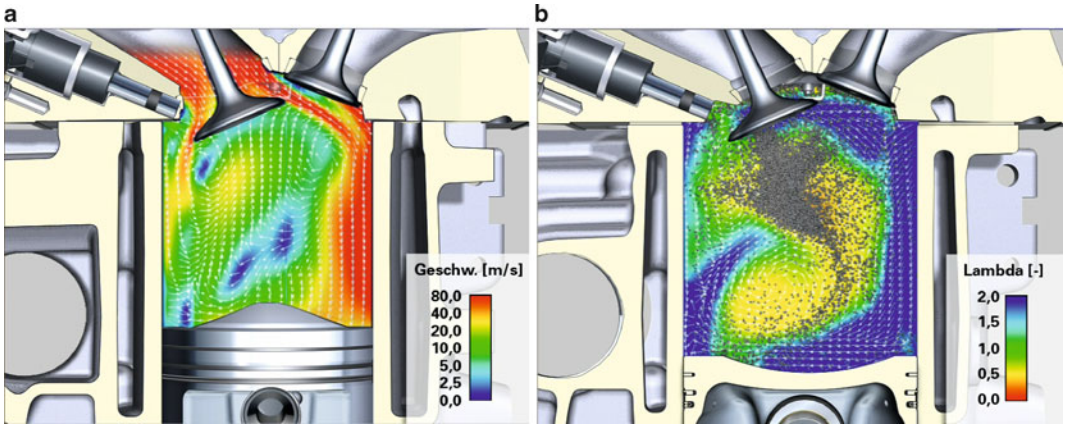



**Abb. 11.42** Simulation der Zylinderinnenströmung (**a**) und der Gemischbildung (**b**) in einem direkteinspritzenden Ottomotor (Quelle: AUDI AG)

auf das Turbinenlaufrad, das sich zeitweise mit über 200.000 U/min dreht. Ziel der Simulationen ist es, die optimale Interaktion zwischen Verbrennungskraftmaschine (Motor) und Strömungsmaschine (Turbolader) für maximale Motorperformance zu finden, wobei dabei die unterschiedlichen Betriebspunkte des Motors zu berücksichtigen sind (Low-End-Torque, Nennleistung, etc.). Hierzu werden auch Kennfeldberechnungen durchgeführt, um Turboladerdaten für die 1D-Ladungswechselsimulationen zu erzeugen. Weiterhin bildet die Optimierung der packagebedingten Peripherie des Laders, d. h. die Optimierung der Zu- und Abströmung von Verdichter und Turbine, erhebliches Potenzial für den erfolgreichen Einsatz von CFD-Simulationen.

**Zylinderinnenströmung (Ladungsbewegung, Gemischbildung, Verbrennung)** Ein wesentliches Ziel der Entwicklung innovativer Triebwerke ist neben der Steigerung der Fahrleistungen und der Dynamik gleichzeitig eine deutliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei Erfüllung der zukünftigen Abgasgrenzwerte. Ein Schwerpunkt des Einsatzes von Strömungssimulationen liegt daher in der Brennverfahrensentwicklung, d. h. der Auslegung von Brennraumform, Ein- und Auslasskanälen, Kolben sowie der Einspritzkomponenten. Da die Strömungsvorgänge im Zylinder stark von Kolben- und Ventilbewegung beeinflusst sind und kleine Geometriedetails (Abrisskanten, Maskierungen, etc.) entscheidend sein können, ist hier eine sowohl geometrisch als auch zeitlich hochaufgelöste Strömungssimulation mit bewegten Netzen erforderlich (Abb. 11.42). Zur Simulation der Gemischbildung ist zusätzlich eine Nachbildung des Einspritzvorgangs in Spray-Modellen zusammen mit physikalischen Modellen für die Mechanismen von Tröpfchenbildung und -zerfall, Verdampfung, Tropfen-Wandinteraktion u. v. m. durchzuführen [89]. Dabei wird i. d. R. eine Euler-Lagrange-Methode eingesetzt, bei der die Gasphase mit Hilfe der Euler'schen und die Flüssigkeit mit der Lagrange'schen Betrachtungsweise simuliert werden.

**Verbrennungssimulation** Die prädiktive CFD-Simulation der motorischen Verbrennung im Zylinder stellt auch heute noch eine große Herausforderung dar – obwohl in den letzten Jahren deutliche Fortschritte bei der Vorhersagegüte durch verbesserte physikalische Modelle erzielt wurden. Während die Simulation der Ladungsbewegung und der Gemischbildung inzwischen fester Bestandteil in der modernen Brennverfahrensentwicklung ist, werden Verbrennungssimulationen zumeist eher zur Problemanalyse oder als Ergänzung zu Messungen am Motor in späteren Entwicklungsphasen eingesetzt. Eine durchgängig verlässliche Vorhersage von Energieumwandlung und Schadstoffbildung ist heute oft noch nicht möglich.

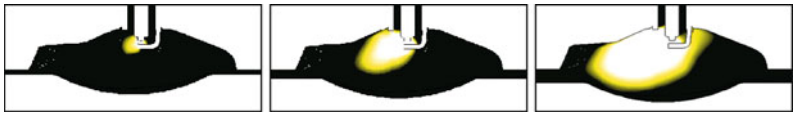


**Abb. 11.43** Simulation der Flammenausbreitung in einem direkteinspritzenden Ottomotor [90]

Eine Übersicht über die aktuellen Methoden zur Simulation der motorischen Strömungs- und Verbrennungsvorgänge ist detailliert in [48] dargestellt.

Die Herausforderungen bei Ottomotoren sind hierbei die korrekte Beschreibung der Mischungs-, Transport- und chemischen Umwandlungsprozesse in der turbulenten, teilweise vorgemischten Flammenfront, die korrekte Beschreibung der Vorgänge während der Zündung sowie eine verlässliche Klopfvorhersage. Abb. 11.43 zeigt exemplarisch die Simulation der Flammenausbreitung in einem modernen direkteinspritzenden Ottomotor.

Bei Dieselmotoren stellen die gleichzeitig ablaufenden und daher stark gekoppelten Vorgänge der Einspritzung, der Gemischbildung und der eher diffussionsdominierten Verbrennung eine hohe Anforderung sowohl an die Verbrennungs- als auch an die Einspritzmodelle. Hierbei spielt die Modellierung des Selbstzündungsmechanismus eine zentrale Rolle. Weiterhin ist die Abbildung der komplexen Rußbildungs-Mechanismen für die Dieselmotorentwicklung und damit für eine erfolgreiche Simulation im Entwicklungsprozess essenziell.

**Wasserablaufsimulation** Ein relativ neuer Bereich ist die Simulation von Wasserablaufvorgängen am Fahrzeug. Hier wird ausgehend von einer Benetzung der Karosserie z. B. mit Regen der Verlaufspfad des Oberflächenwassers berechnet, um etwa die Wasserbeaufschlagung von Komponenten zu beurteilen. Dabei müssen unter anderem komplexe physikalische Phänomene wie die Tröpfchen- oder Filmbildung, Kontaktwinkel, Adhäsion und Agglomeration berücksichtigt werden.

### 11.3.3.4 Elektrik-/Elektronik-Simulation

Jede neue Fahrzeuggeneration enthält deutlich mehr elektrische, elektronische und mechatronische Komponenten als ihre Vorgänger. In einem modernen Fahrzeug sind bspw. mehr als 8000 komplexe Halbleiter-Bauelemente und mehr als 1 GByte Software verbaut, worin sich die Notwendigkeit der Elektrik-/Elektronik-Simulation ergibt, welche zunehmend an Bedeutung in der Fahrzeugentwicklung gewinnt.

**Elektromagnetische Verträglichkeit** Angesichts der zunehmenden Elektronikdichte im Kfz stellt die Sicherstellung der EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) eine wachsende Herausforderung dar (s. ▶ Abschn. 8.4). Leistungselektronik unterstützt immer häufiger bisher rein mechanische Funktionen. Ausgefeilte Regelungen und Überwachungen von Motor-, Fahrwerk- oder auch Komfortsystemen verlangen immer schnellere Prozessoren. Mit der Integration von High-End-Infotainment-Systemen in die Fahrzeuge werden Rechenleistungen moderner PCs notwendig. All diese Systeme können auf elektromagnetische Felder reagieren bzw. erzeugen selbst elektromagnetische Felder, die zu Störungen führen können [30, 91].

Um diese Komplexität zu bewältigen und bereits vor der Fertigstellung eines Fahrzeugs Aussagen über die EMV einer elektronischen Komponente im Verbund des Gesamtfahrzeugs treffen zu können, sind neue Ansätze notwendig. Seit einigen Jahren wird mit Hilfe von EMV-Simulationen die elektromagnetische Verträglichkeit von Elektronikkomponenten im Vorfeld abgeschätzt. Die drei wesentlichen Handlungsfelder sind das Leitungsübersprechen, d. h. die elektromagnetische Verkopplung zwischen einzelnen Leitungen im Bordnetz, die Einkopplung von elektromagnetischen Feldern in den Kabelbaum und darüber in die elektronischen Komponenten sowie die Störspannungen und Ströme auf dem Leitungssatz, die zu abgestrahlten Feldern führen und im Fahrzeug genutzte Funkdienste (Radio, TV, Behördenfunk, LTE, Bluetooth usw.) stören können.

Die Berechnung der EMV erfolgt über ein Modell, das die wesentlichen EMV-Eigenschaften des KFZ nachbildet. Dieses Modell besteht aus

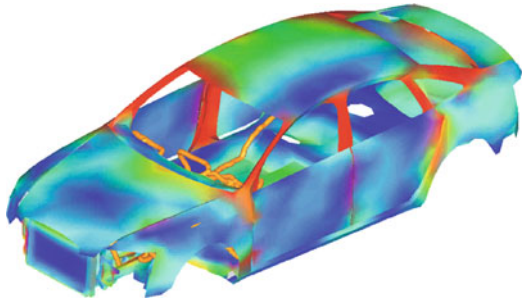


**Abb. 11.44** Beispiel einer Oberflächenstromverteilung aufgrund einer einfallenden ebenen Welle. Berechnung der Feldeinkopplung in das CAN-Netzwerk (Quelle: AUDI AG)

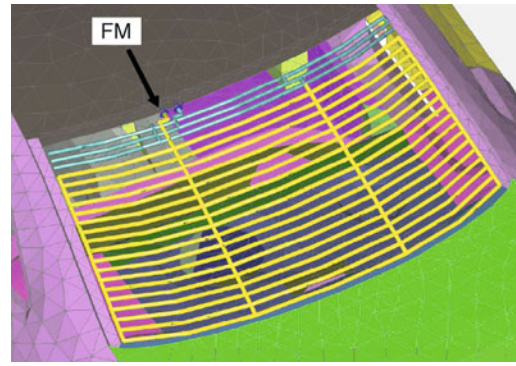



**Abb. 11.45** Simulationsmodell einer Heckscheibenantenne mit integrierter UKW Antenne in der Rohkarosserie [92]

der Karosserie, für die alle größeren Metallteile durch Dreieckselemente nachgebildet werden, sowie den Leitungssatz-, Steuergeräte- und Antennenmodellen. In Abhängigkeit vom eingesetzten Berechnungsverfahren können die Modelle variieren (Abb. 11.44).

Benutzerfreundliche Software erlaubt es mittlerweile, auch sehr komplexe Modelle in kurzer Zeit aufzubauen und verschiedene Berechnungsverfahren miteinander zu kombinieren. Im Kfz-Bereich haben sich bewährt:

- direkte Feldberechnungsverfahren, welche die Wellengleichung numerisch anhand eines diskretisierten Modells lösen (Berechnungsverfahren ist die Methode der Momente),
- statische Verfahren zur Lösung der Laplace-Gleichung; äquivalente Kapazitäten und Induktivitäten zur Beschreibung der Kopplung und Aufbau von Ersatzschaltbildern für den unteren Frequenzbereich,
- Mehrfachleitungstheorie zur Berechnung der Leitungsüberkopplung,
- Schaltkreisberechnungsprogramme, welche die Kirchhoff'schen Gleichungen auch für komplexe nichtlineare Schaltungen im Zeit- und Frequenzbereich lösen,
- Kombinationen der Verfahren (Hybride Verfahren) wie z. B. Verbindung der Feldberechnung mit der Leitungstheorie zur Bestimmung der Einkopplung elektromagnetischer Felder in das Bordnetz.

Auch wenn das gesamte Spektrum der EMV durch Simulation noch nicht abgedeckt werden kann, gibt es Bereiche, in denen die Simulation zuverlässige Ergebnisse liefert. Dadurch nimmt die Simulation einen immer größer werdenden Raum in der EMV-Entwicklung ein.

**Antennensimulation** EMV-Berechnungsverfahren ermöglichen das frühzeitige Erkennen von Störungen durch elektrische Komponenten und elektrisch leitende Karosserieelemente auf Fahrzeugantennen. Hierbei ist es von hoher Bedeutung, alle wichtigen Komponenten im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Diese sind elektrisch leitende Karosseriebauteile sowie elektrische Komponenten des Fahrzeuges wie Steuergeräte, Verkabelungen, Sensoren und Aktuatoren (s. a. ► Abschn. 8.5.4.7).

Zur Minimierung der Störung der Antennen können bereits kleine konstruktive Änderungen beitragen. So kann beispielsweise die Gestaltung der Kofferraumklappenanbindung einen erheblichen Einfluss auf eine in der Heckscheibe integrierte Antenne haben [92, 93].

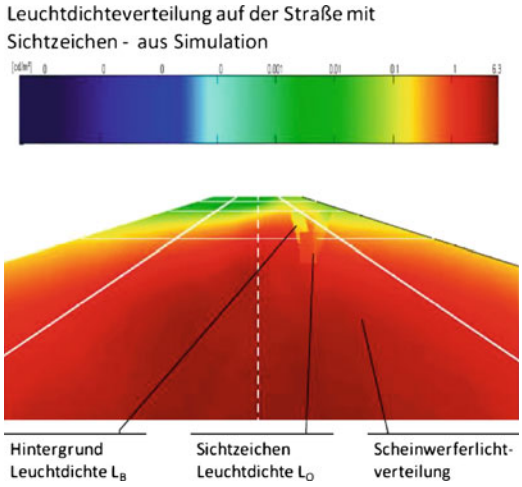
In modernen Fahrzeugen sind die Antennen häufig unsichtbar in den Fahrzeugscheiben integriert, weshalb der korrekten Modellierung von Scheibenantennen eine wichtige Rolle zukommt (Abb. 11.45). Für die Modellierung gibt es verschiedene Ansätze, jedoch basieren die meisten auf der Momentenmethode [94, 95].

**Beleuchtungs- und Lichtsimulation** Die Außenbeleuchtung des Fahrzeugs ist eines der wesentlichen Design-Merkmale, welche den Wiedererkennungswert einer Marke definieren, und gleichzeitig ein wichtiges Sicherheitssystem der Fahrzeuge (► Abschn. 8.5.2). Durch neue technologische Entwicklungen im Beleuchtungssektor, wie beispielsweise den Fortschritt in der LED-Technologie, hat sich in den letzten Jahren eine Vielzahl von Möglichkeiten in der Beleuchtungsgestaltung ergeben, welche den intensiven Einsatz von Simulationsmethoden erfordern.

Es gibt diverse Bewertungskriterien für Scheinwerfereigenschaften, welche durch die Simulation bestimmt werden. Neben der Einhaltung gesetzlicher Rahmenbedingungen werden hier der Lichtstrom, die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer, die Reichweite, die Homogenität der Fahrbahnausleuchtung, die seitliche Ausleuchtung, die Schärfe und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze und das Streulicht simuliert, bewertet und im Entwicklungsprozess optimiert. Das Ziel der Scheinwerferentwicklung ist also, dem Fahrer eine optimale Sicht zu bieten, bei gleichzeitig möglichst geringer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Durch die Flexibilität der LED-Technologie ergeben sich hier viele neue Möglichkeiten auch hinsichtlich Design und Gestaltung, wodurch die Scheinwerferentwicklung zu einem komplexen Optimierungsproblem wird.

Zur Simulation der Lichtausbreitung gibt es mittlerweile diverse kommerzielle Softwaretools, welche die Ausbreitung von Lichtstrahlen simulieren können. Die Basis der Simulation stellt die Modellierung der Lichtquelle sowie lichtlenkender Optikkomponenten (Reflektoren, Linsen, usw.) und umgebender Bauteile (z. B. Design-Blenden) dar. Zur Definition einer Lichtquelle wird ein durch Nahfeldmessung der realen Lichtquelle erzeugtes richtungsabhängiges Modell verwendet, welches manchmal vom Hersteller der Lichtquelle bereitgestellt wird. Für die ganzheitliche Auslegung von Scheinwerfern wird auch die Abhängigkeit der Lichtquelle von weiteren Einflussfaktoren wie der anliegenden Spannung, der Alterung und Herstellungstoleranzen berücksichtigt.

Zur Berechnung der Ausbreitung des Lichtes ist die Modellierung der Materialien, auf die das Licht trifft, von essenzieller Bedeutung. Um die Komplexität der Materialmodellierung beherrschbar zu halten, können teilweise vereinfachte physikalische Modelle verwendet werden, welche Materialeigenschaften wie Reflexionsgrad, Reflexionsart, Streulichteigenschaften, Transmissionsgrad oder spektrale Eigenschaften getrennt und ohne Wechselwirkung modellieren [96]. Eine simulierte Lichtdichtenverteilung ist in ◘ Abb. 11.46 dargestellt.




◘ **Abb. 11.46** Simulierte Leuchtdichteverteilung auf der Straße [96]

Zusätzlich zu den lichttechnischen Simulationsfeldern werden auch Temperatur und Enttauung berücksichtigt (► Abschn. 11.3.3.3).

**Energie- und Kommunikations-Bordnetzsimulation** Die zunehmende Elektrifizierung im Kraftfahrzeug durch die Einführung einer Vielzahl elektrischer Nebenaggregate sowie durch die (Teil-)Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt zu der Notwendigkeit, den Entwicklungsprozess mit Bordnetzsimulationen zu begleiten (s. ► Abschn. 5.7 u. ► Abschn. 8.2).

Die Simulation des Energie-Bordnetzes wird genutzt, um den steigenden Energiebedarf durch elektrische Komponenten für Sicherheit (z. B. ESP) und Komfort (z. B. Sitzheizung) sowie elektrische Antriebe zu analysieren. Die Simulation dient als Werkzeug für die optimale Auslegung und Regelung von ausfallsicheren und leistungsstarken Bordnetzen. Die Untersuchung von Energieflüssen,

Lastpunktverschiebungen, der Bordnetz-Stabilität und spezifischen Fehlerfällen steht im Vordergrund [97].

Die Vernetzung der zum Teil sicherheitskritischen Funktionen (beispielsweise bei einem Abstandsregeltempomaten) führt zu komplexen verteilten Funktionen. Die Simulation des Kommunikations-Bordnetzes hilft diese Komplexität zu beherrschen. Die Entwicklung neuer Funktionen, z. B. im Energiemanagement [98] oder im Bereich der Betriebsstrategien, und die funktionale Sicherheit bei eng vernetzten Steuergeräten sind Kernthemen für die Simulation.

Die Simulationen lassen sich in analoge, digitale und hybride Ansätze klassifizieren.

Analoge Modelle werden durch zeit- und wertkontinuierliche Funktionen beschrieben. Die elektrische Energieverteilung im Bordnetz wird in der Regel durch das Verhalten an den Anschlüssen der elektrischen Bauteile an das Bordnetzes beschrieben. Das kann zum einen durch Signalflüsse geschehen, indem Schaltkreise als mathematische Funktionsblöcke über gerichtete Skalar- und Vektorsignale miteinander verbunden werden. Diese Darstellung kann in ein Differentialgleichungssystem überführt werden, welches explizit gelöst wird. Der Nachteil dieser Methode ist, dass stark gekoppelte Modelle kaum abgebildet werden können. Zum anderen existiert der Ansatz der Modellierung über Netzlisten, bei dem Schaltkreise durch ein Netz von elektronischen Bauteilen beschrieben werden. Dies führt zu Differentialgleichungssystemen, welche implizit gelöst werden und sämtliche Kopplungen zwischen den Bauteilen enthalten. Rückkopplungen sind implizit berücksichtigt. So gelten für alle elektrischen Knoten und Maschen des Netzes Erhaltungssätze gemäß den Kirchhoff'schen Regeln. Bei der Simulation von Energieflüssen werden oft die elektrische und thermische Domäne in einer Gesamtsimulation vereint.

Digitale Modelle dagegen sind zeit- und wertdiskret. Diese Modelle sind ereignisgesteuert und digitale Zustandswechsel finden ohne zeitaufwändiges Lösen von Differentialgleichungssystemen statt. Signale am Ausgang einer Komponente hängen nicht vom Eingang der nächsten Komponente ab, d. h. es gibt keine direkte Rückkopplung. Digitale Modelle werden oft für die Simulation der Kommunikation zwischen Steuergeräten eingesetzt.

Für eine komplette Beschreibung eines Bordnetzes, d. h. sowohl der Energieflüsse als auch der Kommunikation zwischen den Steuergeräten, werden gemischt analog und digitale Simulationen benötigt. Dabei werden sowohl Signalflüsse modelliert als auch Erhaltungsätze berücksichtigt. Je nach Fragestellung bietet es sich auch an, verschiedene Modellierungsansätze zu verfolgen. So kann eine Einzelkomponente, wie z. B. ein Inverter, auf Elektronikebene und das Gesamtnetz auf Signalebene simuliert werden.

Sowohl beim Energie- als auch beim Kommunikations-Bordnetz gibt es komplexe Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, die eine isolierte Betrachtung einzelner Komponenten nicht zu erfassen vermag. Die Simulation kann Risiken im Entwicklungsprozess frühzeitig identifizieren, die sonst erst spät am Prüfstand oder im Versuchsträger erkannt werden.

**Leistungselektronik** Moderne Leistungselektronik hat als Bindeglied zwischen Batterie und elektrischer Maschine eine zentrale Rolle im Antriebsstrang von Elektro- oder Hybridfahrzeugen (s. ► Abschn. 4.3.3.6). Bei der Simulation leistungselektronischer Schaltungen unterscheidet man je nach Modellierungsgrad folgende Arten [99]:

- systemtechnische Simulation,
- bauelemente-spezifische Simulation,
- leistungselektronische Simulation.

Bei der systemtechnischen Simulation steht die Auslegung des gesamten elektrischen Antriebsstrangs im Fokus. Das leistungselektronische Stellglied wird dabei stark vereinfacht modelliert [99, 100]. Bei der Reglerauslegung wird häufig von einem Verzögerungsglied erster Ordnung (PT1) ausgegangen und der Oberschwingungsgehalt von Spannung und Strom vernachlässigt. Durch eine Abbildung des Steuerverfahrens der Leistungselektronik (z. B. Pulsweitenmodulation) können die Spannungsverläufe genauer berechnet und die Auswirkungen von höheren Harmonischen auf die elektrische Maschine untersucht werden. Die Leistungshalbleiter werden in systemtechnischen Be-

trachtungen aber meist als ideale Schalter oder nur bezüglich ihres statischen Verhaltens (Spannungsabfälle, Verluste) modelliert.

Im Gegensatz dazu bietet die bauelemente-spezifische Simulation die genaueste Möglichkeit, die Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter zu untersuchen. Durch eine örtliche und zeitliche Diskretisierung der halbleiterphysikalischen Gleichungen ergeben sich Gleichungssysteme hoher Ordnung und eine dementsprechend hohe Rechenzeit [98]. Durch die Verlustleistung in den leistungselektronischen Bauteilen kommt der virtuellen Absicherung der Kühlung der Leistungselektronik eine besondere Aufgabe zu [101]. Hierfür wird mittels Co-Simulation (s. ▶ Abschn. 11.3.3.7) die elektro-thermische Simulation der Leistungselektronik mit einer 3D-Strömungssimulationen des Gesamtfahrzeuges gekoppelt, wodurch eine hochgenaue und zuverlässige Auslegung der Kühlung der Leistungselektronik ermöglicht wird.

Die leistungselektronische Simulation deckt den Bereich zwischen systemtechnischer und bauelemente-spezifischer Simulation ab [98] und stellt einen Kompromiss zwischen benötigter Rechenzeit und Genauigkeit dar. Dabei sollen das statische und dynamische Verhalten aller in der Topologie vorhandenen Leistungshalbleiter, die passiven Bauelemente, das Ansteuerverfahren und die parasitären Effekte berücksichtigt werden.

Neben der reinen Offline-Simulation der leistungselektronischen Schaltung werden auch häufig HiL- und SiL-Tests (s. ▶ Abschn. 11.3.3.6) verwendet, um reale Komponenten oder die Software von Steuergeräten der Leistungselektronik im Gesamtsystem zu testen.

**Elektrische Maschinen** Neben den elektrischen Maschinen, die als sogenannte Hilfsantriebe in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden (z. B. in Lenkhilfe, Sitzverstellung, Klimakompressor), gewinnen Anwendungen im Bereich der Traktion, z. B. in einem HEV (Hybrid Electric Vehicle) als getriebeintegrierte E-Maschine oder als Achsantrieb in einem BEV (Battery Electric Vehicle), zunehmend an Bedeutung (s. ▶ Abschn. 4.3.1).

Wesentliche Aufgabe der Simulation von elektrischen Maschinen ist es, aus den Anforderungen an den elektrischen Antrieb die optimale Geometrie und Dimensionierung sowie die zu verwendenden Materialien der elektrischen Maschine zu bestimmen, wobei nicht nur die elektromagnetischen, sondern auch die thermischen, akustischen und mechanischen Randbedingungen zu berücksichtigen sind.

Neben den bewährten analytischen Methoden z. B. nach [102–104] werden in zunehmenden Maß numerische Methoden und insbesondere die FE-Methode zur Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder innerhalb und außerhalb der elektrischen Maschine eingesetzt. Bei der numerischen Feldberechnung lassen sich die elektrischen und magnetischen Felder direkt durch Diskretisierung der Maxwell'schen Gleichungen berechnen. Man unterscheidet dabei zwischen [103]

- stationären (elektrostatische oder magnetische Probleme),
- quasistationären (elektromagnetische Felder mit Wirbelströmen),
- zeitperiodischen (mit komplexen Größen dargestellte elektromagnetische Felder und Wirbelströme),
- nichtstationären (elektromagnetische Felder und Wirbelströme)

Problemstellungen, die sich mittlerweile mit vielen kommerziellen FE-Programmen lösen lassen (s. ◘ Abb. 11.47) und zudem die Kopplung mit Struktur- und Temperaturberechnungen (▶ Abschn. 11.3.3.7 und [105]) ermöglichen. Vor jeder Simulation ist der Aufwand mit dem zu erwartenden Ergebnis abzuwägen. Simulationen basierend auf analytischen Modellen werden in der Regel zu schnelleren, oft hinreichend genauen Ergebnissen führen. Der Einsatz der FE-Methode führt meistens zu einer flexibleren Modellierung hinsichtlich des Aufbaus und der Abmessungen der elektrischen Maschine und zu einer Erhöhung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Diese Vorteile stehen den teilweise sehr hohen Anforderungen an Vernetzung z. B. durch die Modellierung sehr kleiner Luftspalte und Anzahl der zu betrachtenden Zeitschritten und damit einer Erhöhung der Rechenzeit gegenüber.

**Batteriesimulation** Die Batterie als zentraler Energiespeicher im Fahrzeug ist insbesondere bei Fahr-

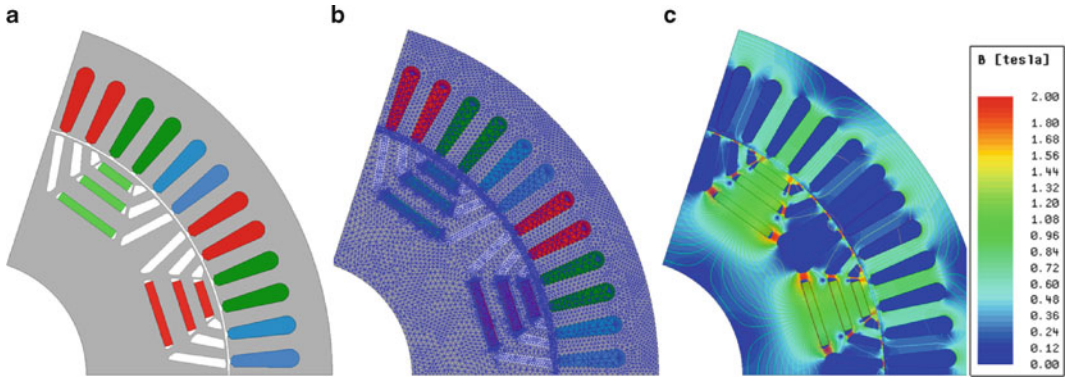



**Abb. 11.47** **a** Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschinen mit vergrabenen Magneten; **b** Vernetzung des Rechengebiets mit finiten Elementen; **c** Magnetische Flussdichte und magnetische Feldlinien [106]

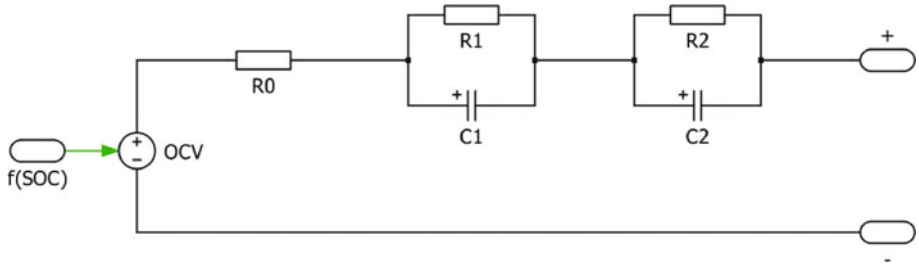



**Abb. 11.48** Ersatzschaltbild eines elektrischen Batteriemodells (Quelle: AUDI AG)

zeugen mit alternativen Antrieben maßgeblich für die Fahrleistung, den Verbrauch und die Reichweite (s. ▶ Abschn. 4.3.1.4).

Je nach Fragestellung bieten sich verschiedene Modellierungsansätze für Batterien an:

Elektrochemische Modelle beschreiben die in der Batteriezelle stattfindenden physikalisch-chemischen Prozesse ausgehend von entsprechenden Grundgleichungen. Die Stoff-Konzentrationen und Stromverteilungen innerhalb der Zelle werden zeit- und ortsaufgelöst (z. B. über Finite Differenzen oder Finite Elemente Modelle) berechnet. Die komplexen Berechnungen erfordern eine hohe Rechenzeit [107, 108].

Elektrische Modelle auf Basis von Ersatzschaltbildern beschreiben die Dynamik der Batterie mit geringem Rechenaufwand und können für die Untersuchung transienter Effekte genutzt werden. Der Schaltkreis besteht in der Regel aus einer idealen Spannungsquelle und einer Reihe von RC-Gliedern, die die Impedanz und somit die Dynamik beschreiben (Abb. 11.48) [109].

Die Parametrierung erfolgt in der Regel durch impedanzspektroskopische Messdaten. Ersatzschaltbild-Modelle eignen sich für den Online-Einsatz im Batteriemanagement-Systemen und geben die Strom- und Spannungsverhältnisse an den Klemmen in Abhängigkeit des Ladezustands und Stroms hinreichend genau wieder.

Ein wichtiger Aspekt bei der Batterie-Modellierung ist die Temperaturabhängigkeit. Da auch die Lade- und Entladecharakteristik signifikant von der Temperatur abhängen, werden oft gekoppelte elektrisch-thermische Simulationen verwendet [108, 110, 111].

Alterungseffekte laufen auf viel längeren Zeitskalen ab. Eine Simulation der Batteriealterung muss die akkumulierten Effekte von Lade- und Entladezyklen sowie die Temperaturhistorie berücksichtigen. Hierzu sind spezielle Alterungsmodelle notwendig [112].

**Brennstoffzellensimulation** In Brennstoffzellen herrschen stark nichtlinear gekoppelte Prozesse,

die durch unterschiedliche Raum- und Zeitskalen charakterisiert sind, vor, weshalb die Verwendung eines einzigen Modellierungsansatzes nicht sinnvoll ist. Je nach Zielsetzung der Simulation und der Verfügbarkeit von Rechenressourcen wird üblicherweise eine der vier folgenden Modellierungsebenen verwendet [113]:

Die Modellierung auf Systemebene wird hauptsächlich für Integrationsuntersuchungen und die Bestimmung globaler Parameter wie beispielsweise Gesamtwirkungsgrade verwendet. Außerdem erlaubt die dynamische Systemmodellierung den Entwurf von Betriebs- und Regelstrategien. Neben den Kernsystemkomponenten, welche durch eine chemisch-thermodynamische Prozesssimulation berücksichtigt werden, enthalten die Systemmodelle auch einfache Modelle weiterer Komponenten wie beispielsweise Wärmetauscher, Pumpen und Verdichter. Durch Einbindung in entsprechende Längsdynamikmodelle erlaubt diese Ebene auch die Modellierung der Gesamtfahrzeugdynamik und eine Optimierung der hybriden Betriebsstrategie sowie der Lebensdauer (s. a. ▶ Abschn. 4.3.2.4).

Die Modellierung auf Stackebene wird beispielsweise für die Simulation und Optimierung des Temperaturmanagements der Brennstoffzelle eingesetzt, welches für die Abführung der Reaktionswärme verantwortlich ist. Der Fokus der Simulation liegt dabei auf der Untersuchung von thermodynamischen Wechselwirkungen zwischen der Eduktvorbereitung, der Reaktion und der Eduktnachbereitung innerhalb der Reaktoren. Um die komplexen physikalischen Phänomene korrekt zu beschreiben, werden CFD-Modelle verwendet, welche Turbulenzmodelle, Modelle für Mehrphasenströmungen mit Berücksichtigung von Wärmeüberträgen und Phasenübergangsphänomenen und Modelle der chemischen Reaktion beinhalten. Neben den oben genannten thermo- und fluiddynamischen Simulationen finden auf dieser Ebene auch Finite Elemente Analysen des Gesamtstacks bezüglich des Press- und Setzverhaltens sowie der Schwingungen statt.

Die Modellierung auf Zellebene wird für die detaillierte Untersuchung und Auslegung einzelner Zellen verwendet. Hierbei wird die Verteilung der Gase über die Membran-Elektroden-Einheit, die Temperaturverteilung und die Stromdichteverteilung simuliert, optimiert und bewertet. Bei der CFD Modellierung der Zellen werden einzelne Phänomene räumlich und zeitlich fein diskretisiert abgebildet, was den Einsatz von High Performance Computing (HPC)-Clustern notwendig macht.

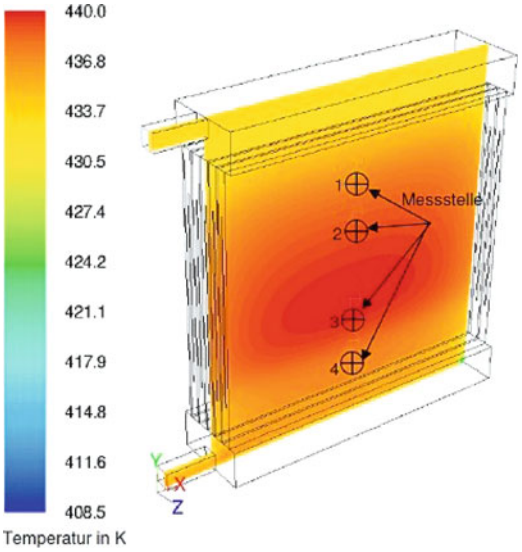



**Abb. 11.49** Simulation der Temperaturverteilung eines Stacks [114]

Wie bei der Modellierung auf Stackebene (Abb. 11.49), wird auch auf der Zellebene intensiv von Finite Elemente Analysen einzelner Komponenten Gebrauch gemacht. Hier geht es primär um die Analyse von Verpressungen des Gas-Diffusion-Layers (GDL) in die Gaskanäle der Bipolarplatten (BPP), die Untersuchung des Spannungsniveaus in den Bipolarplatten und Detailanalysen von Druckverteilungen innerhalb der Zelle und Dichtungen.

Auf der Ebene der Herstellung von Bipolarplatten werden gerade bei metallischen Bipolarplatten mit sehr feinen Verteilstrukturen Finite Elemente Analysen angewendet, um die Umformung während der Pressvorgangs zu untersuchen.

Die Modellierung auf Materialebene wird verwendet, um das Gas-Diffusion-Layer detailliert zu untersuchen und dafür Strukturen zu entwickeln, die eine optimale Arbeitsweise der Brennstoffzelle ermöglichen. Für diese Untersuchungen werden CFD-Modelle meistens auf Basis der Lattice-Boltzmann-Methode verwendet. Auf der Materialebe-

ne finden auch sehr viele kommerzielle Software-Programme Anwendung, welche Stabilitätsthemen (Auflösung von Kohlenstoff und/oder Platin aus der Elektrode, irreversible Reaktionen der Membrane) analysieren bzw. simulieren.

### 11.3.3.5 Simulation in der Produktion

**Umformsimulation** Die Herstellbarkeit von Bauteilen bewerten zu können, ist ein wesentliches Ziel von Simulationen in der frühen Entwicklungsphase. Aber auch die Rückwirkung des Fertigungsprozesses auf die Funktionalität der Bauteile im Gesamtfahrzeug, z. B. im Crash, wird untersucht [62, 115], siehe auch ► Abschn. 11.3.3.1.2. Aus diesem Grund werden nachfolgend zwei wichtige Prozess-Simulationsverfahren besprochen (s. a. ► Abschn. 10.3).

Mit der Umformsimulation werden sämtliche Bauteile bereits in einer sehr frühen Phase der Fahrzeugentwicklung auf die fertigungsgerechte Ausführung und Machbarkeit im Produktionsprozess geprüft bzw. dahingehend optimiert. Hierfür wird der Umformvorgang durch die virtuelle Abbildung eines Pressenhubes im Umformwerkzeug analysiert. Während der Fahrzeug- und Werkzeugentwicklung werden in Optimierungsschleifen teilweise mehrere hundert Simulationen eines Bauteiles angefertigt.

Die nichtlineare Berechnung der plastischen Umformung erfolgt mit FE-Systemen, die auf die besonderen Anforderungen der Werkzeugplanung ausgelegt sind. Bei einem Seitenwandrahmen der Karosserie lassen sich Genauigkeiten von ca. 95 % erzielen. Typische Ergebnisse der Berechnung sind die Dehnungen (Reißer), die Neigung zur Faltenbildung und die aktuelle Blechdickenverteilung.

Während die Simulation der ersten Fertigungsstufe – dem sog. Ziehen – schon seit Jahren zum Stand der Technik gehört, gilt dies erst seit kürzerer Zeit für die sog. Folgeoperationen. Das mehrfache Nachformen, Beschneiden, Lochen und Kalibrieren erfordern einen hohen Modellerstellungs- und Berechnungsaufwand, so dass nur nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten qualitätsrelevante Operationen berechnet werden. Die Fehlerkumulation über die einzelnen Fertigungsschritte aufgrund numerischer Effekte und Modellvereinfachungen führt dabei zu einer abnehmenden Ergebnisqualität.

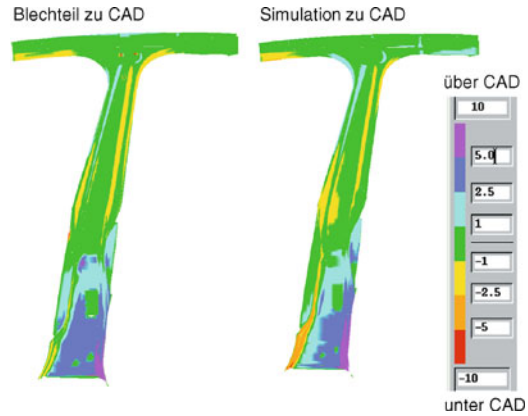



**Abb. 11.50** Tiefgezogenes Bauteil und Bauteil nach Rückfederungssimulation relativ zum CAD-Stand (Quelle: AUDI AG)

Zur Genauigkeitssteigerung wird an allen Einzelursachen wie der mathematisch vereinfachten Modellbildung (z. B. Elementtypen, Reibung) über numerische Abhängigkeiten (z. B. Netzfeinheit und -orientierung, numerische Parameter) bis hin zu ungenauen Eingangsdaten (z. B. Werkstoffdaten) und der Ergebnisbewertung (z. B. Versagenskriterien, Welligkeiten) intensiv gearbeitet. Schwerpunkte in Forschung und Anwendung liegen aktuell auf neuen Material- und Versagensmodellen.

Die Berechnung der Maßhaltigkeit eines Bauteils, die durch das elastische Aufspringen nach der Umformung erforderlich wird, stellt einen Schlüsselfaktor zur Verkürzung der gesamten Werkzeuganfertigungszeit dar, da nur so die bisher notwendigen Optimierungsschleifen zur Erreichung von Maßhaltigkeit und Qualitätszielen reduziert werden können. Ziel der Auslegung ist es, die in einem Iterations-Prozess berechneten Rückfederungswerte so im Werkzeug vorzuhalten, dass nach Rückfederung die gewünschte Geometrie erreicht wird [32] (Abb. 11.50). Aktuelle Herausforderung ist die Steigerung der Prognosegüte für die zwecks Leichtbau und Crashperformance zunehmend eingesetzten höherfesten Blechwerkstoffe in der Karosserie, da diese Werkstoffe ein wesentlich ausgeprägteres Aufsprungverhalten zeigen.

Am Anfang der Entwicklung steht die Simulation der Warmumformung (Formhärten). Das Fertigungsverfahren wird aufgrund der extremen Festigkeiten des Werkstoffs bis 1500 MPa Zugfestigkeit

in immer größerem Maße für crashrelevante Bauteile eingesetzt. Die im Temperaturbereich von 200 bis 850 °C ablaufende Umformung und Härtung ist aktuell noch nicht simulierbar, da geeignete, validierte Modelle für den Wärmeübergang und das Werkstoffverhalten fehlen.

**Gießsimulation** Heute werden im Karosseriebau verstärkt Druckgussbauteile aus Leichtmetall-Legierungen eingesetzt. Diese Bauteile weisen eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht auf und besitzen ein breites Eigenschaftsspektrum.

Der Fertigungsprozess „Druckguss" erzwingt die Einhaltung von Konstruktionsrandbedingungen wie einer nicht zu unterschreitenden Wandstärke oder auch einer zulässigen Dickenverteilung über dem Bauteil. Damit hat der Fertigungsprozess Rückwirkungen auf die Funktionalität des Gesamtfahrzeugs, wie sie z. B. im Crash gefordert wird [115].

Gießsimulationen werden heute standardmäßig eingesetzt, um frühzeitig eine Optimierung des Anguss-Systems vorzunehmen. Hier gilt es in erster Linie, füll- bzw. erstarrungsbedingte Defekte wie Gaseinschlüsse oder Erstarrungslunker mit Hilfe der Simulation zuverlässig zu erkennen. Die Ansprüche an die Prognosefähigkeit des Rechenverfahrens steigen, wenn die simultane Betrachtung der Herstellbarkeit mit der Abprüfung der Funktionalität im Gesamtfahrzeug im Vordergrund steht. Hier werden z. B. von einer Crashsimulation Angaben zu Materialkennwerten wie Streckgrenze und Bruchdehnung erwartet, die in einem Materialmodell Verwendung finden [115].

Abb. 11.51 zeigt die Übereinstimmung, die zwischen Simulation und Experiment für ein Getriebegehäuse erreicht wurde: Dargestellt sind hier makroskopische Defekte, wie sie entweder durch Lufteinschlüsse oder Erstarrungsschrumpfung entstehen. Die Anforderungen an die Auflösung und die Genauigkeit der Gießsimulation steigen weiter, wenn die Herstellung dünnwandiger, flächiger Strukturbauteile betrachtet wird. Die wesentlichen Unterschiede zu dem oben beschriebenen Getriebegehäuse bestehen in der sehr gleich bleibenden Wandstärke, den sehr kurzen Füllzeiten und den kurzen und zugleich sehr gleichmäßigen Erstarrungszeiten eines solchen Bauteils. Sie werden nach dem Gießen einer Wärmebehandlung unterzogen, die erst die gewünschten Materialeigenschaften und hier insbesondere die erforderliche Bruchdehnung ergibt. Die erreichbare Übereinstimmung mit den Rechenergebnissen ist ermutigend, allerdings sind weitere Ansätze zur Verbesserung der Prognosefähigkeit nötig, wie bspw. die Berücksichtigung der temperaturabhängigen Viskosität der Schmelze und der Gleichmäßigkeit der Schmelztemperaturen in den isoliert erstarrenden Bereichen der Form.

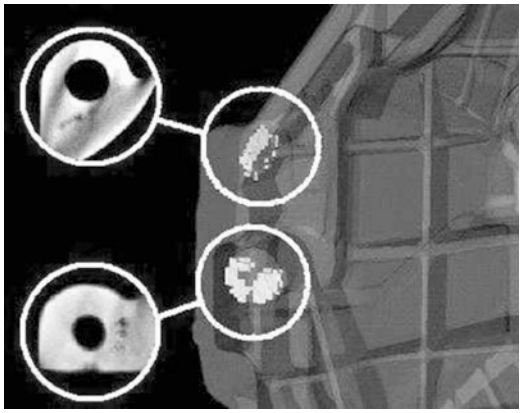


**Abb. 11.51** Getriebegehäuse aus Gießsimulation und mittels Computer-Tomographie gefundene lokale Defekte (Inserts) [116]

**Verbindungstechnik- und Schweißsimulation** Ziel der Berechnung von Verbindungen ist zum einen die Sicherstellung der Herstellbarkeit und Maßhaltigkeit der Baugruppen und zum anderen die virtuelle Absicherung der Verbindungselemente bezüglich Lebensdauer und extremer Lasten wie zum Beispiel Crash.

Für die Simulation von Niet- und Stanznietvorgängen werden hochgenaue FE-Modelle verwendet (Abb. 11.52). Diese Modelle sind in der Lage das Materialverhalten während des Nietvorgangs abzubilden, so dass sich die Spannungen, Dehnungen und Schädigungen des Materials vorhersagen lassen. Mittels Simulation können die Prozessparameter optimiert und somit eine zuverlässige Produktion erreicht werden.

Nietverbindungen sind häufig die Schwachstellen, welche bei einem Crash als erste versagen. Daher ist eine genaue Vorhersage des Verhaltens

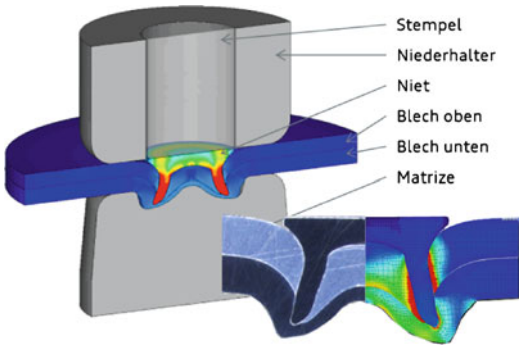



**Abb. 11.52** Beispielhafter Vergleich zwischen FE-Simulation und Experiment einer Stanzniet-Verbindung. Dargestellt ist die plastische Dehnung. (Quelle: AUDI AG)

der Niete im Crashfall von besonderer Wichtigkeit. Bisherige einfachere Ersatzmodelle von Nieten haben hierbei häufig eine zu hohe Festigkeit von Nietverbindungen besonders bei Biegebelastungen vorhergesagt. Daher werden heute verbesserte Modelle eingesetzt, welche auf den Auswertungen von speziellen Versuchen basieren [117]. Um diesen Versuchsaufwand weiter zu minimieren, ist es notwendig die zur Kalibrierung der Ersatzmodelle notwendigen Versuche durch virtuelle Tests zu substituieren.

Beim Halbhohlstanznieten werden zwei aufeinander liegende Bleche durch einen Niet verbunden. Dieser Stanzniet durchstanzt das obere Blech und wird durch die Matrize so verformt, dass eine Hinterschneidung entsteht, wodurch eine form- und kraftschlüssige Verbindung hervorgeht. Der Fügeprozess des Stanznietens kann durch FE-Modelle abgebildet und optimiert werden. Die Herausforderung dieser nichtlinearen Berechnung besteht zum einen in der numerischen Abbildung der Materialverformung und -schädigung sowie in der korrekten Abbildung der Reibung. Zum anderen ist es notwendig, bei der Simulation des Fügeprozesses mit Verklebung die viskosen Eigenschaften des Klebstoffes in der Verbindung zu berücksichtigen. Hierzu werden gekoppelte Simulationsmodelle durch FSI (Fluid-Struktur-Interaktion) verwendet.

Beim Clinchen werden zwei aufeinander liegende Bleche durch einen Stempel in eine Matrize gepresst und so verformt, dass sich eine charakteristische Hinterschneidung bildet, woraus ein Kraft- und Formschluss resultiert. Der Prozess des Clinchens kann durch FE-Modelle abgebildet und optimiert werden. Durch die Simulation kann das genaue Fließ- und Schädigungsverhalten der Materialien vorhergesagt werden, was die simulative Optimierung der Prozessparameter ermöglicht (Abb. 11.53) [118, 119].

Bei der numerischen Schweißsimulation geht es um die rechnerische Optimierung der Bauteile und des Fertigungsprozesses mit dem Ziel, die Bauteileigenschaften und Maßhaltigkeit zu verbessern. Dabei nimmt die Berechnung des durch die Wärmeeinbringung hervorgerufenen Verzuges zurzeit die wichtigste Position ein (Abb. 11.54, Abb. 11.55).

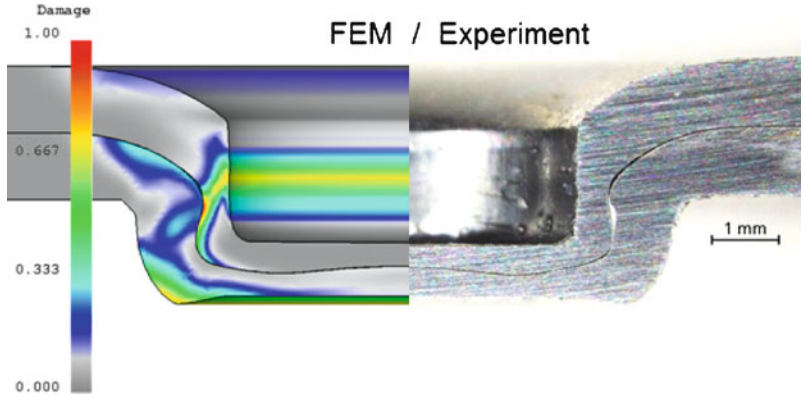



**Abb. 11.53** Beispielhafter Vergleich zwischen FE-Simulation und Experiment einer Clinch-Verbindung. In der Simulation ist die plastische Dehnung dargestellt. [119]

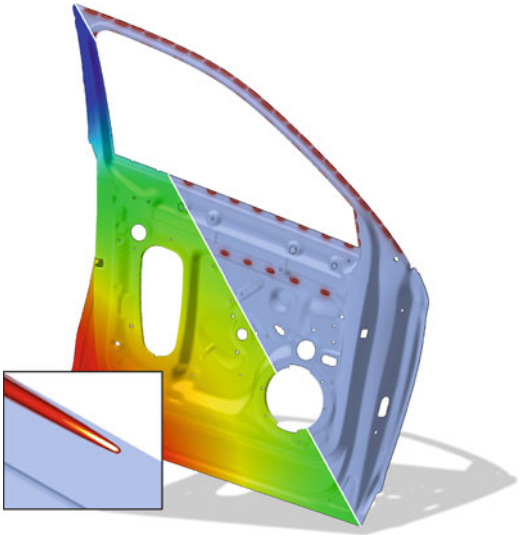


**Abb. 11.54** Beispiel einer laserstrahlgeschweißten Tür – Wärmeeinbringung durch die Schweißnähte. Dargestellt ist der Gesamtverzug (Quelle: AUDI AG)

Als Basis dafür dient die Berechnung der exakten Temperaturfeldentwicklung während des laufenden Prozesses. Eine Berechnung des Gefüges und der Eigenspannungen im Hinblick auf spätere Festigkeitsanalysen und die Kopplung zu nachgelagerten Prozessen sind weitere wichtige Anwendungen. Aufgrund der reduzierten Rechenzeiten und Modellierungsoptimierungen der letzten Jahre existiert heute ein Stand, der es zulässt die Schweißverzugssimulation auch im produktiven Einsatz und bei großen Bauteilstrukturen wie bspw. einer Tür oder einer Dachlötung einzusetzen.

Kleben als Fügetechnik von Strukturbauteilen findet in der Automobilindustrie eine verstärkte Anwendung. Deshalb sind die Anforderungen an die Simulation bezüglich Festigkeit und Haltbarkeit der Klebeverbindung besonders hoch. Für die Festigkeitssimulation von geklebten Bauteilen werden als FE-Modelle spezielle Ersatzmodelle verwendet, welche auf der experimentellen Ermittlung von Klebstoff- und Klebeschichtkennfunktionen beruhen [120]. Für die Prozesssimulation im Bereich Kleben gibt es zwei Anwendungsgebiete. Zum einen müssen die im Karosserie-Zusammenbauprozess auftretenden Klebstoffverdrängungen simuliert werden, um die reale Klebstoffverteilung zu überprüfen. Zum anderen gilt es, die im Lacktrocknungsofen stattfindende Klebstoffaushärtung und die daraus resultierende Geometrieabweichung zu simulieren. Zur Simulation im Bereich Lacktrocknungsofen werden ausgehend von einer thermodynamischen Simulation der Temperaturverteilung im Ofen die resultierenden Knotentemperaturverläufe der Gesamtkarosserie ermittelt. Diese werden anschließend in eine Verzugssimulation, in der auch die Vernetzungskinetik des Klebstoffes abgebildet wird, überführt [52, 121].

Die Voraussetzung für eine zielgerichtete Optimierung der Bauteile und der zugehörigen Fertigungsprozesse ist ein gutes Prozessverständnis. Die Verbindungstechnik- und Schweißsimulation helfen, durch entkoppelte Parametervariationen und Sichtbarmachung nicht unmittelbar messbarer Prozessgrößen, wie z. B. Schmelzbadgeometrie beim Schweißen, dieses Verständnis zu ermöglichen oder zu verbessern. Mit Hilfe der Simulation werden Messergebnisse verschiedener Parametersätze überhaupt erst effektiv miteinander vergleichbar. Die Vorteile der Simulation im Vergleich

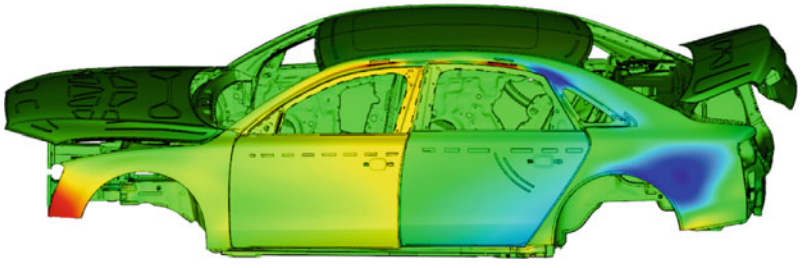


**Abb. 11.55** Verzugssimulation einer Karosserie im KTL-Trocknungsofen (Quelle: AUDI AG)

zu einer rein experimentellen Vorgehensweise werden vor allem bei immer wiederkehrenden Problemen und Optimierungsvorgängen durch Variationen deutlich sichtbar [122].

**KTL-Simulation** Um sicherzustellen, dass auch an schwer zugänglichen Bereichen einer Rohkarosserie eine ausreichende Lackdicke durch die Kathodische Tauchlackierung (KTL) erreicht wird, wird die Lackierung mittels Simulation abgesichert. Das hierfür verwendete FE-Modell beinhaltet die Karosserie, das Tauchbecken sowie die Anoden. Zunächst wird das elektrische Feld um die gesamte Karosserie berechnet. Aus den daraus abgeleiteten lokalen Stromdichten wird das Schichtwachstum auf der Karosserie berechnet. Die Spannungsverläufe an den Anoden im Lackierbecken werden als Randbedingung für die Simulation vorgegeben. Die auftretenden Strömungen, Ladungsverteilungen sowie der Partikeltransport werden gerechnet. Das Ergebnis der Simulation ist die Lackdicke an jeder Stelle der Karosserie. Hieraus können Maßnahmen abgeleitet werden um einen ausreichenden Korrosionsschutz der Karosserie sicher zu stellen.

Außer der KTL werden auch die Decklackbeschichtung (mit Hochrotationsglocken) sowie die Trocknung simuliert. Hier werden häufig Ersatzmodelle verwendet. In diesem Ansatz werden Anlagen parametrisiert und zunächst auf ein Fahrzeugmodell kalibriert. Für ähnliche Karosserieformen lassen sich mit der kalibrierten Anlage gute Vorhersagen für neue Fahrzeuge machen. Die Übereinstimmungen mit Messdaten sind zum Teil sehr gut [123].

Ein weiterer Ansatz zur Abbildung der Teilprozesse ist die Verwendung von Ersatzmodellen, wobei hauptsächlich Aussagen zum Fahrzeug möglich sind. Auch in diesem Ansatz werden Anlagen parametrisiert und kalibriert, was zu guten Vorhersagen der Simulation führt [124].

Da die Eigenschaften verschiedener Lacke nur schwer verallgemeinert werden können, müssen diese aus Versuchen ermittelt und das Simulationsmodell entsprechend angepasst werden [124].

**Simulation des induktiven Härtens** Beim induktiven Härten wird ein Werkstück, oder auch nur bestimmte Teile eines Werkstückes, mittels Induktion auf Härtetemperatur erhitzt und anschließend abgeschreckt. Hierfür wird ein Magnetfeld erzeugt, welches einen Wirbelstrom im zu härtenden Werkstück induziert und das Werkstück somit erhitzt.

Beim Prozess des induktiven Härtens müssen die Erwärmungszonen, die Einwärmtiefe, die Spitzentemperaturen sowie der Temperatur-Zeit-Verlauf genau gesteuert werden. Mithilfe von FE-Modellen kann der Prozess simuliert und somit optimiert werden. Mittels Simulation können die optimale Induktor-Form und die Stromstärken und -frequenzen bestimmt werden.

Das nichtlineare FE-Modell besteht aus dem Induktor, dem Werkstück und dem umgebenden Luftraum. Für die Berechnung wird eine elektromagnetisch-thermisch gekoppelte Rechnung durchgeführt (◘ Abb. 11.56). Da die Zeitskalen der elektromagnetischen und der thermischen Berechnung stark unterschiedlich sind, werden die Berechnungen getrennt durchgeführt und die gemittelte elektromagnetische Leistung der thermischen Berechnung als Last aufgeprägt. Für die Simulation des Abschreckvorganges wird eine rein thermische Abkühlsimulation mit definierten Wärmeübergangskoeffizienten durchgeführt [125].

### 11.3.3.6 Gekoppelte virtuelle-reale Systeme

**SiL-, MiL-, HiL-Simulation** Durch die hohen Kosten von Tests im realen Fahrversuch und die immer größer werdende Variantenvielfallt der entwickelten Fahrzeuge, ist es nicht möglich, kosteneffizient jede Funktion jeder Komponente des Fahrzeuges real zu testen. Daher hat sich in den vergangenen Jahren der Trend zu „X-in-the-loop“ (XiL)-Tests im Kraftfahrzeugbereich durchgesetzt. Typischerweise wird zwischen „Software-in-the-Loop“ (SiL), „Model-in-the-Loop“ (MiL) und „Hardware-in-the-Loop“ (HiL) unterschieden. Allen XiL-Tests gemein ist die Tatsache, dass die Umgebung eines zu testenden Systems bzw. einer zu testenden Funktion simuliert wird (s. ▶ Abschn. 11.4.3).

Um die Vielfalt der zu testenden Funktionen bewältigen zu können, werden manuelle Tests in vielen Fällen durch automatische Testabläufe ersetzt. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die zu testende Komponente alle relevanten Tests zeit- und kosteneffizient durchläuft.

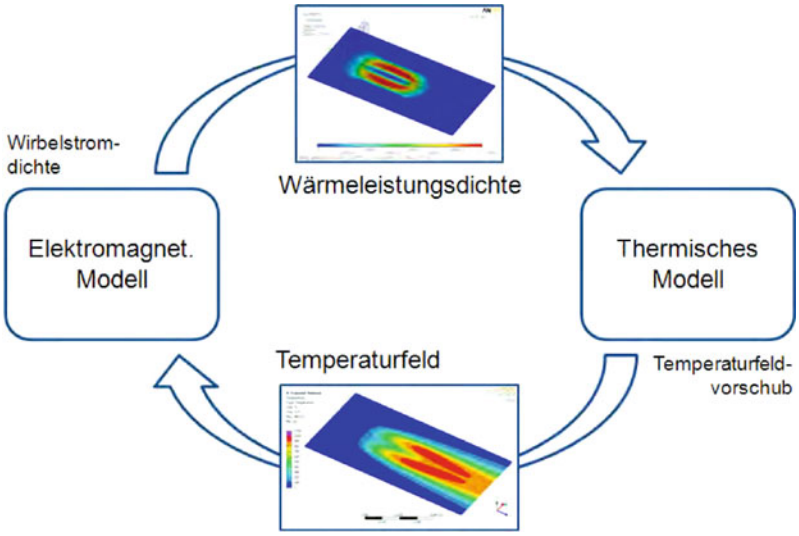



**Abb. 11.56** Elektromagnetisch-thermische Kopplung bei der Simulation des Induktiven Härtens [124]

Bei HiL-Tests wird eine physikalisch vorhandene Hardware-Komponente des Fahrzeugs getestet. Typischerweise handelt es sich hierbei um einzelne Steuergeräte wie Motorsteuergeräte [126] oder Fahrerassistenzsysteme (s. ▶ Abschn. 8.5.5) wie beispielsweise ESP-Systeme [127]. Die virtuelle simulierte Umgebung umfasst dabei nicht ausschließlich das Fahrzeug selber, sondern kann, je nach zu testendem System, auch weitere Umgebungssignale wie beispielsweise simulierte Signale von GPS-Satelliten enthalten [128]. Bei HiL-Tests werden nicht nur Einzelkomponenten getestet, sondern auch Teilsysteme bis hin zu Gesamtsystemintegrationstests aller Elektronikkomponenten, um beispielsweise die Interaktion mehrerer elektronischer Systeme oder das Zusammenspiel aus Leistungselektronik und elektrischem Antriebsstrang bei Elektrofahrzeugen zu untersuchen (Abb. 11.57) [129].

Bei SiL-Tests wird im Gegensatz zum HiL-Test keine besondere Hardware getestet. Beim SiL-Test wird die Software (eines Steuergerätes) auf einem Entwicklungsrechner zusammen mit der simulierten Umgebung ausgeführt. SiL-Tests finden üblicherweise vor den HiL-Tests während der Softwareentwicklung statt. Ein Vorteil der SiL-Tests liegt in den geringeren Kosten, da neben dem Entwicklungsrechner keine spezielle Hardware benötigt wird. Des Weiteren können die SiL-Tests durchgeführt werden, bevor die Zielhardware verfügbar oder überhaupt definiert ist, was frühere Tests in der Entwicklung erlaubt.

SiL-Tests von Steuergeräten werden häufig nicht durch den Entwickler der Software durchgeführt. So wird beispielsweise Steuergerätesoftware eines Zulieferers beim Fahrzeughersteller im Gesamtsystem getestet. Hierfür können die Software des Steuergerätes als auch das Streckenmodell in sogenannte Functional Mock-up Units (FMU) gekapselt werden. In diesen Fällen kommuniziert die FMU mittels Functional Mock-up Interface (FMI) mit seiner Umgebung. FMI ist ein Tool-unabhängiger Schnittstellenstandard, welcher in dem EU-Projekt MODELISAR entwickelt wurde. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Software zwar im Gesamtsystem getestet werden kann, der Tester jedoch keinen Einblick in die Software und somit in das geistige Eigentum des Softwareherstellers hat [130].

Bei MiL-Tests werden eingebettete Systeme in frühen Entwicklungsphasen der modellbasierten Softwareentwicklung getestet. Die MiL-Tests finden im Produktentwicklungsprozess vor den SiL- und den HiL-Tests statt.

**Umfeldsimulation und virtuelle Testfahrt** Für die kosteneffiziente Erprobung von Fahrzeugen werden

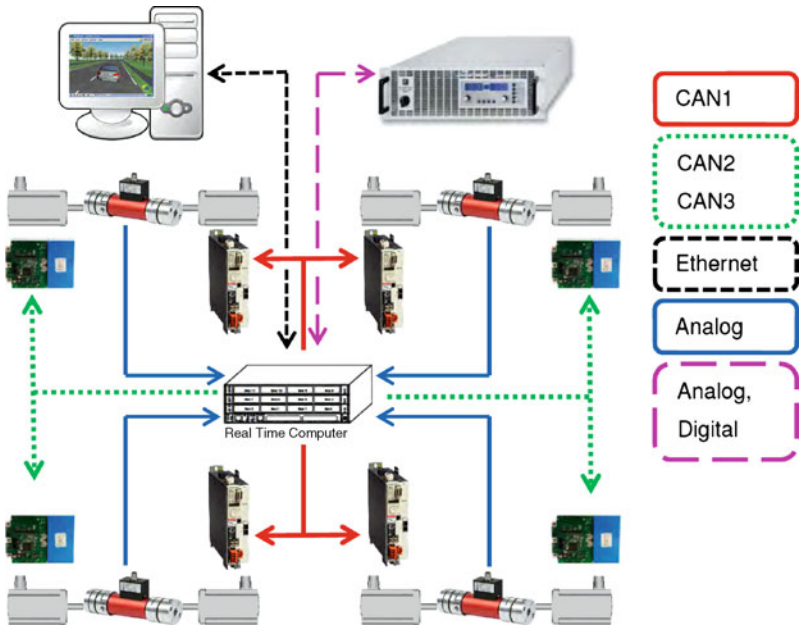



**Abb. 11.57** Beispielhafter HiL-Testaufbau mit beteiligten Hardware-Komponenten und Kommunikationswegen eines vierradgetriebenen Elektrofahrzeugs [129]



immer größere Funktionsumfänge virtuell abgesichert, bevor sie am realen Prototypen getestet werden. Bei der Umfeldsimulation wird das Umfeld des Fahrzeuges (z. B. Straßen, Verkehrszeichen, andere Verkehrsteilnehmer) virtuell abgebildet. Dies ist die Voraussetzung für das virtuelle Testen von Funktionen, welche mit dem Umfeld des Fahrzeuges interagieren.

Hierbei bietet die virtuelle Testfahrt im Vergleich zu realen Tests an Prototypen mehrere Vorteile. Neben den schon erwähnten Kostenersparnissen können Erprobungen früher durchgeführt werden, die Tests sind reproduzier- und automatisierbar, können ohne eine Gefährdung von Mensch und Material erfolgen und ermöglichen eine höhere und zuverlässigere Abdeckung des Testraums.

Je nach zu testender Funktion beinhaltet die Umfeldsimulation diverse Komponenten. So werden neben dem Verlauf der Straße und der Spuren auch Ampeln, Verkehrsschilder, Randbebauungen, GPS-, UMTS-, oder LTE-Signale und andere Verkehrsteilnehmer wie Fremdfahrzeuge, Fußgänger und Radfahrer virtuell abgebildet. Des Weiteren kann beispielsweise die Sonne abgebildet werden, um ein kamerabasiertes Fahrerassistenzsystem auf Blendung zu testen.

Besondere Bedeutung kommt der virtuellen Testfahrt bei der Entwicklung von sicherheitsrelevanten Assistenzsystemen und Systemen zum autonomen Fahren zu, da die Systeme hier ohne jegliche Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer erprobt und zur Serienreife weiterentwickelt werden können [131–133].

Hinter der Umfeldsimulation stecken moderne Software-Frameworks, welche speziell für diesen Einsatzzweck entwickelt wurden. Diese Frameworks bestehen aus offenen Modulen und ermöglichen die effiziente Funktionsentwicklung durch eine Sammlung von Programmbauteilen und Dokumentationen. Der Kern des Software-Frameworks besteht in einem Schnittstellenkonzept, an welches Applikationen und Tools im Rahmen der Entwicklung von elektronischen Systemen einfach angebunden werden können. Dadurch können beliebige Software-Komponenten zeitsynchron verwendet werden. Dies ermöglicht beliebigen I/O-Devices im Online- und Offline-Betrieb einen transparenten Zugriff auf bestehende Datenaufzeichnungen.




**Abb. 11.58** Toolkette zur virtuellen Testfahrt zur durchgängigen Entwicklung vorrausschauender Fahrerassistenzsysteme (Quelle: AUDI AG)

**Simulatoren** Die Methoden der Umfeldsimulation und der virtuellen Testfahrt werden auch in „in-the-Loop"-Simulationen angewendet, da hier reale Komponenten in einem virtuellen Umfeld getestet werden müssen (Abb. 11.58). Insbesondere im Bereich Fahrsimulatoren findet diese Technik verstärkte Anwendung.

In modernen Fahrsimulatoren werden Teilabschnitte der Karosserie bis hin zu kompletten Fahrzeugen verwendet. Der Simulator kann auf beweglichen Stützen stehen, welche die Neigung der Plattform in Echtzeit verändert. Des Weiteren kann sich der Simulator auf einer Schiene befinden, um größere Bewegungen abbilden zu können. Der Straßenverkehr wird auf einer Projektionswand oder großen Bildschirmen realitätsnah abgebildet. Die Steuereinrichtungen des Fahrzeugs sind mit dem Fahrsimulator verbunden, um jede Steuereingabe realistisch am Simulator abzubilden.

In solchen Simulatoren können diverse Funktionen des Fahrzeugs intensiv getestet werden, ohne dass sich ein Fahrzeug in den realen Verkehr einordnen muss. Das wichtigste dabei sind Tests, welche die Fahrzeugsicherheit betreffen. So wird beispielsweise überprüft, wie stark sich der Fahrer ablenken lässt, während er verschiedene Funktionen des Fahrzeugs bedient (z. B. Navigationsgeräte, Radio etc.). Des Weiteren können sicherheitskritische Fahrerassistenzfunktionen am Simulator getestet werden. Aber auch Aspekte der Fahrdynamik und der Ergonomie werden in Fahrsimulatoren untersucht.

Die „Vehicle-in-the-Loop" (ViL) Simulation stellt eine besondere Möglichkeit für Tests von Fahrerassistenzsystemen, z. B. Fußgängerschutz, autonome Notbremsung, dar, welche die Vorzüge eines realen Versuchsfahrzeugs mit der Sicherheit und Reproduzierbarkeit von Fahrsimulatoren kombiniert. Virtuelle Objekte, wie beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer, werden dabei während der Fahrt realitätsnah und kontaktanalog für den Fahrer in einer Augmented-Reality (AR) Brille eingeblendet (Abb. 11.59).

### 11.3.3.7 Querschnittsthemen

**Optimierung** Bei der Entwicklung neuer Produkte müssen alle Potenziale zur Kostenreduktion und Verkürzung der Entwicklungszeiten ausgeschöpft werden, wobei gleichzeitig eine hohe Produktqualität gewährleistet werden muss. Dies erfordert neben den bereits als Standard geltenden linearen und nichtlinearen Berechnungsmethoden auch den Einsatz effizienter Optimierungsverfahren.

Mit Optimierungsrechnungen wird anhand mathematischer Verfahren das Extremum einer oder mehrerer Zielgrößen als Funktion vorgegebe-

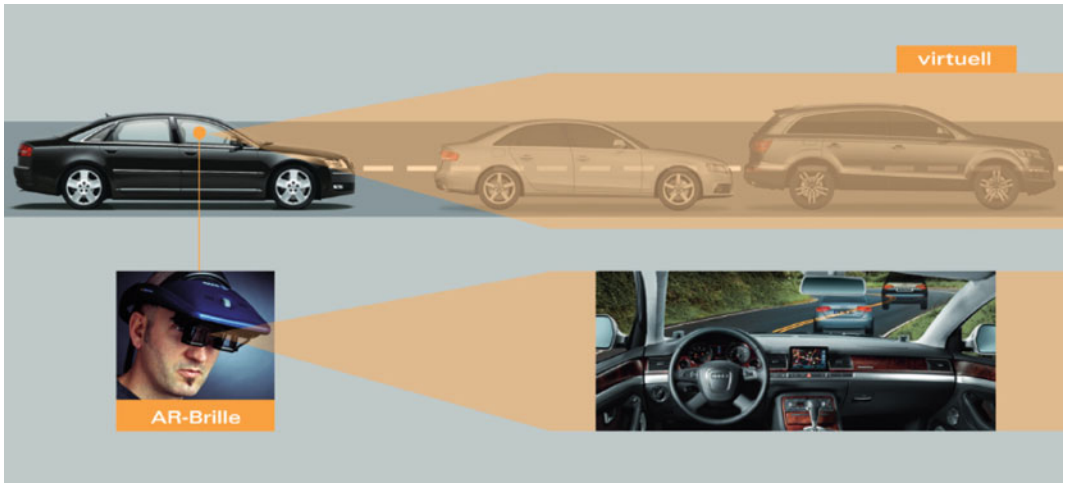



**Abb. 11.59** In der Vehicle-in-the-Loop Technologie werden dem Fahrer virtuelle Objekte in einer Augmented Reality (AR) Umgebung eingeblendet. [134]



ner Design-Parameter gesucht. Das Ziel der Optimierung ist es, die bestimmenden Parameter der Bauteile wie bspw. Gewicht oder die Spannungen unter Berücksichtigung der Bauteilkosten zu reduzieren [32, 135].

Prinzipiell teilt man die rechnergestützte Optimierung von Strukturbauteilen in drei verschiedene Verfahren ein. Als erstes ist die Parameteroptimierung zu nennen, bei der charakteristische Parameter der Bauteile automatisch variiert werden. Dies können Querschnittsflächen von Fachwerkstäben, Flächenträgheitsmomente von Rahmenbauteilen, Wandstärken u. ä. sein.

Bei der zweiten Optimierungsart – der Gestalt- oder Formoptimierung – auf Basis von Knoten müssen keine geometrischen Parameter des CAD-Modells, wie z. B. Radien und Abstände, ausgewählt werden, die durch den Optimierer verändert werden dürfen. Es werden vielmehr die kritischen Bereiche definiert, in denen dann die Oberfläche durch lokale Knotenverschiebungen verändert wird, um die Beanspruchung zu minimieren. Man arbeitet also frei von geometrischen Parameter des CAD-Modells. Ein effizientes Verfahren zur Netzglättung muss die Netzgüte im Inneren des Modells gewährleisten, um den Anforderungen an die Elementqualitäten der FE-Solver bei den sich einstellenden Veränderungen gerecht zu werden.

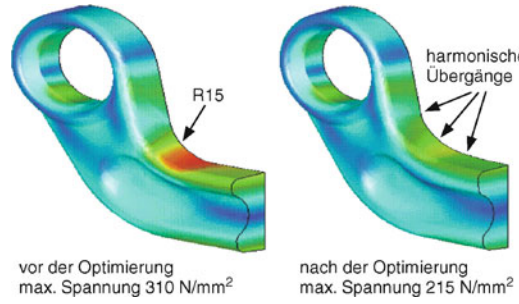



**Abb. 11.60** Abbau von Spannungsspitzen bei der Gestaltoptimierung (Quelle: AUDI AG)

Ein typischer Anwendungsfall ist die Vergrößerung einer Ausrundung zum Abbau der Kerbspannungen. Die Gestaltoptimierung wird oft bei Bauteilen verwendet, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Stadium des Konstruktionsprozesses befinden (Abb. 11.60).

Die Topologieoptimierung als drittes Verfahren schließlich ist eine völlig andere Optimierungsmethode. Es wird von einem zulässigen Bauraum des zu konstruierenden Bauteils ausgegangen. Basierend auf dem FE-Modell werden Elemente, die nicht im Kraftfluss liegen, aus dem Bauteil entfernt. Der optimierte Entwurf erfüllt die Betriebsanforderungen z. B. bezüglich Festigkeit, Steifigkeit oder Ei-

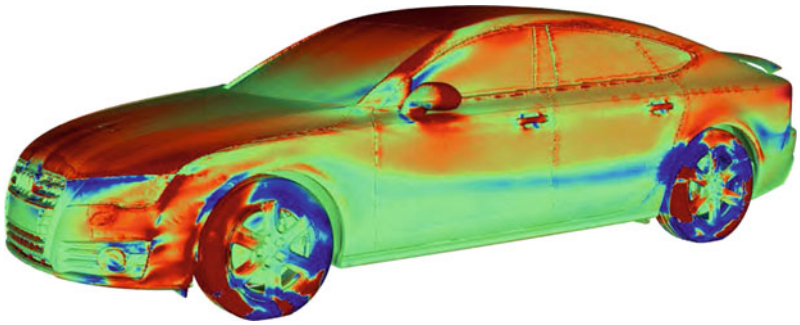


**Abb. 11.61** Audi A7 Widerstandssensitivitätsanalyse aus Adjungiertenberechnung. Blaue Flächen sollten zur Widerstandsminimierung nach außen, rote nach innen verschoben werden [136]

genfrequenzen. Neben der Gewichtsreduktion können bei der Topologieoptimierung auch dynamische Aspekte berücksichtigt werden. Bereits bei der Definition des Optimierungsproblems können Restriktionen definiert werden, um beispielsweise Elementfixierungen oder eine Entformungsrichtung vorzugeben. Diese – der Konstruktion vorgeschaltete – Optimierung ermöglicht eine automatische Neukonstruktion des Bauteils und hat damit häufig die größte Gewichtsersparnis zur Folge. Als Ergebnis der Topologieoptimierung erhält man einen Designentwurf, der interpretiert und weiterverarbeitet werden muss. Hierbei können einerseits die Ergebnisse der Optimierung im FE Postprozessor ausgewertet werden. Andererseits kann eine Glättung der optimierten Struktur durchgeführt werden, um die Optimierungsergebnisse in die Konstruktionsumgebung zu überführen und eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Die automatisierte aerodynamische Formoptimierung hat mittlerweile ihren festen Platz im Produktentstehungsprozess. Dies beinhaltet sowohl die Optimierung von Auftrieb und Widerstand der äußeren Fahrzeugform, als auch die Widerstandsoptimierung von Rohrströmungen und die komfortoptimierte Auslegung der Klimaanalage.

Um die Sensitivitäten von Geometrieänderungen auf z. B. den Widerstand zu bestimmen, müssen mit herkömmlichen Verfahren, z. B. Finite-Differenzen-Verfahren, Strömungssimulationen für jede Änderung jedes Designparameters durchgeführt werden, was zu enormen Rechenzeiten führt. Mit der Adjungierten Methode kann man dagegen mit nur einer zusätzlichen Rechnung die Sensitivitäten aller Designparameter auf einmal bestimmen, was zu einem hohen Zeitgewinn in der Optimierung führt. In Abb. 11.61 ist beispielhaft das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse eines Gesamtfahrzeuges gezeigt. Mittels dieser Ergebnisse kann nun die Form optimiert werden. In einem automatisierten Prozess kann die Formoptimierung unter Einhaltung verschiedener Randbedingungen automatisch durchgeführt werden [136].

Im Entwurf des Fahrzeugs müssen Verbesserungen der Crash-Sicherheit eines Fahrzeugs nicht unbedingt positive Auswirkungen zum Beispiel auf den Schwingungskomfort und die Akustik haben. Numerische Optimierungen müssen daher eigentlich nicht nur die Ergebnisse einer Disziplin, sondern mehrerer Disziplinen berücksichtigen. Der Abgleich von Zielkonflikten zwischen unterschiedlichen Fachrichtungen findet jüngst Einzug in die industrielle Praxis. Diese multidisziplinären Optimierungen sind hochkomplex, da zunächst die Zielfunktionen unterschiedlicher Disziplinen miteinander kombiniert und zu einer einheitlichen Zielfunktion zusammengefasst werden muss. Ferner verwenden Strukturimulation und Crashsimulation zum Beispiel unterschiedliche Optimierungsansätze, die dann entsprechend miteinander kombiniert werden müssen [32].

Die nötige Funktionalität wird häufig in Optimierungstoolboxen angeboten, die die nötigen Simulationsprogramme als Black-Box Anwendung betrachten. Im Inputdeck werden wenige Parameter textuell geändert und die Zielfunktion aus Werten

im Ausgabefile abgeleitet. Typische Optimierer verwenden Gradientenverfahren oder Verfahren mit Ersatzfunktionen und genetische Algorithmen, die das Verhalten der Lösung in einem großen Definitionsbereich approximieren. Diese Ansätze erfordern heute noch enorme Rechenzeiten, da eine Vielzahl von Simulationsläufen notwendig ist, um Abstiegsrichtungen oder das globale Verhalten der Zielfunktion zu bestimmen. Aktuelle Beispiele für multidisziplinäre Optimierung finden sich in der Literatur, z. B. zur Auslegung einer Frontklappe bezüglich der Zielkonflikte Steifigkeit unter Windlast und der geforderten Nachgiebigkeit für Fußgängerschutz [30, 137].

**Stochastische Simulationen und Robustheitsuntersuchungen** Bei der Auslegung von Fahrzeugen genügt es nicht, eine hohe Performance unter definierten Test- und Aufbaubedingungen zu entwickeln. Vielmehr muss die Frage beantwortet werden, was passiert, wenn bestimmte Parameter wie bspw. Blechdicken oder Materialparameter sich verändern, wie dies aufgrund von Schwankungen im Herstellprozess vorkommen kann. Weil im Experiment solche Studien nur eingeschränkt durchführbar und darüber hinaus unwirtschaftlich sind, hat die Koppelung von Programmen für die stochastische Untersuchung mit klassischen CAE-Simulationswerkzeugen in den vergangenen Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Durch ein Stochastikprogramm werden nach einem Monte-Carlo-Verfahren die Inputparameter deterministischer Rechenmodelle innerhalb definierter Grenzen gestreut und die Ergebnisse der Zielgröße über dem Schwankungsbereich visualisiert. Damit gelingt es, robustere Lösungen zu finden [30, 138]. Auch in der Umformsimulation (s. ▶ Abschn. 11.3.3.5) wird häufig nicht wie bisher nur mit diskreten Werten, sondern mit verteilten Parametern simuliert.

**Multidisziplinäre und vernetzte Simulation** Die ganzheitliche Simulation von dynamischen und vernetzten Systemen ist aus einem modernen Produktentstehungsprozess nicht mehr wegzudenken. Sie ist notwendig, um frühzeitige Aussagen über das Verhalten einzelner Komponenten im Gesamtsystem treffen zu können und somit die korrekte Funktionsweise der Komponente im Fahrzeug abzusichern. Hierbei genügt es nicht, einzelne Baugruppen oder Teilmodule einzelner Fachgebiete zu simulieren und zu testen. Vielmehr muss das Zusammenspiel verschiedener Komponenten und Funktionen ganzheitlich abgebildet werden [139].

Hierfür wurden in den letzten Jahren in zahlreichen Forschungsprojekten verschiedene Co-Simulationsplattformen entwickelt, deren Einsatz mittlerweile zum Standard in der automobilen Produktentwicklung gehört. Die Aufgabe der Co-Simulationsplattform ist es, die verschiedenen einzelnen Simulationsmodelle miteinander zu verknüpfen. Hierbei können die Simulationsmodelle in beliebigen unterschiedlichen Programmiersprachen implementiert sein und ihre Funktion sehr einfach oder auch hoch komplex abbilden. Die Co-Simulationsplattform muss hierbei den korrekten Datenaustausch, die zeitliche Synchronisierung, die korrekte Kopplung von Systemen mit stark unterschiedlicher Dynamik und die Korrektheit der Gesamt-Simulationsergebnisse gewährleisten. Co-Simulationen werden auch im Zusammenhang mit HiL-Prüfständen (s. ▶ Abschn. 11.3.3.6) eingesetzt, da hier einzelne Modelle durch echte Hardwarekomponenten, wie beispielsweise ein Steuergerät, ersetzt werden können [139].

Die Verknüpfung der einzelnen Simulationsmethoden mit dem Co-Simulationsframework erfolgt dabei häufig über den im EU-Projekt MODELISAR entwickelten FMI-Standard. Mittlerweile bieten zahlreiche Softwarehersteller Funktionen für den Export von Modellen mit FMI-Schnittstelle an [129, 141].

In der modernen Produktentwicklung wird die Co-Simulation beispielsweise für Fahrdynamikuntersuchungen eingesetzt, bei der Teilkomponenten des Antriebstranges (Räder, Achsen, Motor, Getriebe) mit Steuergerätefunktionen (Motorsteuerung, ASR, ABS, ESP…) miteinander gekoppelt werden [141]. Weitere typische Anwendungen sind die Simulation von Energieflüssen von Heizung und Klimatisierung [141], die thermische Absicherung des Gesamtfahrzeuges [140–142] oder Verbrauchssimulationen. In ◘ Abb. 11.62 ist der schematische Co-Simulationsansatz am Beispiel Thermomanagement gezeigt.

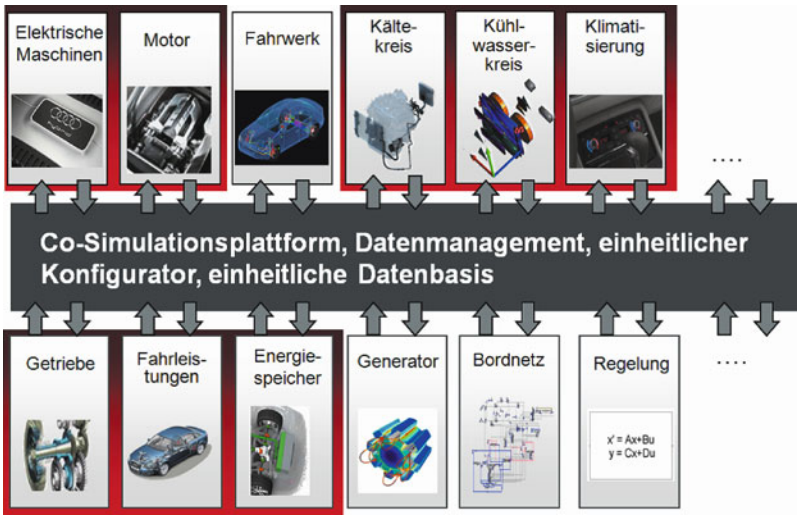



**Abb. 11.62** Co-Simulations-Ansatz am Beispiel Thermomanagement (schematisch) [140]

## 11.4 Mess- und Versuchstechnik

### 11.4.1 Kurzer Rückblick

Die vielen Schwächen der ersten, zunächst rein handwerklich gebauten, Automobile zwangen neben umfangreichen konstruktiven Verbesserungen auch zur Entwicklung entsprechender Versuchsmethoden (z. B. [143]). Stand zu Beginn die Sicherstellung einer Mindest-Gebrauchstüchtigkeit im Vordergrund, folgten sehr bald weitere Kundenanforderungen, wie Transportleistung, Fahrsicherheit, Fahrkomfort und Wirtschaftlichkeit. Nach dem zweiten Weltkrieg begann man, auch die Anforderungen, die aus erschwerten Betriebsbedingungen resultieren (Hitze, Kälte, Hochgebirge, z. B. [144]) sowie Umweltschutz und Unfallfolgenmilderung, einzubeziehen. Alle Bemühungen führten im Laufe der Jahrzehnte zu einem umfangreichen Instrumentarium an Mess- und Versuchstechniken (typische Beispiele siehe Abb. 11.63).

### 11.4.2 Grundsätzliches zur Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau

In Forschung und Vorentwicklung wird zur Erkennung und Bestätigung von Technologie- und Konzept-Potenzialen experimentiert, in Serienentwicklung und Produktion wird zur Sicherstellung von Produkt- und Prozessreife getestet (im Versuch simuliert) und geprüft (Ist mit Soll verglichen, siehe [153] – in allen Phasen der Produktentstehung sind also Mess- und Versuchstechniken trotz oder gerade wegen umfangreicher Berechnungs- und Simulationsverfahren unverzichtbar. Zu den Aufgaben gehören:

- Unterstützung des Zielsetzungsprozesses, Überprüfung der Zielerreichung,
- Bestimmung von Grenzwerten für Entwicklung, Produktion, Gesetzgebung,
- Fundierung von Konstruktionsentscheidungen,

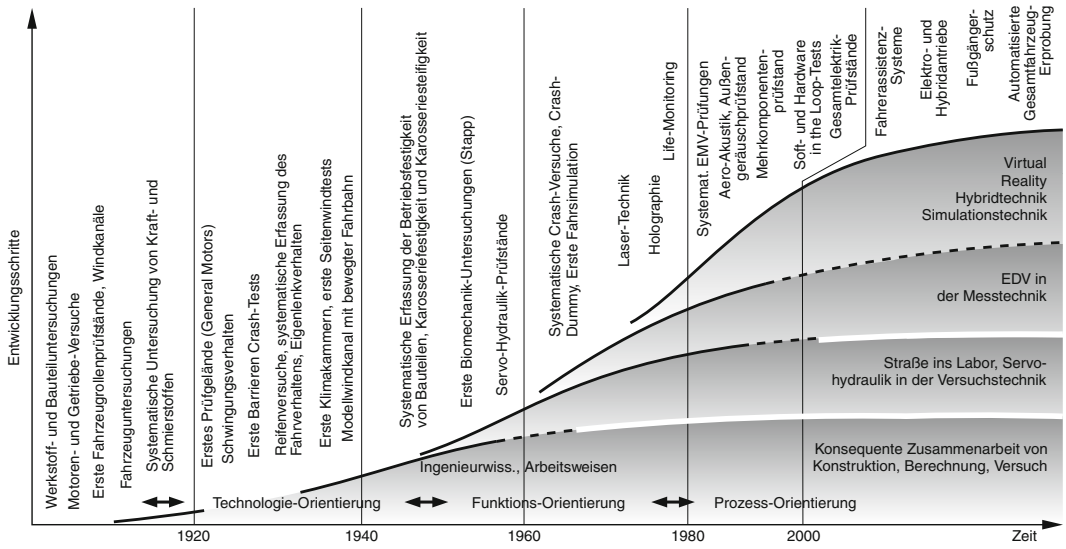



**Abb. 11.63** Meilensteine der Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau (aus [151], ergänzt)

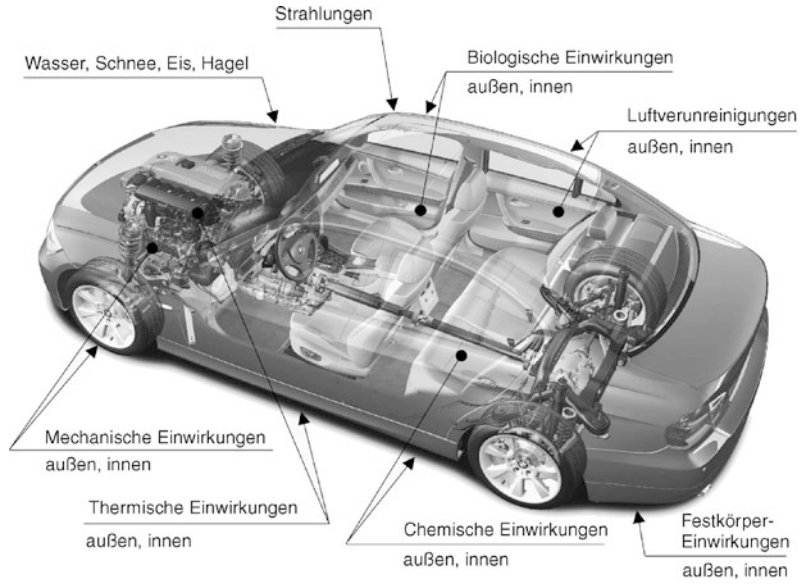



**Abb. 11.64** Einflüsse (Belastungen) auf das Kraftfahrzeug

- Feinabstimmung und Optimierung von Komponenten und Systemen (einschl. Software),
- Validierung und Verifizierung von Rechenmodellen und Simulationsverfahren sowie Ermittlung nur experimentell bestimmbarer Parameterwerte,
- Daten und Zeitverläufe zur Ansteuerung von Prüfständen.

Wichtige Grundlage für den Versuchsbereich ist, wie auch für die Konstruktion, der Umfang aller Betriebszustände und Einsatzbedingungen eines Fahrzeugs (Abb. 11.65), deren Häufigkeiten und Schweregrade (Kunden-, Straßen- und Ländereinflüsse, Lastkollektive, …) einschließlich aller inneren und äußeren Belastungen auf das Fahrzeug (Abb. 11.64). Von besonderer Bedeutung ist, dass

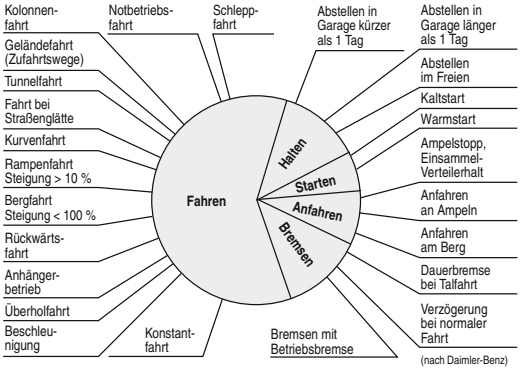



**Abb. 11.65** Wichtige Betriebszustände eines Kraftfahrzeuges

| | | |
|---|---|---|
| Funktionsversuche | — | Dauerversuche |
| Bauteilversuche | — | Aggregat-/Systemversuche |
| Labor und Prüfstands-versuche | — | Fahrversuche |
| Versuche bei bestimmungs-gemäßer Behandlung | — | Missbrauchtests, Unfallsimulation |
| Versuche mit Einzelwirkungen | — | Versuche mit kombinierten Wirkungen |
| Versuche mit objektiven Bewertungskriterien | — | Versuche unter Einbeziehung subjektiver Bewertungen |
| Modellversuche | — | 1:1 Versuche |
| ... | | ... |
| ... | | ... |

**Abb. 11.66** Zur Versuchstechnik im Automobilbau

bei Hybridantrieben die Zahl möglicher Betriebszustände, so z. B. Segeln und Rekuperieren, und deren Übergänge sprunghaft ansteigt. Aus all diesen Faktoren lässt sich eine Systematik der Versuchstechnik ableiten. Dazu gehört die genaue Beschreibung des Untersuchungsziels, der Versuchsart (Abb. 11.66) sowie der Zuordnung infrage kommender Test- und Prüfmethoden zu den konkreten Versuchsaufgaben (Abb. 11.67), oder anders ausgedrückt, „Was, Wie, Wann, von Wem und Womit getestet werden soll." [195].

Zur Festlegung der Versuchsmethode gehört zwingend das Vorhandensein geeigneter Versuchsobjekte, von der Werkstoffprobe über das Versuchsbauteil, das funktionsfähige Aggregat (z. B. Motor) im Aggregateträger, den fahrfähigen, evtl. noch unvollständigen, Prototyp bis zum kompletten Serienfahrzeug. Für manche Untersuchungen werden auch speziell konzipierte Experimentalfahrzeuge eingesetzt (z. B. [161]. Dazu gehört auch die Festlegung der Versuchsbedingungen sowie zugehöriger Messverfahren und Bewertungskriterien (Beispiel siehe Abb. 11.68). Letztere ergeben sich entweder direkt quantitativ aus dem Lastenheft (z. B. Kraftstoffverbrauch, Beschleunigungsvermögen) oder als empirisch-wissenschaftlich abgeleitete Größen komplexer Verhaltensweisen, auch stark subjektiv empfundener Effekte (s. u.) oder aus der Biomechanik des Unfallgeschehens (▶ Kap. 9). Zur Bestimmung des Kraftstoff-Normverbrauchs gibt es weltweit unterschiedliche Fahrzyklen. Zukünftig soll es jedoch möglichst eine einzige „Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure" geben [203].

Als Folge von Fahr- und Bedienungsfehlern können Fahrzeuge wesentlich stärker belastet werden als bei bestimmungsgemäßem Einsatz. Deshalb müssen aus der großen Zahl von Sonderereignissen (z. B. [158]) und Möglichkeiten „missbräuchlichen" Umgangs sog. Missbrauchtests entwickelt und eingesetzt werden (Abb. 11.69 aus [145, 153, 157] und [162]). Zugehörige Erkenntnisse dürfen einerseits nicht zu Konstruktionen mit unakzeptablen Nachteilen im Normalbetrieb des Fahrzeugs führen, müssen andererseits aber sicherstellen, dass nach einem Missbrauch noch ein (u. U. eingeschränkt) betriebsfähiger Zustand vorhanden ist.

Der große Umfang an Versuchsaufgaben hat die Messtechnik im Automobilbau zu einem eigenständigen Fachgebiet werden lassen. In einer Fülle von stationären und mobilen Geräten und Verfahren werden heute vielfältige, oft sehr genau und hochdynamisch zu erfassende, Messgrößen verwendet (z. B. [163]), die verschiedenen Bereichen zugeordnet werden können, so insbesondere:

- Mechanik, Fahrdynamik,
- Fluiddynamik,
- Schwingungen, Akustik,
- Thermodynamik, Wärme- und Energietechnik,
- Elektrotechnik,
- Elektrochemie,
- Optik,
- Werkstoffe, Bauteile, Kraft- und Betriebsstoffe,
- Tribologie,
- Fahrerassistenz,

| Prüf-Aufgaben \ Prüfmethode | | Reale Straßenfahrt | Mess- und Prüfgelände | Physikalische Prüfstände | „Dummies in the loop“ | „Software in the loop“ „Hardware in the loop“ | „Man in the loop“ | Virtuelle Prüfstände |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Funktions- und Dauerversuche | Gesamtfahrzeug in seinem Umfeld | ● Fahrzeug-Gesamtfunktion, Fahrerlebnis<br>● Langstreckentauglichkeit<br>● Dauerläufe<br>● Fahrzeug bei Extrembedingungen (Nordland, Tropen, Hochgebirge)<br>● Länderspezifika (Verkehrszeichen-Erkennung, infrastrukturbasierte FAS) | Fahrzeug-Gesamtfunktion und Fahrerlebnis bei definierten Betriebsbedingungen | ● Aerodynamik<br>● Klima<br>● Außengeräusch<br>● Innengeräusch<br>● Schwingungen<br>● Kraftstoffverbrauch<br>● Elektromagnetische Verträglichkeit<br>● Fahrzeug bei Extrembedingungen | ● Crashverhalten<br>● Klimaverhalten<br>● Akustik | ● Fahrdynamik-Simulation bei definierten Betriebsbedingungen bis in Fahrgrenzbereiche<br>● Funktionsfehler von Systemen | Fahrsimulation | ● Design (Exterieur, Interieur)<br>● Ergonomie-Funktionen<br>● Zugänglichkeiten für Wartung und Reparatur<br>● Energiemanagement<br>● Hitzeschutz<br>● Korrosion |
| | Aggregate<br><br>Systeme | ● Komplexe Aggregate und Funktionen bei wechselnden und extremen Betriebsbedingungen<br>● ... | ● Antriebs-Abstimmung<br>● Fahrwerks-Abstimmung (Längs-, Quer- und Vertikaldynamik)<br>● ... | ● Motor, Getriebe, Kraftübertragung<br>● Achs- und Bremssysteme<br>● Rohkarosserie<br>● Abgasanlagen<br>● ... | ● Insassenschutz<br>● Fußgängerschutz | ● Antriebs- und Fahrwerks-Regelsysteme<br>● Elektrisches Bordnetz<br>● Software | ● Ergonomie<br>● Fahrerassistenz-Systeme | ● Musterbau, Montage<br>● Aggregat- und System-Funktionen |
| | Werkstoffe, Bauteile, Betriebsstoffe | Verhalten von Werkstoffen, Bauteilen und Betriebsstoffen bei realen Betriebsbedingungen | Verhalten von Werkstoffen, Bauteilen und Betriebsstoffen bei definierten Betriebsbedingungen (bis in den Bereich des Missbrauchs) | Verhalten von Werkstoffen, Bauteilen und Betriebsstoffen | In vivo und in vitro Experimente | Funktionsfehlererkennung von Bauteilen | Olfaktorische Prüfung von Geruchsstoffen | ● Bauteilgeometrie<br>● Bauteilfunktionen |

**Abb. 11.67** Beispiele für Einsatzfelder der Versuchstechnik im Automobilbau

| | Death-Valley-Sommer | Nordland-Winter |
|---|---|---|
| Ort | 35° n. B. | 68° n. B. |
| Strahlungsrichtung | 78° | 2° |
| – Intensität direkt | 1000 W/m$^2$ | 150 W/m$^2$ |
| diffus | 90 W/m$^2$ | 20 W/m$^2$ |
| Fzg.-Ausrichtung | Bug zur Sonne | Bug zur Sonne |
| Umgebungstemperatur | 40 °C | –20 °C |
| Motorraumtemperatur | 85 °C | +30 °C |
| Kofferraumtemperatur | 65 °C | –10 °C |
| Bodentemperatur | 40 °C | –20 °C |
| Luftfeuchte | 10 % rel. | 90 % rel. |
| Fahrgeschwindigkeit | 0, 32, 64, 96... km/h | 0, 32, 64, 96... km/h |
| Gebläsestufen | 0 : III | 0 : III |

**Abb. 11.68** Versuchsbedingungen für die Szenarien „Death Valley-Sommer“ und „Nordland-Winter“

- unfallfolgenmildernde Sicherheit,
- Abgasmanagement,
- Telematik.

Während im Labor an Aggregaten und Gesamtfahrzeugen umfangreiche und sensible Messverfahren eingesetzt werden können, müssen für die mobile Messtechnik im fahrenden Fahrzeug Raum- und Gewichtsgrenzen, manchmal weitere Einschränkungen, berücksichtigt werden (Abb. 11.70, aus [147]). Dennoch sind heute manche Dauerlauf-Fahrzeuge rollende Messlabors, z. B. zur Erfassung aller möglichen kritischen Temperaturen und Belastungen. Besondere Anforderungen gibt es für das berührungslose Messen an schwer zugänglichen Bereichen, z. B. an bewegten und/oder heißen Bauteilen, sowie für das Sichtbarmachen komplexer Vorgänge, z. B. in kompakten und hochbeanspruchten Aggregaten. Wie das Beispiel der Hybridantriebe zeigt, steigt mit der Komplexität der Fahrzeuge auch die der Testverfahren und Versuchseinrichtungen.

Schon seit Jahren sind Messsysteme auf Rechnerbasis Stand der Technik; sie erlauben optimierte und überwachte Versuchsdurchführung, komplexe on-line-Auswertungen (Zeit- und Frequenzbereiche, Leistungsspektren, Modalanalysen usw.) einschließlich quick-look-Darstellungen.

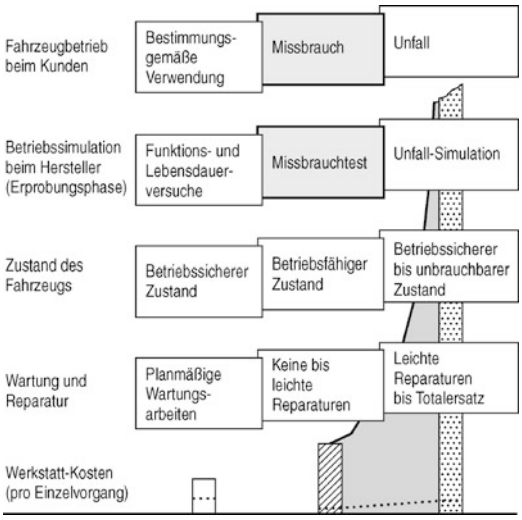
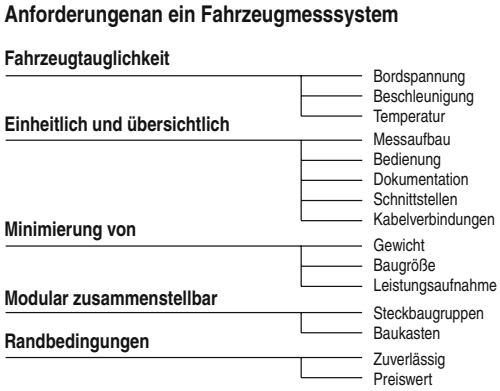



**Abb. 11.69** Zur Definition des Fahrzeug-Missbrauchs und des Missbrauchtests



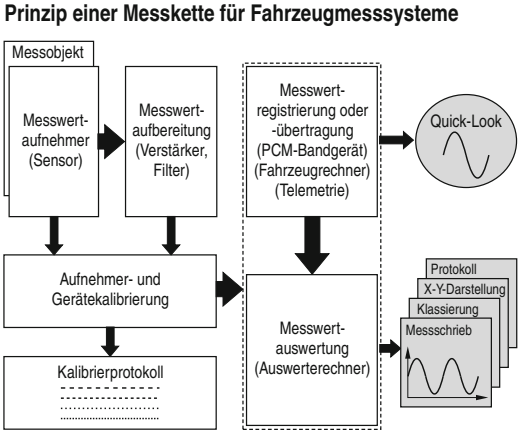




**Abb. 11.70** Fahrzeugmess-Systeme – Anforderungen, Prinzipdarstellung Anforderungen, Prinzip einer Messkette

Bevor die Messwerte registriert und/oder verarbeitet werden, müssen sie störungsfrei erfasst, gefiltert, aufbereitet und (häufig telemetrisch) übertragen werden, was vor allem für Fahrten unter Extrembedingungen (Klima, Straßenverhältnisse) gezielte Maßnahmen erforderlich macht. Besondere organisatorische Maßnahmen im Versuchsbetrieb sind für Planung und Durchführung von Versuchsfahrten mit Fahrzeugflotten in entfernten Ländern zu ganz bestimmten Jahreszeiten notwendig (Beispiele für Erprobungsgebiete siehe Abb. 11.71).

Um möglichst jederzeit, ungestört und reproduzierbar Fahrerprobungen außerhalb des öffentlichen Verkehrs durchführen zu können, betreiben alle größeren Autohersteller (häufig in der Nähe ihrer Entwicklungszentren, aber auch in Regionen mit besonderen klimatischen Bedingungen) aufwendige Mess- und Prüfgelände (Beispiel siehe Abb. 11.72).

Solche Einrichtungen umfassen eine Vielfalt unterschiedlicher Strecken. Typischerweise gehören dazu:

- Kreisplatte für Kurvenfahrten (einschl. Kurvenaquaplaning),
- Fahrdynamikfläche für beliebige Fahrmanöver,
- Schnellfahrbahn,
- Handlingkurs,
- verschiedene Schlechtwegstrecken (wie Kopfsteinpflaster mit Trambahnschienen, Höcker, Rinnen, Waschbretter …),
- verschiedene Sonderstrecken (Wasserdurchfahrten, Niedrigreibwertstrecken, Steigungshügel, Seitenwindanlage, Offroad-Strecken).

Großer Aufwand, häufig nicht konstant zu haltende Versuchsbedingungen und damit mangelnde Reproduzierbarkeit, Probleme mit der Messtechnik, Abhängigkeit von Jahreszeiten usw. führten schon frühzeitig zu Bemühungen, zusätzlich zu Aggregatversuchen auch möglichst viele Versuche mit Gesamtfahrzeugen „von der Straße ins Labor zu holen“ (z. B. [143, 145–160, 164]). So wurden schon vor dem zweiten Weltkrieg große Windkanäle zur

| Erprobungsorte | Schwerpunkte | Spez. Effekte |
|---|---|---|
| Nürburgring | Fahrwerk, Motor, Karosserie | Zeitraffung unter Extrembeanspruchung |
| Mittelmeer-Raum | Fahrwerk, Karosserie | Zeitraffung unter Extrembeanspruchung |
| „Osteuropa“ | Fahrwerk, Karosserie | Zeitraffung unter Hochbeanspruchung |
| Südafrika | Sommerbetrieb | Hitze, Staub, Rechtslenker |
| VAE | Sommerbetrieb | Hitze, Staub |
| USA/Death Valley | Sommerbetrieb | Extreme Hitze |
| „Nordland“ | Winterbetrieb | Extreme Kälte |
| Deutschland | Gesamtfahrzeug | Kundennaher Betrieb, BAB |
| Miramas (Testgelände) | Fahrwerk, Motor, Karosserie | Zeitraffung unter Extrembeanspruchung |
| | Motor, Antriebsstrang, Kühlsystem, Aerodynamik | Hochgeschwindigkeits-verhalten unter Zeitraffung |
| **Landesspezifische Erprobungen** USA, Südafrika, Japan, Südostasien, China | | |

**Abb. 11.71** Erprobung Gesamtfahrzeug (Beispiele)

Untersuchung aerodynamischer Eigenschaften und Rollenprüfstände zur Untersuchung des gesamten Antriebssystems im Fahrzeug gebaut und in den letzten Jahrzehnten in vielfältiger Weise verfeinert (z. B. [204–206]). Weitere Beispiele betreffen klimatisierte Antriebsprüfstände, Thermo- und Umwelt-Windkanäle mit Simulation aller möglichen Wetterverhältnissen sowie Betriebsfestigkeitsprüfungen von Achsen und Gesamtfahrzeugen mit komplexen servohydraulischen Belastungseinrichtungen, die mit auf der Straße gemessenen Betriebslasten im Nachfahrversuch unter Echtzeitbedingungen betrieben werden können (Abb. 11.73, z. B. [155, 158, 159, 165]). Weitere Beispiele betreffen Akustik-Windkanäle, Außengeräusch-Prüfstände sowie Hallen zur Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Wesentliche Voraussetzung für solch realitätsnahe Versuchstechniken war die Entwicklung leistungsfähiger Realtime-Rechner- und -Software-Systeme. Aus der umfangreichen Versuchstechnik zur sog. passiven Sicherheit (► Kap. 9) sei das aktuelle Thema Fußgängerschutz genannt (z. B. [208]).

Mögen alle Entwicklungs- und Fertigungsplanungs-Abteilungen noch so gute Arbeit geleistet haben, Serienstarts und Kundenauslieferungen neuer Modelle werden erst dann freigegeben, wenn eine genügend große Zahl von Fahrzeugen im Praxiseinsatz Funktionstüchtigkeit, Zuverlässigkeit und auch subjektiven Qualitätseindruck bewiesen haben. Dabei zeigt es sich immer wieder, dass die letzten Feinheiten besonders viel Aufwand erfordern. Und selbst dann kann es bei der hohen Komplexität der Produkte und Prozesse vorkommen, dass nicht alles programmgemäß verläuft, dass in der Serie größere Abweichungen als erwartet auftreten, …



**Abb. 11.72** Beispiel für ein Automobil-Testgelände (Seiffert, U.; Walzer, P.: Automobiltechnik der Zukunft. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1989, S. 165)

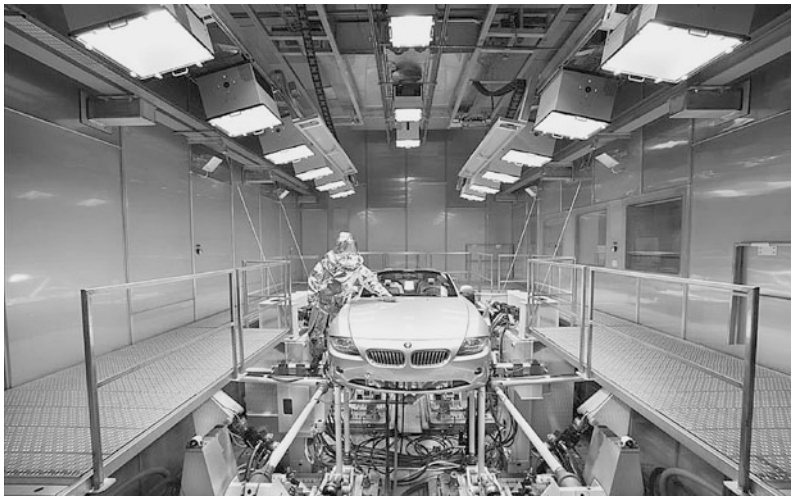


**Abb. 11.73** Mehrkomponenten-Fahrzeugprüfstand für Betriebslasten-Nachfahrversuche

### 11.4.3 Einige ausgewählte Beispiele

Die Entwicklung extrem sparsamer und abgasarmer Verbrennungsmotoren setzt präzise Kenntnisse der komplexen Wirkkette „Gaswechsel, Einspritzung, Zerstäubung, Verdampfung, Gemischbildung, Zündung, Verbrennung, Energieumsetzung sowie Reaktionskinetik“ voraus (z. B. [166, 167]). Zur Erfassung und Beherrschung zugehöriger Effekte konnten in den letzten Jahrzehnten verschiedene optische Messtechniken, so Lichtleiter-Endoskopieverfahren sowie vor allem verschiedene Lasertechniken zur Anwendung gebracht werden, mit deren Hilfe insbesondere Strömungsfelder, Strahlausbreitungen, Strahl-Wand-Interaktionen, Flammenausbreitungen oder Partikelbildungen (z. B. [209]) zeitlich-örtlich hochauflösend sichtbar gemacht oder auch dynamische Abgas- oder Ölverbrauchs-Untersuchungen bis zum ppb-Bereich vorgenommen werden können (z. B. [163]). Schon seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wird die laserinduzierte Doppelpuls-Holographie zur Messung angeregter Schwingungsformen optisch zugänglicher Strukturoberfächen eingesetzt (z. B. [145–160]). Eine andere Anwendung der Lasertechnik, die Laser-Doppler-Anemometrie, betrifft die Visualisierung weiterer komplexer Strömungsverhältnisse, so aerodynamischer Fahrzeug-Umströmungen im Windkanal (► Abschn. 3.2), Bremsstaub-Emissionen [210] oder im Wassermantel von Verbrennungsmotoren.

Eine den Motorkonzepten ähnliche Vielfalt findet man auch bei den Triebsträngen, die immer höhere Anforderungen zu erfüllen haben und weiter steigende Komplexität aufweisen (siehe ► Abschn. 5.4 und ► Abschn. 5.5). Entsprechend universell einsetzbare Prüfstände, auch für Allrad-, Hybrid- und Elektroantriebe, sind hierzu schon in frühen Entwicklungsphasen unverzichtbar (z. B. [168]).

Bei der strömungs- und wärmetechnischen Simulation von Fahrzeugen in Wind- und Klimakanälen kommt es, wie bei fast jeder Simulation, zu Abweichungen gegenüber der Realität. Die noch offenen Fragen der Windkanaltechnik konnten inzwischen weitgehend geklärt werden [169, 196, 197].

Aerodynamikversuche in frühen Entwicklungsphasen lassen sich vergleichsweise schnell und kostengünstig mit verkleinerten Modellen durchführen (ein Beispiel für die in Abb. 11.66 genannten Modellversuche). Solche Versuche erfordern jedoch die ausreichende Berücksichtigung der wichtigen Formdetails sowie der physikalischen Ähnlichkeitsgesetze (z. B. [170, 171]).

Dass dem Nichtfachmann einfach erscheinende Bauteile oder Komponenten häufig anspruchsvolle Versuchsaufgaben stellen, zeigt das Beispiel des Scheibenwischers, bei dem Werkstoffeigen-

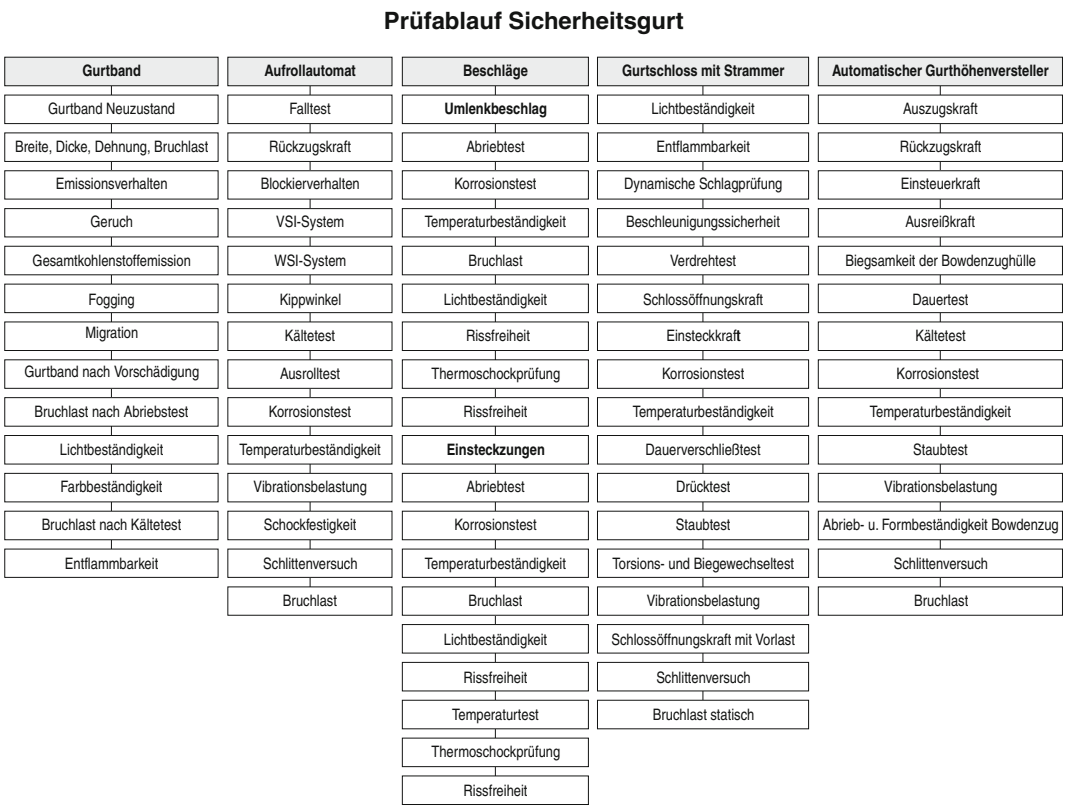



**Abb. 11.74** Prüfablauf – Sicherheitsgurt

schaften, geometrische Feinheiten, Kraftverteilungen und aerodynamische Einflüsse Wischqualität, Tribologie, Rattergeräusche und Lebensdauer beeinflussen. Auch ein weiteres Beispiel, nämlich der Prüfablauf von Sicherheitsgurten (Abb. 11.74) zeigt den großen Versuchsaufwand, der zur Sicherstellung von Funktion und Lebensdauer moderner Fahrzeuge unerlässlich ist.

Mit beiden Beispielen ist ebenfalls angedeutet, welch beachtlicher Prüfaufwand bezüglich des gesamten Umfangs an Werk-(auch Kraft- und Betriebs)-stoffen des Automobils einschließlich aller Fügetechniken zu leisten ist (z. B. [172, 173]). Es handelt sich dabei um physikalische, chemische und technologische Prüfverfahren zur Bestimmung von Werkstoff-Identitäten, Festigkeits- und Verschleißeigenschaften, Innen- und Oberflächen-Fehlern, Medienbeständigkeiten von Kunststoffen usw. Dazu stehen vielfältige Apparate und Verfahren zur Verfügung, wie folgende Beispiele zeigen: Elektronenmikroskope für neue Materialien, Röntgenstrahlen für relativ unkomplizierte Einblicke in Bauteile, Thermographie zur berührungslosen und zerstörungsfreien Materialprüfung.

Funktionalität, Sicherheit und Zuverlässigkeit elektronischer Steuerungen und Regelungen sind mit klassischen Verfahren allein nicht zu ermitteln. Deshalb wurden neue und besonders leistungsfähige Methoden für Systementwicklungen, Testen vernetzter Elektroniksysteme sowie automatisierte Testumgebungen und Fehlersimulationen entwickelt, um die steigende Anzahl von Steuergeräten und deren Variantenvielfalt, die steigende Vernetzung und zunehmende Verteilung von Funktionalitäten zusammen mit der zugehörigen Software untersuchen zu können (▶ Abschn. 8.7). Aus der Praxis der manchmal schwierigen Fehlersuche seien Kriechströme, Wackelkontakte und

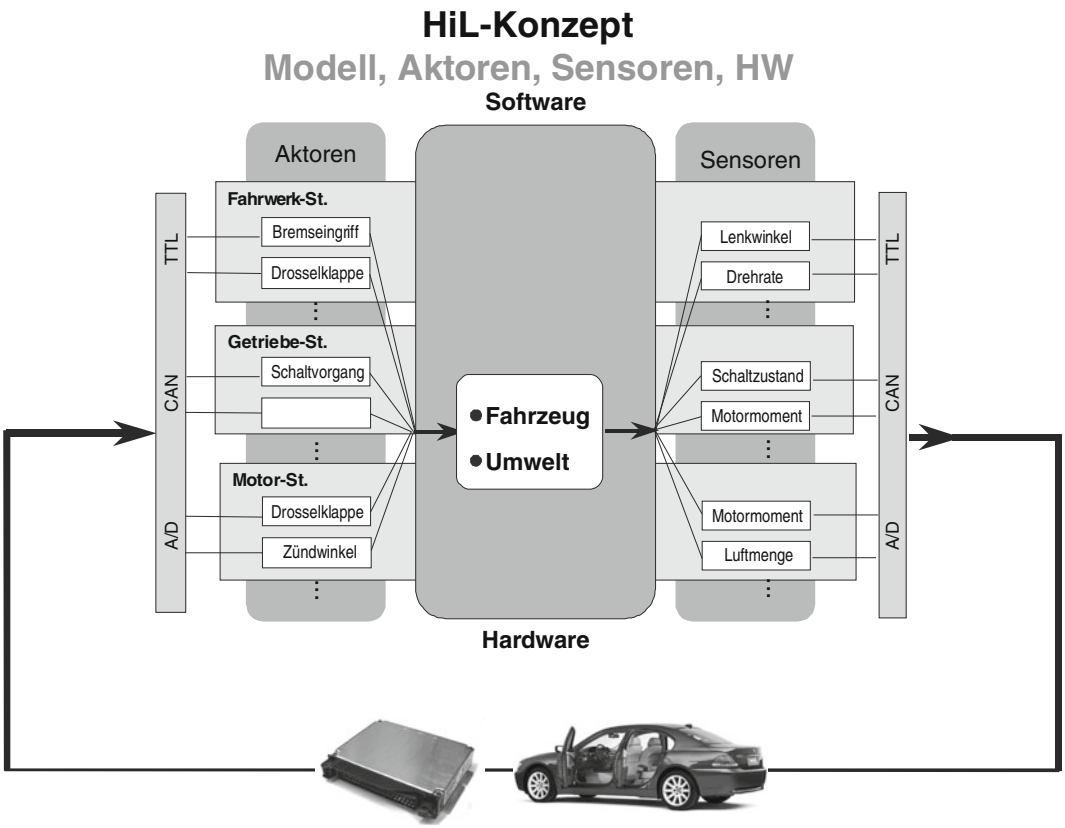



**Abb. 11.75** Hardware in the Loop-Konzept (Beispiel)

Kontaktkorrosion genannt [211]. Insbesondere die fast unendliche Vielfalt von Vernetzungsvarianten softwarebasierter Funktionen (z. B. Informations-, Kommunikations- und Assistenzfunktionen) stellt hohe Anforderungen an die versuchstechnische Absicherung gegen Fehler. Häufig erscheinen Fehler nur sporadisch, d. h. der Zustand des vernetzten Gesamtsystem, in welchem sie auftreten, kommt im normalen Fahrbetrieb nur gelegentlich vor. Das erschwert die Analyse solcher Softwarefehler erheblich.

Neue Aufgaben für Simulations- und Versuchstechniken stellt die Entwicklung neuer Elektro- und Hybridantriebs-Systeme (▶ Abschn. 4.3.3). Das beginnt zunächst mit der Funktions- und Sicherheitsentwicklung neuer Batteriesysteme (z. B. [212]). Zusätzlich handelt es sich sowohl um das komplexe Zusammenspiel aller Komponenten als auch um Fragen des Gesamtfahrzeugs, wie die Beherrschung hoher elektrischer Spannungen und Ströme, EMV, Crashsicherheit oder die Erreichung eines voll akzeptablen Geräuschverhaltens (z. B. [198]).

Die Kopplung unterschiedlicher Methoden und Techniken zeigt sich deutlich bei den Hybridtechniken „Software in the Loop“, „Hardware in the Loop“, die zur Steigerung der Reifegradabsicherung und zur „Function“- und „Model in the loop“ sowie „Human and Hardware in the loop“, Entwicklungseffizienz zunehmend eingesetzt werden (Abb. 11.75, [174–176, 224, 225]). HiL-Testsysteme für Hybridantriebe müssen extrem schnell sein, hohe Leistungen schalten und gleichzeitig flexibel sein [224–226]. Die heute zu beherrschende Komplexität mit der Gesamtheit aller Funktionen, Aktoren und Sensoren zeigt sich auch beim Stillstandsmanagement des Fahrzeugs [217].

Es ist ein besonderes Kennzeichen der Automobiltechnik, dass eine Reihe von Eigenschaften nicht allein oder gar nicht objektiv bewertbar ist. Ein wichtiges Teilgebiet der Fahrzeug-Versuchstechnik bemüht sich daher mit zunehmendem Erfolg, Zusammenhänge zwischen subjektiven Bewertungen und messbaren Größen zu finden und daraus quasiobjektive Bewertungskriterien abzuleiten [177–179], die auch für die Bewertung von Simulationsergebnissen und die Entwicklung des „Digital Car" (► Abschn. 11.3) herangezogen werden. Beispiele sind Bewertung von Komforteindrücken, Bedienbarkeit und Anzeigen. Eine weitere Zielrichtung betrifft Entwicklung und Einsatz anthropomorpher Testpuppen, die jeweils für bestimmte Anwendungsfälle, wie Crashverhalten (Abschn. 9), Schwingungsverhalten, Klimakomfort oder Audioqualität geeignet sind (z. B. [177]).

Schon seit Jahrzehnten bemüht man sich, Fahrsimulatoren zur Verkehrsicherheitsforschung und zur Vorentwicklung unkonventioneller Fahrzeugkonzepte zu entwickeln und einzusetzen (z. B. [180, 181]). Deren Vorteile liegen vor allem in Untersuchungen voll reproduzierbarer, auch extrem kritischer, Verkehrssituationen, in schnellen Änderungsmöglichkeiten von Fahrzeug- und Umfeldparametern und in Untersuchungsmöglichkeiten für völlig neue Fahrzeugkonzepte. Dazu gehören auch Fahrerassistenzsysteme (z. B. ► Abschn. 8.5.5 und [156, 158]), die besondere Versuchsmethoden erfordern (z. B. [182, 218]) sowie die Vorausaktivierung von Systemen zur Unfallmilderung (► Kap. 9), lange bevor diese in Realversuchen einsetzbar sind. Obwohl die neuesten Simulatoren gegenüber früher deutliche Fortschritte aufweisen, stellt die realisierbare „High Fidelity"-Simulation noch immer eine besondere Herausforderung dar.

### 11.4.4 Zur Effizienz der Mess- und Versuchstechnik

Je früher aussagekräftige Versuchsergebnisse vorliegen, um so schneller kann der Konstrukteur seine Freigaben erteilen, um so früher kann daraufhin die Fertigungsplanung aufwendige Investitionen tätigen. Dies hatte jedoch (und hat auch noch) Grenzen, insbesondere wenn in Prototypphasen viele „handgemachte" Bauteile verspätet und/oder nicht sachgerecht, und die Versuchsergebnisse mit den „unfertigen" Prototypen zu spät und zusätzlich nicht aussagekräftig genug zur Verfügung standen. Deshalb kommt, wie in diesem Handbuch an vielen Stellen erläutert, der Stärkung aller Aktivitäten in der frühen Entwicklungsphase besonders hohe Bedeutung zu.

Schon frühzeitig begannen Fahrzeughersteller, Zeitraffertests für Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprüfungen, in den 70er Jahren auch für Korrosionsprüfungen, zu entwickeln (z. B. [143, 145–160, 183]). Zunächst wurden in Prüfgeländen ausgesprochene „Marterstrecken" gebaut, mit für Fahrwerks- und Karosserieteile hohen Raffungsfaktoren; später kamen die schon angesprochenen computergesteuerten Nachfahr-Prüfstände hinzu, die ohne Fahrereinflüsse voll reproduzierbar, „rund um die Uhr" und bei jedem Wetter arbeiten können; zusätzlich können Zeitanteile geringer Beanspruchungsintensität weggelassen werden (Beispiel für Prüfzeit- und Datenreduktionsverfahren). Neuerdings versucht man auch, die Dauererprobung von Serienfahrzeugen durch auf Testgeländen autonom fahrenden Fahrzeugen und „bionischen Diagnoseassistent-Systemen" effizienter zu gestalten [184]. Praxisgerechte Zeitraffer-Verfahren für rein zeitabhängige Alterungsvorgänge, z. B. bei Gummi- und Kunststoffbauteilen, stehen noch aus.

In der Produktentwicklung sind Modelle und Musterteile ein wichtiges Hilfsmittel zur Unterstützung von Produktgestaltung und Prozessplanung. Mit der CAD/CAM-Technologie bietet sich prinzipiell die Möglichkeit, Musterteile auf der Basis der Konstruktionsdaten sehr schnell zu fertigen; sie sind oftmals das Bindeglied, das die Parallelisierung von Produkt- und Prozess-Gestaltung („Simultaneous Engineering", ► Abschn. 11.1) erst ermöglicht. Rapid Prototyping bietet somit ein großes Potenzial zur Verkürzung des Produktentstehungs-Prozesses bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität. Möglich sind geometrische Prototypen (insbesondere für die frühe Phase der Prozessplanung) sowie funktionale Prototypen, mit denen, je nach Werkstoff, unterschiedliche Funktionen untersucht werden können (z. B. [185]). Eine weitere Art von Rapid Prototyping betrifft integrierte Entwurfs- und Bewertungsverfahren für Software-

Systeme und für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Interaktionen (z. B. [186]).

Ein wichtiger Beitrag zur Effizienzsteigerung in Entwicklung und Fertigung stellt „Design to Testability", also einfache und schnelle Testbarkeiten der Komponenten und Subsysteme schon von der Konstruktion her zu ermöglichen, dar. Dies setzt eine enge Kooperation zwischen Designern und Testingenieuren voraus, die jedoch nicht immer gegeben ist (z. B. [220]).

Obwohl Fahrzeuge immer komplexer werden und immer mehr Parameter zu optimieren sind, muss es Ziel jeder Versuchsplanung sein, möglichst wenig Versuche durchzuführen, und dennoch ein Maximum an Informationen in möglichst kurzer Zeit zu gewinnen. Daraus folgt, dass zumeist nicht alle Parameter einzeln untersucht werden können; vielmehr müssen mehrparametrige Versuche durchgeführt werden, die dennoch genaue Detail-Informationen liefern. Hierzu sind zunächst in einer Systemanalyse die wesentlichen Parameter und deren Wechselwirkungen zu bestimmen, was um so genauer gelingt, je mehr a priori-Wissen, sowohl empirisch als auch mittels Berechnung und Simulation, vorhanden ist. Anschließend erfolgt dann die Auswahl der für die konkrete Aufgabe am besten geeigneten, deterministischen oder statistischen, Versuchsmethode (z. B. [145–160, 187]). Als ein Beispiel sei die modellgestützte Kennfeldoptimierung moderner Ottomotoren genannt [153]. Genügten für die Kennfelderstellung zu Anfang der 80er Jahre noch einige wenige Parameter zur Optimierung der beiden Stellgrößen Zündwinkel und Einspritzzeitpunkt, müssen inzwischen für mindestens 8 Stellgrößen mehr als 100 Kennlinien oder Kennfelder für das Steuergerät optimiert werden, und das auch noch für unterschiedliche Motor-, Getriebe- und Abgas-Varianten. Der dazu notwendige Entwicklungsaufwand („vielparametrige Versuchsräume") wäre mit klassischen Versuchsmethoden überhaupt nicht mehr bewältigbar, sodass Methoden wie „Design of Experiments" (DOE) und „Rapid Measurement" erforderlich sind (z. B. [158–160] und [176, 188, 189, 199]).

Der Zwang zur Effizienzsteigerung führte darüberhinaus zu unternehmensinternen und ab etwa 1990 zu firmenübergreifenden Aktivitäten, Grundlagen für die hard- und softwareunabhängige Standardisierung von Automatisierungs-, Mess- und Auswertesystemen zu erarbeiten (insbesondere „ASAM" [145–160]). Standards sind schon heute unverzichtbar, damit Messergebnisse vergleichbar und übertragbar sind, sowie Methoden und Tools in Entwicklungs- und Lieferverträgen verbindlich vereinbart werden können [153, 160]. Nicht zuletzt gehört zur Effizienz des Versuchbetriebs, Ergebnisse gut zu dokumentieren und wenn möglich zu verallgemeinern, damit die Zahl neuer Versuche minimiert werden kann. Dazu zählen auch neue Methoden des Wissensmanagements, neuronale Netze oder allgemein „Know how-Recycling" [152].

Dennoch wird, trotz immer leistungsfähigerer Berechnungs- und Simulationstechniken („digital car, virtueller Prüfstand, virtuelle Probefahrt", (z. B. [155, 158, 159, 190–192, 200, 221–223]), weiterhin ein großer Teil der Fahrzeugentwicklung im Realversuch zu leisten sein. In der Antriebsentwicklung beispielsweise liegt der Anteil im Bereich von zwei Drittel bis drei Viertel (siehe auch [201]). Denn der Versuch beantwortet auch Fragen, die gar nicht gestellt wurden.

Die starke Verlagerung von Entwicklungsaktivitäten von den Fahrzeugherstellern zu den Systemlieferanten hat die Strukturen der Zusammenarbeit auch in der Versuchstechnik deutlich beeinflusst. Insbesondere mussten sich die Lieferanten in verstärktem Maße Know how und Einrichtungen mit Gesamtfahrzeug-Inhalten schaffen (z. B. [154]). Eine Vereinheitlichung der Prüfvorschriften der OEM kann wiederum zur Effizienzsteigerung bei den Lieferanten beitragen.

Von besonderer Bedeutung ist, dass die kundenwertige Gesamtfunktionalität neuer Fahrzeuge (bis hin zur Langzeitqualität) trotz aller Vorarbeiten nur durch reale Straßenversuche (Dauerläufe) in ganz unterschiedlichen Regionen dieser Welt mit extremer Hitze, Sandstürmen, außergewöhnlichen Wintersituationen sicherzustellen ist (z. B. [193, 194, 224]). Diesen Aufwand zu reduzieren ist schon heute eine besondere Aufgabe der gesamten Versuchstechnik im Fahrzeugbau.

Auch bei immer weiter verbesserten sich ergänzenden und über alle Integrationsstufen erfolgende Versuchs-Methoden und Verfahren muss man sich dennoch darüber im klaren sein, dass selbst „richtige Tests" [153] nur geeignet sind, Fehler nachzuwei-

sen, nicht aber, absolute Fehlerfreiheit zu garantieren". Ebenso bedeutet Verifikation (Nachweis, dass Spezifikationen erfüllt werden) nicht zwangsläufig, dass das getestete Produkt auch „valide" ist, also die erwarteten Leistungen zur Gänze erbringt. Deshalb muss auch an völlig neuartigen Verfahren gearbeitet werden, um mögliche Fehlerfalle noch schneller finden zu können.

Testen muss also als eine Kerndisziplin im gesamten Produktentstehungsprozess verankert sein, der mit dem Requirement Engineering beginnt (siehe auch ► Abschn. 8.1 und [202, 225]), alle Erprobungs- und Gewährleistungsdaten beinhaltet [226] und nicht zuletzt Produkt- und Produzentenhaftung zu berücksichtigen hat.

Die Einführung von automatisierten Fahrerassistenzsysteme und Erweiterung in Richtung automatisches Fahren beeinflussen auch die Versuchs- und Messtechnik sehr stark.

Ein besonderer Schwerpunkt bilden dabei die Entwicklungsarbeiten – erweiterte Simulation und Testen – zum Absichern der komplexen Funktionen, einschließlich der dazugehörigen Software. Dabei sind nicht nur die Grundfunktionen beim Fahren in der Stadt, Landstraße und Autobahnen zu testen, sondern auch das Fahren bei schlechter Witterung und bei den Abläufen im realen Verkehr. Stichworte dazu sind: die Wahrnehmung von komplexen Umgebungen, das Verständnis der Fahr- und Umweltszene und der unerwarteten Ereignisse. Dabei müssen auch die Systemgrenzen erkannt und bei Problemen gegengesteuert werden. In der momentanen Entwicklungsphase sind folgende Kernfragen zu beantworten:

- Welche funktionale Leistungsfähigkeit müssen automatische Fahrfunktionen aufweisen?
- Wie kann die Vollständigkeit der relevanten Testfälle sichergestellt werden?
- Welche Testfälle können in der Simulation geprüft werden, welche auf der Straße?
- Welche Gütekriterien, Werkzeuge, Methoden und Prozesse sind erforderlich?

Nicht nur der Simulation im Rechner, sondern auch der intensiven Erprobung auf der Straße kommt eine besondere Bedeutung bei. Dabei ist das Zusammenspiel des Menschen mit den automatisierten Fahrzeugfunktionen und dem Umfeld auch eine besondere Herausforderung für die Mess- und Prüftechnik, z. B. Wann und wie schnell übernimmt der Mensch wieder die Fahraufgabe. Aus der Vielzahl der laufenden Projekte sind das Projekt Pegasus und der „Runde Tisch Automatisiertes Fahren" zu erwähnen. Details dazu wurden u. a. auf dem 18. VDA Technischem Kongress im März 2016 in Ludwigsburg vorgetragen.

## 11.5 Qualitätsmanagement

Qualität als Eignung, festgelegte oder vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen, gilt heute ebenso wie Zuverlässigkeit (als Qualität auf Zeit zu interpretieren) als mehr oder weniger selbstverständliches Merkmal moderner Kraftfahrzeuge. Dazu gehören Gebrauchstauglichkeit, Betriebssicherheit, Verarbeitungsqualität, Wartungsarmut und Haltbarkeit.

In den letzten 50 Jahren hat sich das Qualitätsmanagement grundlegend verändert. Das betrifft sowohl die angewandten Methoden und Systeme als auch den Stellenwert der Qualität, die in den Unternehmen heute ein deutlich höheres Niveau als früher erreicht hat. Schrittweise wurde der Qualitätsbegriff aus der stark fertigungsbezogenen Sicht auf alle Aspekte der Fahrzeughersteller und der Zulieferer ausgedehnt; charakteristische Begriffe sind Produkt- und Prozessqualität.

In den ersten Jahrzehnten des Automobilbaues wurde Qualität im wesentlichen „nachgeprüft", nach dem zweiten Weltkrieg schon systematisch „gesteuert" – mit der Devise „Prävention statt Inspektion". Heute heißt ein strategischer und umfassender Ansatz TQM – "Total Quality Management", mit dem Ziel „Nullfehler-Planung", „alles gleich richtig machen", statt nachträglich zu prüfen und nacharbeiten zu müssen. Dies entspricht nicht nur dem Effizienzprinzip, sondern hängt auch mit der hohen Komplexität heutiger Fahrzeuge und der gesamten Wertschöpfungsketten zusammen: So entziehen sich Fehler bei zunehmender Komplexität und bei gleichzeitig abnehmender Auftretenswahrscheinlichkeit nämlich oft einer Endprüfung, da nicht selten weder messtechnische Zugänglichkeiten gegeben sind, noch alle relevanten Betriebszustände in der Endkontrolle erzeugt werden kön-

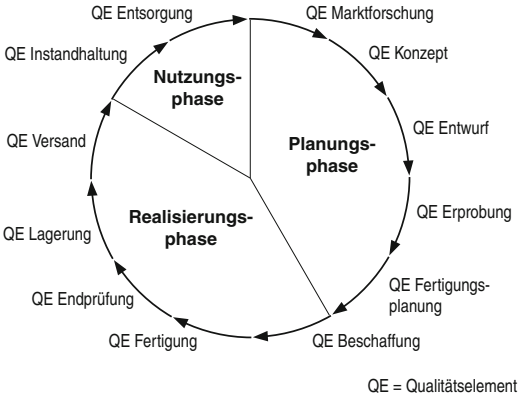



**Abb. 11.76** Qualitätsmanagement über den gesamten Produktlebenszyklus – Qualitätskreis (nach Masing)

nen. Zu aufwändig wären auch Fehlersuche und Beseitigungen am fertigen Produkt. Damit ist ein Qualitätsmanager heute immer mehr ein interner Berater für die Entscheider im Unternehmen.

Wissend, dass man sich dem Ziel der Nullfehlerplanung mit vielfältigen und kontinuierlichen Verbesserungsmaßnahmen nur asymptotisch nähern kann, umfasst TQM integrierend alle Bereiche der Wertschöpfungsketten (Fahrzeughersteller, Zulieferer, Entwicklungspartner, Kundendienst, Recycling, …). Ein klassisches Modell für das Zusammenwirken aller Aktivitäten ist der Qualitätskreis (Abb. 11.76).

Diese Aufgabenstellung sowie die zunehmende Komplexität der Produkte und Prozesse hat schon vor Jahren den VDA veranlasst, alle zugehörigen Punkte der Qualitätsarbeit zusammenzufassen. Inzwischen beschreiben internationale Normen die Anforderungen unternehmensübergreifender Qualitäts-Sicherungssysteme. Über die Produktphasen eines Automobils lässt sich das Qualitätsmanagement in drei Schwerpunktbereiche – Entwicklung, Produktion und Feld – aufteilen. Alle zugehörigen Tätigkeiten können in Form von Prozessketten mit definierten Kunden-Lieferanten-Beziehungen nach ISO TS 16949 – beginnend bei der Festlegung des Lastenheftes – transparent gemacht werden. Enthalten sind alle wichtigen Freigaben – wie Versuchs-, Planungs-, Beschaffungs- und Produktionsfreigaben, sowie alle Vereinbarungen mit Wertschöpfungspartnern für Investitionsgüter, Fertigungs- und Betriebsmittel sowie Dienstleistungen (siehe auch ▶ Abschn. 11.1). Weitere Details sichern die durchgängige Ablaufplanung und Steuerung der Prozesse einschließlich systematischer Problembearbeitungen bei Nichterreichen wichtiger Ziele oder beim Auftreten unerwarteter Hindernisse, so auch bei Prozessänderungen zur Nutzung von Ratio-Potenzialen.

Damit hat sich die Aufgabe der Qualitätssicherung im Produktentstehungsprozess deutlich verändert. Hat früher eine Vielzahl von Mitarbeitern die erwähnten Kontrollfunktionen wahrgenommen, begleitet das Qualitätsmanagement heute als fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses die neuen Fahrzeugmodelle und deren Aggregate. Qualität und Zuverlässigkeit werden also „hineinentwickelt“ und nicht „hineingetestet“. Das beginnt mit der Lastenhefterstellung (bei der auch die Belange von Produktion und Kundendienst spezifiziert werden) und reicht über Styling und Prototypen bis zur Produktion, teilweise mit eigenen Abnahmeversuchen. Für Modellpflegemaßnahmen und Neuentwicklungen werden alle Felderfahrungen systematisch ausgewertet; in großen Konzernen wird zudem die Erfüllung aller Anforderungen markenübergreifend sichergestellt.

Da häufig kleine Abweichungen genügen, Qualität und Zuverlässigkeit eines komplexen technischen Systems drastisch zu reduzieren, manche Fehler nur sporadisch auftreten oder Langzeitqualität nicht immer einfach prüfbar ist, sind im Automobilbau schon seit Jahren systematische Analyse- und entwicklungsunterstützende Verfahren im Einsatz und in Weiterentwicklung (Abb. 11.77). Im Bild enthalten ist das Thema EFQM, eine branchen- und länderübergreifende Plattform mit einem Exzellence-Modell und dem European Excellence Award als internationaler Qualitätspreis.

Schon ein einfach erscheinendes Beispiel, ein Lampenausfall, mag zeigen, wie komplex sich Einflussfaktoren und Verantwortlichkeiten bei der Qualitätssicherung darstellen (Abb. 11.78). So kann eine 5 % höhere Betriebsspannung die Lebensdauer halbieren.

Bei den elektronischen Regelsystemen wurden bisher noch nicht alle Störungen und schleichenden Systemabweichungen frühzeitig genug erkannt.

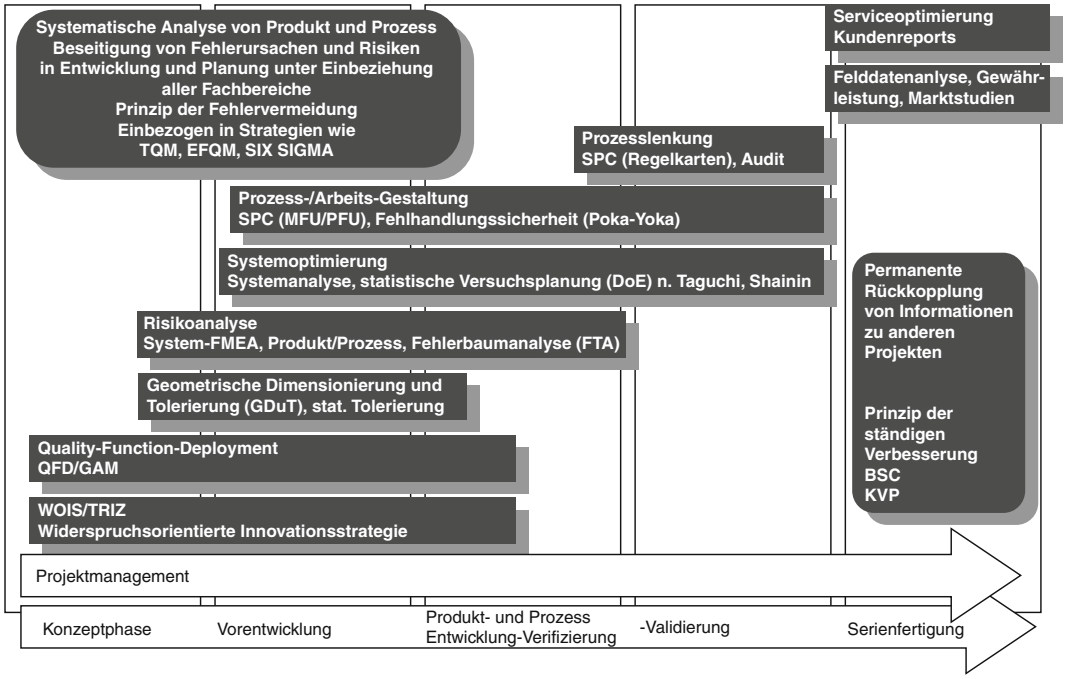



**Abb. 11.77** Methodeneinsatz im Qualitätsmanagement

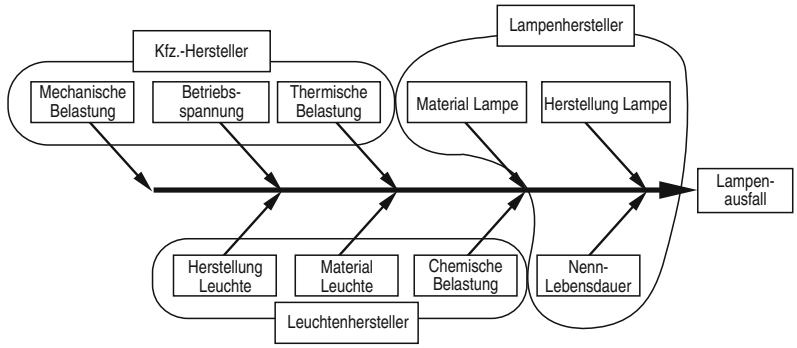



**Abb. 11.78** Einflussfaktoren für Lampenausfälle (nach Huhn)

Inzwischen wurden, vor allem für echtzeitkritische Systeme, neue Standards, Normen und Entwicklungsmethoden sowie erweiterte Prüfkonzepte für Produktion, Diagnose, Wartung, Logistik und Überwachung eingeführt. Zur Sicherung der Softwarequalität dienen Verfahren wie CMMI und SPICE (► Abschn. 8.7). Ein Beispiel laufender Aktivitäten betrifft den Arbeitskreis „Robustness Validation" des ZVEI.

Der hohe Wertschöpfungsanteil der Zulieferer hat den VDA schon frühzeitig veranlasst, das Qualitätsmanagement in der gesamten Lieferkette als gemeinsame Aufgabe aller an dieser Kette Beteiligten zu vereinbaren, mit einer Reihe von Grundsätzen und Vorgehensweisen.

Auch wenn es zur Lösung aller Aufgaben kaum Patentrezepte gibt, kann man in der Praxis dennoch zu guten, ja sehr guten Problemlösungen durch An-

wendung mehrerer Prinzipien kommen. Dazu gehören:

- in produktgestalterischer Hinsicht Vermeidung von Grenzauslegungen, möglichst weitgehender Einsatz robuster und fehlertoleranter Systeme und Komponenten, ausgewogenes Verhältnis von innovativen und bewährten Konzepten und Konstruktionselementen,
- in systemtechnischer Hinsicht umfassende und systematische Berücksichtigung aller relevanten Einflussfaktoren, Anwendung wissenschaftlich begründeter Methoden,
- in marketingbezogener Hinsicht Übererfüllung der Kundenerwartungen,
- in menschlicher Hinsicht die Verankerung des Qualitätsbewusstseins bei allen Führungskräften und Mitarbeitern,
- im Hinblick auf Kundenbetreuungsqualität die Berücksichtigung aller notwendigen Maßnahmen bezüglich Verkauf und Service.

Besonders kritisch muss das „Liegenbleiben" eines Fahrzeugs bewertet werden, so dass dieser Thematik erhebliche Bedeutung zukommt.

Letztlich muss Qualität, neben allen technisch-wissenschaftlichen Kriterien, für den Kunden durch seine Sinne erfaßbar sein: Qualität muss man sehen, spüren, riechen, hören (bzw. nicht hören), … können, womit Teilbereiche, wie Designqualität, Wertigkeit, Anmutung, Verarbeitungs- oder Akustik-Qualität, insgesamt „Sich wohl fühlen", enthalten sind. Ähnlich wie in anderen Lebensbereichen erwartet der Kunde von Modell zu Modell einen ständigen Qualitätsfortschritt. Wo diese Erwartung enttäuscht wird, verliert eine Marke, wie mehrere Beispiele zeigen, sehr schnell Marktanteile, welche dann nur schwer zurückerobert werden können. Das erfordert nicht zuletzt eine hohe Güte der Kundenbeziehung, die sowohl durch die Fahrzeughersteller als auch durch die Handelsorganisationen sicherzustellen sind, insbesondere durch: Perfekten Werkstatt-Service, schnelle Hilfe für den Kunden wenn nötig, angemessene Garantie und Kulanzleistungen.

Überlegene Qualität muss nicht zwangsläufig mit einem Kostenanstieg verbunden sein. Daraus folgt die Notwendigkeit, Kosten und Nutzen von Qualität (bzw. Beseitigung von Nichtqualität) monetär zu bewerten.

Es ist ein Kennzeichen modernen Automobilbaues, dass spezifische Qualitäts-Verbesserungen durch Zunahme an Bauteilen und Komplexitäten teilweise kompensiert werden. Zusätzlich steigt auch der Umfang an Software, bei der die Entwicklung von Qualitäts- und Zuverlässigkeits-Methoden noch im Fluss ist, immer weiter an. Und da auch überall Menschen am Werk sind, muss leider akzeptiert werden, dass nicht immer alles planmäßig abläuft …

## 11.6 Betrieb und Instandhaltung von Kraftfahrzeugen

» „Wenn einer meiner Wagen versagt, weiß ich, dass ich daran Schuld habe."

Henry Ford

» „Ein Volkswagen darf nicht mit komplizierten Einrichtungen versehen sein, die eine erhöhte Wartung erheischen, sondern vielmehr ein Fahrzeug mit möglichst narrensicheren Einrichtungen, die jede Wartung auf ein Minimum herabdrücken."

Ferdinand Porsche

### 11.6.1 Einführung

Kraftfahrzeuge sind i. A. so zu konstruieren, dass sie während der vorgesehenen Lebensdauer mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand instand gehalten werden können. Neben der Erhaltung ihrer Funktion, sind Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit sicherzustellen. Der Konstrukteur bestimmt in hohem Maße mit seiner Auslegung den späteren Instandhaltungsaufwand und damit die Lebenslaufkosten (◘ Abb. 11.79). Diese werden beeinflusst durch Konstruktions-, Fertigungs-, Montage- und Betriebsfehler sowie durch Unfall- oder Transportschäden und durch Einflüsse beim Betreiben [254–257].

Ein Mehrfaches der Energiemenge für die Herstellung eines durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw

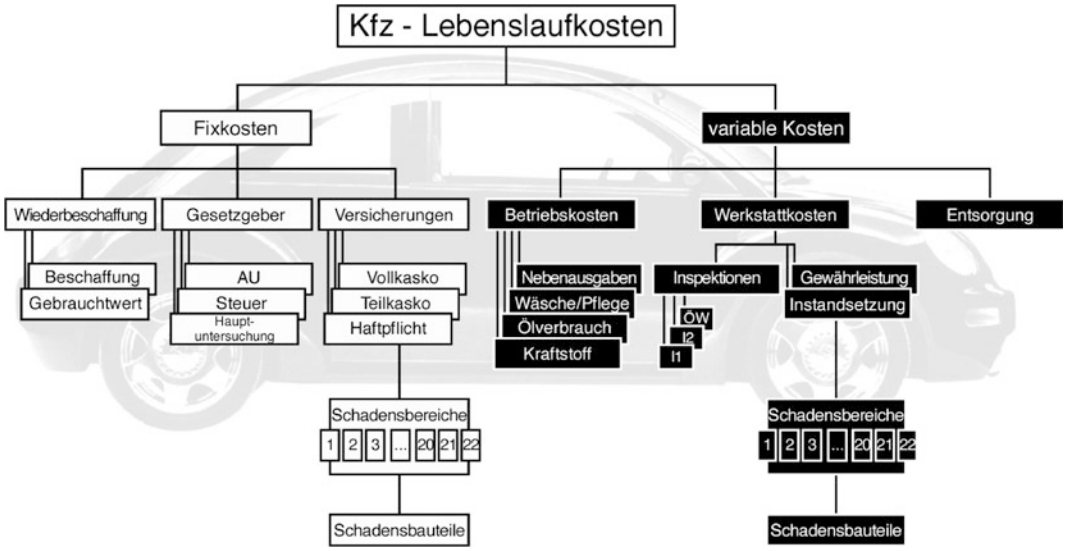



**Abb. 11.79** Lebenslaufkosten für Kfz

wird für dessen Nutzung und Verwertung unter der Voraussetzung einer sachgemäßen Instandhaltung benötigt. Dabei bedeutet sachgemäße Instandhaltung die Anwendung der modernsten Werkzeuge materieller und immaterieller Art bei der Projektierung, Planung, Ausführung und Auswertung der Instandhaltungsprozesse.

### 11.6.1.1 Definitionen

Unter Instandhaltung sind nach der deutschen Norm DIN 31051 [254] auf der Grundlage der europäischen Norm EN 13306 [258] die Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung mit folgenden Definitionen zu verstehen:

**Instandhaltung** – Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.

**Wartung** – Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrates.

**Inspektion** – Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung.

**Instandsetzung** – Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand mit Ausnahme von Verbesserungen.

**Verbesserung** – Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern.

Der Begriff Betrachtungseinheit gilt als Sammelbegriff für jedes Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem (Aggregat), jede Funktionseinheit, jedes Betriebsmittel oder System, das für sich allein betrachtet werden kann. Abnutzung im technisch-physikalischem Sinne ist Abbau des Abnutzungsvorrates durch Reibung (Verschleiß), Korrosion, Ermüdung, Alterung, Kavitation, Bruch usw. [254]. Der Abnutzungsvorrat, der meist Vorrat an unbeschädigtem Material darstellt, z. B. beim Reifen die Profilhöhe, wird durch Nutzung – beim Fahrzeug zum Erzielen einer Fahrstrecke – bis zum Erreichen der Abnutzungsgrenze gemäß Abb. 11.80 abgebaut. Nach Überschreiten der Abnutzungsgrenze, beim Reifen z. B. die Profilhöhe von 1,6 mm, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall unzulässig groß, so dass eine vorbeugende Instandsetzung erfolgen sollte. Diese verursacht zumeist geringere Kosten als eine nach Ausfall unbedingt notwendi-

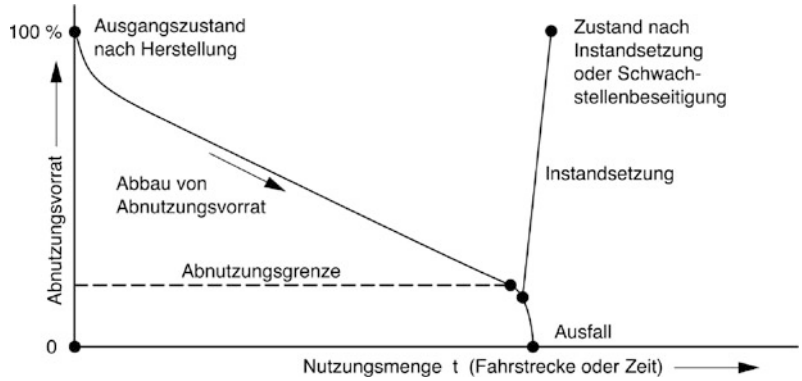



**Abb. 11.80** Abhängigkeit des Abnutzungsvorrates von der Nutzungsmenge (schematische Darstellung nach [254])

ge wiederherstellende Instandsetzung, die auch als Reparatur bezeichnet werden kann.

Im Gegensatz zur gängigen Praxis in der Kraftfahrzeugtechnik enthält der Begriff Inspektion keine Wartungsmaßnahmen, wie z. B. das Wechseln von Öl und anderen Betriebsflüssigkeiten, sowie keine Instandsetzungsmaßnahmen, wie das vorbeugende Wechseln von Bremsbelägen oder Zahnriemen.

#### 11.6.1.2 Entwicklungstendenzen

Instandhaltungs- und Versicherungskosten sowie Umweltverträglichkeit und Verwertung stehen immer stärker im Mittelpunkt des Interesses des Kfz-Kunden und viele orientieren sich beim Kauf an diesen Kriterien. Besonders Firmen, Behörden, Leasing- und Vermietungsgesellschaften richten ihren Fuhrpark an wirtschaftlichen Aspekten, speziell den Lebenslaufkosten aus.

Frühzeitiges Aufnehmen der Kfz-Instandhaltbarkeitsanforderungen in den Produktentwicklungsprozess und Beteiligen des Kundendienstes bewahren vor gravierenden Kosten in der Nutzungsphase [256]. Instandhaltbarkeit ist als ein Entwicklungsziel zu etablieren. Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten sind Nachweisverfahren und -zeitpunkte für die Instandhaltbarkeit zu definieren und in der Folge konsequent zu berücksichtigen.

Eine abgestimmte Instandhaltungsstrategie, das dazugehörige Konzept, sowie der wirtschaftlich zumutbare Instandhaltungsaufwand sind zu berücksichtigen und beeinflussen das Kundenverhalten in starkem Maße.

### 11.6.2 Instandhaltbarkeit und Zuverlässigkeit

Instandhaltungsprozesse stellen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen oben genannten Bedingungen stochastische Prozesse dar, deren Beherrschung in den unmittelbaren Aufgabenbereich des Herstellers fällt. Neben der Instandhaltbarkeit wird von einem mobilen Erzeugnis wie dem Kraftfahrzeug Zuverlässigkeit erwartet, worunter nach der DIN EN 13306 [258] die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit verstanden wird, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen. Zuverlässigkeit stellt somit eine imaginäre Teileigenschaft der Qualität dar. Andererseits ist Zuverlässigkeit als Ausfallfreiheit zu interpretieren, die unter Zugrundelegung von Gesetzmäßigkeiten der Stochastik der Ausfälle analytisch ermittelt werden kann. Dabei ist zwischen der Prüfzuverlässigkeit, die sich im Produktentstehungsprozess durch eigens zu diesem Zweck durchgeführte Untersuchungen ergibt, und der Betriebszuverlässigkeit zu unterscheiden. Die für die Berechnung der Instandsetzungsprozesse letztendlich maßgebende Betriebszuverlässigkeit basiert auf der stochastischen Auswertung der Ausfälle in der Nutzungsphase, was eine besonders sorgsame Datenerfassung und -rückmeldung erfordert. Wegen fehlender Unterscheidungsmerkmale wird dabei als Ausfall das Wechseln einer Betrachtungseinheit sowohl bei wiederherstellender als auch bei vorbeugender Instandsetzung betrachtet.

#### 11.6.2.1 Zuverlässigkeitskenngrößen

Eine traditionell verwendete Kenngröße zur Beschreibung der Zuverlässigkeit ist die Ausfallrate, die statistisch nach Gl. (11.1) den Quotienten der in einem Intervall $i$ ausgefallenen Betrachtungseinheiten $\Delta r_i$ und den zu Beginn des Intervalls funktionsfähigen Betrachtungseinheiten $n(t_i)$, bezogen auf die Intervallbreite $\Delta t$ angibt:

$$\lambda(t_i) = \frac{\Delta r_i}{n(t_i) \cdot \Delta t} \,. \tag{11.1}$$

Darin bedeuten:

$\lambda(t_i)$ – Ausfallrate in NE-1 (NE: Nutzungseinheiten in km oder in einer Zeiteinheit, z. B. h, a),

$\Delta t$ – Nutzungseinheiten-Intervall,

$\Delta r_i$ – Ausfälle im Intervall $i$,

$n(t_i)$ – zu Beginn des Intervalls $i$, funktionsfähige Betrachtungseinheiten (BE) einer Stichprobe $n$.

Bei einer Stichprobe, die über eine Beobachtungsdauer von $k$ Intervallen vollständig ausfällt (vollständige Stichprobe) gilt:

$$n = \Delta r_1 + \Delta r_2 + \ldots + \Delta r_k \,. \tag{11.2}$$

Damit lassen sich weitere statistische Kenngrößen angeben:

- Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$:

$$f(t_i) = \frac{\Delta r_i}{n \cdot \Delta t} \tag{11.3}$$

- Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$:

$$F(t_i) = \int_0^{t_i} f(t)\,\mathrm{d}t = \frac{r(t_i)}{n} \tag{11.4}$$

wobei gilt:

$$r(t_i) = \sum_{j=1}^{i} \Delta r_j \tag{11.5}$$

$r(t_i)$ –bis zum Zeitpunkt $t_i$ ausgefallene BE,

- Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$:

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = \frac{n(t_i)}{n} \tag{11.6}$$

wobei gilt:

$$n = r(t_i) + n(t_i) \,. \tag{11.7}$$

#### 11.6.2.2 Weibullverteilung

Die Verteilung der statistisch ermittelten Ausfälle folgt einem bestimmten mathematischem Gesetz, das genau genommen durch einen Anpassungstest jeweils aus einer großen Anzahl von anwendbaren Gesetzen heraus zu finden ist. Es hat sich jedoch erwiesen, dass im Maschinenbau bei genügender Übereinstimmung mit nur einem Gesetz, der Weibullverteilung, gearbeitet werden kann. Dies gilt ebenso für elektrische und elektronische Bauteile die in Erzeugnissen des Maschinenbaus genutzt werden. Für die Kraftfahrzeugtechnik wurde dafür vom VDA eine praxisnahe Anleitung erarbeitet [259]. Weitere interessante Möglichkeiten mit Kfz-spezifischen Lösungen werden in [262] beschrieben.

Die Weibullverteilung kann zwei oder drei Parameter aufweisen. In den meisten Fällen genügt die Verwendung der zweiparametrigen Form:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-(t/T)^b\right) \tag{11.8}$$

$b$ – Formparameter, weniger gebräuchlich: Steilheit,

$T$ – charakteristische Lebensdauer in NE (km, Stunden, Jahre), weniger gebräuchlich: Maßstabparameter.

Bei Verwendung der Weibullverteilung ist auf folgende Vorteile zu verweisen:

- Durch unkomplizierte mathematische Operationen lässt sich die Verteilung leicht linearisieren, so dass ein einfaches Verteilungsnetz nach Abb. 11.81 aufgebaut werden kann, mit dessen Hilfe die Parameter grafisch ermittelbar sind [260].
- Die Weibullverteilung ermöglicht die Berechnung der Parameter bereits bei Vorhandensein von minimal zwei Ausfällen unabhängig von

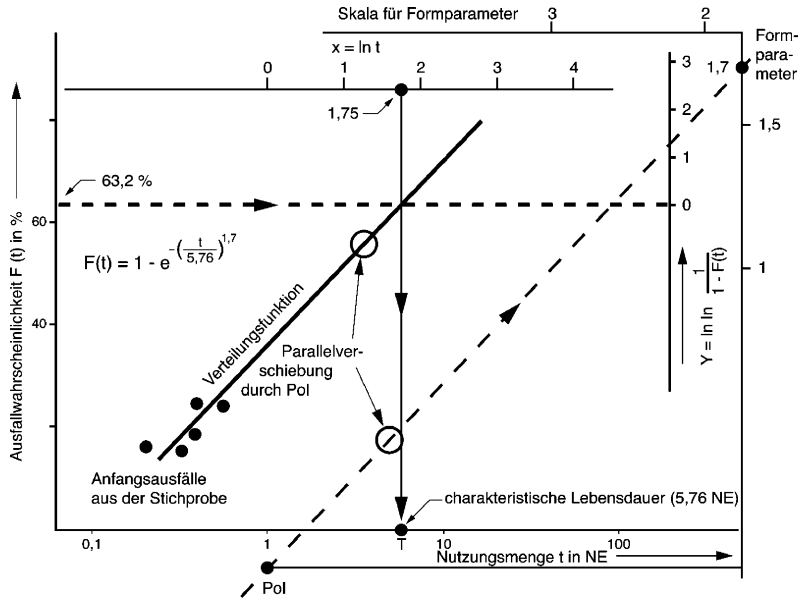



**Abb. 11.81** Verteilungsnetz nach Weibull

der Größe der Stichprobe. Somit können problemlos sogenannte unvollständige Stichproben ausgewertet werden, was überhaupt Voraussetzung zur Erfüllung des eigentlichen Zwecks von Zuverlässigkeitsuntersuchungen ist, konzeptionelle Angaben für das zu erwartende Ausfallverhalten als Grundlage für strategische Planungen zu liefern.

- Die charakteristische Lebensdauer ist als ein Maß für die mittlere Nutzungsmenge in Kilometern oder Zeiteinheiten bei Formparametern größer als 1 zu betrachten, wobei gilt:

$$\bar{t} = 0,9 \cdot T \tag{11.9}$$

$\bar{t}$ –mittlere Nutzungsmenge in NE (km, h oder a).

- Der Formparameter $b$ charakterisiert die Ausfallphase, was in Abb. 11.82 anhand der sogenannten Badewannenkurve für die Ausfallrate verdeutlicht wird. Für die Ausfallrate gilt dabei folgende Gleichung basierend auf der Weibullverteilung:

$$\lambda(t) = \frac{b}{T}\left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}. \tag{11.10}$$

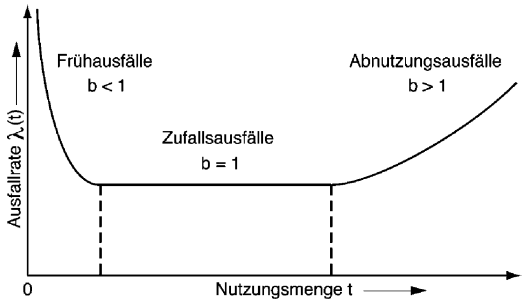



**Abb. 11.82** Verlauf der Ausfallrate über der Nutzungsmenge

Frühausfälle weisen auf gravierende konstruktive oder Fertigungsfehler hin, so dass Änderungen zwingend erforderlich sind, die ermittelten Kenngrößen also nicht als Planungsgrundlage dienen können.
Zufallsausfälle weisen eine konstante Ausfallrate auf und sind demnach nicht abhängig von der Nutzungsmenge, so dass vorbeugende Maßnahmen der Instandhaltung wirkungslos bleiben, aber konstruktive Maßnahmen greifen.

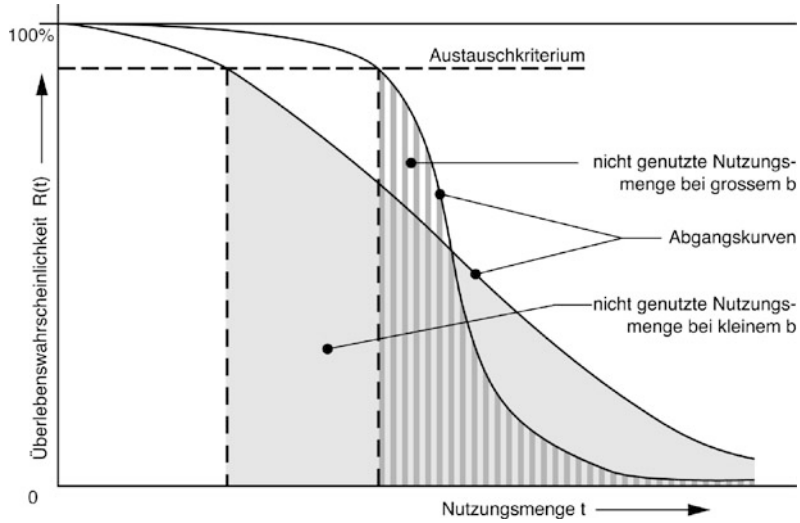



**Abb. 11.83** Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit über der Nutzungsmenge

- Bei Formparametern größer als 1 ist es anhand der Abgangskurve (Abb. 11.83) möglich, den Verlust an Restnutzungsmenge abzuschätzen, der im Falle vorbeugender Instandsetzung bei Unterschreitung einer bestimmten vorgegebenen Überlebenswahrscheinlichkeit als Austauschkriterium realisiert wird. Die Gesamtfläche unter der Abgangskurve stellt die mittlere Nutzungsmenge dar:

$$t = \int_0^\infty R(t)\,\mathrm{d}t\,. \tag{11.11}$$

### 11.6.2.3 Anwendung von Zuverlässigkeitskenngrößen

Auf Ausfällen beruhende Zuverlässigkeitskenngrößen können u. a. angewendet werden für folgende Berechnungen:

- Ersatzteilbedarf über die Ermittlung der Erneuerungsfunktion [261],
- Lagersicherheit in unterschiedlichen Ersatzteillagern,
- Aufwand an Material und Arbeitszeit für die Instandsetzung von Fahrzeugen und Baugruppen in Werkstätten oder von Austauschteilen in spezialisierten Instandsetzungsbetrieben,
- optimale Austauschzeitpunkte von Betrachtungseinheiten und deren gegenseitiger Abstimmung,
- Systemzuverlässigkeit bei Reihen- oder Parallelschaltung von Baugruppen einschließlich der Abschätzung der Wirksamkeit von konstruktiv vorgesehenen Redundanzen.

Insbesondere für die Planung des Fahrzeugeinsatzes ist die Kenngröße Verfügbarkeit interessant, die aus einer Kombination von Instandhaltbarkeit und Zuverlässigkeit wie folgt definiert ist [258]:

» Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllen kann, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind.

Allgemein lautet die Gleichung der Verfügbarkeit $A$:

$$A = T/(T + T_\mathrm{V})\,. \tag{11.12}$$

$T$ – ausfallfreie mittlere Nutzungsmenge (MTBF) in h,
**MTBF** – **M**ean **T**ime **B**etween **F**ailures,

$T_V$ – mittlere Verlustzeit, Werkstattaufenthalts- oder Instandsetzungszeit (MDT) in h,

**MDT** – **M**aintenance **D**own **T**ime.

Da bei Kraftfahrzeugen statt der Betriebszeit vorzugsweise die Fahrstrecke registriert wird, ist es angebracht, einen sogenannten Verfügbarkeitsindex zu berechnen, der die mit einer Instandsetzungs- oder Werkstattaufenthaltsstunde zurückgelegte Fahrstrecke angeben kann:

$$I_A = s / T_V \,. \tag{11.13}$$

$I_A$ – Verfügbarkeitsindex in km pro Instandsetzungsstunde,

$s$ – mittlere ausfallfreie Fahrstrecke in km.

## 11.6.3 Lebenslaufkosten

Laut Statistischem Bundesamt sind die Ausgaben für Verkehr und Nachrichtenübermittlung der zweitwichtigste Ausgabenbereich privater Haushalte in Deutschland. 2004 betrug ihr Anteil an privaten Konsumausgaben 16,9 %, was Aufwendungen von ca. 440 € pro Haushalt und Monat im Bundesdurchschnitt entspricht [285]. Der überwiegende Anteil dieser Kosten betrifft die Haltung privater Fahrzeuge und damit die Kosten des Fahrzeugunterhaltes vom Kauf über den Betrieb bis hin zur Entsorgung. Letztere wird nach dem Altfahrzeuggesetz für Fahrzeuge, die nach dem 01.07.2002 produziert wurden, durch den Hersteller geregelt [286]. Mit Wirkung ab dem 1.1.2007 müssen die Hersteller alle Fahrzeuge ihrer Marke kostenlos zurücknehmen.

Abb. 11.79 zeigt, nach welchen Kriterien Fahrzeuge angeschafft werden. Die Kriterien Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit, Kraftstoffverbrauch und Preiswürdigkeit stehen als Teilaspekte der Unterhaltskosten in vorderster Reihe. Der Aufwand, der für die Instandhaltbarkeit erbracht wird, geht ebenso wie der Aufwand für Konstruktion, Versuch, Entwicklung und Produktion in den Fahrzeugpreis ein. Aus Sicht des Kunden sind deswegen die folgenden Kosten zu optimieren (Prozentangaben gelten für Golf IV):

Fixkosten (Zeit abhängig)
- Beschaffungskosten (in der Regel die Differenz zwischen Neupreis und Zeitwert): 38,0 %,
- Gesetzgeber abhängige Kosten (Haupt- und Abgasuntersuchung, Kfz-Steuer): 3,0 %,
- Versicherungskosten (Haftpflicht, Voll- oder Teilkasko): 19,5 %

Variable Kosten (Zeit und Fahrstrecken abhängig):
- Betriebskosten, wie Kraftstoffe, Öle und Pflege: 30,0 %,
- Werkstattkosten für Inspektionen und Instandsetzung: 9,5 %

Gewährleistungskosten sind im Fahrzeugverkaufspreis enthalten, sie werden mit den ausführenden Werkstätten vom Hersteller abgerechnet (Abb. 11.79). Bei vollständiger Betrachtung müssen auch die Kosten für den Ausfall (z. B. Ersatzfahrzeug) berücksichtigt werden.

### 11.6.3.1 Anschaffungskosten

Einen sehr großen Einfluss auf die Lebenslaufkosten stellen die Vorgänge Kaufen und Verkaufen dar. Hierzu müssen unterschieden werden:
- Anschaffungskosten als Differenz zwischen dem Neupreis und dem Zeitwert des Fahrzeuges.
- Der Zeitwert ist der Wert, der i. d. R. bei einer Veräußerung des Fahrzeuges erzielt wird oder zu erzielen wäre, und ist somit dem Händlereinkaufswert gleich zu setzen. Positiven Einfluss darauf haben geringe Kosten, speziell bei Versicherung und Werkstatt [287].
- Als Grundlage von Schadensbemessungen bei Zerstörung oder Verlust eines Fahrzeuges in der Haftpflichtversicherung, der Teilkaskoversicherung und der Vollkaskoversicherung gilt der Wiederbeschaffungswert, der dem Preis entspricht, der beim Kauf eines gleichwertigen Fahrzeuges an einen seriösen Händler zu zahlen wäre.

Der Wiederbeschaffungswert ist dem Händlerverkaufswert gleich zu setzen [287].

- Nach der Rechtsprechung des BGH ist der Restwert der Betrag, den der Geschädigte im Rahmen der Ersatzbeschaffung nach § 249 Satz 2 BGB bei einem seriösen Gebrauchtwagenhändler im örtlichen Bereich oder bei dem Kraftfahrzeughändler seines Vertrauens bei Inzahlunggabe des beschädigten Fahrzeuges noch erzielen könnte [263].

#### 11.6.3.2 Gesetzgeber abhängige Kosten

Kosten entstehen durch die gesetzlich vorgeschriebenen Untersuchungen, die Hauptuntersuchung (§ 29, StVZO) und die Abgasuntersuchung (§ 47a, StVZO), sowie durch die jährlich zu entrichtende Kraftfahrzeugsteuer, die in der Vergangenheit oft als umweltpolitisches Steuerungsinstrument eingesetzt wurde.

#### 11.6.3.3 Versicherungskosten

Versicherungskosten setzen sich zusammen aus Prämienzahlungen des Kunden für die obligatorische Haftpflicht und die optionale Teil- oder Vollkaskoversicherung. Während die Haftpflichtversicherung Schäden beim Unfallpartner abdeckt und das eigene Kfz kaum betrifft, werden mit der Teil- und Vollkaskoversicherung Ereignisse am eigenen Kfz, also Unfall-, Glasbruch- und Brandschäden sowie Diebstähle als Teil- oder Totalentwendungen abgesichert. Fahrzeugschadenskosten stellen in den meisten Fällen den Hauptanteil der bei einem Schaden anfallenden Kosten dar. In vielen Ländern wie z. B. Deutschland, Großbritannien, Schweden und USA beeinflussen Instandsetzungsaufwand und Diebstahlschutz zunehmend die Versicherungsprämien. Ist ein Fahrzeug wegen eines Unfalles nicht gebrauchsfähig und wird auf das Anmieten eines Fahrzeuges verzichtet, so kann eine sogenannte Nutzungsausfallentschädigung beansprucht werden. Dies gilt auch für die Standzeit in der Werkstatt während der Instandsetzung. Abhängig vom Fahrzeugtyp erfolgt eine Zuordnung zu Gruppen. Die Beträge reichen in elf Gruppen von 27 €/Tag bis 99 €/Tag bei Pkw und in neun Gruppen von 10 €/Tag bis 66 €/Tag bei Krafträdern [265].

#### 11.6.3.4 Betriebskosten

Betriebskosten setzen sich im Wesentlichen aus den Kosten für die Pflege sowie für Kraft- und Schmierstoffe zusammen. Deren Verbrauch war und ist bei der Kfz-Entwicklung stets ein Merkmal, das mit besonderer Aufmerksamkeit der Ingenieure beachtet wird (◘ Abb. 2.1). Mit einer Bewertung des Energieverbrauchs von 3300 Fahrzeugtypen und der Einteilung in sieben Verbrauchsklassen von „A“ für sparsame bis „G“ für verschwenderische Fahrzeuge bietet z. B. der ADAC eine Entscheidungshilfe für den Autokauf unter wirtschaftlichen Aspekten [264].

#### 11.6.3.5 Werkstattkosten

Bei Gewährleistungs- und Kulanzfällen werden die Kosten vom Hersteller getragen, in anderen Fällen vom Kunden selbst oder von Versicherungen. In jedem Falle entstehen dem Kunden Kosten durch Wartungen und Inspektionen sowie durch Diagnose- und Instandsetzungsarbeiten, die als Einzelereignisse bei Baugruppen und Bauteilen planmäßig oder außerplanmäßig auftreten können.

Wartungen und Inspektionen werden nach einem vom Fahrzeughersteller festgelegten Plan in Intervallen durchgeführt, wobei alle von normaler Abnutzung betroffenen Betrachtungseinheiten einbezogen und insbesondere Schwachstellen früh erkannt werden. Um den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden, bemühen sich die Hersteller, die Wartungsintervalle zu verlängern. Da die tatsächlichen Wartungsintervalle von den spezifischen Einsatzbedingungen der Fahrzeuge abhängen, werden die Intervalle zunehmend flexibel gestaltet. Dazu ist die Einführung von Sensoren und elektronischen Auswerteeinheiten erforderlich, die eine Erfassung der Abnutzungszustände von Bauteilen und somit eine rechnerische Ermittlung der Restnutzungsmengen bis zum Erreichen der Abnutzungsgrenzen ermöglichen.

Ein ausschlaggebendes Kriterium ist hierbei der Zustand des Motoröls. Aktuelle Ölwechsel liegen zwischen 10.000 und max. 30.000 km bei Otto- bzw. 7500 bis max. 50.000 km bei Dieselmotoren. Andere Wartungsmaßnahmen werden im allgemeinen ei-

nem Vielfachen des Ölwechselintervalls angepasst. Nicht nur lange Intervalle, sondern auch reduzierte Umfänge an Wartungen und Inspektionen senken deren Kosten und erhöhen die Fahrzeugverfügbarkeit.

Die Anwendung von elektronischen Systemen, die mechanische ergänzen oder gar ersetzen verursacht in Form von größeren Diagnosekosten jedoch auch Nachteile. Auch wenn die Eigenschaft, einzelne elektronische Systeme variabel an die Anforderungen anpassen zu können, ein großer Vorteil gegenüber herkömmlichen Systemen ist, bedeuten zusätzliche elektronische Bauteile immer größere Komplexität, größere Unübersichtlichkeit und größere Störanfälligkeit.

Das stellt eine besondere Herausforderung für das Werkstattpersonal, wie auch für den Hersteller dar. Damit die sichere Funktion der elektronischen Systeme gewährleistet werden kann, sind mit der implementierten Software auch Funktionen und Plausibilitäten zu prüfen. Erkannte Fehler, aber auch bereits Abweichungen von Standardwerten und andere Statusinformationen werden applikationsabhängig in Steuergeräten gespeichert und gezielt ausgewertet. Auch wahlweise vorgenommene Einstellungen wie ein abgeschalteter Beifahrerairbag und bewusst vom System abgeschaltete Funktionen müssen in den Steuergeräten abgelegt und über die Diagnoseschnittstelle in der Werkstatt ausgelesen werden können. So kann die Abschaltung von Verbrauchern zum Schutz der Batterie einen oder mehrere Fehler im Fahrzeug zur Ursache haben, aber auch durch lange Standzeit oder andere Umstände hervorgerufen worden sein. Die Informationsauswertung wird effizient mittels geführter Off-Board-Diagnose unterstützt, wozu Geräte und Software gehören, die Wissen des Herstellers in geeigneter Form dem Mechaniker zur Verfügung stellen. Oftmals kann ein auftretendes Problem auch durch neu entwickelte Software-Updates im Fahrzeug korrigiert werden, die On-Line zur Verfügung gestellt werden, ein u. U. üblicher Austausch von Fahrzeugkomponenten mit entsprechend hohen Kosten kann dann entfallen.

Der Mechaniker in der Werkstatt soll alle Instandhaltungsmaßnahmen unabhängig vom Fahrzeugtyp durchführen können, was angesichts der rasant fortschreitenden Fahrzeugentwicklung einen hohen Schulungsaufwand erfordert. Die Arbeitsqualität der Werkstätten ist in der Öffentlichkeit mehr und mehr zu einem Messkriterium des Fahrzeugherstellers geworden. Durch die vielerorts vorhandene Markenbindung der Werkstätten verbindet der Kunde die Leistungsfähigkeit des Betriebes auch mit der Leistungsfähigkeit des Fahrzeugherstellers und der Qualität seiner Produkte.

Die auftretenden Lohnkosten werden nach betriebswirtschaftlichen Regeln berechnet, wobei zwischen Deckungsbeitrags- und Vollkostenrechnung unterschieden wird [266, 267]. In beiden Fällen müssen die ermittelten Beträge die im Autohaus entstehenden Kosten decken. Diese Kosten sind: Arbeitslohn der produktiven und Gehälter der unproduktiven Kräfte, freiwillige und gesetzliche Sozialleistungen, Steuern, Investitionen und Abschreibungen, Verwaltungskosten und Gewinnanteil.

Die Kostenstruktur der Werkstätten kann marktspezifisch sehr stark variieren. In europäischen Märkten stellt zum Beispiel der Faktor Lohn ein größeres Gewicht dar als in anderen Kontinenten, in denen dann wiederum Ersatzteilpreise und Investitionskosten für Werkstattequipement den größeren Kostenpunkt darstellen.

### 11.6.4 Organisation des Service-Prozesses in den Werkstätten

Die Erledigung von Kundenaufträgen ist immer auch mit der Gestaltung und Optimierung von Prozessen im Autohaus verbunden. Das Zusammenspiel der einzelnen Abläufe wird im Qualitätsmanagement des Autohauses als Service-Prozess bezeichnet. Optimierte Arbeitsabläufe im Service-Prozess sind auf eine effektive Erledigung der Kundenaufträge und damit auf höchste Kundenzufriedenheit und Wirtschaftlichkeit des eigenen Betriebs ausgerichtet. Unterstützend wirken speziell entwickelte Systemlösungen, die vernetzt einen vollständigen Informationsfluss innerhalb eines Autohauses gewährleisten.

Für besonders anspruchsvolle Aufträge bzw. unvorhersehbare Abläufe hat z. B. Volkswagen landesspezifische Kompetenzzentren aufgebaut, mit dem eine optimale Unterstützung der Instandsetzung in

kürzester Zeit gewährleistet wird. In diesem Fall wird das Autohaus nach einer technischen Anfrage an das Technische Service Center (TSC) mit Online Beratung, Telediagnose, Wissensdatenbanken und gegebenenfalls auch durch Analysen im Autohaus unterstützt [283].

Um den reibungslosen Ablauf von der Terminvereinbarung bis zur Nachbearbeitung durch den Telefonreport auf zu zeigen, ist eine schematische Darstellung des Datenflusses im Autohaus notwendig:

- Terminvereinbarung
  Qualifiziertes Personal mit kommunikativen Fähigkeiten nimmt die Kunden- und Fahrzeugdaten entgegen und gibt diese in das Händlersystem ein. Gezieltes Hinterfragen von Beanstandungen hinsichtlich der Randbedingungen, bei denen die Beanstandung auftritt, sichert die qualifizierte Vorbereitung auf die spätere Fahrzeugannahme und die Leistungserstellung.
- Terminvorbereitung
  Der Auftrag wird nun eröffnet, wobei die Daten geprüft und erforderliche Hintergrundinformationen und Ersatzteile zu vorliegenden Beanstandungen beschafft werden. Die Planung der notwendigen Personal- und Werkstattkapazität kann damit frühzeitig und fahrzeugspezifisch erfolgen.
- Fahrzeugannahme
  Bei der Fahrzeugannahme durch den gut vorbereiteten Service-Berater wird mit dem Kunden der Zustand des Fahrzeuges sowie der Umfang der Instandhaltungsmaßnahme abgestimmt und präzisiert.
- Leistungserstellung
  Die exakten Vorarbeiten ermöglichen eine zügige und zuverlässige Erledigung des Auftrages. Die Einhaltung aller Vereinbarungen und die Information bei Auftragserweiterung sichern Kundenzufriedenheit.
- Qualitätskontrolle
  Eine gewissenhafte Qualitätskontrolle verhindert kostenintensive Nacharbeit. Damit werden für den Kunden besonders ärgerliche Reklamationen vermieden, es wird Qualitätsarbeit sichergestellt.
- Fahrzeugrückgabe/Abrechnung
  Eine freundliche und ausführliche Erläuterung der durchgeführten Arbeiten bei der Fahrzeugrückgabe fördert das Vertrauen zum Autohaus.
- Nachbearbeitung
  Der Telefonanruf nach dem Werkstattbesuch zeigt dem Kunden Engagement und Interesse sowie stetiges Streben nach Verbesserung. Schwachstellen im Service und zusätzliche Kundenwünsche lassen sich so gut erkennen.

## 11.6.5 Instandhaltungsgerechte Konstruktion

### 11.6.5.1 Ziele und Anforderungen zur Instandhaltbarkeit

Die Eigenschaften instandhaltbar und werkstattgerecht werden bei der Gestaltung und Konstruktion im Produktentstehungsprozess festgelegt. Deswegen muss neben anderen Eigenschaften dieses Konstruktionsziel in allen Entwicklungs- und Konstruktionsphasen gleichberechtigt berücksichtigt werden. Die Wege zu instandhaltungsgerechten Fahrzeugen führen einerseits über instandhaltungsarme Bauteile und Baugruppen hin zur Zuverlässigkeit sowie andererseits über instandhaltungsfreundliche Bauteile und Baugruppen hin zur Instandhaltbarkeit. In der Phase der Produktentwicklung bildet das Instandhaltungskonzept die Grundlage für die instandhaltungsgerechte Konstruktion von Fahrzeugen. Dabei werden die Ziele verfolgt, die Zuverlässigkeit zu optimieren, den Aufwand für die Instandhaltung zu minimieren und die spezifischen Rahmenbedingungen der Instandhaltung, wie Ausrüstung der Werkstätten mit Sonderwerkzeugen, optimal zu berücksichtigen (◘ Abb. 11.84) [269].

Konkrete Ziele für instandhaltungs- und werkstattgerechte Kraftfahrzeuge leiten sich aus den Kosten des Kfz im Gebrauch beim Kunden ab. Werkstattkosten entstehen durch Einzelereignisse, die bei Baugruppen und Bauteilen planmäßig oder außerplanmäßig auftreten. Die Kenntnis über die durchschnittlichen Kosten von Instandhaltungs-

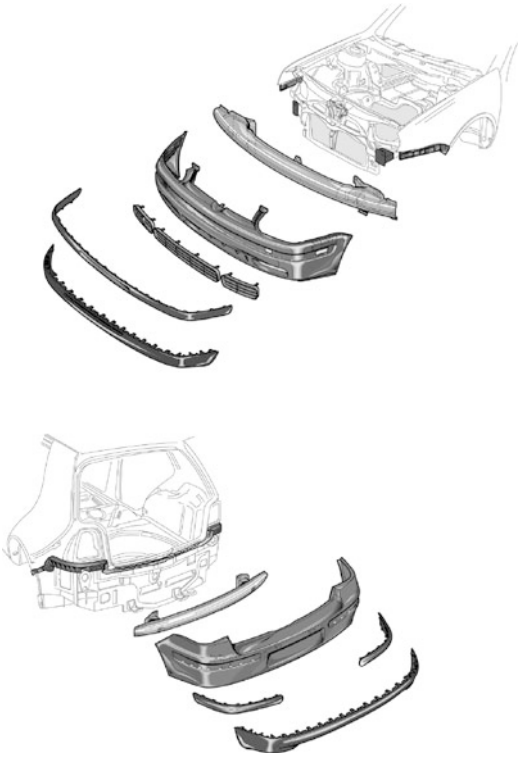


**Abb. 11.84** Geschraubte Teile an Front und Heck des Golf

maßnahmen und über deren Häufigkeit lassen konstruktive Möglichkeiten zur Optimierung zu. Um Ziele bzw. Anforderungen zu definieren, sind die beeinflussbaren Werkstattkosten möglichst einzeln den Baugruppen und Bauteilen des Kfz zuzuordnen. Damit kann der Konstrukteur im Produktentstehungsprozess diese Ziele und Anforderungen bei der Planung, den Entwürfen, der Gestaltung und Optimierung berücksichtigen [255–257, 282].

Die zunehmende Elektrifizierung durch den verstärkten Einsatz der elektronischen Komponenten, welche durch die immer zahlreicher durch die Fahrerassistenzsysteme, die Hybridisierung und den elektrischen Antrieb, aber auch durch die wachsenden Bereiche der „connectivity" (z. B. e-cell) getrieben wird, erfordert auch entsprechende Systeme im Reparaturfall, damit die Kosten in Grenzen gehalten werden.

So verändert speziell die Komplexität im Bereich des autonomen Fahrens, wie auch die Entwicklung im Bereich der „connectivity" gravierend das Anforderungsprofil für die Servicedienstleister. Eine Reparatur erfordert neben der Kenntnis der sehr komplex werdenden Fahrzeugtechnik und des Fahrzeugverhaltens zukünftig ebenso Kenntnisse über Kommunikationswege und die dahinter liegenden Backend-Systeme, deren aktuellem Status und deren Verhalten in unterschiedlichem Umfeld.

#### 11.6.5.2 Werkstattkostenfaktor Zeit (Instandhaltungszeit, Planzeiten)

Mit dem Faktor Zeit für die Arbeitsverrichtung wird der Werkstattpreis des Lohns ermittelt. Dem Durchführenden muss immer die Zeit gegeben werden, die er zur ordnungsgemäßen Verrichtung benötigt. Deswegen sind Zeiten für Instandhaltungsarbeiten das Ergebnis systematischer Arbeits- und Zeitstudien, wie es der Verband für Arbeits- und Zeitstudien e. V. (REFA) verlangt. Dann und nur dann dienen diese Zeitvorgaben der Kapazitäts- und Auftragsplanung, der Steuerung und Kontrolle, der Entlohnung, der Rechnungslegung und sonstigen Kalkulationen im Autohaus.

Folgende Voraussetzungen müssen bei einer Zeitaufnahme vorliegen:

- Beschreibung des Arbeitsumfangs und des -ablaufs,
- Zeitaufnahme erfolgt in einer für die Aufgabe eingerichteten Werkstatt,
- Verwendung von Normal- und Sonderwerkzeugen bzw. sonstige Ausrüstungen,
- Realisierung durch einen im Kfz-Handwerk ausgebildeten und für diese Arbeit geschulten Mechaniker oder Elektriker,
- Einhaltung der Sicherheitsregeln der Instandhaltung.

Aus Zeitstudien lassen sich durch Multiregression Zeit relevante Parameter eliminieren, die zu Planzeiten führen. Planzeiten verkürzen den obigen Prozess und können bei der Konstruktionsauslegung helfen, die optimale Lösung zur Instandhaltung zu finden. Dazu müssen Parameter vorliegen, die sich an Konstruktionselementen orientieren. Solche Parameter sind:

- Verbindungen aller Art wie Schrauben, Klebeverbindungen, Clipse, Nieten, Splinte und Schellen (Abb. 11.85),
- Werkzeuge, Prüfgeräte,

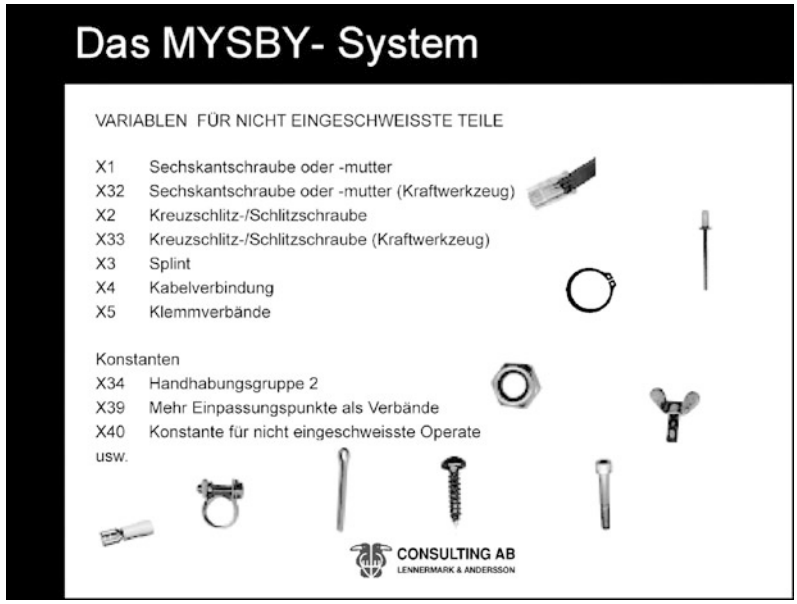



**Abb. 11.85** Verbindungselemente

11

- Zugängigkeit,
- Bearbeitungsvorgänge, wie Bohren, Schweißen, Einstellen,
- bekannte Prozesszeiten für Bearbeitungsvorgänge.

Planzeiten, die dies optimal erfüllen, sind z. B. MYSBY-Planzeiten, gültig für die Unfallinstandsetzung, und MEKBY-Planzeiten für die allgemeine Kfz-Instandsetzung.

Dabei bedeuten: M: Mattrikta (Rahmen richten), Y: Ytrikta (Ausbeulen), S: Svetsbyta (Schweißen), BY: Byta (Erneuern), MEK: Mechanik.

Bei beiden Verfahren werden Zeitformeln angewendet, die sich besonders gut für eine virtuelle Bewertung der Servicefreundlichkeit während der Entwicklungsphase eignen [268].

Da diese Planzeiten aus einer überschaubaren Anzahl von Elementen bestehen, lässt es die Kombination dieser Elemente zu, dass für jeden Auftrag durch Abruf der Parameter aus einer Datenbank in einer Kfz-Werkstatt die erforderliche Arbeitszeit ermittelt werden kann. Dieses Verfahren, genannt CABAS, wird seit 1986 für die Kalkulation der Instandsetzung von Unfallschäden in Schweden verwendet. Unter dem Namen xTime findet das System seit 2005 für die Kalkulation von Wartungs-, Diagnose-, Fehlersuch- sowie Instandsetzungsarbeiten bei Abnutzungs- und Unfallschäden in VW/AUDI-Autohäusern Anwendung. xTime bietet zusätzlich Sonderwerkzeuge, Zwangsersatzteile und Ersatzteile des Arbeitsumfanges an. Durch die detaillierte Beschreibung des Umfangs und der aufeinander folgenden Schritte ist eine optimale Kapazitäts-, Mitarbeiter-, Ressourcen- und Terminplanung für den Werkstattprozess möglich (Abb. 11.86).

Die Eigenschaft „instandhaltbar“ ist in der Arbeitszeit messbar.

#### 11.6.5.3 Kostenfaktor Werkstattausrüstung, Spezialwerkzeuge

In die Investitionen und damit in den Werkstattpreis fließen alle Kosten für neue Werkstattausrüstung und Werkzeuge ein. Fahrzeuge, bei deren Entwicklung auf die Wiederverwendung dieser Ausrüstung geachtet wurde, werden sich positiv auf den Werkstattpreis auswirken. In der Praxis fallen für Kfz-Betriebe Investitionskosten zwischen

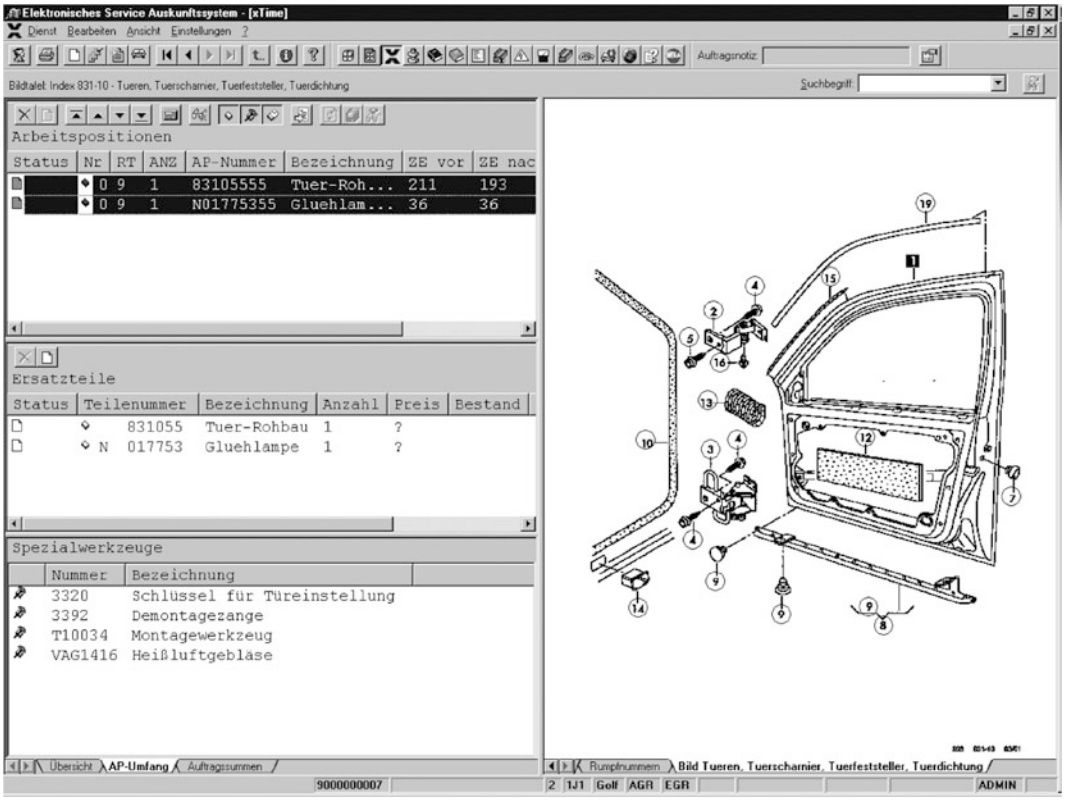



**Abb. 11.86** xTime Bildschirm-Druck

0,– € und mehr als 100.000,– € bei Einführung eines neuen Modells an. Im letzteren Fall werden nur Stützpunkte den vollen Umfang investieren. Dies bedeutet, dass unter Umständen ein höherer Werkstattpreis zu erwarten ist. Außerdem wird das Werkstättennetz weitmaschiger, so dass Kunden größere Entfernungen akzeptieren müssen. Bei erheblichen konstruktiven Änderungen sind Auswirkungen auf die Instandhaltung von Anfang der Entwicklung an zu beachten. Besondere Schwerpunkte sind neue Materialien, elektronische Systeme und deren Diagnose. Fortschritte in der Fahrzeugtechnik sind mit den Fortschritten in der Werkstatttechnik zu synchronisieren.

Die Eigenschaft „werkstattgerecht“ ist im Aufwand für erforderliche Werkstattausrüstung messbar.

#### 11.6.5.4 Ersatzteile, Zerlegungstiefe, Transport-, Lagerfähigkeit und Lieferzeitraum

Ersatzteil- und Materialpreis definieren die zweite Komponente der Werkstattkosten. Der Konstrukteur entscheidet mit der Zerlegungstiefe, wie teuer ein Ersatzteil [258] wird. Die Zerlegungstiefe sollte den Austausch des kleinsten verschleißenden Bauteils ermöglichen. Dies ist insbesondere für Länder wichtig, in denen die Arbeitsstunde wenig kostet, die Ersatzteile aber teuer sind. So werden zum Beispiel in Ländern mit hohen Löhnen Schwungräder mit dem Zahnkranz gewechselt, während in Ländern mit niedrigen Löhnen Zahnkränze vom Schwungrad gelöst werden, um das neue auf zu schrumpfen. Ersatzteile müssen lange Transportwege schadlos überstehen und über lange Zeit la-

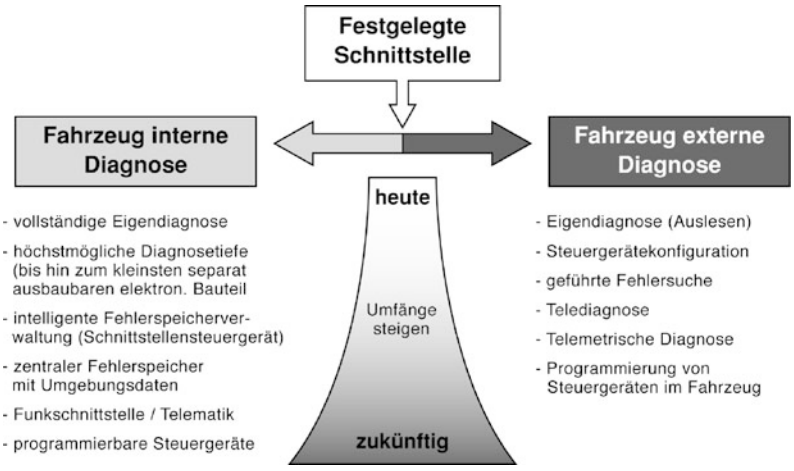



**Abb. 11.87** Diagnose Struktur

gern können. Sperrige Teile sollten stapelbar sein. Die Ersatzteilversorgung erstreckt sich i. Allg. über 15 Jahre nach dem Serienauslauf. Eine Missachtung dieser Grundsätze erhöht unnötig den Ersatzteilpreis. Die Eigenschaft „ersatzgerecht" ist im Ersatzteilpreis messbar.

#### 11.6.5.5 Nachweis der Instandhaltbarkeit

Um zukünftigen Anforderungen bezüglich der Instandhaltbarkeit zu genügen, ist neben einer Verbesserung der Wart- und Instandsetzbarkeit vor allem eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Inspizierbarkeit bzw. der Diagnosefähigkeit der Kfz erforderlich. Ziel ist dabei eine vollständige Eigendiagnose der Steuergeräte bis zu den kleinsten Bauteilen, so dass nur diese gewechselt und für den Kunden berechnet werden müssen. Innerhalb des Fahrzeugs ist eine aktive Selbstprüfung der vernetzten Steuergeräte notwendig, weil nur so eindeutig bestimmt werden kann, wo die Fehlerursache liegt. Der Umfang und die Komplexität der Systeme erfordern, dass außerhalb des Fahrzeugs (off board) eine Diagnosestruktur mit Diagnose- und Prüfgeräten existiert, die beim Hersteller angesammelte Erfahrungen mit den Daten aus dem Fahrzeug (on board) verknüpft. Trotz der Funktionsvielfalt muss auch in Zukunft eine wirtschaftliche Instandhaltung möglich sein. Es liegt nahe, bei Softwarefehlern nur das Tauschen der Software bzw. einzelner Programme vorzusehen. Um Expertenwissen über komplexe Zustände innerhalb kürzester Zeit zuverlässig an das Fahrzeug in der Werkstatt zu bringen, sind auch Ferndiagnose-System einzusetzen (Abb. 11.87).

Der Konstrukteur, der diese Aufgabe erfüllen will, benötigt durch diese Vernetzung bereits im Entwicklungsprozeß die fachmännische Beratung des Instandhaltungsprozesskundigen. Die bereichsübergreifende Zusammenarbeit mit Mitarbeitern aus Kundendienst und Qualitätssicherung ist unverzichtbar. In festgelegten Versuchsprozessen werden Konstruktionsalternativen getestet und der Nachweis optimaler Instandhaltbarkeit erbracht, dokumentiert und ggf. auch vor Kunden bzw. Versicherungen demonstriert.

Neue Aufgaben für Diagnosesysteme und Instandhaltungen ergeben sich durch den zunehmenden Einsatz komplexer Fahrer-Informations- und -Assistenzsysteme.

#### 11.6.5.6 Datensysteme

Datensysteme, die Einsatzdaten von Fahrzeugen bei Fuhrparks oder auch Privatkunden als Felddaten erfassen, sollten den Ansprüchen einer Produktbeeinflussung des Kundendienstes genügen. Für die vom Management festgelegten Zeiträume, z. B. für Gewährleistung und Kulanz oder für die Dauer im Erstbesitz oder aber für die gesamte Nutzungsdauer von der ersten Zulassung bis zur Verschrottung, werden alle Instandhaltungsereignisse statis-

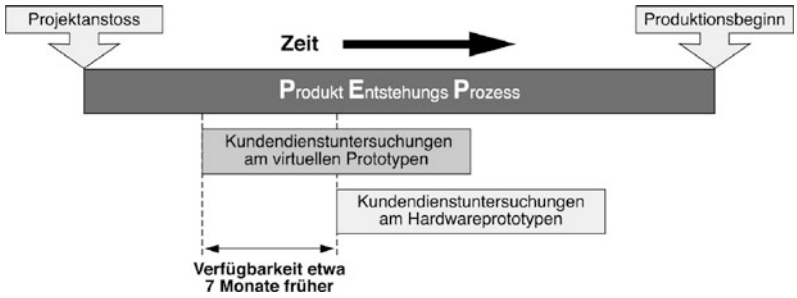



**Abb. 11.88** Kundendienstuntersuchungen im Produktentstehungsprozess

tisch ausreichend abgesichert erfasst. Aus diesen Daten werden auf Bauteile bezogene Warenkörbe gebildet. Zu jedem Element des Warenkorbes werden Schadendurchschnitt (SD), Schadenhäufigkeit (SH) und Schadenbedarf (SB) wie folgt ermittelt:

$$\mathrm{SB} = \mathrm{SD} \cdot \mathrm{SH}\,. \tag{11.14}$$

Dabei wird der Schadensdurchschnitt SD aus der Summe von Lohnkosten, die sich aus dem Produkt von Arbeitszeit und Verrechnungssatz ergeben, von Kosten für Material und Ersatzteile sowie ggf. von Kosten für Ersatzfahrzeuge gebildet. Zu berücksichtigen sind alle Instandhaltungsereignisse der in Betracht kommenden Bauteile, also Wartung, Inspektion und Instandsetzung sowie Unfallinstandsetzung.

### 11.6.5.7 Virtuelle Beurteilung der Servicefreundlichkeit

Im Zuge der immer kürzer werdenden Produktentwicklungszeit und der reduzierten Zahl von realen Prototypen kommt der virtuellen Instandhaltbarkeitsuntersuchung anhand von digitalen Produktmodellen (DMU) wachsende Bedeutung zu. Da immer weniger Prototypen zu einem immer späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen, sind Demontage- und Remontageuntersuchungen an virtuellen Modellen unverzichtbar. In Abb. 11.88 ist der Zeitraum eines Entwicklungsprozesses von Projektanstoß bis Produktionsstart dargestellt. Die Durchführung von Instandhaltungsuntersuchungen ist 20 Monate vor Produktionsbeginn angesetzt. Durch den Einsatz von DMU besteht die Möglichkeit, bereits einige Monate nach Projektanstoß auf einen



**Abb. 11.89** Virtuelle Werkzeuge

ersten virtuellen Prototypen zuzugreifen und an diesem virtuelle Demontagen und Remontagen durchzuführen. Damit bietet sich wesentlich früher die Gelegenheit, die Servicefreundlichkeit des Fahrzeuges erstmals beurteilen zu können. Wenn der Datenstand den ersten virtuellen Prototypen eines Fahrzeugs in höchster Ausbaustufe darstellt, sind bei weniger umfassenden Datenständen virtuelle Beurteilungen noch früher abrufbar, was durchaus Entwicklungszeiten verkürzen kann.

Mittels einer virtuellen Werkzeugdatenbank werden Demontagen und Remontagen simuliert. Abb. 11.89 zeigt eine Auswahl zur Verfügung stehender virtueller Werkzeuge. Abb. 11.90 zeigt die Demontage eines Anlassers am realen und am virtuellen Prototyp.

Die zu erwartende Weiterentwicklung von Soft- und Hardware wird die Simulation der Demontagen und Remontagen mit den Planzeiten der Arbeitszeitstudien verbinden. Jedem simulierten Vor-

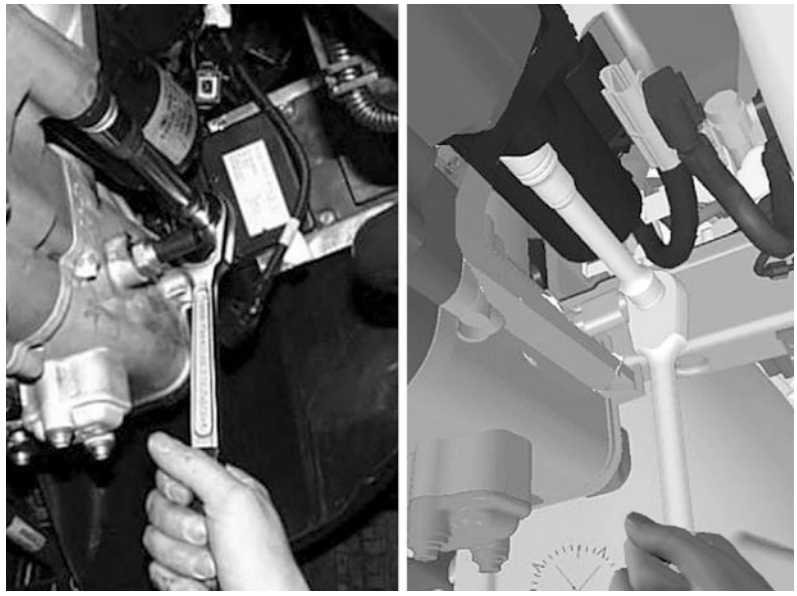


**Abb. 11.90** Demontage eines Anlassers real und virtuell



gang kann ein Arbeitsablauf und damit eine Arbeitszeit zugeordnet werden, unabhängig von der Verfügbarkeit realer Prototypen.

#### 11.6.5.8 Berichtswesen

Instandhaltbarkeit von Fahrzeugen wird geprägt durch geringen Zeitaufwand bei der Instandhaltung, der im Wettbewerbsvergleich eine große Bedeutung einnimmt.

Das interne Berichtswesen dient der Analyse von Kostentreibern und dem Erkennen von Verbesserungspotenzialen in Bezug auf instandhaltungsgerechte Konstruktion. Es umfasst die Kosten aus Versicherung, Betrieb und Werkstatt. Eine Prognose dieser Kosten im Vergleich zu Wettbewerbern des Segmentes ist gemäß Zielen des Lastenheftes in vereinbarten Abständen vorzusehen.

Schwerpunkte für das weitere Handeln müssen im Bericht vorliegen, um die gesteckten Ziele zu erreichen. Die Details eines solchen Berichtes hängen von der vom Projektmanagement gewünschten Tiefe ab.

In jedem Fall soll der Bericht das Entwicklungsprojekt begleiten, um dem Management Gelegenheit zum Eingreifen zu ermöglichen. Zu Ende der Entwicklungsaktivitäten ist mit den dann verfügbaren Daten der Nachweis der Instandhaltbarkeit in einem abschließenden Bericht zu dokumentieren.

### 11.6.6 Strategie und Konzept

#### 11.6.6.1 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien beschreiben ob, wo und welche Instandhaltungsmaßnahmen von wem, wie und wann durchzuführen sind. Es werden unterschieden:

- Korrektive Instandhaltung:
  Bei der korrektiven Instandhaltung werden Instandhaltungsmaßnahmen nach Bedarf durchgeführt.
- Vorbeugende Instandhaltung:
  Zur Vermeidung von Ausfällen werden vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen ausgeführt.
- Zustandsabhängige Instandhaltung:
  Eine zustandsabhängige Instandhaltungsmaßnahme wird nach Feststellung und Beurteilung des Istzustandes durch eine Inspektion durchgeführt.

#### 11.6.6.2 Instandhaltungskonzept

In Absprache mit dem Instandhaltungsprozesskundigen legt der Konstrukteur während der Konzeptionsphase eine Instandhaltungsstrategie zugrunde. Mit dieser Absprache zur Strategie entwirft der Kundendienst in der Entwurfsphase die ersten

Überlegungen zum späteren Instandhaltungskonzept.

Dieses Konzept wiederum berücksichtigt den Instandhaltungsbedarf. Den Konstruktionsfortschritt begleitend reift dann das Instandhaltungskonzept bis zur Serienphase heran.

Dieses Instandhaltungskonzept beinhaltet die Art und Weise und mit welchen Mitteln die Instandsetzung später in der Werkstatt vorbereitet und durchgeführt werden kann.

Wurden keine besonderen Absprachen getroffen, werden beim Konstrukteur die von früheren Fahrzeugen bekannten Arbeitsverfahren und -abläufe, Betriebsmittel und Werkstattausrüstungen, Werkzeuge und Sonderwerkzeuge sowie der dazu gehörige Schulungsinhalt der Instandhaltungsorganisation als bekannt vorausgesetzt.

Änderungen, die durch neue Fertigungsverfahren oder Werkstoffe Einfluss auf die Instandhaltung nehmen, müssen bereits in der Konzeptphase geklärt werden, um unnötige Kosten zu vermeiden. Das gilt auch, wenn Arbeitsverfahren, Betriebsmittel, Werkstattausrüstungen und Sonderwerkzeuge zu ändern oder neu zu entwickeln sind.

#### 11.6.6.3 Anforderungen zur Instandhaltbarkeit

Basierend auf Erfahrungen, Strategien und Konzepten stellt der Kundendienst Instandhaltbarkeitsforderungen auf. Um dem Konstrukteur die Arbeit zu erleichtern, werden diese Forderungen Bauteil bezogen aufgeschlüsselt. In die Forderungen fließen die Kosten während der Nutzung, die Identifizierbarkeit, die Zugänglichkeit und Austauschbarkeit, die Wartbarkeit, die Inspizier- und Prüfbarkeit, die Transport- und Lagerfähigkeit sowie die Standardisierung ein. Historische Daten, Problemzonen und Randbedingungen, wie Prüfanschlüsse zu verfügbaren Prüfgeräten, Instandhaltungswissen beim vorhandenen Personal und Ausrüstungsumfang der Instandhaltungsorganisation, sind ebenso zu berücksichtigen.

Werden den so gestalteten Forderungen während der Projektverfolgung die betreffenden Protokolle hinzugefügt, so entsteht mit dem Projektfortschritt auch gleichzeitig die Dokumentation darüber. Dies ist dann Quelle für den Instandhaltbarkeitsnachweis.

#### 11.6.6.4 Kunden- und Lieferantenbeziehungen

Die Herstellerbeziehung zum Großkunden nimmt im Automobilsektor eine Sonderstellung ein. Aufgrund der Nähe zum Kunden sind Synergien möglich, die eine direkte Rückinformation und damit Optimierungen bewirken. Zum einen ist der Automobilhersteller Lieferant seines Großkunden. Beim Einkauf der Bauteile, Baugruppen oder Module ist der Automobilhersteller Kunde. In beiden Richtungen sind die Anforderungen des jeweiligen Kunden ausschlaggebend. Das bedeutet, dass Anforderungen des letzten Kunden in der Kette bis zum ersten Lieferanten durchgegeben werden müssen.

In einem Fahrzeug werden Bauteile, -gruppen und -module verwendet, die auf dem weltweit agierenden Zuliefermarkt eingekauft werden. Die Auswahl wird primär auf Grund technischer Forderungen und Erfahrungen mit dem Lieferanten sowie auf Grund des Einkaufspreises getroffen. Die Einkaufs- und ggf. Konstruktionsabteilungen werden übliche und bekannte Lösungen sowohl beim Kunden als auch beim Lieferanten bevorzugen, wobei statt einseitig funktionaler und herstelleroptimierter Kosten auch die Instandhaltungskosten zu beachten sind. Wenn die Lebenslaufkosten als weiteres Optimierungskriterium in diesen Prozess eingebracht werden, kann der Leistungsumfang zu Gunsten der Instandhaltbarkeit erweitert werden. Der Nutzen für den Lieferanten liegt in geringeren Garantiekosten und für den Fahrzeugkunden in niedrigeren Instandhaltungskosten während der Nutzung. In der Folge wird auch der Lieferant versuchen, die Summe aller Ausgaben vor der Lieferung in Form von Fertigungs- und Nacharbeitskosten und nach der Lieferung in Form von Gewährleistungs- und Kulanzkosten zu minimieren. Der künftige Nutzer wird zunehmend die Lebenslaufkosten, also die Summe aus den Anschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten, in den Mittelpunkt stellen und damit verstärkt vom Hersteller geringe Lebenslaufkosten fordern.

#### 11.6.6.5 Rolle des Managements

Damit das instandhaltungsgerechte Konstruieren den angemessenen Stellenwert im Unternehmen erhält, müssen eindeutige Ziele definiert werden, die neben Termin-, Herstellkosten- und Funktionszie-

len im Entwicklungsprozess zu kontrollieren und umzusetzen sind. So setzt die Einführung des Entwicklungsziels zur Minimierung der Lebenslaufkosten einen durchdachten Plan voraus, für dessen kontinuierliche Fortschreibung Grundlagen zu schaffen sind. Diese bestehen in der Erarbeitung einer Methodik zur Nachweisführung, in der Ausbildung der beteiligten Personen, in der Festlegung von Prozeduren, in der Erarbeitung von Anforderungskatalogen, Checklisten, Instandhaltungsanalysen und Datensystemen sowie von Vorgaben für das Berichtswesen.

Ferner ist eine Bereitschaft voraus zu setzen, Lebenslaufkosten so zu beachten, dass Zeiten und Mittel eingesetzt werden, um von der ersten Entwicklungsphase an nur instandhaltungsgerechte Lösungen zu akzeptieren. Im Rahmen einer standardisierten Vorgehensweise im Unternehmen sollten Versuchsprojekte mit kontinuierlicher Betreuung und Bewertung des instandhaltungsgerechten Konstruierens durchgeführt werden. Nur bei positivem Ausgang des Versuchsprojektes sollten Freigaben erteilt werden.



#### 11.6.6.6 Einfluss der EU

Seit Januar 2002 ist das Schuldrecht für die sogenannte Sachmangelhaftung neu geregelt. Anstelle der bis dahin gültigen „Gewährleistung" wird im Gesetz eine „Sachmangelhaftung" genannt. Hierfür gilt eine Verjährungsfrist von zwei Jahren ab Lieferung des Kaufgegenstandes. Die Beweislast im Sinne der Sachmangelhaftung liegt seitdem bei Neufahrzeugen für 6 Monate beim Verkäufer und erst anschließend beim Kunden. Im Falle eines Mangels am Fahrzeug muss der Verkäufer nachweisen, dass zum Zeitpunkt der Übergabe dieser Mangel nicht vorlag. Auch bei gewerblichem Verkauf von Gebrauchtwagen gilt die 2jährige Sachmangelhaftung, sie kann jedoch durch AGB auf ein Jahr beschränkt werden.

Diese Gesetzesänderung hat Auswirkung auf die Produktentwicklung, denn Zuverlässigkeit und Instandhaltbarkeit gewinnen einen höheren Stellenwert, wenn statt der Gewährleistungszeit von einem Jahr ein doppelt so großer Zeitraum für die Sachmangelhaftung in die Verantwortung des Herstellers fällt. Die Europäische Union (EU) verfolgt das Ziel, den Automobilmarkt stärker unter Wettbewerbsdruck zu stellen. Die Regelungen und Gesetze sollen den Fahrzeugkauf innerhalb der EU erleichtern, die freie Preisgestaltung ermöglichen und Vertrieb und Service für den Kunden vereinfachen. Dazu gilt seit Oktober 2002 die „Gruppenfreistellungsverordnung (GVO)" [288]. Diese regelt den Kauf und Verkauf von Fahrzeugen, Ersatzteilen und von Instandhaltungsdienstleistungen zwischen dem Einzelhandel und den Herstellern. Mit dieser Regelung soll die Gleichstellung von Vertragshändlern und -werkstätten mit sogenannten freien Händlern und Werkstätten gewährleistet werden.

Diese Regelung ermöglicht den freien Werkstätten jene Fahrzeuge aus dem unerschöpflichen Angebot aller Anbieter auszuwählen, die bei geringsten Investitionen den höchsten Erlös pro Monteureinheit und Jahr bzw. pro Werkstattdurchgang garantieren. Dagegen werden Fahrzeuge mit hohen Werkstattinvestitionen, mit langen Arbeitszeiten für den Aus- und Einbau von Bauteilen und mit teuren Ersatzteilen Wettbewerbsnachteile hinnehmen müssen.

#### 11.6.6.7 Einfluss alternativer Antriebskonzeptionen

Alternative Antriebskonzeptionen müssen im Handel betreut und instandgesetzt werden. Je besser und flächendeckender dies in den Märkten umgesetzt werden kann, umso einfacher ist es für den Kunden bei Schwierigkeiten mit seinem Fahrzeug kompetente Hilfe zu erhalten und umso eher wird er wieder bei der Marke seines Vertrauens ein Fahrzeug erwerben. Um die Attraktivität neuer Technologien im Verkauf dementsprechend nicht negativ zu beeinflussen, ist eine serviceorientierte Ausrichtung der neuen Technologien erforderlich und im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen.

Neue Technologien bedingen oftmals Veränderungen in der Ausbildung der Handelsmitarbeiter, eine Anpassung der Arbeitsorganisation sowie neue Werkstattausrüstungen. Letztlich werden alternative Antriebstechnologien auch die Ertragssituation im Handel beeinflussen. Die Einführung reiner Elektroantriebe mit der entsprechend geringen Ausfallrate im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren könnte das Ersatzteilgeschäft

und den Verkauf von Arbeitszeit im Handel maßgeblich verändern.

Die unterschiedlichen Verfahrensweisen zur Instandsetzung neuer Antriebstechnologien müssen im Idealfall für die Endkunden in jeder Werkstatt weltweit umgesetzt werden. Dort kumulieren damit die Anforderungen aller neuen Antriebskonzeptionen. In Anbetracht der marktspezifisch in der Welt sehr unterschiedlichen Ausbildungswege und -stände sowie der unterschiedlichen Bonität der Werkstätten ein schwieriges Unterfangen, welches nur bei Berücksichtigung dieser Faktoren im PEP ermöglicht werden kann.

Schon die Einführung von Hochvolttechnologie beinhaltet einige Hürden, die zu berücksichtigen sind:

- Jeder Mitarbeiter eines Autohauses, der mit dem Hochvoltfahrzeug in Verbindung kommt oder kommen könnte, muss die möglichen Gefahren kennen und über die Verfahrensweise mit derartigen Fahrzeugen aufgeklärt sein.
- Jeder Betrieb sollte mindestens einen Spezialisten haben, der an der Hochvoltanlage Instandsetzungsarbeiten durchführen kann und darf.

Aus wirtschaftlicher Sicht wird es zunächst nur wenige derartige Experten je Betrieb geben. Damit muss dort der Arbeitsablauf neu geplant und gestaltet werden. Es ist von vornherein im PEP festzulegen, welche Arbeiten vom Spezialisten auszuführen sind und welche Arbeiten von anderen Mitarbeitern ausgeführt werden können.

So kann bei spannungsfreiem Zustand des Fahrzeuges und unbeschädigter Hochvoltanlage eine Standardreparatur oftmals von allen Mitarbeitern bearbeitet werden. Die Herstellung der Spannungsfreiheit muss jedoch vom Spezialisten selbst durchgeführt und sichergestellt werden. Jede Arbeit, die mit der Hochvoltanlage in Verbindung steht oder eine Beschädigung der Hochvoltanlage zur Folge haben könnte, sollte vom Spezialisten erledigt werden. Diese Aufgabenaufteilung kann je nach Fahrzeugtyp unterschiedlich ausfallen und muss im PEP gemeinsam abgestimmt werden.

Das Fahrzeug muss dafür konstruktiv so gestaltet sein, dass es sich selbst überwacht, dass die Hochvoltanlage spannungsfrei geschaltet werden kann, dass die Spannungsfreiheit durch sichere Messung geprüft werden kann und dass die Anlage gegen unabsichtliches Wiedereinschalten gesichert ist.

Des Weiteren muss aus den Fahrzeugdaten und den Fahrzeugdokumenten sofort der Ausrüstungsstand erkannt werden können. Auch am Fahrzeug selbst sind entsprechende Kennungen anzubringen. Die Hochvoltanlage im Fahrzeug muss für jeden leicht erkennbar markiert sein, üblicherweise erfolgt dies durch orange-rote Farbmarkierung.

Speziell bei Unfällen, aber auch in einigen anderen Fällen, bei denen ein Hochspannung führendes Teil beschädigt sein könnte, muss zunächst der Spezialist, der eine besondere Zusatzausbildung erhalten hat, die Arbeit aufnehmen.

Der sicherheitstechnische Aspekt, die rechtliche Situation im jeweiligen Markt, der Verbraucherschutz und die auf die Ausbildungen abgestimmte Instandhaltungsstrategie in Verbindung mit der Versorgungsgüte stellen hier eine große Herausforderung dar.

## Literatur

**Literatur zu Abschnitt 11.1**

1. Winterkorn, M.: Anforderungen an die Produktentwicklung im Automobilbau. Graz (2000). Tagung Motor und Umwelt
2. Winterkorn, M., Ludanek, H.: Weltweit landesspezifische Fahrzeuganforderungen für Material und Funktionen. Stahl-Dokumentation. Bd. 747. Dresden (2002)
3. Hackenberg, U.: Virtuelle Aufbau-Entwicklung bei Audi, 7. Automobiltechnische Konferenz, Stuttgart, 30. Juni/ 06. Juli 2003
4. Tang, T.: Integriertes Produktdatenmanagement im virtuellen Produktentstehungsprozess. 7. Automobiltechnische Konferenz, Stuttgart, 30. Juni/1. Juli 2003
5. Heinrich, A., Müller, K., Fehrling, J., Paggel, A., Schneider, I.: Versionsmanagement für Transparenz und Prozesssicherheit in der Steuergeräte-Entwicklung. Internationale Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug, Baden-Baden, 2003
6. Oehlschläger, H., Krebs, J.: Neue virtuelle Entwicklungswerkzeuge für frühe Phasen des Fahrzeug-Produktentstehungsprozesses bei Volkswagen. VDI Bericht, Bd. 1876. VDI-Verlag, Düsseldorf (2005)
7. Hackenberg, U.: Produktentstehung. Vortrag, Automobilforum, Stuttgart, 2006
8. Lindemann, U., Reichwald, R., Zäh, M.-F.: Komplexitäts- und Variantenmanagement der AUDI AG. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg (2006)

9. Seiffert, U., Rainer, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2008)
10. VDI: SIMVEC – Berechnen, Simulieren und Erproben im Fahrzeugbau. Baden-Baden (2010)

**Allgemeine Literatur**

11. Der neue Audi A6. ATZ extra (Januar 2011)

**Literatur zu Abschnitt 11.2**

12. Minx, E., Waschke, T.: Mobilität von morgen – Konzepte der Automobilindustrie. Internationales Verkehrswesen Sonderheft: 100 Jahre Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft (2008)
13. Tattersall, S., Renner, G.: Untersuchung von Kundenanforderungen an aktive Sicherheit und an Fahrerassistenzsysteme durch den Real-life Analysis Ansatz. VDI-Tagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg, 12./13. Oktober 2006
14. Flögel, H.-H., Kauf, F., Wahl, D., Frühauf, F.: Wärme- und Energiemanagement Gesamtfahrzeug – Simulationstool VehEMent. In: Deußen, N. (Hrsg.) Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs II. Expert-Verlag (2000); 2. Tagung Wärmemanagement, Essen, Haus der Technik, 18.–19. September 2000
15. Brückner, B.: Neue Möglichkeiten der Ergonomieabsicherung. Ramsis User Conference, Human Solutions GmbH, Kaiserslautern, 21./22. September 2009
16. Daimler: Die neue Mercedes-Benz S-Klasse: Voraus schauen – voraus fahren. Pressemappe, TecDay 2, Stuttgart, 09. August 2005
17. Käding, W., Zeeb, E.: 25 years driving simulator research for active safety. In: Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2010), Loughborough, August 2010
18. Zeeb, E.: Daimler's new full-scale, high-dynamic driving simulator – A technical overview. In: Conference Proc. Driving Simulator Conference Europe, Paris, September 2010
19. Okamura, H.: Approach of engineering concept design for optimisation problem. 29. ISATA Konferenz, Paper 96 ME 028, 1996
20. Braess, H.-H., et al.: Methodik und Anwendung eines parametrischen Fahrzeugauslegungsmodells. Automobil-Industrie **5**, 627–637 (1985)
21. Hänschke, A., et al.: Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf. SIMVEC – Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010, Baden-Baden, 16./17. November 2010
22. Volz, A.K.: Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der Crashsimulation. Dissertation, TU Ilmenau (2000)
23. Wallentowitz, H.: Vertikal/Querdynamik von Fahrzeugen, 6. Aufl. Schriftenreihe Automobiltechnik **35**(96) (2002)
24. Ammon, D.: Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrdynamik, Habil.-Schr., Uni Karlsruhe (1996). Teubner, Stuttgart (1997)
25. Hänschke, A., Hilmann, J.: Der Einsatz vereinfachter Modelle zur verbesserten Auslegung der passiven Sicherheit. 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Berichtsband, S. 471–493 (2001)
26. Botev, S.: Digitale Gesamtfahrzeugabstimmung für Ride und Handling. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12, Bd. 684. VDI-Verlag, Düsseldorf (2008)
27. Seiffert, U.: Fahrzeugtechnik. In: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 21. Aufl. Springer, Heidelberg, Berlin, New York (2005)
28. Virtual Product Creation. Congress Documentation. Vieweg (2003/2004/2005)
29. Kögl, M., Klimetzek, F.R., Pletschen, B., Möller, J.-S., Füllbier, K.-P., Pfeiffer, M.: Multidisziplinäre Optimierung des Fahrzeugrohbaus. VDI Tagung Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Baden-Baden, 2008

**Literatur zu Abschnitt 11.3**

30. Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau. VDI Berichte 1559, 1613, 1701, 1833, 1846, 1967
31. Seiffert, U., Rainer, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2008)
32. Kuhlmann, A., Thole C.-A., Trottenberg, U.: AUTOBENCH/AUTO-OPT: Towards an integrated construction environment for virtual prototyping in the automotive industry. In: Dongarra, Laforenza, Orlando, V. (Hrsg.) Lecturer Notes in Computer Science. (2003)
33. Volz, K.: Car body design in the concept stage of vehicle development. 2. European LS – DYNA Conference. Gothenburg, Schweden, 14./15. Juni 1999
34. TOP 500. Liste der Supercomputer. Erstellt durch das Rechenzentrumder Universitat Mannheim
35. Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Springer (2015)
36. Bathe, K.-J., Wilson, E.: Numerical methods in Finite Element Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
37. Zienkiewicz, O.C.: Methode der Finiten Elemente. Hanser, München (1984)
38. Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik. Vieweg + Teubner (2012)
39. FAT-Schriftenreihe Nr 96, 101, 108, 126, 128, 135, 137, 139, 140, 150, 153, 157, 174, 177, 179
40. Waltz, M., Chmielewski, R., de Bruyne, F., Heuler, P.: Rechnerische Bewertung geschweißter Karosseriestrukturen mit einer Submodelltechnik. ATZ/MTZ Konferenz 2005
41. Widmann, U.: Virtuelle Aufbauentwicklung bei Audi. In: Faszination Karosserie. 2. Braunschweiger Symposium (2005)
42. Meyer, M., van Gemmeren, J., Boyle, M.: Akustiksimulation am Beispiel einer Lenksäule. ATZ 06/2014, 50–55 (2014)
43. Petterson, BAT.: Numerische Methoden. In: Müller, G., Möser, M. (Hrsg.) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer (2004)

44. Lyon, R.H., de Jong, R.D.: Statistical Energy analysis. 2. Aufl. Butterworth-Heinemann, Bosten (1996)
45. Desmet, W., Pluymers, B., Atak, O.: "MID-FREQUENCY" – CAE Methodologies for Mid-Frequency Analysis in Vibration and Acoustics. Universiteit Leuven (2012)
46. Tanner, G., et al.: Dynamical energy analysis on FEM grids – a new tool for describing the vibro-acoustic response of car-body parts. Simvec (2012)
47. Nitzschke, S. et al.: Simulation der Kolbendynamik unter Berücksichtigung der EHD-Kopplung. 9. Magdeburger Maschinenbau-Tage (2009)
48. Basshysen, R., Schäfer, F. (Hrsg.): Handbuch Verbrennungsmotor. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg (2015)
49. Merker, G. P., Teichmann, R. (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg (2014)
50. Paulus, S., Gaberan, T., Lechner, B.: Modellierung von Permanentmagnet-Synchronmaschinen mit Daten aus der Finite-Elemente-Methode. Simvec (2012)
51. Blumcke, E.: Integration der Giessimulation in die Fahrzeug-Funktionsauslegung bei Audi. MAGMA-Forum, Eigenschaften gegossener Leichtmetallbauteile (2004)
52. Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien im Automobilbau. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg (2014)
53. Cuntze, R., et al.: Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise für unidirektionalen Faserkunststoffverbund unter mehrachsiger Beanspruchung – Modellbildung und Experimente. VDI Forschungsbericht, Reihe 5: Grund- und Werkstoffkunde, Nr. 506 (1997)
54. Hinterhölzl, R.M.: Simulation of Draping, Infiltration and Curing of Composites. FACC Technical Colloquium "Advances in Composites" (2012)
55. Leutz, D., Drechsler, K.: Draping Simulation: Modelling different Materials and Processes. CCeV Engineering (2011)
56. Döbrich, O., Gereke, T., Cherif, C.: Drape Simulation: Textile Material Model for Correct Property Reproduction to Improve the Preform Development Process of Fiber-Reinforced Structures. 12th International LS-DYNA Users Conference (2012)
57. Staack, H., et al.: Versuchsbasierte Entwicklung eines industriellen Bruchkriteriums für Kunststoffkomponenten in der Fußgängerschutzauslegung. Simvec (2014)
58. Marsolek J.: Energieabsorptionsverhalten zylinderschalenförmiger Strukturelemente aus Metall und Faserverbundwerkstoff. Dissertation, RWTH Aachen (2002)
59. Feindler, N.: Charakterisierungs- und Simulationsmethodik zum Versagensverhalten energieabsorbierender Faserverbundstrukturen. Dissertation, TU München (2012)
60. Marx, B., Kalka, D., Jankowski, U.: Crash-Sicherheit von Elektrofahrzeugen: Herausforderungen und Lösungsansätze. 13. ATZ-Fachtagung Karosseriebautage Hamburg, 2014
61. Jones, N., Wierzbicki, T. (Hrsg.): Structural crashworthiness. Butterworths (1983)
62. Haufe, A., Keding, B.: Zur Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation in der Crash-Berechnung am Beispiel LS-Dyna. Altair Technology Seminar (2004)
63. Shigeta, K., Kitagawa, Y., Yasuki, T.: Development of Next Generation Human FE-Model Capable of Organ Infury Prediction. U. S. Department of Transportation (2009)
64. Yigit, E., et al.: Anwendung eines aktiven FE Menschmodells in der Pre-Crash Insassensimulation. Simvec (2014)
65. Neubohn, A., Weiss, C., Keck, F., Kuhn, A.: KISS – Gesamtheitlicher Ansatz zur Auslegung von Insassenschutzsystemen. Airbag 2004, Karlsruhe, 1. Dezember 2004
66. Adamski, D.: Simulation in der Fahrwerktechnik – Einführung in die Erstellung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer (2014)
67. Spickenreuther, M., Bersiner, F., Fricke, E.: Virtuelle Auslegung und Absicherung im Schwingungskomfort. Simvec (2012)
68. Starr, J., Glaser, H.: Das Fahrwerk des neuen Audi A6. ATZ (Sonderheft Audi A6) (2011)
69. Braess,H.-H.: Konstruktion, Berechnung und Versuch – zunehmende Partnerschaft in der Automobilindustrie. ATZ, 327–330 (1985)
70. Hagerodt, B., et al.: Der Golf VII – Rechnerische Konzept- und Bauteilauslegungen für den Komfort- und Akustikanspruch. Simvec (2012)
71. Kessing, N.: Anwendung von CAE in der Fahrkomfortentwicklung. In: Kudritzki, D. (Hrsg.) Tagung: Fahrzeugschwingungen – Fahrkomfort und Fahrwerk, H030-06-006-0. Haus der Technik, Essen, Juni 2000
72. Keppler, V., Wank, V.: Biomechanisches PKW-Fahrermodell. Simvec (2014)
73. Seifert, A., et al.: Integration eines dynamischen Menschmodells in die NVH-Analyse des Gesamtfahrzeugs. Simvec (2012)
74. Galvac, M., Schmidt, E.: Erlebbare Digitale NVH Auslegung der neuen Mercedes-Benz C-Klasse. Simvec (2014)
75. Spickenreuther, M., Bersiner, F., Fricke, E.: Virtuelle Auslegung und Absicherung im Schwingungskomfort. Simvec (2012)
76. Keijsers, R.: MKS-Gesamtfahrzeugsimulation zu Lastwechselschwingungen und Triebwerksbewegungen. Fahrwerk-Tech 2001. TÜV Akademie (März 2001)
77. Rasenack, W.: Analyse von Missbrauchslastfällen bei der Fahrwerkentwicklung auf Basis expliziter FEM-Berechnungen. Simvec (2014)
78. Kaindl, S., Meindl, W.: Betriebsfestigkeitsbewertung eines Nutzfahrzeugmotorlagers. Simvec (2014)

79. Hucho, W.-H.: (Hrsg.) Aerodynamik des Automobils. 6. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2013)
80. Ferzinger, J., Peric, M.: Numerische Strömungssimulation. Springer (2007)
81. Wesseling, P.: Principles of Computational Fluid Dynamics. Springer (2010)
82. Betz, J., Lührmann, L., Kobs, T., Micko, S.: Beitrag der Strömungssimulation zur effizienten Karosserieentwicklung des neuen A6. Mobiles 30 (2004)
83. Raman, G. (Hrsg.): Computational Aeroacoustics. Multi Science Pub (2008)
84. Genuit, K. (Hrsg.): Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer (2010)
85. Frontczak, M., Wargocki, P.: Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. Building and Environment **46**(4), 922–937 (2011)
86. Patil, M., Pise, A., Gokhale, N.: Simulation of Conjugate Heat Transfer (CHT) Between Engine Head and Cooling Medium of Diesel Engine. SAE Technical Paper 2015-01-1662 (2015)
87. Eiser, A., Doerr, J., Jung, M., Adam, S.: Der neue 1,8l-TFSI-Motor von Audi; Teil 1: Grundmotor und Thermomanagement. MTZ 72. Jahrgang 06/2011, Wiesbaden (2011)
88. Wurms, R., Jung, M., Adam, S., Dengler, S., Heiduk, Th., Eiser, A.: Innovative Technologies of Current and Future TFSI Engines from Audi. In: 20. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen (2011)
89. Islam, M.: Numerical and experimental investigations of high-pressure diesel sprays. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London (2002)
90. Merker, G., Schwarz, C., Stiesch, G., Otto, F.: Verbrennungsmotoren – Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung. B.G. Teubner, Wiesbaden (2004)
91. Franz, J.: EMV: Störungssicherer Aufbau elektronsicher Schaltungen, Springer Vieweg (2012)
92. Huneke, B., Frei, S.: Simulationsmodelle für Kfz-Antennen zur Bewertung der Störaussendung. Elektromagnetische Verträglichkeit in der KFZ-Technik – GMM-Fachtagung (2005)
93. Hippeli, H., et al.: Simulatorische Bestimmung der Störeinkopplung durch leistungselektronische Komponenten in Kfz-Antennensysteme. EMV-Düsseldorf (2010)
94. Bogdanov, F., et al.: Computational Techniques for Automotive Antenna Simulations. In: Chiaberge, M. (Hrsg.), New Trends and Developments in Automotive System Engineering, INTECH (2011)
95. Tazi, H.: Integration of Numerical Simulation Approaches in the Virtual Development of Automotive Antenna Systems. Dissertation, TU München (2012)
96. Kiel, H.: Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Lichtsimulation. Dissertation, TU Ilmenau (2012)
97. Gigler, M., Gruber, K.: Virtuelle Absicherung der Bordnetzstabilität. Simvec (2012)
98. Liebl, J., et al.: Energiemanagement im Kraftfahrzeug. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg (2014)
99. Schröder, D.: Leistungselektronische Schaltungen: Funktionen, Auslegung und Anwendung. Springer (2012)
100. Alimeling, J.H.: PLECS-piece-wise linear electrical circuit simulation for Simulink. IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (1999)
101. Dimitrijev, S.: Principles of Semiconductor Devices. Oxford University Press (2011)
102. Richter, R.: Elektrische Maschinen. Bd- I–IV, Springer (1924–1936)
103. Ponick, B., Müller, G., Vogt, K.: Berechnung elektrischer Maschinen. 6. Aufl. Wiley-VCH (2012)
104. Brune, K.: Betriebsverhalten von Induktionsmaschinen mit fehlenden Spulen in der Ständerwicklung. Shaker (2005)
105. Herrmann, M.: Entwurf, Berechnung und Regelung magnetischer Reluktanzaktoren. Dissertation, TU München (2008)
106. Bittner, F.: Modellgestützte multikriterielle Optimierung von permanenterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Universität Erlangen-Nürnberg (2015)
107. Herschold-Pließnig, G., Suzzi, D., Jagsch, S.: CAE-gekoppelte Methode zur thermischen Analyse eines Li-Ion-Fahrzeugbatteriesystems. Simvec (2012)
108. Kostetzer, L., et al.: Electro-thermal battery modeling at the level of finite elements. Simvec (2012)
109. Schulz, V., Burgard, K.: Echtzeitmodelle von Fahrzeug und Lithium-Ionen-Batterie. Simvec (2010)
110. Fell, S., et al.: Li-ion Battery Simulation Strategies and Validated Implementations for the Virtual Development Process of Electrified Vehicles. Simvec (2012)
111. Kostetzer, L., et al.: Li-ion Battery Simulation Strategies and Validated Implementations for the Virtual Development Process of Electrified Vehicles. Simvec (2010)
112. Herb, F.: Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Dissertation, Universität Ulm (2010)
113. Kvesic, M.: Modellierung und Simulation von Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen. Dissertation, RWTH Aachen (2012)
114. http://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Leistungen/Brennstoffzellen/Modellierung%20und%20Simulation.html;jsessionid=125291FE9F12AE64DC6964BEA7CB180C?nn=928176. Zugegriffen: 17.6.2015
115. Jansen, J.: Ein Werkstoffmodell fur Aluminium-Druckgusslegierungen unter statischen und dynamischen Beanspruchungen. Schriftenreihe Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik (2005)
116. Cupito, G.: IDEAL Mid Term Report, GRD2-2001-50042 (2004)

117. Von Prondzinski, L.: Autocrash: Computermodell simuliert erstmals Biegeverhalten der Nieten. VDI Verlag GmbH (2014)
118. Awiszus, B., et al.: Flach-Clinchen – Simulationsbasierte Optimierung und Weiterentwicklung einer einseitig ebenen, einstufig gefügten Clinch-Verbindung. UTF Science (2009)
119. Drossel, W.-G., Israel, M., Falk, T.: Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen. 9. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage (2012)
120. Schlimmer, M.: Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen. 6. LS-DYNA Anwenderforum (2007)
121. Retka, J., Höfer, P., Lion, A. (Hrsg.): Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen. Beiträge zur Materialtheorie 1/07 (2007)
122. Schwenk, C., Rethmeier, M., Dilger, K., Michailov, V.: Sensitivity analysis of welding simulation depending on material properties value variation. In: Cerjak, H., Bhadeshia, H.K.D.H., Kozeschnik, E. (Hrsg.): Mathematical Modelling Of Weld Phenomena. Bd. 8. Verlag der Technischen Universitat Graz, Graz (2007)
123. Ye, Q., Domnick, J., Scheibe, A.: Numerical simulation of electrostatic spraypainting processes in the automotive industry. In: Krause, E. (Hrsg.): High Performance Computing in the Science and Engineering 2004: Transactions for the High Performance Computing Center. Stuttgart (HLRS) 2004. 7th HLRS results and review workshop on October 4–5 at the HLRS. 261–275. Springer, Berlin (2005)
124. Zelder, G., Steinbeck-Behrens, C.: Prozesssimulation in der Karosserielackierung. JOT Journal für Oberflächentechnik **50**(3), 30–32 (2010)
125. Neumeyer, J.: Vom Strom bis zum Gefüge: FE-Simulation des induktiven Härtens. Simvec (2014)
126. Getos, S., Krügel, K.: Die virtuelle Absicherung in der Praxis. Simvec (2014)
127. Simon, P., Bewersdorff, S., Lehmpfluhl, T.: Absicherung und Freigabe der ESC-Gespannstabiliesierung für den Weltmarkt. Simvec (2014)
128. Geneder, S., et al.: Hardware-in-the-Loop-Test von GPS-basierten Assistenzfunktionen in der virtuellen Fahrzeugerprobung durch Echtzeitsimulation der Satellitensignale. Simvec (2012)
129. Jäger, B., Neugebauer, P., Parspour, N.: Hardware-in-the-Loop Fahrdynamikprüfstand für 4WD-Elektrofahrzeuge. Simvec (2014)
130. Mezger, J., et al.: Protecting Know-How In Cross-Organisational Functional Mock-Up by a Service-Oriented Approach with Trust Centres. 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (2011)
131. Laschinsky, Y. et al.: Evaluation of an active safety light – using virtual test drive within vehicle in the loop. IEEE-ICIT 2010 CHILE (2010)
132. Neumann-Cosel, K., et al.: Virtual test drive – provision of a consistent tool-set for [d,h,s,v]-in-the-loop. Driving Simulation Conference Monaco (2009)
133. Neumann-Cosel, K., et al.: Preadjustment of a vision-based lane tracker – using virtual test drive within a hardware in the loop simulator. Driving Simulation Conference Monaco (2009)
134. Bock, T., et al.: Vehicle in the Loop – Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung. ATZ 01/2008, Springer Vieweg (2008)
135. Ramm, E., Schwarz, S., Kemmler, R., Lipka, A.: Structural optimization – The interaction of form and mechanics. 18. CAD-FEM Users' Meeting, Friedrichshafen, 20.-22. September 2000
136. Gregersen, M. M., Othmer, C.: Automatic aerodynamic shape optimisation based on the adjoint method. Simvec (2014)
137. Bachem, et al.: Multidisziplinare numerische Parameter und Shape optimierung von Karosseriebauteilen am Anwendungsbeispiel Fußgängerschutz. LS-Dyna Anwenderforum (2004)
138. Hoffmann R., et al.: Stochastische Simulation in der Entwicklung und Verifikation von automobilen Systemen. LS-Dyna Anwenderkonferenz (2002)
139. Benedikt, M., et al.: Forschungsprojekt ACoRTA: Modellbasierte Kopplung zur Lösung des Echtzeit-Co-Simulationsproblems. Simvec (2014)
140. Bauer, S., et al.: Entwicklung einer Co-Simulationsprozesskette und deren Integration in den Prozess. Simvec (2012)
141. Soppa, A., Bindick, S., Dobmann, M.: Virtuelle Fahrzeugentwicklung auf Basis von Co-Simulationen und FMI. Simvec (2014)
142. Giebenhain, C., et al.: Forschungsprojekt ACoRTA: Echtzeitfähige Cosimulation am Virtuellen Fahrerplatz. Simvec (2014)

**Literatur zu Abschnitt 11.4**

143. Mehrere Autoren: 100 Jahre Automobil. VDI-Ber. 595 (1986)
144. Troesch, M.: Die Alpenstraßen als Prüffeld für Automobile. Katalognummer 1955 der Automobil Revue, Bern, S. 101–105 (1955)
145. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 632 (1987)
146. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 681 (1988)
147. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 741 (1989)
148. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 791 (1990)
149. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 893 (1991)
150. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 974 (1992)
151. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1189 (1995)

152. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1335 (1997)
153. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1470 (1999)
154. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1616 (2001)
155. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1755 (2003)
156. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1900 (2005)
157. Mehrere Autoren: Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI-Berichte 1967 (2006)
158. Mehrere Autoren: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. VDI-Ber. 1990 (2007)
159. Mehrere Autoren: 14. Tagung 2009, VDI-Bericht 2031 (2008), 2107 (2010), 2169 (2012)
160. Mehrere Autoren: VDI-Bericht 2106 (2010)
161. Drews, R., Jongen, H.: Modulares Experimentalfahrzeug für Betriebslastenmessungen. ATZ , 44–54 (2002)
162. Hauke, M.: Simulation des Missbrauchverhalten von Gesamtfahrzeugen. Diss., TU München (2003)
163. Klingenberg, H.: Automobil-Messtechnik. Bd. A: Akustik, Bd. B: Optik, Bd. C: Abgasmesstechnik. Springer (1988, 1994, 1995)
164. Schöggl, P., Steinmeier, C.: Rollenprüfstände als fester Bestandteil der Fahrzeug-Entwicklungskette. ATZ , 686–693 (2002)
165. Weibel, K.-P.: Mehr als 10 Jahre Betriebsfestigkeitsprüfung mit den Mehrkomponenten-Prüfständen der BMW AG. ATZ , 193–198 (1987)
166. Kostka, J., Ziegler, P.: Int. Symp. Verbrennungsdiagnostik. MTZ **6**, 142–147 (2005)
167. Kubach, H.: Ionenstrom als Sensorsignal der dieselmotorischen Verbrennung. Diss., Uni. Karlsruhe (2004)
168. Hagemann, G., et al.: Universelle Prüfumgebung für Untersuchungen des Antriebsstrangs. ATZ , 128–136 (2003)
169. Potthoff, J., et al.: Die neue Laufbandtechnik im IVK-Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart. ATZ , 53–61, 150–160 (2004)
170. Hucho, W.H.: Aerodynamik des Automobils. Vieweg, Wiesbaden (2005)
171. Moog, W.: Ähnlichkeits- und Analogielehre. VDI-Verlag, Düsseldorf (1985)
172. Czichos, H. (Hrsg.): Handbook of Materials Measurement Methods. Springer (2005)
173. Signer, M.: Leistungstests von Kraftstoffen und Schmierölen. MTZ , 112–115 (2005)
174. Gühmann, C., Riese, J.: Testautomatisierung in der Hardware-in-the-Loop Simulation. VDI-Ber. Bd. 1672, S. 511–527 (2002)
175. Kluge, J., Klages, B.: Hardware-in-the-Loop-Simulation und Testautomatisierung. ATZ/MTZ (VW Phaeton-Sonderausgabe), 138–144 (2002)
176. Honisch, A., et al.: Vollautomatisierter Test von Steuergeräte-Netzwerken. ATZ/MTZ (Sonderausgabe Mercedes A-Klasse), 36–39 (2004)
177. Mehrere Autoren: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen. Haus der Technik Essen, 30.11./1.12.1998. Expert-Verlag, (2000, 2002, 2006)
178. Heißing, B., Brandl, H.J.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. Vogel (2002)
179. Gundler, E.: Lässt sich gefühlte Qualität objektiv beurteilen? Techn. Rundschau , 36–39 (2004)
180. Gruening, I.: Driving simulation. SAE-Paper 980223
181. Mehrere Autoren: Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten. VDI-Ber. 1745 (2003)
182. Mehrere Autoren: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Ber. 1864 (2004)
183. Langerl J.W.: Entwicklung einer Simulation zur Abprüfung einer 12-Jahre-Gewährleistung gegen Durchrostung. Symp. „Steel and Automotive Body", Cannes, 17. Juni 1999
184. Michler, T.: Bionisches Diagnoseassistentsystem für die Dauererprobung autonom fahrender Personenkraftwagen. Diss., TU Braunschweig (2002)
185. Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung. Diss., TU München (1996)
186. Eckstein, L., van Gijssel, A.: HMI guidelines and their effect on process, product and traffic safety. SAE 2006-01-0574
187. Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung. Hanser, München (2001)
188. Röpke, K.: Design of Experiments in der Motorenentwicklung. MTZ , 414–415 (2002)
189. Lütkemeyer, G., et al.: Effektive Strategien für Motorsteuerungsapplikationen. MTZ , 602–604 (2002)
190. Deuschl, M.: Gestaltung eines Prüffelds für die Fahrwerksentwicklung unter Berücksichtigung der virtuellen Produktentwicklung. Diss., TU München (2005)
191. Denkmayr, K., et al.: Die load-Matrix – Der Schlüssel zum intelligenten Dauerlauf. MTZ , 924–930 (2003)
192. Dick, M.: Virtuelle Probefahrt mit dem neuen Audi A6. Automobil- und Motortechn., Konf. Virtual Product Creation, Stuttgart, 2004
193. Leucht, R., et al.: Abstimmung und Erprobung – Komfort auf vier Rädern. ATZ/MTZ (Sonderausgabe „Der neue Maybach" September 2002), 152–159 (2002)
194. Dippold, J.: In der ganzen Welt zu Hause. ATZ/MTZ (Sonderausgabe 6er BMW), 168–173 (2004)
195. Meisenzahl, J., et al.: Innovation und Zuverlässigkeit durch systematische Testplanung und Testspezifikation. VDI-Ber. Bd. 1907, S. 175–198 (2005)
196. Röser, P., et al.: Testergebnisse im Klimawindkanal von Modine Europe in Übereinstimmung mit Straßenmessungen, Bd. 2, S. 245–264. 7. Int. Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 20./21. März 2007

197. Sterneus, J.: Installation of a moving ground simulation system in the Volvo wind tunel, Bd. 2, S. 281–294. 7. Int. Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 20./21. März 2007
198. Mehrere Autoren: Hybrid vehicles and energy management. 4. Symp. Gesamtzentrum für Verkehr Braunschweig, 14./15. Februar 2007
199. Röpke, K., et al.: Rapid measurement. MTZ , 276–282 (2007)
200. Gattringer, O., et al.: Virtueller Rufstand-Versuch und Simulation rücken zusammen. chassis.tech 2007, TU München und TÜV Süd Automotive GmbH (März 2007)
201. Rinkens, T., et al.: Mechanikerprobung bleibt notwendig. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, S. 1045–1067 (2006)
202. Blucha, F., et al.: Requirement engineering is the key to mastering ECU networks. Autotechnology **6**, 48–51 (2006)
203. Mehrere Autoren: Zur Bestimmung des Kraftstoff-Normalverbrauchs gibt es weltweit unterschiedliche Fahrzyklen. Zukünftig soll es jedoch möglichst eine einzige „Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure" geben. Automobil Industrie **9** (2010)
204. Potthoff, J., et al.: 20 Jahre Fahrzeugwindkanäle der Universität Stuttgart am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen. ATZ , 940–952 (2009)
205. Duell, E., et al.: The BMW AVZ Wind Tunnel Center. SAE 2010-01-0118
206. Special, A.V.L.: Der Rollenprüfstand als Entwicklungsplattform. ATZ , 841–860 (2009)
207. Goroncy, J., Hammer, H.: Vier Jahreszeiten. Automobilindustrie **9**(44/45) (2010)
208. Mehrere Autoren: Crash. tech. 2010, TÜV Süd (April 2010)
209. Petschenig, E., et al.: Differentielle Erfassung von Strömungsfeldern in der Motorenentwicklung. MTZ **5**, 332–338 (2010)
210. Münchhoff, I., et al.: Method for visualization and handling of brake dust emissions. Chassis. tech. plus 2010, Berichtsband S. 485–496, München (Juni 2010)
211. Mohr, P.: Dem Fehler auf der Spur. Hanser Automotive **11**, 49–52 (2008)
212. Kern, P., et al.: Durchgängiges Sicherheitskonzept für die Prüfung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. ATZ elektronik **05**, 22–29 (2009)
213. Eismann, W., Jacoby, H.: Function-in the loop-Tests für Steuer- und Regelfunktionen. ATZ elektronik **06**, 58–63 (2009)
214. Duesti, P.: Verbindung von Human- und Hardware-in the loop-Testing verkürzt Entwicklungszeit. ATZ , 764–769 (2009)
215. Gibitz, J.: Ströme und Spannungen an Hybridsystemen sicher messen. ATZ elektronik **02**, 54–59 (2009)
216. Jacobsen, M., Geiselhart, R.: EMV-Herausforderungen bei Hochvoltsystemen in alternativen Antrieben. ATZ elektronik **02**, 46–53 (2009)
217. Kern, D.: Stillstandsmanagement. 1. Automobiltechn. Kolloquium, TUM Garching, April 2009
218. Mehrere Autoren: AAET-Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. 10. Braunschweiger Symp., Gesamtzeitraum für Verkehr, Februar 2009, Braunschweig
219. Mehrere Autoren: Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit. VDI-Ber. 2104 (2010)
220. jr.: Kooperation zwischen Design und Test ist ungenügend. Hanser Automotive 7/8, 69–70 (2008)
221. Vögl, R., et al.: Innovative Anwendung des Rollenprüfstands für die Fahrbarkeitsabstimmung. ATZ , 853–860 (2009)
222. Schretter, N., et al.: Planung und Realisierung von automatisierten Fahrmanövern zur Erprobung von aktiven Sicherheitssystemen. 3. Grazer Symp. Virtuelles Fahrzeug, Mai 2010
223. Illmeier, F., Pfister, F.: Virtuelles Fahren am Antriebsprüfstand. 3. Grazer Symp. Virtuelles Fahrzeug, Mai 2010
224. Friedrich, A., et al.: Erprobung und Abstimmung Mercedes-Benz E-Klasse. ATZ extra (Januar), 184–195 (2009)
225. Anon.: Der Weg zum Zero-Error-Testing. Automobil-Elektronik (Dezember 2008), S. 24–25
226. Ungermann, I., et al.: Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung unter Einbeziehung von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten zu [92], VDI-Berichte 2031 (2008)
227. Mehrere Autoren/Artikel: Testsysteme für Hybridfahrzeuge. Hanser Automotive 7/8, 32–37 (2010)

**Literatur zu Abschnitt 11.5**

228. VDA (Hrsg.): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, 1. Aufl. Bd. 4: Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. Frankfurt am Main (1998)
229. VDA (Hrsg.): Sicherung der Qualität von Lieferungen: Lieferantenauswahl, Qualitätssicherungsvereinbarung, Produktionsprozess und Produktfreigabe, Qualitätsleistung in der Serie, 4. Aufl. (2004)
230. VDA (Hrsg.): Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette, Bd. 1: „Reifegradabsicherung", Bd. 2 „Robuste Prozesse" (2006/2007)
231. Masing, W. (Hrsg.): Handbuch der Qualitätssicherung. Hanser Verlag (1988)
232. Braunsperger, M.: Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf. Diss., TU München (1992)
233. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: VDI/VDE 3542 „Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer Systeme" (1995)
234. Balzert, H.: Software-Qualitätssicherung. In: Lehrbuch der Software-Technik. Spektrum Akadem. Verlag (1998)
235. DIN EN ISO 9001–12000 „Qualitätsmanagement-Systeme" Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1999, 2002

236. Uehlinger, K., Almen, W.: Das Handbuch der Erfolgskompetenz TQM live. Smart Book's Publishing AG, (1999)
237. Kuhlang, P., et al.: Software-Entwicklung entlang der Prozesskette – ISO 9000-Zertifizierung auf der Basis von TQM-Grundsätzen. QZ , 286–292 (1999)
238. Hartig, F.: Qualitätsmanagement im Wandel. 5. Handelsblatt-Jahrestagung „Vision Automobil", München, 21./22. Mai 2001
239. Isermann, R.: Fehlertolerante Komponenten für Drive by Wire-Systeme. ATZ , 382–393 (2002)
240. Geyer, E.: Qualität als Wettbewerbsvorteil. Autom. Electron. **II**(Sonderausgabe ATZ/MTZ/Autom. Eng. Partners), 30–34 (2004)
241. Hu, M., et al.: Essentials of Design Robustness in Design for Six Sigma (DFSS) Methodology. SAE 2004-01-0813
242. Stumvoll, H.: Return on Quality (ROQ): Wirtschaftlichkeit von Produktqualität aus Unternehmenssicht. Diss., RWTH Aachen (2004)
243. Janouch, S.: In der Qualitäts-Sackgasse. Electronik automotive **6**, 79–81 (2006)
244. Kamiske, G., Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A bis Z, 5. Aufl. Carl Hanser Verlag (2006)
245. Schleuter, W., et al.: Qualitätsmanagement in der Prozesskette Elektrik/Elektronik. ATZ elektronik **01**, 6–12 (2007)
246. www.efqm.com
247. Thomas, M., Singh, N.: Design for Lean Six Sigma (DFLSS): Philosophy, Tools, Potential and Deployment Challenges in Automotive Product Development. SAE 2006-01-0503
248. Rehbein, R., et al.: Produkt- und Prozessdesign für Six Sigma mit DFSS. Publics Corporate Publishing (2007)
249. Knöfel, P., et al.: Six Sigma-Methoden und Statistik für die Praxis, 2. Aufl. Springer Verlag (2009)
250. Schmitt, R., Pfeifer, P.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken, 4. Aufl. Hanser Fachbuch Verlag (2010)
251. Varwig, J.: Zehn Jahre Entwicklung des Qualitätsmanagements – Schlingerkurs zur Spitze. QZ **10**, 22–29 (2010)
252. Brückner, C.: Qualitätsmanagement – Das Praxishandbuch für die Automobilindustrie, 1. Aufl. Carl Hanser Verlag (2011)
253. www.efqm.org. EFQM Excellience Model 2010


**Literatur zu Abschnitt 11.6**


254. DIN 31 051: Grundlagen der Instandhaltung, Juni 2003
255. KR 00 020: Konstruktionsrichtlinie: Instandhaltungsgerechte Konstruktion von Kfz, Modulen, Baugruppen u. -teilen, Volkswagen AG, Wolfsburg (März 1999)
256. VDI 2246 Blatt 1: Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse; Grundlagen VDI 2246 Blatt 2: Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse; Anforderungskatalog, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf (März 2001)
257. VW 011 54: Entwicklungsbedingungen; Allgemeine Anforderungen, Volkswagen AG, Mai 2001, Wolfsburg
258. DIN EN 13306: Begriffe der Instandhaltung (September 2001)
259. VDA: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, 3. Aufl. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Frankfurt (2000)
260. Steinecke, K.: Wahrscheinlichkeitsnetz für nach Weibull verteilte Werte. Beuth-Verlag, Berlin (1979)
261. Eichler, C.: Instandhaltungstechnik, 4. Aufl. Verlag Technik, Berlin (1990)
262. Liskowsky, V.: Untersuchungen zur Primärdatenerfassung und -aufbereitung zwecks Ermittlung der Zuverlässigkeit von Kraftfahrzeugen. Dissertation, Ingenieurhochschule Zwickau (1983)
263. Deutsche Akademie f Verkehrswissenschaft: 40. Deutscher Verkehrsgerichtstag 2002. Brune-Mettcker Druck- u. Verlagsgesellschaft, Jever (2002)
264. ADAC: Energieeffizienzklassen. ADAC-Verlag (2002)
265. Sanden, Danner, Küppersbusch: Nutzungsausfallentschädigung, Schwacke Liste, eurotaxschwacke, Maintal, 2004
266. Härdler, J.: Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure, 1. Aufl. Carl Hauser, München/Wien (2001)
267. Brachat, H., et al.: Grundlagen der Automobilwirtschaft, Autohaus, 1. Aufl. Ottobrunn (1994)
268. Lennermark, A.: Ein Unternehmen, das mit der Zeit geht, Fa. Consulting AB, Örebro, Schweden (März 2002)
269. Warnecke, H.J.: Instandhaltung Grundlagen. TÜV Rheinland GmbH, Köln (1981)
270. Danner, M., et al.: Crash-Reparaturversuche – Eine Entwicklung des Allianz Zentrum für Technik. In: Der Maschinenschaden. Allianz Versicherung-AG, München (1985)
271. RCAR: The Procedure for Conducting a Low Speed 15 km/h Offset Insurance Crash Test to Determine the Damageability and Repairability Features of Motor Vehicles, Motor Insurance Repair Research Centre, Thatcham, England (Mai 1994)
272. IIHS: Low-Speed Crash Tests, Insurance Institute of Highway Safety (IIHS). Washington, USA (1969)
273. Anselm, D.: Die Pkw-Karosserie, 1. Aufl. Vogel, Würzburg (1997)
274. Damschen, K., et al.: Karosserie-Instandsetzung, 4. Aufl. Vogel, Würzburg (1998)
275. Redlich, J.: Neue Kaskostruktur in der Autoversicherung, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV), Vortrag, Berlin, Juli 2002
276. SAE J 1551: Recommended Practice for Optimizing Automobile Damageability, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, USA (1993)
277. Thatcham: Fahrzeugkonstruktionsmerkmale für optimales Aufprallverhalten bei niedriger Geschwindigkeit, Motor Insurance Repair Research Centre, 1. Aufl. Thatcham, England (1994)

278. Weber, G.: Servicefreundliche Fahrzeugkonstruktion, FH Braunschweig/Wolfenbüttel, Vorlesungsmanuskript, Wolfsburg, 2002
279. Thatcham: The British Insurance Industry's Criteria for Vehicle Security, Motor Insurance Repair Research Centre, 4. Aufl. Thatcham, England (2000)
280. TFFN 801: Car Alarm Requirements and Test Methods, Swedish Motor Insurers'Bureau, 1. Aufl. Stockholm, Schweden (1998)
281. TFFN BKK 9007: Egenskapsnorm Dörrlas, Trafikföräkringsföreningens Norm, 1. Aufl. Stockholm, Schweden (1990)
282. van der Mooren, A.L.: Instandhaltungsgerechtes Konstruieren und Projektieren. Springer, Berlin (1991)
283. Schüttemeyer, K., et al.: Herstellergeschützte Reparatur. ATZ/MTZ (VW Phaeton Sonderausgabe) (2002)
284. Betriebsanleitung und Wartungskarte für Volkswagen – Kleinlieferwagen, VOLKSWAGENWERK AG WOLFSBURG, August 1966, Wolfsburg
285. Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch. Wiesbaden (1974)
286. Gesetz über die Entsorgung von Altfahrzeugen vom 21. Juni 2002; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 41, Bonn, 28. Juni 2002
287. DAT: DAT-Sachverständigenhandbuch. Ostfilder-Scharnhausen (2004)
288. GVO 1400/2002: Verordnung der Kommission (EG) vom 01. August 2002
289. Nickel, E.: Warranty Cost Reduction through Tele-Diagnostics and New Analytics Methods. Automobil Elektronik Fachkongress, Ludwigsburg, 20./21. September 2006
290. Hollmotz, L., Horn, C.: Hochvolt in der Werkstatt – Elektrifizierte Antriebe als Herausforderung für die After-Sales-Prozesse. VDI-Berichte, Bd. 2105, S. 159 (2010)

# Rennfahrzeuge

*Dipl.-Ing. Carsten Dieterich, Dipl.-Ing. Christoph Müller und Dipl.-Ing. (FH) Frank Nysten*

12.1 **Einsatzbedingungen** – **1372**

12.2 **Fahrzeug-Kategorien** – **1373**

12.3 **Bauweise** – **1375**

12.4 **Performance und Rundenzeit** – **1383**

12.5 **Entwicklung Aerodynamik und Fahrdynamik** – **1385**

12.6 **Zuverlässigkeit** – **1390**

**Literatur** – **1390**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_12

## 12.1 Einsatzbedingungen

### 12.1.1 Sportbehörde

Rennfahrzeuge werden für die Teilnahme an Wettbewerben konstruiert bzw. von Serienfahrzeugen abgeleitet. Die Rahmenbedingungen der jeweiligen Rennserie werden von einer Sportbehörde festgelegt und überwacht. Die größte Bandbreite weltweit deckt dabei die FIA ab, unter anderem mit den Weltmeisterschaften Formel 1 (F1), Rallye (WRC), Prototypen und GT (WEC), Tourenwagen (WTCC). Die Rahmenbedingungen sind im Reglement verankert, das in der Regel aus einem technischen und einem sportlichen Teil besteht [1].

### 12.1.2 Technik-Reglement

Wichtigste Grundlage für die Konzeption und Entwicklung eines Rennfahrzeugs ist das Technik-Reglement. Es enthält Vorgaben zur Bauweise von Fahrzeug und Antrieb, zu geometrischen Restriktionen, Gewichtsgrenzen, Sicherheitsmerkmalen und zur Bereifung. Formel-Fahrzeuge werden dabei von Grund auf nach einem feststehenden Reglement konstruiert. Im GT- und Tourenwagensport dagegen sind die Rennfahrzeuge von Serienmodellen abgeleitet. Das Reglement muss in diesem Fall spezielle Kriterien enthalten, um trotz unterschiedlicher Voraussetzungen der Basismodelle ein wettbewerbsfähiges Feld von Rennfahrzeugen zu gewährleisten („Balance of Performance"). Solche Kriterien sind zum Beispiel der zulässige Eintrittsquerschnitt der Motoransaugluft („Air Restrictor"), der Ladedruck bei aufgeladenen Motoren, das Fahrzeuggewicht oder der Tankinhalt. Die Einstufung einzelner Fahrzeuge kann dabei auch während einer laufenden Saison geändert werden.

Hinzu gekommen sind in den letzten Jahren verstärkt Auflagen zur Kostenreduzierung: exotische Werkstoffe werden verboten, Mindestgewichte und Schwerpunktlagen für Motoren definiert, die Motorleistung und Drehzahl begrenzt sowie die Verwendung von Einheitskomponenten wie Motorsteuerung oder Reifen vorgegeben. Mindestlaufleistungen bzw. verlängerte Wechselintervalle schränken den Teiledurchsatz ein. Der Technikstand wird vielfach über eine Saison eingefroren oder es wird nur eine begrenzte Zahl von Entwicklungsschritten erlaubt. Stellenweise werden Versuche unternommen, weltweit technisch einheitliche Reglements festzulegen, z. B. im Bereich des Prototypensports zur Angleichung der amerikanischen und europäischen Reglements oder zwischen DTM („Deutsche Tourenwagen Masters") und der japanischen Super-GT Serie.

Ebenfalls Bestandteil des Technik-Reglements sind die Prüfmethoden, mit denen seine Einhaltung überwacht wird. Dazu zählen statische und dynamische Crashtests, Mess- und Wiegeprozeduren, aber auch die gezielte Belastung von aerodynamischen Bauteilen, um deren regelkonformes Verhalten im Fahrbetrieb sicherzustellen.

### 12.1.3 Sport-Reglement

Das Sport-Reglement enthält alle notwendigen Vorgaben zum Rennformat und dem Austragungsmodus einer Meisterschaft. Diese umfassen insbesondere:

- Teilnahmevoraussetzungen für Fahrer und Teams,
- Testrestriktionen,
- Fahrzeugabnahme,
- Rollen von Rennleitung und Sportkommissaren sowie ihre Arbeitsweise bis hin zum Strafenkatalog bei Regelverstößen,
- Zuteilung und Verwendung von Reifen,
- Ablauf einer Veranstaltung mit Zahl und Dauer der freien Trainings, der Qualifikationen und Rennen,
- Qualifikationsmodus und die sich daraus ergebende Startaufstellung,
- Startprozedur, Dauer des bzw. der Rennen sowie Tankstopps und Reifenwechsel während des Rennens,
- Anzahl der Mechaniker, die während eines Boxenstopps gleichzeitig am Fahrzeug arbeiten dürfen,
- Siegerehrung und Pressetermine,
- Punkteverteilung und Meisterschaftswertung.

Durch die Reglementierung von Tankstopps und Reifenwechseln im Rennen nimmt auch das Sport-Reglement Einfluss auf das Fahrzeugkonzept. Mit dem Nachtankverbot in der Formel 1 musste z. B. der Kraftstofftank von vorher ca. 85 kg Fassungsvermögen auf die doppelte Kapazität vergrößert werden. Der Radstand der Fahrzeuge ist dadurch angewachsen, die Belastung der Reifen durch das höhere Gewicht bei Rennbeginn gestiegen.

In einigen Rennserien nimmt das Sport-Reglement auch direkt auf den Rennablauf Einfluss, beispielsweise durch eine Pflicht zum Fahrerwechsel oder durch eine Startaufstellung, die erfolgreiche Fahrer weiter hinten platziert („Reverse Grid“).




**Abb. 12.1** WRC-Fahrzeug VW Polo R WRC (Quelle: Volkswagen Motorsport)

## 12.2 Fahrzeug-Kategorien

Eine umfassende Darstellung der Technik von Rennfahrzeugen, beginnend mit der Einteilung von Wettbewerbsfahrzeugen in verschiedene Kategorien, hat Trzesniowski erarbeitet [2].

Grenzt man das Spektrum auf den Automobilsport ein und klammert Sonderformen wie Karts und Dragster aus, dann bleibt immer noch eine Vielzahl von Klassen für den Einsatz auf der Straße bzw. auf unbefestigtem Terrain.

Cross Country Rallyes führen über lange Distanzen fast ausschließlich durchs Gelände. Die FIA unterscheidet zwischen seriennahen (T2) und stark modifizierten (T1) Fahrzeugen sowie Trucks (T4). Gemeinsame Merkmale sind verstärkte Fahrwerke mit großen Federwegen, erhöhte Bodenfreiheit und Unterfahrschutz. Die Karosserie basiert in der T2-Klasse auf dem Serienfahrzeug, während ein T1-Aufbau aus einem hochfesten und steifen Rohrrahmen besteht, auf den eine leichte, nichttragende Außenhaut aufgesetzt wird.

Rallye-Fahrzeuge sind für Sprintprüfungen ausgelegt, die zum Teil auf Asphalt, zum Teil auf unbefestigten Pisten ausgetragen werden. Auch hier sind die Fahrzeuge in verschiedene Klassen eingeteilt, je nach Seriennähe, Motorisierung und Zweirad- bzw. Vierradantrieb. Zum Zweck der Kostensenkung gilt ab 2011 in der World Rally Championship (Abb. 12.1) und in der World Touring Car Champi-




**Abb. 12.2** Tourenwagen nach TC1 Reglement Honda Civic WTCC (Quelle: Honda)

onship, also im Rallye- und im Tourenwagen-Sport, ein einheitliches Motorenreglement: Zum Einsatz kommen 1,6 l Vierzylindermotoren mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Die Motoren können als reine Rennmotoren oder basierend auf einem Serienmotor ausgeführt werden.

Für den Sport auf der Straße, also Slalom-, Berg- und Rundstrecken-Rennen, gibt es eine Vielzahl von Fahrzeugklassen. Tourenwagen sind von einem Serienfahrzeug abgeleitet, ihre Technik darf nur in der Top-Kategorie TC1 deutlicher modifiziert werden (Abb. 12.2). Karosseriestruktur und Außenhaut werden beibehalten, ein Rohrkäfig erhöht Steifigkeit und Crash-Sicherheit, Fahrwerk und Motor



**Abb. 12.3** GT-Rennfahrzeug Porsche 911 GT3 R (Quelle: Porsche)



**Abb. 12.4** LMP-1-Fahrzeug Porsche 919 Hybrid (Quelle: Porsche)

werden unterhalb der Top-Kategorie auf Serienbasis entwickelt.

Auch das GT Reglement baut auf Serienfahrzeugen auf. Ausgangsbasis sind hier Sportwagen in Blech-Schalenbauweise oder mit CFK-Karosserie (Abb. 12.3). Während die GT4-Klasse nahezu dem Serienstand entspricht, sind in den Klassen GT3 und GT2 größere Modifikationen erlaubt. Das Leistungsniveau reicht von 300 bis deutlich über 400 kW. Unterschiedliche Fahrzeug- und Antriebskonzepte werden durch eine „Balance of Performance" auf vergleichbare Leistungsfähigkeit angeglichen. Dadurch gibt es in Abhängigkeit von der Rennstreckencharakteristik unterschiedliche potentiell siegfähige Fahrzeuge.

Nur äußerlich dem Produktionswagensport zuzuordnen sind Fahrzeuge mit einer Seriensilhouette, deren Technik jedoch von Grund auf nach einem Rennreglement entwickelt wurde (Beispiele: NASCAR, DTM). In der Regel wird diese Bauweise mit der Vorgabe von Standardkomponenten verbunden, um Entwicklungsaufwand und Teilekosten einzugrenzen.

Zukünftig sollen z. B. die Fahrzeuge der DTM auch in der japanischen GT-Serie einsetzbar sein und japanische GT-Fahrzeuge gleichermaßen in der DTM. Der ursprüngliche Plan, diese Änderung ab 2017 einzuführen, ist jedoch vorerst verschoben worden.

Eine Grundsatzproblematik im Produktionswagensport besteht in der unterschiedlichen Eignung der jeweiligen Basisfahrzeuge für den Renneinsatz. Ein wettbewerbsfähiges Starterfeld lässt sich häufig nur durch Angleichung der Leistungsfähigkeit einzelner Fahrzeuge mittels Handicaps bzw. Zugeständnissen („Waiver") erreichen. Diese Notwendigkeit entfällt bei Sport-Prototypen und Formel-Fahrzeugen, da diese von vornherein nach einem vorgegebenen Reglement konstruiert werden.

Sport-Prototypen werden dabei nach dem Reglement der FIA homologiert und kommen bei der WEC (World Endurance Championship) und dem damit verbundenen 24 Stunden Rennen von Le Mans zum Einsatz (Abb. 12.4 und Tab. 12.1).

Mit der Zulassung von aufgeladenen Motoren und von Hybridantrieben trägt das Reglement den allgemeinen Entwicklungstrends in der Antriebstechnik Rechnung. Darüber hinaus wird der maximale Kraftstoffmassenstrom begrenzt und überwacht. Mit Einführung des seit 2014 geltenden Reglements wird somit Effizienz als Entwicklungsziel in den Vordergrund gestellt.

Formel-Fahrzeuge decken den breiten Bereich von verschiedenen Markenformeln für Junioren über internationale Nachwuchs-Rennserien wie die Formel 3 bis hin zur Formel 1 ab. Die Motorleistung liegt zwischen 120 (Formel 4) und ca. 480 kW (Formel 1, 2015).

Gemeinsame Merkmale sind frei stehende Räder, ein Sitz, ein CFK-Monocoque mit Crash-Elementen sowie eine Motor-Getriebe-Einheit vor der Hinterachse, die entweder voll tragend oder in einem Hilfsrahmen verbaut ist. Formel-Fahrzeuge weisen im Vergleich mit anderen Kategorien das

**Tabelle 12.1** LMP-Fahrzeuge (Sport-Prototypen FIA Regulations 2016) [10, 11]

| | LMP1 | LMP1H | | | | LMP2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fahrzeuggewicht | 855 kg | 875 kg | | | | 900 kg |
| Motorkonzept | 4-Takt-Hubkolbenmotor | | | | | Serienmotor* |
| maximaler Hubraum, ohne Aufladung | 5500 $cm^3$ | frei | | | | 5000 $cm^3$, 8 Zyl. Maximum |
| maximaler Hubraum, mit Aufladung | 5500 $cm^3$ | frei | | | | 3200 $cm^3$, 6 Zyl. Maximum |
| Leistungsbegrenzung | Kraftstoffbegrenzung** | | | | | Luftmengenbegrenzer |
| Hybridsystem | – | maximal zwei Energiekuperationssysteme | | | | – |
| maximal abgegebene Energiemenge pro Runde | – | < 2 MJ/Lap | < 4 MJ/Lap | < 6 MJ/Lap | < 8 MJ/Lap | – |
| Tankgröße Otto | 67,4 l | 62,5 l | | | | 75 l |
| Tankgröße Diesel | 53,7 l | 49,9 l | | | | – |

* basierend auf Serienmotor, mindestens 1000 Stück in 12 Monaten gebaut. Frei käuflich für max. € 80.350.–
** maximale Kraftstoffenergiemenge pro Runde, maximaler Kraftstoffvolumenstrom sinkend mit steigender homologierten Hybridklasse (0, 2, 4, 6, 8 MJ/Runde)

niedrigste Gewicht und den tiefsten Schwerpunkt auf und erreichen damit die höchste Fahrdynamik bzw. die schnellsten Rundenzeiten.

## 12.3 Bauweise

Im Folgenden werden Bauweise und Auslegungskriterien von Rennfahrzeugen am Beispiel der Formel 1 gezeigt, da sich deren Technik am stärksten von Serienfahrzeugen unterscheidet.

### 12.3.1 Monocoque

Zentrales Element eines Formel-Fahrzeugs ist das Monocoque (Abb. 12.5). Es umfasst das Cockpit mit eingebauter Pedalerie und den Sicherheits-Kraftstofftank als geschlossene Zelle. Mindestmaße für Cockpit-Querschnitt und -Öffnung sind vorgeschrieben.

#### 12.3.1.1 Struktur

Ein modernes Formel 1 Monocoque muss zwei wesentliche Anforderungen erfüllen. Das Design und die Struktur müssen auf optimale Fahrleistungen ausgelegt werden und gleichzeitig größtmögliche Sicherheit für den Fahrer gewährleisten.



**Abb. 12.5** F1-Monocoque (Quelle: Sauber)

Optimale Fahrleistungen werden besonders durch minimales Gewicht, tiefe Schwerpunktlage, optimierte Torsionssteifigkeit und genau definierte lokale Steifigkeiten an den Fahrwerks- und Motoranbindungspunkten erreicht.

Der hohe Sicherheitsstandard wird durch den Nachweis der strukturellen Integrität für alle im Betrieb auftretenden Belastungen aus Aerodynamik und Fahrwerksanregung erreicht. Zudem be-

schreibt das Reglement der FIA zahlreiche sicherheitsrelevante statische und dynamische Belastungstests, welche für die Homologation respektive Zulassung zum Rennbetrieb erfüllt werden müssen [1].

Anhand der statischen Belastungstests muss die Strukturfestigkeit jeder Fahrersicherheitszelle an verschiedenen Stellen der Seitenwand, am Cockpitrand und am Tankboden nachgewiesen werden. Zusätzlich muss beispielsweise der Hauptüberrollbügel hinter dem Fahrer so ausgelegt werden, dass neben klar definierten Kräften in lateraler und longitudinal rückwärtiger Richtung auch einer Belastung von 90 kN in vertikaler Richtung standgehalten wird. Für die Befestigungen der vorderen (Fahrzeugnase) und seitlichen Crash-Strukturen ist eine vorgeschriebene Mindestfestigkeit bei Lateralbelastung zu erreichen [1].

Die FIA definiert zudem dynamische Belastungstests aus Front-, Heck- und Seitenaufprall und Kopfaufprall auf die Lenksäule. Diese sogenannten Crash-Tests müssen in einem von der FIA anerkannten Testzentrum absolviert werden.

Zudem muss die Monocoque Seitenwand genügend Widerstand gegen das Eindringen von Fremdstrukturen (z. B. Crash-Strukturen anderer Fahrzeuge bei einem 90° Aufprall zweier Fahrzeuge) aufweisen. Dies wird für die Seitenwand in einem Eindringtest der FIA nachgewiesen.

#### 12.3.1.2 Entwicklung

Zur Entwicklung eines Monocoque werden moderne Simulationsmethoden angewendet. Nur so kann in der kurzen Entwicklungsphase eine hochoptimierte und sichere Bauweise entstehen. Das strukturmechanische Verhalten wird mit der Finiten Element Methode (FEM) modelliert. Der Laminataufbau wird mit speziellen Laminat-Pre- und Postprozessoren erstellt.

Die meisten Anforderungen können mit linear statischer Berechnung abgedeckt werden. Selbst dynamische Belastungen (aus Front-, Heck- und Seitenaufprall) können quasistatisch mit den maximal auftretenden Belastungsspitzen berechnet werden. Nichtlineare Berechnungen sind nur dann notwendig, wenn hohe Verformungen und/oder Materialplastizität, wie beispielweise beim Überrollbügel, berücksichtigt werden müssen.

#### 12.3.1.3 Fertigung

Die Faserverbundbauweise bringt einen hohen Integrationsgrad mit sich. Deshalb besteht das Monocoque aus wenigen, dafür aber komplexen Einzelteilen. Für eine effiziente Fertigung wird es aus einer oberen und einer unteren Schale zusammengesetzt (seltener, aber durchaus möglich, ist eine Trennung vorne/hinten bzw. links/rechts).

Im Inneren des Monocoque gibt es Bauteile zur Verstärkung respektive Aussteifung. Die Tankvorderwand ist gleichzeitig auch die Befestigung des Sicherheitsgurts. Im vorderen Teil des Monocoque gibt es einen Fahrwerksspant, welcher alle Elemente des Fahrwerks aufnimmt.

Der Laminataufbau besteht aus Kohlefaser und einem Wabenkern aus Aluminium in Sandwichbauweise. Aufgrund der geringen Stückzahl an Monocoques pro Saison (4 Stück pro Saison, je nach Budget [3]) kommt die „Prepreg Technologie“ (vorimprägnierte Gewebe- und unidirektionale Lagen) zum Einsatz. Es werden verschiedene hochmodulige und hochfeste Kohlefasern verwendet. Üblicherweise wird ein Epoxidharz verwendet. Für die lokalen Krafteinleitungen werden Inserts aus Kohlefaser, Aluminium und Titan in Aussparungen des Wabensandwichs geklebt.

Der hohe Optimierungsgrad und die Struktureffizienz bringen einen erheblichen Fertigungsaufwand mit sich. Das Laminat besteht aus bis zu 60 einzelnen Kohlefaserlagen und wird in Handarbeit eingelegt [3]. Der ungefähre Aufwand für die verschiedenen Bauabschnitte ist wie folgt:

- Außenhaut Laminat ca. 400 h,
- Wabensandwich und Inserts ca. 400 h,
- Innenhaut Laminat ca. 200 h.

Das Laminat härtet nicht bei Raumtemperatur aus und muss deshalb im Autoklaven (Druckofen) gebacken werden („Curing Prozess“). Je nach Harzsystem und Einsatzbereich wird bei unterschiedlich hohen Temperaturen ausgehärtet. Das Monocoque wird bei ca. 135 °C gebacken und muss für die Einzelschritte mehrmals in den Autoklaven.

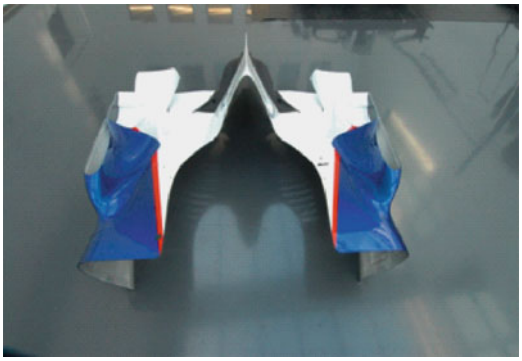


**Abb. 12.6** Bodywork (Quelle: Sauber)

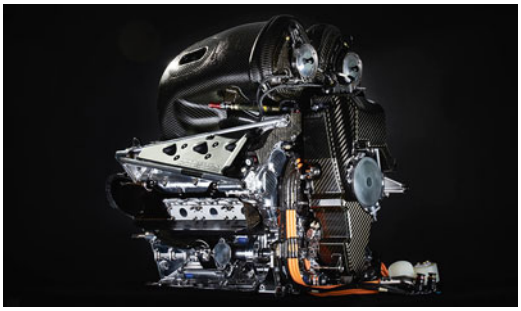


**Abb. 12.7** F1-Motor Mercedes-Benz PU106B Hybrid (Quelle: MERCEDES AMG PETRONAS Formula One Team)

### 12.3.2 Bodywork

Die Karosserie-Außenhaut (Bodywork, Abb. 12.6) besteht aus der Nase mit integriertem Crash-Element und Frontflügel, dem Unterboden, den Seitenkästen, der Antriebsabdeckung, dem Heckflügel und diversen Anbauteilen. Sie wird nach aerodynamischen Kriterien gestaltet und ebenfalls aus CFK im gleichen Verfahren hergestellt.

### 12.3.3 Antrieb

Bereits seit der Saison 2009 sind in der Formel 1 Systeme zur Rückgewinnung kinetischer Energie zugelassen. Das ab 2014 gültige neue technische Reglement definiert eine F1-Antriebseinheit („Power Unit"), bestehend aus Verbrennungsmotor und zwei Systemen zur Energierückgewinnung. Das minimale Gewicht dieser Einheit ist auf 145 kg beschränkt und die Höhe des Schwerpunktes muss mindestens 200 mm betragen. Die Weiterentwicklung der Antriebseinheit für die folgenden Jahre ist limitiert möglich. Änderungen verschiedener Komponenten und Systeme der Antriebseinheit werden mittels unterschiedlicher Wichtungsfaktoren („Token") bewertet. Die Gesamtsumme der Token pro Jahr ist dabei beschränkt.

#### 12.3.3.1 Motor

Das Anforderungsprofil eines F1-Motors unterscheidet sich deutlich von dem eines Serienmotors für den Einsatz in globalen Märkten: Leistung, Gewicht bzw. Package und Zuverlässigkeit über die geforderte Laufleistung sind die entscheidenden Merkmale. Bis 2013 waren ausschließlich Saugmotoren, zuletzt als V8-Motoren mit 2,4 l Hubvolumen, zugelassen. Mit Beginn der Saison 2014 kamen erstmals seit den 1980er Jahren wieder aufgeladene Motoren zum Einsatz. Die restriktiven Vorgaben zu Motorgeometrie und Materialien sind in angepasster Form weiterhin durch das Reglement vorgegeben.

Jetzt sind ausschließlich V6-Motoren mit 1,6 l Hubvolumen zugelassen, die über Benzindirekteinspritzung und Abgasturboaufladung mit einem Turbolader verfügen (Abb. 12.7). Die absolute, für ein Rennen zur Verfügung stehende, Kraftstoffmenge ist beschränkt, ebenfalls der maximale momentane Kraftstoffdurchfluss. Pro Zylinder ist ein Injektor gestattet. Da der Turbolader auch zur Rückgewinnung von elektrischer Energie genutzt werden kann, ergeben sich vielfältige Möglichkeiten zur Ladungswechsel- und Brennverfahrensauslegung. U. a. sind folgende technische Merkmale (Tab. 12.2) des Verbrennungsmotors durch das Reglement vorgegeben:

- „Exotische" Materialien, z. B. Magnesiumlegierungen, intermetallische Werkstoffe, Metallmatrix-Verbundwerkstoffe, oder keramische Werkstoffe, sind aus Kostengründen verboten.
- Die Auslasskanäle müssen auf der Außenseite der Zylinderköpfe liegen. Die Aufladung erfolgt mittels eines einstufigen Abgasturboladers, der keine variable Turbinengeometrie aufweisen darf.

**Tabelle 12.2** Motordaten F1 (2016)

| | |
|---|---|
| Bauweise | V6 mit einem Bankwinkel von 90° mit drei Kurbelkröpfungen |
| Hubraum | 1600 $cm^3$ |
| Bohrung | 80 mm (± 0,1 mm) |
| Kurbelwellenlage (Schwerpunkthöhe) | min. 90 mm über der Referenzfläche |
| Maximale Drehzahl | 15.000 1/min |
| Maximaler Kraftstoffdruck | 50 MPa |
| Maximaler Kraftstoffmassenstrom | 100 kg/h |
| Drehzahlabhängiger Kraftstoffmassenstrom für Drehzahlen bis 10.500 1/min | 5,5 + 0,009 · (Drehzahl in 1/min) kg/h |

- Im Gegensatz zum Trend bei Serienmotoren sind auch variable Ventilsteuerzeiten oder Ventilhubstellsysteme verboten.

Die Formulierung des verwendeten Kraftstoffs kann in gewissen Grenzen flexibel gestaltet werden. Ein Anteil von 5,75 Prozent Bio-Komponenten ist dabei vorgeschrieben. Aufgrund der Beschränkung der gesamten für ein Rennen zur Verfügung stehenden Kraftstoffmasse, des maximal zulässigen Kraftstoffmassenstroms und einer drehzahlabhängigen Limitierung bei Drehzahlen unterhalb von 10.500 1/min wird die Formulierung des Kraftstoffes primär dem Auslegungskonflikt zwischen Energiegehalt und Klopffestigkeit folgen.



#### 12.3.3.2 Energierückgewinnungssysteme

2009 kam in der Formel 1 erstmals ein Hybridsystem (Kinetic Energy Recovery System, KERS) zum Einsatz. Hierbei wird in Bremsphasen kinetische Energie in einen Speicher geladen, die der Fahrer beim Beschleunigen als kurzzeitige elektrische Zusatzleistung abrufen kann (Boost-Funktion). Seit 2014 kommt eine deutlich komplexere Architektur, bestehend aus zwei einzelnen Energierückgewinnungssystemen, zum Einsatz. Ähnlich wie bei der Einführung der KERS-Systeme ist die Einheit zur Rückgewinnung kinetischer Energie („MGU-K", Motor Generator Unit Kinetic) mechanisch mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt. Das Übersetzungsverhältnis zwischen MGU-K und Verbrennungsmotor darf nicht variabel sein, die maximale Drehzahl ist auf 50.000 1/min begrenzt und das übertragene Drehmoment bezogen auf Kurbelwellendrehzahl ist auf 200 N m limitiert. Das zweite System nutzt die im Abgas enthaltene Restenergie („MGU-H", Motor Generator Unit Heat) und ist mit festem Drehzahlverhältnis mit der Turbine verbunden, kann aber über eine mechanische Kupplung getrennt werden. Für die MGU-H muss eine maximale Drehzahl von 125.000 1/min eingehalten werden.

Der Energiefluss im Gesamtsystem unterliegt mehreren Begrenzungen durch das Reglement, ermöglicht aber dennoch viele Freiheitsgrade (Abb. 12.8). Die Größe des Energiespeichers (ES) ist auf maximal 4 MJ festgelegt. Höchstens 2 MJ pro Rennrunde dürfen von der MGU-K in den Energiespeicher rekuperiert werden, aber 4 MJ pro Runde an den Elektromotor wieder abgegeben werden. Der Energiespeicher darf nicht bei stehendem Fahrzeug, z. B. während eines Boxenstopps, geladen werden. Zwischen Verbrennungsmotor und MGU-K darf eine maximale Leistung von ± 120 kW ausgetauscht werden. Die Nebenaggregate des Verbrennungsmotors, z. B. Kühlmittel- oder Ölpumpen dürfen vom Verbrennungsmotor mechanisch oder von der MGU-K elektrisch angetrieben werden.

Für die Nutzung der Abgasenergie über die MGU-H gibt es keine Vorschriften durch das Reglement, mit Ausnahme der Obergrenze von 4 MJ für das Speichervermögen des ES. Sowohl der Ladedruck, den der Kompressor des Abgasturboladers für den Verbrennungsmotor bereitstellt, als auch die mittels MGU-H rekuperierte Energie ist

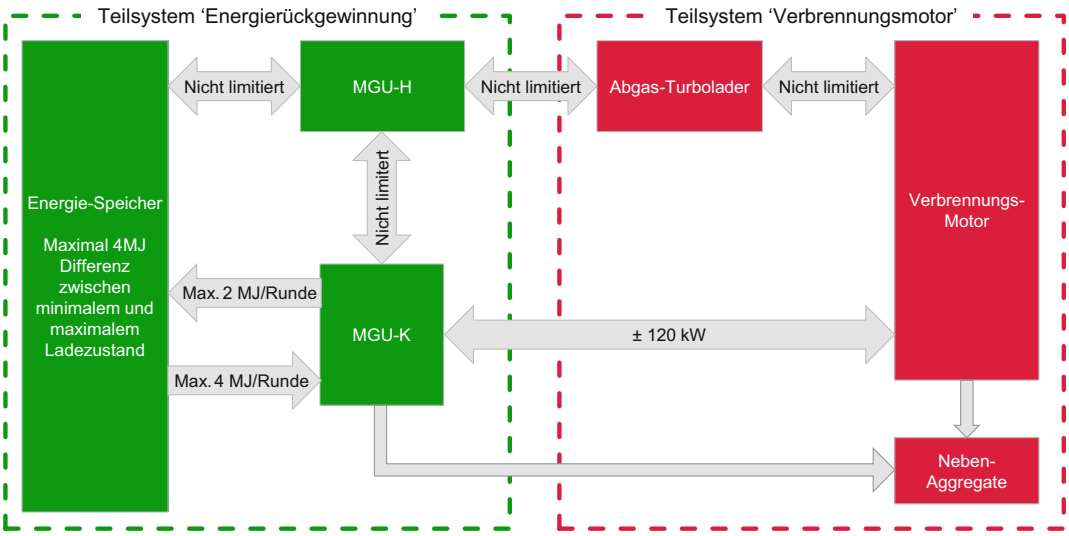



**Abb. 12.8** Energieflussdiagramm der F1 Antriebseinheit (nach [4])

nicht begrenzt. Dabei kann von der MGU-H in den Energiespeicher eingespeist werden oder elektrische Energie der MGU-K zur Verfügung gestellt werden. Umgekehrt kann der Abgasturbolader über die Verbindung von MGU-K oder Energiespeicher zur MGU-H angetrieben werden. Dadurch ist eine Verbesserung des Ansprechverhaltens des Verbrennungsmotors möglich.

Das Lademanagement des Energiespeichers wird von der Antriebsteuerung kontrolliert. Das Abrufen der gesamten Antriebssystemleistung wird ausschließlich über das Fahrpedal gesteuert. Traktionskontrolle oder andere Fahrhilfen sind nicht erlaubt.

## 12.3.4 Getriebe

Das Getriebe eines heutigen F1-Rennwagens (Abb. 12.9) bildet neben dem Monocoque und dem Motor das dritte tragende Element der Fahrzeugstruktur. Neben der eigentlichen Aufgabe der Drehzahl- und Drehmomentwandlung muss es die Fahrzeug- und Fahrwerkskräfte aufnehmen. Deshalb ist das Getriebegehäuse, an dem die Radaufhängungsteile direkt befestigt sind, extrem steif ausgeführt. Als Gehäusematerial wird entweder Aluminium, Titan oder Kohlefaser eingesetzt. Dies

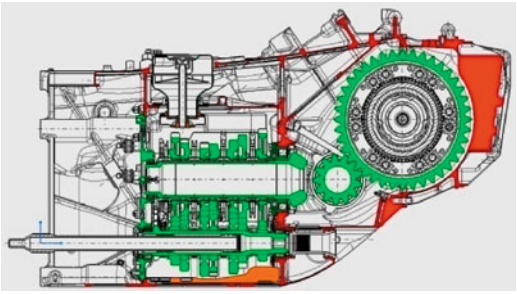


**Abb. 12.9** Längsschnitt 7-Gang F1-Getriebe (Quelle: BMW)

führt zu einem Gehäusegewicht von ungefähr 10 bis 12 kg. Das komplette Getriebe bringt ca. 30 bis 35 kg auf die Waage. Als Materialien werden Aluminium für Halterung und Ölpumpengehäuse, hochfeste Vergütungsstähle für Wellen und Einsatzstähle für die Zahnräder verwendet.

Im Gehäuse selbst sind die Funktionen Drehzahlwandlung, Schaltung, Drehrichtungsumkehr und Differential mit hydraulisch betätigter Sperre untergebracht. In gegenwärtigen F1-Fahrzeugen sind längs eingebaute Zwei-Wellen Getriebe üblich. Seit 2014 wird statt der zuvor maximalen Anzahl von sieben Vorwärtsgängen vom Reglement ein Getriebe mit genau acht Vorwärtsgängen und einem Rückwärtsgang vorgeschrieben. Die Übersetzung

der einzelnen Gänge muss vor Beginn der Saison definiert werden.

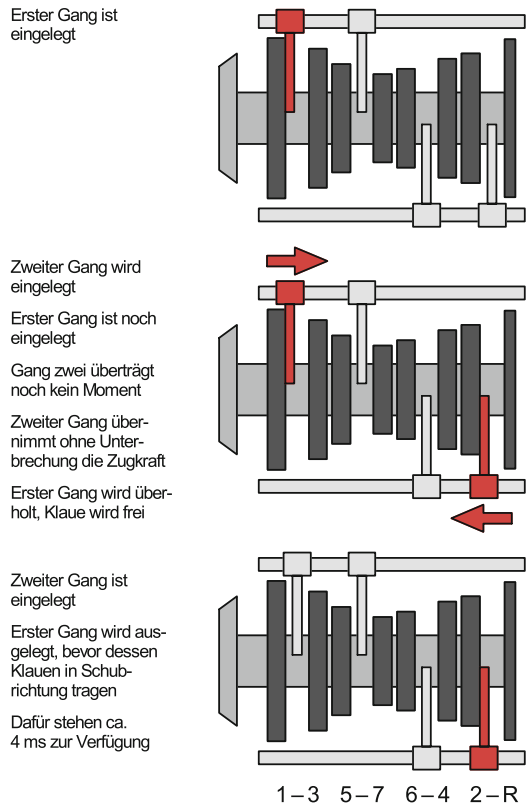
Über die zwischen dem Motor und dem Getriebe positionierte trockene Mehrscheiben-Kohlefaser-Kupplung wird das Drehmoment auf die Primärwelle des Getriebes übertragen. Auf dieser sind die Gangräder befestigt. Mit hochfesten Einsatzstählen waren diese bis 2006 nur bis zu 7 mm stark, seitdem sind jedoch zur Steigerung der Laufleistung und Senkung der Teilekosten mindestens 12 mm breite Zahnräder vorgeschrieben. Zur weiteren Kostensenkung sind gemäß dem F1 Reglement 2015 zudem ein Minimalgewicht der Zahnräder sowie ein minimaler Achsabstand zwischen Gangrad und korrespondierendem Losrad vorgeschrieben. Von diesen Gangradpaarungen wurden bis 2013 bis zu 70 Varianten entwickelt, die individuell für die Streckenbedingungen zusammengestellt wurden.

Die Losräder dieser Gangradpaarungen sind mittels Nadellagern auf der Sekundärwelle gelagert. Durch axial verschiebbare Klauenringe mit fünf bis sechs Klauen wird der gewählte Gang mit der Sekundärwelle drehmomentübertragend verbunden. Dazu wird der jeweilige Klauenring über eine hydraulisch betätigte Schaltwalze und Schaltgabeln bewegt.

Das am Ende der Sekundärwelle dargestellte Kegelradpaar dreht die Antriebsrichtung um 90°, um von dort aus den sogenannten Final Drive zu treiben. In diesem befinden sich das Differential und die integrierten Tripodengelenke für die Abtriebswellen. Das meist mit Planetenrädern dargestellte Differential enthält eine stufenlose Sperre in Form einer nassen Lamellenkupplung, die Sperrmomente bis zu 1000 N m realisieren kann.

Wurden die Gänge noch bis vor kurzem sequentiell nacheinander eingelegt, wobei während einer Schaltung die Zugkraft am Hinterrad für ca. 35 bis 60 ms unterbrochen wurde, so haben sich heute zugkraftunterbrechungsfrei schaltende Schnellschaltgetriebe (SSG) durchgesetzt.

Ähnlich wie bei einem unter ▶ Abschn. 5.4 beschriebenen Doppelkupplungsgetriebe werden zwei Gänge gleichzeitig aktiviert (◘ Abb. 12.10). Dabei wird der bei Klauenschaltgetrieben vorhandene freie Winkel zwischen den Klauen genutzt. Während der untere Gang noch Last überträgt, wird positionsgesteuert die Klaue des nächsthöheren Ganges eingelegt. Dazu wird meist eine zweite Schaltwalze verwendet. Bedingt durch die Drehzahldifferenz zwischen den Gängen ‚überholt' der obere den unteren Gang und übernimmt unterbrechungsfrei die Last. Der untere Gang wird nun lastfrei und wandert mit der Differenzdrehzahl zurück. Bevor nun der Freiwinkel zwischen den Klauen überwunden ist und es zur Anlage an der gegenüberliegenden Klaue kommt, wird der untere Gang herausgenommen. Dazu stehen – abhängig von Gangübersetzung und Drehzahl – ca. 4 ms zur Verfügung.




◘ **Abb. 12.10** Schaltvorgang SSG (Quelle: BMW)

◘ Abb. 12.11 zeigt den Vorteil des SSG (durchgezogene Kurve) im Vergleich zu einem Standardgetriebe (gestrichelte Kurve). Der bis in eine starke Verzögerung reichende Beschleunigungseinbruch bleibt aus, das Drehmoment an der Hinterachse bleibt abgesehen vom Einschwingverhalten konstant.

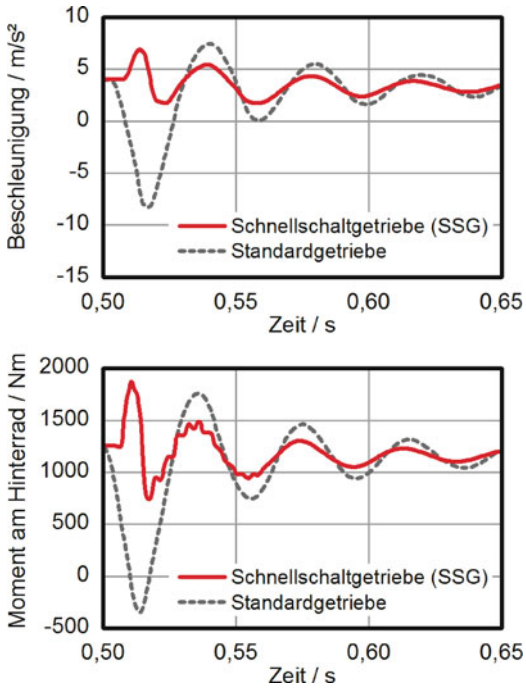



**Abb. 12.11** Beschleunigungsverlauf Fahrzeug und Momentenverlauf am Hinterrad bei einem Schaltvorgang mit bzw. ohne Zugkraftunterbrechung (Quelle: BMW)

Neben dem reinen Zeitgewinn durch den Entfall der Zugkraftunterbrechung entsteht durch den fehlenden Lastwechsel am Hinterrad eine deutlich höhere Fahrstabilität. Hierdurch kann nun auch bei Kurvenfahrt unter Last geschaltet werden.

## 12.3.5 Fahrwerk

Im Folgenden werden einige Grundlagen auf Basis des F1-Fahrwerks erklärt, welche prinzipiell auch für andere Formelwagen gelten. Für andere Fahrzeuge, wie Sportwagenprototypen aus der Langstreckenweltmeisterschaft (z. B. LMP1) ist die Vergleichbarkeit im speziellen hinsichtlich der aerodynamischen Einflüsse zum Teil beschränkt. Geschlossene Radhäuser, aber auch die im Reglement erlaubte Kopplung des Fahrwerks zwischen Vorder- und Hinterachse, stellen nur beispielhaft die Unterschiede der LMP1-Klasse zur Formel 1 dar.

### 12.3.5.1 Achskonzept

Die Vorder- und Hinterradaufhängung eines F1-Fahrzeugs sind als Doppelquerlenkerachsen mit innenliegenden (also innerhalb des Bodywork) Federungs- und Dämpferelementen ausgeführt.

Die Abstützung der Vertikalkräfte erfolgt bei den meisten derzeitigen Vorderachs-Konstruktionen über eine Druckstange (Push Rod) und in Ausnahmefällen seit 2012 über eine Zugstange (Pull Rod). An der Hinterachse kommen zur Abstützung der Vertikalkräfte zumeist ebenfalls Druckstangen zum Einsatz. In den vergangenen Jahren entwickelte sich die Verwendung von Pull Rods zu einer immer häufiger verwendeten Alternative, welche im speziellen die Aerodynamik des Fahrzeugs positiv beeinflusst. Die Umsetzung der Bewegung vom Push oder Pull Rod auf Federn und Dämpfer erfolgt über Umlenkhebel (Rocker) mit in Fahrzeuglängsrichtung liegender Drehachse.

Die Entscheidung für eine Push Rod oder Pull Rod Konstruktion wird auf Basis der Anforderungen an Steifigkeit und Aerodynamik getroffen.

**Vorderachse** Aus aerodynamischen Gründen (zur Verbesserung der Luftströmung unter dem Monocoque) sind die Monocoques bei den aktuellen Fahrzeugen im Bereich der Vorderachse so hoch wie vom Reglement erlaubt ausgeführt. Für die Verwendung eines Push Rod (Anbindung vom unteren Querlenker/Radträger zum Umlenkhebel im Monocoque oben) spricht hier das höhere Übersetzungsverhältnis von Radbewegung zu Dämpfer und Federbewegung. Ein Pull Rod hat aufgrund des flachen Winkels (Anbindung vom oberen Querlenker/Radträger zum Umlenkhebel im Monocoque unten) ein relativ geringes Übersetzungsverhältnis. In Einzelfällen wird dem daraus resultierenden Nachteil der lokal sehr hohen Kräfte mit sehr steifen Bauteilen Rechnung getragen, um durch geschickte Anordnung des Pull Rods eine im Vergleich zum Push Rod aerodynamisch günstigere Umströmung erreichen zu können.

**Hinterachse** Aus aerodynamischen Gründen (zur Verbesserung der Luftströmung an Heckflügel und Diffusor) hat sich in den letzten Jahren der Trend

zu schmäleren und niedrigeren Getriebegehäusen fortgesetzt. Durch den damit flacheren Winkel des Push Rod (Anbindung vom unteren Querlenker/Radträger zum Umlenkhebel auf dem Getriebegehäuse) wird hierdurch die Übersetzung von Radbewegung zu Feder-Dämpferbewegung ungünstiger.

Im Speziellen bei der Anbindung an sehr flachen Getriebegehäusen bietet die Pull Rod Achse Vorteile. Jedoch erfordert die Installation der Feder- und Dämpferelemente an der Seite des Getriebegehäuses weitere Kompromisse bezüglich Steifigkeit und Zugänglichkeit für Änderungen der Fahrwerksabstimmung. Da die radseitige Anbindung des Push- oder Pull Rod in einem aerodynamisch kritischen Bereich der Radumströmung liegt, kann auch dies den Ausschlag für eine Push oder Pull Rod Lösung an der Hinterachse geben.

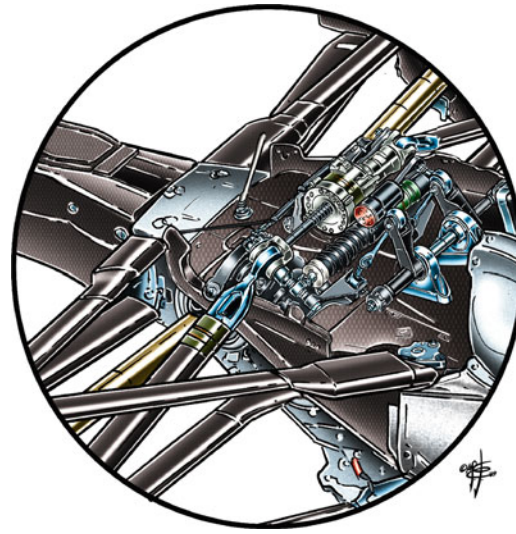


**Abb. 12.12** F1-Hinterradaufhängung mit drittem Feder/Dämpferelement [5]

#### 12.3.5.2 Federungssystem

Die Federung besteht in der Regel aus drei Hauptelementen: den beiden seitlichen Federn und einem sogenannten dritten Element. Dieses ist zwischen den beiden Umlenkhebeln montiert, die durch Push Rod oder Pull Rod die beiden genannten seitlichen Federn ansteuern (Abb. 12.12). Das dritte Element mit stark progressiver Kennlinie hat die Aufgabe, den minimalen Bodenabstand des Fahrzeuges bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sicherzustellen. Auch dient die Federkennlinie des dritten Elementes an der Vorder- und Hinterachse dazu, die Aerobalance abhängig von der Fahrgeschwindigkeit zu beeinflussen (siehe Abschn. ▶ Abschn. 12.5.2.3, Abhängigkeit des Abtriebs vom Bodenabstand). Eine progressive Kennlinie wird durch die Kombination aus Schraubenfeder bzw. Torsionsfedern und Tellerfederpaketen bzw. Kunststofffederblöcken (Bump Rubber) erreicht.

#### 12.3.5.3 Dämpfungssystem

Die Dämpfung besteht aus drei oder vier Hauptelementen: analog zum Federungssystem den beiden seitlichen Dämpfern und einem oder zwei sogenannten Dritte-Element-Dämpfern. Die seitlichen Dämpfer sind meist als viskose Lineardämpfer ausgeführt. Aufgrund des kompakteren Package kommen an der Hinterachse auch viskose Drehflügel-Dämpfer zum Einsatz. Die Dritte-Element-Dämpfer, welche zwischen den beiden Umlenkhebeln montiert werden, sind als viskose Lineardämpfer und/oder als sogenannte Trägheits-Dämpfer mit rotierender Masse ausgeführt [5].

#### 12.3.5.4 Abstimmung

Für die Abstimmung der Vertikaldynamik gibt es zwei Hauptkriterien. Dabei wird eine Minimierung bzw. Optimierung folgender Parameter angestrebt:

- Aufbaubewegung (Body Motion),
- Radaufstandskraftänderung (Tyre Contact Force Variation).

Die Abstimmungsarbeit wird ausschließlich mittels Simulationsprogrammen vorbereitet und anschließend mit dem Gesamtfahrzeug am Vertikal-Dynamikprüfstand (7-Post Rig) optimiert.

Da bei einem F1-Fahrzeug die aerodynamischen Kräfte gegenüber den statischen Gewichtskräften dominieren ist es notwendig, diese Aerodynamikkräfte sowie die dynamischen Änderungen der Abtriebskräfte (verursacht durch Bodenabstandsänderung) am Gesamtfahrzeug aufzubringen. Dies geschieht beim 7-Post-Rig mittels hydraulisch geregelter Aktuatoren. Diese Abstimmarbeit ist für jede Rennstrecke separat notwendig, da die Einflussfaktoren wie Fahrbahnoberfläche, Ab-

triebsniveau und Reifenspezifikation einen großen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Fahrzeuges haben.

## 12.4 Performance und Rundenzeit

### 12.4.1 Fahrzeugparameter

Eine ganze Reihe von Parametern hat Einfluss auf die Performance des Fahrzeugs. Einige davon lassen sich nur bedingt in physikalischen Modellen abbilden. Ihre Auswirkung auf die Rundenzeit wird daher indirekt aus Erfahrungswerten abgeleitet:

- Fahrwerkskinematik,
- aerodynamische Wechselwirkungen,
- Fahrzeugbalance und Handling,
- Fahrbarkeit des Antriebstrangs (Verbrennungsmotor und Hybridsystem),
- Antriebsstrang (Kupplungs- und Differentialcharakteristik).

Direkt messbar sind dagegen:

- Aerodynamik (Abtrieb, Widerstand, Effizienz),
- Reifengrip,
- Schwerpunkthöhe Fahrzeug,
- Fahrzeugmasse,
- Antriebstrangleistung (Verbrennungsmotor und Hybridsystem),
- Schaltzeiten bei Gangwechsel (SSG schaltet ohne Zugkraftunterbrechung).

Die Auswirkungen dieser Kenngrößen auf die Rundenzeit lassen sich mittels Simulation mathematisch eindeutig erfassen.

### 12.4.2 Sensitivität der direkt messbaren Fahrzeugparameter

Um die Wirkung der einzelnen Einflussfaktoren zu veranschaulichen, werden zwei Annahmen getroffen:

**Referenzstrecke** Es wird eine Referenzstrecke definiert mit einer Rundenzeit $t = 80\,\text{s}$.

Diese Rundenzeit entspricht einer durchschnittlichen F1-Strecke. Die tatsächliche Rundenzeit ist selbstverständlich abhängig von der Streckenlänge (z. B. Monaco mit 3,6 km, Spa-Francorchamps mit 7 km) und der Streckencharakteristik (Stadtkurs oder Hochgeschwindigkeitsstrecke). Strecken mit langen Geraden und hohem Vollastanteil (z. B. Monza) haben eine höhere Sensitivität bezüglich Abtrieb und Widerstand. Strecken mit hohem Traktionsanteil und niedrigen Kurvengeschwindigkeiten (z. B. Monaco) haben eine höhere Sensitivität bezüglich Reifengrip.

**Referenzfahrzeug** Auch für das Fahrzeug werden realistische Basiswerte angesetzt (Beispiel aus dem Jahr 2010):

- Abtriebsbeiwert: $c_z = 3{,}0$,
- Widerstandbeiwert: $c_x = 0{,}9$,
- Reibbeiwert der Reifen: $\mu = 1{,}8$,
- Schwerpunkthöhe Fahrzeug: $h_s = 250\,\text{mm}$
- Fahrzeugmasse ohne Kraftstoff, mit Fahrer: $m = 620\,\text{kg}$ (entspricht dem Fahrzeugmindestgewicht 2010). Dieser Parameter ist 2015 wegen ERS auf 702 kg angehoben, außerdem muss der Mindestverbrauch von 100 kg/h und max. 100 kg pro Rennen berücksichtigt werden,
- maximale Leistung der Antriebseinheit: $P = 550\,\text{kW}$ (2015 ca. 480 kW mittels Verbrennungsmotor plus ERS).

Mit diesen Annahmen ergeben sich für ein F1-Fahrzeug folgende Sensitivitäten der direkt messbaren Einflussgrößen (Tab. 12.3). Mit dem neuen Reglement des Jahres 2014, bei dem die zusätzlichen Parameter minimaler Verbrauch und effizienter ERS-Einsatz noch hinzugenommen werden müssen, wächst diese Matrix der sensitiven Fahrzeugparameter um ein Vielfaches an.

### 12.4.3 Entwicklungspotenzial

Ausschlaggebend für das Entwicklungspotenzial ist nicht nur die Sensitivität der Parameter (Abb. 12.13). Ebenso wichtig sind die Einflussmöglich-

**Tabelle 12.3** Sensitivität direkt messbarer Fahrzeugparameter

| Parameter | Abkürzung | Änderung | Einfluss auf Rundenzeit |
|---|---|---|---|
| Abtrieb | $c_z$ | plus 1 % | minus 0,1 s |
| Luftwiderstand | $c_x$ | plus 1 % | plus 0,1 s |
| Reifengrip | $\mu$ | plus 1 % | minus 0,3 s |
| Schwerpunkthöhe | $h_s$ | plus 1 % | plus 0,08 s |
| Fahrzeugmasse | $m$ | plus 1 % | plus 0,2 s |
| Motorleistung | $P$ | plus 1 % | minus 0,1 s |

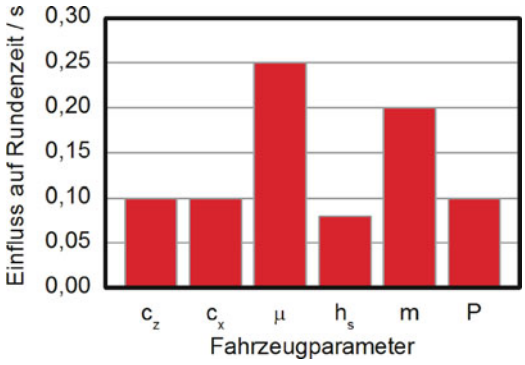



**Abb. 12.13** Einfluss der Fahrzeugparameter auf die Rundenzeit

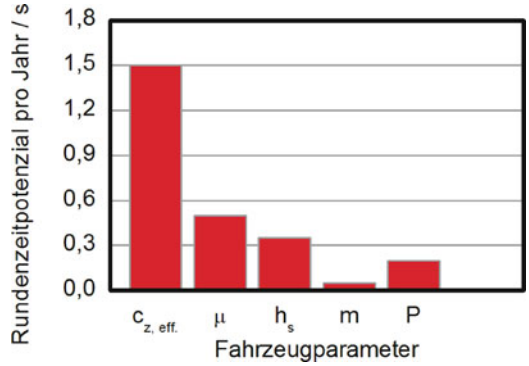



**Abb. 12.14** Entwicklungspotenzial der einzelnen Fahrzeugparameter

keiten, die durch technische oder Reglement-Restriktionen eingegrenzt werden (Abb. 12.14).

**Aerodynamik (Abtrieb und Widerstand)**

- technisches Reglement schränkt Freiraum auf vorgegebene Fahrzeugbereiche ein,
- Restriktionen der Windkanalstunden und der CFD Rechnerkapazität,
- streckenspezifische Fahrzeugentwicklung und Innovationen möglich,
- möglicher Entwicklungsfortschritt pro Jahr: 7 bis 15 % (abhängig von technischem Reglement). Bei großen Änderungen des technischen Reglements, wie 2009 und 2014, ist auch der mögliche Entwicklungsfortschritt größer, da mehr Innovationen einfließen können.

**Hohes Entwicklungspotenzial**

**Reifengrip**

- Standardreifen für alle Teams, keine individuelle Entwicklung möglich,
- Einfluss auf Reifenausnutzung durch Fahrzeugentwicklung möglich (Fahrwerk, Kinematik, Abstimmung Feder/Dämpfer, Abstimmung Reifendruck/Temperatur),
- möglicher Entwicklungsfortschritt pro Jahr: 1 bis 2 %.

**Mittleres Entwicklungspotenzial**

**Schwerpunkthöhe Fahrzeug**

- Einfluss durch Fahrzeugkonzept gegeben,
- oftmals Zielkonflikt mit Aerodynamik (siehe Chassis-Frontend mit Anbindung der Vorderachse),
- Mindest-Schwerpunkthöhe des Motors durch technisches Reglement festgelegt,

- Chassis (Survival Cell) darf während der Saison nicht verändert werden,
- Schwerpunktabsenkung des Fahrzeuges durch Leichtbau und Gewichtsausgleich mittels Ballastkörper an tiefster Stelle des Chassis möglich,
- Zielkonflikt mit Bauteilsteifigkeit bzw. Lebensdauer,
- möglicher Entwicklungsfortschritt pro Jahr: 2 bis 4 %.

**Mittleres Entwicklungspotenzial**

**Fahrzeugmasse**

- Unbetankte Fahrzeuge der Formel 1 sind in der Regel am Minimalgewicht.
- Kraftstoffverbrauch hat Einfluss auf das Fahrzeuggewicht im Rennen, ist aber im Reglement seit 2014 sowohl bezüglich der Gesamtmasse als auch bezüglich des maximalen Massenstromes begrenzt. Dadurch ist der Einfluss auf die Fahrzeugmasse weiter reduziert.

**Sehr geringes Entwicklungspotenzial**

**Motor**

- Aus Kostengründen wird der Motor seit 2007 homologiert (Änderungen innerhalb der Homologation nur im begrenzten Maße möglich).
- Mindestgewicht und Schwerpunkthöhe des Motors durch technisches Reglement festgelegt,
- nur geringe Leistungsentwicklung am Basismotor möglich (ein kompliziertes Punktesystem erlaubt abnehmende Entwicklungsumfänge bis zum Jahr 2020 hin),
- Leistungsentwicklung nur bei Kraftstoff, Motoröl und Abgasanlage erlaubt,
- Optimierung der Fahrbarkeit durch Datenapplikation in der Standardelektronik erlaubt,
- möglicher Entwicklungsfortschritt pro Jahr: 1 bis 2 %.
- Aufgrund der in ▶ Abschn. 12.3.3.2 beschriebenen Abhängigkeiten zwischen Abgasturbolader und MGU-H können weitere, bisher schwer quantifizierbare Potenziale vermutet werden.

**Geringes bis mittleres Entwicklungspotenzial**

Beim derzeit gültigen technischen Reglement hat die Aerodynamik weiterhin den mit Abstand größten Hebel auf die Fahrzeugperformance, wobei der Einfluss des modernen Antriebstranges mit ERS deutlich zugenommen hat. Alleine durch die Verbrauchsvorgabe kommt dem technischen Stand des Verbrennungsmotors heutzutage ein deutlich höherer Stellenwert zu.

Interessant ist in diesem Zusammenhang der Rundenzeitvergleich eines LMP1-Fahrzeuges mit einem Formel-1 Wagen jeweils des Jahrgangs 2015. In [6] wird ein Unterschied von ca. 7,6 s für die 7 km lange Strecke in Spa-Francorchamps berichtet. Ursächlich ist das um 250 kg höhere Gewicht des LMP1 Fahrzeuges. Andere durch das Reglement vorgegebene Parameter kompensieren sich. Der Verbrauch des Langstrecken-Prototypens ist dabei aber deutlich geringer.

## 12.5 Entwicklung Aerodynamik und Fahrdynamik

### 12.5.1 Aerodynamische Effizienz und Aerobalance

Hauptzielgröße bei der aerodynamischen Auslegung eines Straßenfahrzeugs ist ein niedriger Luftwiderstand. Abtrieb ist dem untergeordnet, in der Regel ergibt sich sogar ein mit der Geschwindigkeit zunehmender Auftrieb [7].

Bei Rennfahrzeugen ist es umgekehrt: Hoher Abtrieb ist dominierendes Kriterium. Mit steigendem Abtrieb wächst die übertragbare Längs- und Querbeschleunigung, die Rundenzeit sinkt. Hoher Luftwiderstand wird in Kauf genommen. Ein F1 Fahrzeug entwickelt bei 340 km/h einen Abtrieb von ca. 17 kN, also fast das Dreifache des Fahrzeuggewichts. Die Aerodynamik stellt damit nicht nur den größten Einzeleinfluss auf die Rundenzeit dar, sondern bestimmt auch maßgeblich das Fahrverhalten.

Da die Anforderungen an Abtrieb und Luftwiderstand bei der Entwicklung der Aerodynamik nicht getrennt betrachtet werden können, ist es sinnvoller von Aerodynamischer Effizienz ($A_{\text{eff}}$) zu sprechen:

$$A_{\text{eff}} = \text{Abtrieb} / \text{Luftwiderstand}.$$

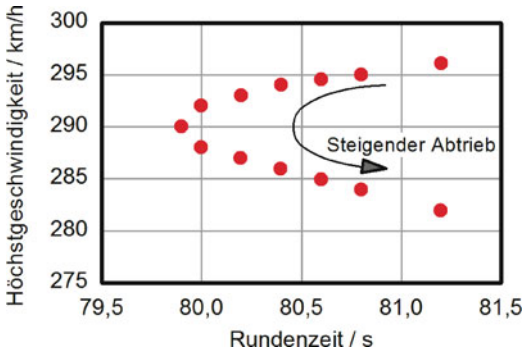



**Abb. 12.15** Einfluss des Abtriebsniveaus auf die Rundenzeit

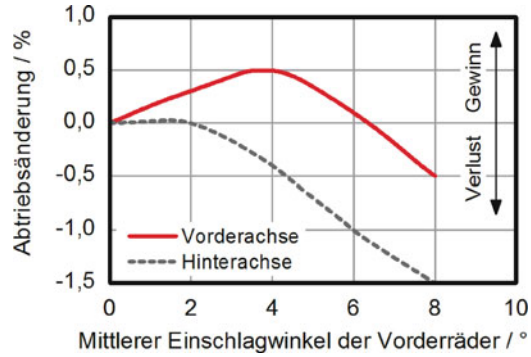



**Abb. 12.16** Abtriebsänderung in Abhängigkeit des Lenkwinkels

Für verschiedene Aerodynamik-Einstellungen mit jeweils gleicher $A_{\text{eff}}$ gibt es, abhängig von der Streckencharakteristik, für jede Rennstrecke ein Optimum bezüglich der Rundenzeit (Abb. 12.15).

Dieses Optimum wird mittels Rundenzeit-Simulation als Vorbereitung für jede Rennstrecke ermittelt und ist die Ausgangsbasis für die verwendete Aerodynamik-Konfiguration.

Bei der Feinabstimmung werden weitere Faktoren mitberücksichtigt, z. B. die mindestens nötige Höchstgeschwindigkeit für Positionskämpfe im Rennen (niedriger Abtrieb) oder der mindestens nötige Abtrieb, um vorzeitigen Reifenverschleiß zu vermeiden.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Aerobalance, d. h. die Verteilung der Abtriebskräfte auf Vorder- und Hinterachse.

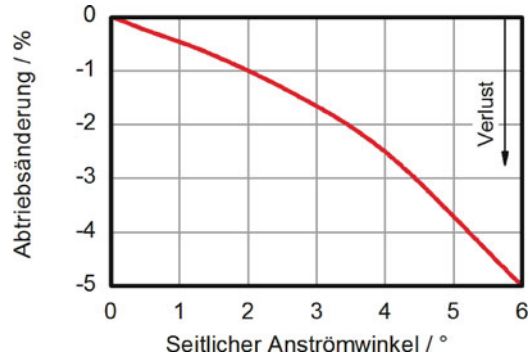



**Abb. 12.17** Abtriebsänderung in Abhängigkeit des Anströmwinkels

## 12.5.2 Einflussgrößen auf die Aerodynamik

Ziel der Aerodynamikentwicklung ist eine möglichst hohe aerodynamische Effizienz in Verbindung mit optimaler Aerobalance unter allen Fahrbedingungen. Abtriebsbeiwert und Aerobalance sind nicht konstant, sondern primär abhängig von im Folgenden beschriebenen Einflussfaktoren.

### 12.5.2.1 Radeinschlag beim Lenken

Bei geringen Lenkeinschlägen (schnelle Kurven) kann sich der Gesamtabtrieb leicht erhöhen. Bei größeren Lenkeinschlägen (langsame Kurven) verändert sich die Luftströmung hinter den eingelenkten Vorderrädern allerdings deutlich, wodurch die Wirkung von Unterboden und Diffusor negativ beeinflusst wird. Der Gesamtabtrieb wird dann immer reduziert (Abb. 12.16).

### 12.5.2.2 Gierwinkel und Schräganströmung

Schräganströmung, wie sie bei Kurvenfahrt oder Seitenwind auftritt, führt in der Regel zu einem Abtriebsverlust, da man sich von der ‚idealen Welt' mit symmetrischer Anströmung entfernt (Abb. 12.17). Die Änderung der Aerobalance bei Schräganströmung hat einen großen Einfluss auf die Fahrdynamik und ist in Kombination mit dem Aerodynamikverhalten bei Radeinschlag einer der dominierenden Parameter für die Fahrzeugabstimmung.

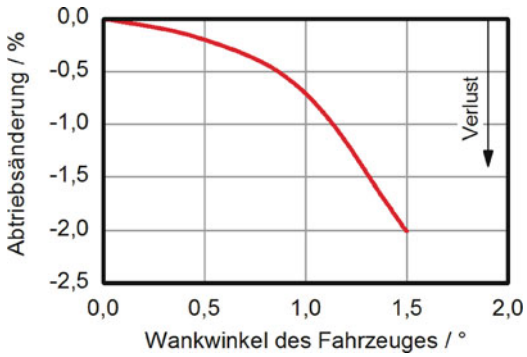



**Abb. 12.18** Abtriebsänderung in Abhängigkeit des Wankwinkels

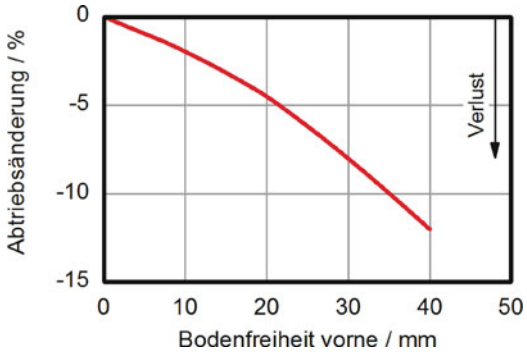



**Abb. 12.19** Abtriebsänderung in Abhängigkeit der vorderen Bodenfreiheit

### 12.5.2.3 Mechanische Fahrwerksabstimmung

Auch die mechanische Abstimmung des Fahrwerks beeinflusst die Aerodynamik über Bodenabstand, Nick- und Rollwinkel.

Zunehmender Roll- bzw. Wankwinkel führt in der Regel zu einem Abtriebsverlust, da die asymmetrische Anströmung des Unterbodens die Funktion des Diffusors beeinträchtigt (Abb. 12.18).

In Abb. 12.19 und Abb. 12.20 ist die Änderung des Abtriebs mit der Bodenfreiheit vorn bzw. hinten dargestellt. Diese Aerodynamik-Charakteristik ist typisch für Fahrzeuge mit flachem Unterboden und Diffusor. Die Änderung der Bodenfreiheit ergibt sich aus der vertikalen Steifigkeit der Federelemente und der Kinematik – sowie zu einem beachtlichen Teil (20 bis 50 %) aus der Reifeneinfederung.

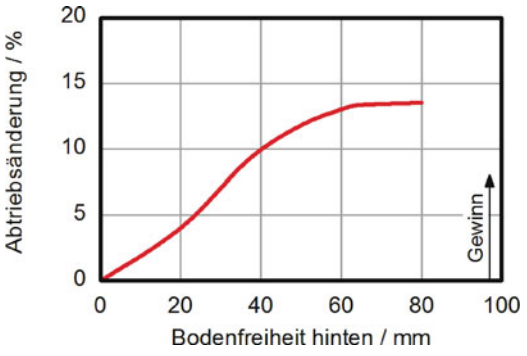



**Abb. 12.20** Abtriebsänderung in Abhängigkeit der hinteren Bodenfreiheit

Der unterschiedliche Einfluss der Bodenfreiheit von Vorder- und Hinterachse auf den Abtrieb verschiebt die Aerobalance über der Fahrgeschwindigkeit (Einfederung vorne und hinten durch die Abtriebskräfte) sowie bei Fahrmanövern wie Bremsen (vorne einfedern, hinten ausfedern).

Eine Änderung der Aerobalance kann somit auch durch die mechanische Abstimmung erzielt werden. D. h., die mechanische Abstimmung beeinflusst die Fahrdynamik nicht nur über den mechanischen Grip und die Rollmomentenverteilung, sondern auch durch die Aerodynamik.

### 12.5.2.4 Durchströmung des Fahrzeugs

Die Betriebstemperaturen eines F1-Antriebs (Kühlwasser, Motor- und Getriebeöl) müssen in engen Grenzen eingehalten werden. Im Gegensatz zu Serienfahrzeugen erfolgt dies nicht mittels Regelung des Kühlflüssigkeitsstromes (Thermostat-Regelung), sondern durch Steuerung der Luftströmung durch die Kühler. Dies geschieht in der Regel durch Variation der Auslassöffnungen hinter dem Kühler.

Mehr Kühlungsbedarf führt aufgrund der höheren inneren Durchströmung des Fahrzeugs zu einem Verlust an aerodynamischer Effizienz, bzw. Abtrieb. Der jeweilige Kühlungsbedarf ist direkt abhängig von der Außentemperatur, d. h. bei einem Anstieg der Außentemperatur um 5 K muss die Kühlwirkung durch aerodynamische Maßnahmen ebenfalls um 5 K erhöht werden. Abb. 12.21 zeigt den Abtriebsverlust aufgrund des Kühlbedarfs des

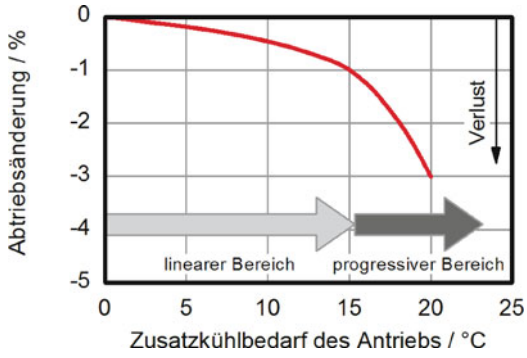



**Abb. 12.21** Abtriebsänderung bei Öffnung des Bodywork zur Kühlung des Antriebs

Antriebsaggregates bei steigender Umgebungstemperatur.

Bei den heutzutage eingesetzten Antriebsstrangsystemen z. B. in der Formel 1 oder WEC steigt der Kühlungsbedarf erheblich an. Dies resultiert zum einen aus der notwendig gewordenen Ladeluftkühlung bei aufgeladenen Verbrennungsmotoren und zum anderen aus der umfangreichen Hybridisierung. Ungefähr 30 Prozent der zugefügten Hybridleistung muss durch Kühlung abgeführt werden, um beispielsweise die eingesetzten Batteriezellen in ihrem maximal zulässigen Temperaturbereich bis ca. 55 °C zu halten oder die Leistungselektronik vor Überhitzen (maximal 80 °C) zu schützen.

Dazu wird ein zusätzlicher Niedrigtemperaturkreislauf im Fahrzeug integriert. Abgesehen von dem zusätzlichen Gewicht und dem Platzbedarf der Verschlauchung kann der Zusatzkühler meist platzsparend vor den konventionellen Wasserkühlern Platz finden und somit die gleichen Zu- und Abströmkanäle im Fahrzeug nutzen.

Der Einfluss des Kühlungsbedarfes auf den Abtrieb ist nicht linear, sondern verläuft progressiv mit großen aerodynamischen Verlusten bei hohem Kühlungsbedarf, also bei Rennen mit hohen Außentemperaturen. Die Auslegung des Kühlsystems hat einen großen Einfluss auf das Fahrzeugkonzept. Ziel ist ein guter Kompromiss zwischen Kühlergröße und innerer Durchströmung. Der zusätzlich benötigte Niedertemperaturkreislauf verschärft diese Problematik nochmals stark.

Große Kühlerflächen erfordern ein voluminöses Bodywork zur Unterbringung der Kühler und der Kühlluftführung und verschlechtern damit die Anströmung des Fahrzeugheckbereiches.

Kleinere Kühler erlauben ein schlankeres und damit aerodynamisch effizienteres Bodywork, führen jedoch bei hohem Kühlungsbedarf zu großen aerodynamischen Verlusten aufgrund der erforderlichen hohen inneren Durchströmung.

### 12.5.3 Aerodynamik und Reifeneinfluss

Grundforderung bei sportlichen Serienfahrzeugen und bei allen Rennfahrzeugen ist es, das Reifenpotenzial unter allen Fahrbedingungen optimal auszunutzen. Diese Anforderung hat bei der Entwicklung von F1-Fahrzeugen oberste Priorität. Im Gegensatz zu Serienfahrzeugen wird die Fahrdynamik der Formel 1 Rennwagen aufgrund der Dominanz der aerodynamischen Abtriebskräfte primär vom Zusammenwirken der Reifencharakteristik und der Aerodynamik bestimmt.

Aufgrund der hohen Abtriebskräfte erreichen F1-Fahrzeuge maximale Längsbeschleunigungswerte von 50 m/s$^2$ (z. B. Bremsmanöver in Monza) und maximale Querbeschleunigungswerte von 40 m/s$^2$ (z. B. Kurvenfahrt in Spa-Francorchamps). Im Vergleich dazu liegen Serienfahrzeuge bei maximal 12 bis 13 m/s$^2$.

Mit der Verwendung von sogenannten „Einheitsreifen“ mit gleicher Spezifikation für alle Teams ist die Reifencharakteristik vorgegeben. Diese bestimmt wichtige Konzept-Parameter wie z. B. die passende Gewichtsverteilung des Fahrzeugs. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei jedem F1-Lauf jeweils zwei unterschiedliche Spezifikationen für den Trockenreifen eingesetzt werden müssen. Die Entscheidung, welche Varianten verwendet werden, trifft der Reifenausrüster

Die unterschiedliche Dimension von Vorder- und Hinterreifen ergibt auch ein unterschiedliches Seitenkraftpotenzial (Abb. 12.22). Um das jeweilige Reifenpotenzial über der Fahrgeschwindigkeit und damit unter Berücksichtigung der mit den Abtriebskräften stark zunehmenden Radlasten maximal zu nutzen, muss die Achslastverteilung (aus

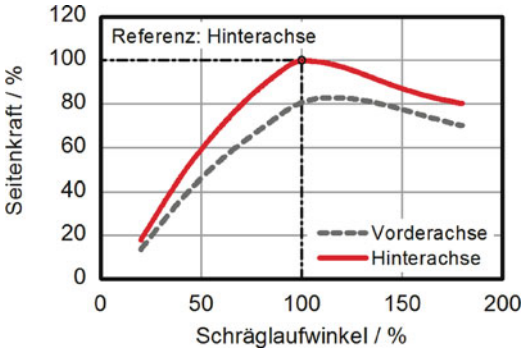



**Abb. 12.22** Seitenkraftverlauf in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels




**Abb. 12.23** Frontflügel mit Wirbelelementen an den Endscheiben

statischer Achslast plus Abtriebskraft) dem Seitenkraftpotenzial der Reifen folgen. Bei der Reifengeneration der letzten Jahre lag die passende Gewichtsverteilung im Bereich von 46 ± 1,5 % Vorderachslast.

Aus der vorgegebenen Reifencharakteristik und der Gewichtsverteilung des Fahrzeugs ergibt sich abhängig von der Fahrgeschwindigkeit eine optimale Verteilung der Abtriebskräfte auf die Vorder- bzw. Hinterachse, die optimale Aerobalance, bei der das Längs- und Seitenkraftpotenzial der Reifen maximal ausgenutzt werden kann. Das Zusammenspiel von Reifencharakteristik und Aerobalance bestimmt in einem weiten Geschwindigkeitsbereich die Fahrdynamik des F1-Fahrzeuges.

### 12.5.4 Aerodynamik und Fahrdynamik

Im dynamischen Fahrbetrieb überlagern sich die einzelnen aerodynamischen Effekte, so dass es in der Realität nicht möglich ist, für jede Fahrbedingung ein Optimum an Abtrieb und Aerobalance zu erreichen. Der beste Kompromiss hängt von der Streckencharakteristik ab. Je nach Streckenverlauf („in welchem Geschwindigkeitsbereich befinden sich die meisten Kurven?“) werden die einzelnen Parameter unterschiedlich gewichtet. Mittels Rundenzeit-Simulationsprogrammen wird Einfluss der einzelnen Fahrbedingungen auf die Rundenzeit quantifiziert, um Prioritäten bei der Aerodynamikentwicklung zu setzen.

Die aerodynamischen Eigenschaften eines F1 Fahrzeuges werden hauptsächlich durch den Frontflügel, den Unterboden sowie den Diffusor und Heckflügel bestimmt. Am Frontflügel haben in erster Linie die sogenannten Endscheiben an den äußeren Flügelenden einen großen Einfluss auf die nachfolgende Luftströmung. Mit den an den Endscheiben erzeugten energiereichen Luftwirbeln hat man die Möglichkeit, die Luftströmung entlang des Unterbodens und damit die Abtriebsverteilung auf Vorder- und Hinterachse gezielt zu trimmen. Dem Heckflügel kommt hierbei eine vergleichsweise kleinere Bedeutung zu.

Seit 2011 wird in der Formel 1 das sogenannte DRS eingesetzt (Drag Reduction System). Dies ist ein bewegliches Element des Heckflügels, das der Hinterherfahrende auf vorher festgelegten Geraden einer Strecke dann umlegen darf, wenn er einen Rückstand von maximal einer Sekunde aufweist. Der damit verbundene reduzierte Luftwiderstand vereinfacht den Überholvorgang am Ende einer Geraden und damit soll die Spannung der Rennen erhöht werden. Nach ersten positiven Erfahrungen in der Formel 1 wurde DRS ab 2013 auch in der DTM eingesetzt.

In der Realität ist sehr viel Detailarbeit im Windkanal und in der Strömungs-Simulation notwendig, um die gewünschte Aerocharakteristik zu erreichen. Im Zuge der Reglement-Änderungen in den letzten Jahren wurden die baulichen Möglichkeiten, diese Luftwirbel zu erzeugen, deutlich eingeschränkt. An F1-Fahrzeugen der Saison 2008 waren bis zu 40 Aerobauteile mit der primären Funktion als „Wirbelgenerator“ (Vortex Generator) verbaut (Abb. 12.23).

## 12.6 Zuverlässigkeit

Die Performance eines Rennfahrzeugs misst sich an der Rundenzeit und an seiner Zuverlässigkeit. Die Mehrzahl der Komponenten ist nicht wie bei einem Serienfahrzeug dauerfest, sondern auf begrenzte Laufleistung ausgelegt. Andernfalls wären sie im Wettbewerbsvergleich überdimensioniert und nicht konkurrenzfähig.

Zwecks Kostenbegrenzung wurden in der Formel 1 die Laufleistungen per Reglement angehoben: Bis 2003 war ein F1-Motor auf 400 km ausgelegt, heute muss er 5000 km erreichen [8]. Dies entspricht etwa der zurückgelegten Distanz des Siegers der 24 Stunden von Le Mans. Im Rahmen der Langstrecken-Weltmeisterschaft muss daher eine notwendige Lebensdauer von 6000 km bis hin zu 9000 km erreicht werden, sofern dieselben Komponenten auch für das freie Training und Qualifikationstraining verwendet werden sollen.

Dennoch ist in dem genannten Zeitraum die spezifische Leistung in der Formel 1 gestiegen, die Ausfallrate dagegen gesunken. Möglich wurde dies durch mehrere Maßnahmen [9]:

- robustere Konstruktion,
- Verwendung höherwertiger Materialien und großzügigere Dimensionierung der mechanisch und thermisch hochbelasteten Bauteile,
- umfassende Erprobung,
- Motor-, Getriebe- und Fahrwerkskomponenten werden auf Prüfständen der realistischen Belastung über die geplante Laufzeit hinweg ausgesetzt,
- enge Toleranzen und lückenlose Qualitätskontrolle,
- Erfassung jedes Bauteils mit Ident-Nr., Herstelldatum, Charge und Prüfprotokoll.

Bei jedem Fahrzeug sind die verbauten Teile dokumentiert, um bei Schäden sofort den betroffenen Umfang eingrenzen und austauschen zu können. Tritt ein Schaden ein, werden die betroffenen Bauteile sofort analysiert. Ist die Ursache nicht eindeutig zu lokalisieren, sind Abhilfemaßnahmen für alle möglichen Fehlerursachen parallel umzusetzen. Oberstes Ziel ist es, die Schwachstelle vor dem nächsten Renneinsatz zu eliminieren.

### Literatur


1. FIA Regulations (2014) http://www.fia.com/regulations/regulation/international-sporting-code-123Annuaire 2015-2015 International Sporting Code (FR-EN)-Edits PKE-CLEAN version 3.pdf. Zugegriffen: 20.05.2015
2. Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik. 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2010)
3. http://www.sauberf1team.com/car/technik-materialien/, abgerufen am 30.04.2015
4. FIA Regulations http://www.fia.com/Regulations/regulation/fia-formula-one-world-championship-1101-2016_technical_regulations_2016-02-27.pdf. Zugegriffen: 31.03.2016
5. Piola, G.: Formula 1 Technical Analysis. Editore Giorgio Nada
6. auto motor und sport, Ausgabe 23/2015, Motor Presse Stuttgart
7. Sauber Motorsport AG: Daten für Fahrdynamik und Aerodynamik
8. „Neue Motoren: Kühlung wird entscheidend sein“ http://www.motorsporttotal.com/f1/news/2013/07/Neue_Motoren_Kuehlung_wird_entscheidend_sein_13070215.html. Zugegriffen: 30.04.2015
9. Theissen, M., Duesmann, M., Hartmann, J., Klietz, M., Schulz, U.: 10 Jahre BMW F1 Motoren. Wiener Motorensymposium 2010
10. FIA: 2016 Technical Regulations for LMP1 Prototype (Dezember 2015)
11. FIA: 2016 Technical Regulations for LMP2 Prototype (Dezember 2015)

# Ausblick – Wo geht es hin?

*Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert*

**Literatur – 1394**

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4_13

Die Automobilindustrie befindet sich in der Zeit der Erstellung der 8. Ausgabe dieses Handbuches in der vermeintlich größten Umbruchphase ihrer Geschichte.

Zu den externen Einflüssen gehören:

- Mittelfristige Abkehr von der bisherigen fossilen Energiebasis, infolge künftiger Verfügbarkeiten und Emissionsbegrenzungen, insbesondere für $CO_2$ Alternativen, die zurzeit diskutiert werden, sind Elektrizität, Wasserstoff und Kraftstoffe, die aus nicht fossilen Quellen erzeugt werden.
- Allmählicher Aufbau erweiterter und neuer Antriebskonzepte und zusätzlicher Energieversorgungs-Infrastrukturen. Neben den Hybridfahrzeugen sind dies reine Elektrofahrzeuge, die im Jahre 2016 bereits von fast allen Herstellern angeboten werden und in Zukunft auch Brennstoffzellenantriebe.
- Teilautomatisierter Fahrzeugbetrieb und Verbindung der Fahrzeuge mit Ihrer Umwelt zum Zwecke der Effizienz- und Sicherheitssteigerung.
- Trend zur Abkehr von bisherigen „Alleskönner-Fahrzeugen" hin zu Fahrzeugmodellen, die sich mehr an den Anwendungszweck richten, so z. B. spezielle Fahrzeuge für den Einsatz in Mega-Cities und Agglomerationen.
- Verschiebung wichtiger Märkte hin zu Schwellenländern, wo insbesondere Low-Cost-Modelle angeboten werden müssen.

Damit verbunden ergibt sich eine Reihe relevanter Konsequenzen und interner Einflüsse:

- Zusätzliche F&E-Aufwendungen für maßgeschneiderte additive/alternative Antriebskonzepte.
- Verstärkter Zwang zu extremen und damit kostenträchtigen Leichtbaukonzepten.
- Damit zusammenhängend, zusätzliche Einrichtungen und Umstrukturierungen in den Produktion- und Wertschöpfungsketten.
- Notwendigkeiten zu unternehmensübergreifenden Allianzen und Kooperationen, bis hin zu markenprägenden Komponenten und Systemen.
- Aufbau und Verfügbarkeit des In-House-Systemwissens bei komplexen Technologiebereichen, wie z. B. der Leistungselektronik und der Elektrochemie.

Schon seit einiger Zeit zeigt sich, dass Kunden in breiten Bereichen nur begrenzt bereit sind, vor allem für nicht kundenrelevante Neuerungen (z.B. infolge verschärfter gesetzgeberischer Vorschriften) entsprechende Mehrpreise zu zahlen. Weiterhin ist erkennbar, dass Bewohner von Großstädten vielfach auf den Besitz von Automobilen verzichten und dafür variable Mobilitätsdienstleistungen nutzen werden.

Ein besonderer Schwerpunkt wird in der weiteren Elektrifizierung des Antriebsstrangs liegen, in Form von z. B. Plug-in Hybrid Modellen, reinen Elektrofahrzeugen, aber auch in Zukunft Brennstoffzellenfahrzeugen. Hier wirken fast alle der genannten Einflüsse zusammen. Dieser Trend bedeutet für OEM und Zulieferer auch eine Abkehr von wichtigen Produkt- und Produktionstechnologien, die jahrzehntelang besondere Schwerpunkte darstellten.

Automobile werden auch in Zukunft wie bisher autarke, „bewegliche Gefäße" sein, in denen Menschen und Güter nach individuellen Vorgaben transportiert werden können. Sie werden jedoch in stärkerem Maße als bisher mit der Umgebung vernetzt sein, und zwar ergänzend zu den fahrzeuginternen Funktionen in:

- Energiesystemen (Stichwort smart electrical grid),
- „intelligenten Verkehrssystemen" (Stichwort car2x-communication),
- übergreifenden Mobilitätskonzepten (Stichwort variable Transportaufgaben).

Elektrik/Elektronik, Software und Automatisierungstechnik werden die großen Themen der Zukunft sein.

Bereits im Jahr 2015 haben sich eine Reihe von Elektronik- und IT-Unternehmen auch mit der Herstellung von Fahrzeugen intensiv beschäftigt. Daraus ergeben sich einerseits neue Funktionalitäten und Möglichkeiten zur Bewältigung von Ziel-

konflikten, andererseits aber auch weitere Herausforderungen für die Beherrschung der Komplexitäten.

Mit dem Postulat zur Nachhaltigkeit eng verbunden ist die Frage, wie es mit den zukünftigen Ansprüchen an Automobile weitergehen kann und soll, nicht zuletzt im Hinblick auf die begonnene Motorisierung großer Schwellenländer. Hier geht es sowohl um gesellschaftliche Forderungen, nach Sicherheit, Umweltschutz und Ressourcenschonung als auch um individuelle Wünsche, so nach Erfüllung spezieller Mobilitätsbedürfnisse und um Komfort. Dabei ist es außerordentlich wichtig, dass der Kunde die fahrzeugspezifischen Erneuerungen im echten Fahrbetrieb auch „erfahren" kann.

Manche Forderungen lassen sich elektronisch (fast) materie- und energiefrei erfüllen: z. B. schafft ein automatisches Abbremsen kurz vor der Kollision eine „virtuelle Knautschzone". Fahrzeuge werden weiterhin auf Rädern fahren, wenn auch infolge Elektrifizierung der Fahrzeuge möglicherweise in neuartiger Form. Verbrennungsmotoren bilden für viele Fahrzeugmodelle noch längerfristig die Basis der Antriebsenergie, beinhalten sie doch noch immer, auch mittels alternativer Kraftstoffe, deutliche Entwicklungspotenziale. Für den Übergang in die fernere Zukunft zeichnet sich ein Wettkampf zwischen Elektroantrieben mit Energiespeichern und der Brennstoffzellentechnologie ab. Speziell in den Jahren 2015 und 2016 haben asiatische Hersteller begonnen, verstärkt Brennstoffzellenfahrzeuge anzubieten [1]. Generell gilt für alle Varianten, dass die Verluste so klein wie möglich sein müssen. Hochwertiger und dennoch erschwinglicher Leichtbau stellt dabei zusätzlich eine besondere Herausforderung dar.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt ist das Thema Verkehrssicherheit. Bei zurzeit weltweit ca. 1,2 Millionen Verkehrstoten pro Jahr, sind gezielte Maßnahmen notwendig. Ein Weg ist die verstärkte Einführung von Systemen zur „Integralen Sicherheit", welche die unfallvorbeugenden und unfallmildernden Teilbereiche koppelt. Es herrscht Einigkeit, dass trotz der $CO_2$-Vorschriften dieses Thema sehr hohe Priorität besitzt. Das Memorandum der VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik und Verkehr aus dem Jahr 2015 zeigt den Weg für zukünftige Aktivitäten auf [2].

Kleinwagen sind inzwischen zu absolut vollwertigen Fahrzeugen geworden. Deren Weiterentwicklung wird ganz besonders vom Spagat zwischen Fortschritt und Kostendruck geprägt. Der Bereich exklusiver Modelle wird wie bisher Vorreiter bei wichtigen Innovationen sein. Design als kundenrelevanter Faktor profitiert sowohl im Exterieur als auch im Innenraum, z. B. durch neue Beleuchtungstechniken als Wohlfühlfaktor, und wird bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben erweiterte Bedeutung erlangen. Bei allen grundlegenden Fortschritten dürften aber die vielfältigen Aspekte der Alltagstauglichkeit keinesfalls vergessen werden, da von ihnen die Akzeptanz eines Automobils in hohem Maße abhängt.

Besonders interessant wird die Geschwindigkeit der Einführung von Fahrerassistenzsystemen für das teilautomatisierte bis hin zum vollautomatisierten Fahren sein.

Allgemein wird sich Infotainment, mit dem mobilen Internet und einer Multimediazentrale im Fahrzeug durchsetzen, speziell durch die gesetzliche Verankerung des emergency calls (eCall).

Effiziente Produktentstehungsprozesse sowie Standards sind unverzichtbar; deren Weiterentwicklungen sind primäre Aufgaben der gesamten Branche. Die Wissenschaften müssen ebenfalls ihre Beiträge, wie z. B. bei der Elektrochemie, bei neuen Werkstoffen und bei Systemoptimierungen, leisten. Entscheidungsträger der Industrie müssen unbedingt den Überblick über alle grundlegenden Fragen und Zielkonflikte der Gesamtfahrzeuge behalten. Die Politik hat für die Rahmenbedingungen zur Aufrechterhalten individueller Mobilität, des Verkehrsmanagements und der Bereitstellung der Infrastruktur sowie für die Ausbildung qualifizierten Nachwuchses zu sorgen.

Für die Zukunft müssen folgende Fragen beantwortet werden, die sich unmittelbar auf die Mobilitätsstrukturen auswirken:

- Welche Energieform wird langfristig zu akzeptablen Kosten mit einer entsprechenden Infrastruktur angeboten?
- Wie werden sich die Möglichkeiten durch Connected Drive [3] bezüglich
  - komfortables Fahren, Fahrzeughandling und automatisches Fahren in definierten Situationen,

  - Information und Entertainment,
  - sicheres Fahren (insbesondere Vermeidung von Ablenkung)

  auswirken?
- Welche Verkehrsstrukturen können in den Megacities realisiert werden?
- In welchem Umfang können und werden carsharing-Angebote sich durchsetzen?
- Werden sich die Fahrzeughersteller vom Fahrzeugbauer zum „Mobilitätsanbieter" entwickeln?
- Wird es aufgrund der Energieversorgung weltweit unterschiedliche Antriebsaggregate geben?
- Ist die zurzeit sehr ausgeprägte individuelle Mobilität mittel- bis langfristig finanzierbar?
- Wie stark werden sich Unternehmen aus dem IT-Bereich im Fahrzeugmarkt positionieren?

Die Technik hat sich „vom Einfachen zum Komplizierten" entwickelt. Heute besteht die Aufgabe, nachhaltige, kundengerechte und „intelligent einfache" Lösungen zu schaffen sowie „Over Engineering" zu vermeiden. Das gilt besonders für erschwingliche Fahrzeuge, aber auch für künftige Premium-Modelle. Den Ingenieuren kommt in der Lösung der anstehenden Probleme eine besondere Verantwortung zu. Nicht nur die Technik, sondern auch die gesellschaftlichen Herausforderungen müssen beachtet werden.

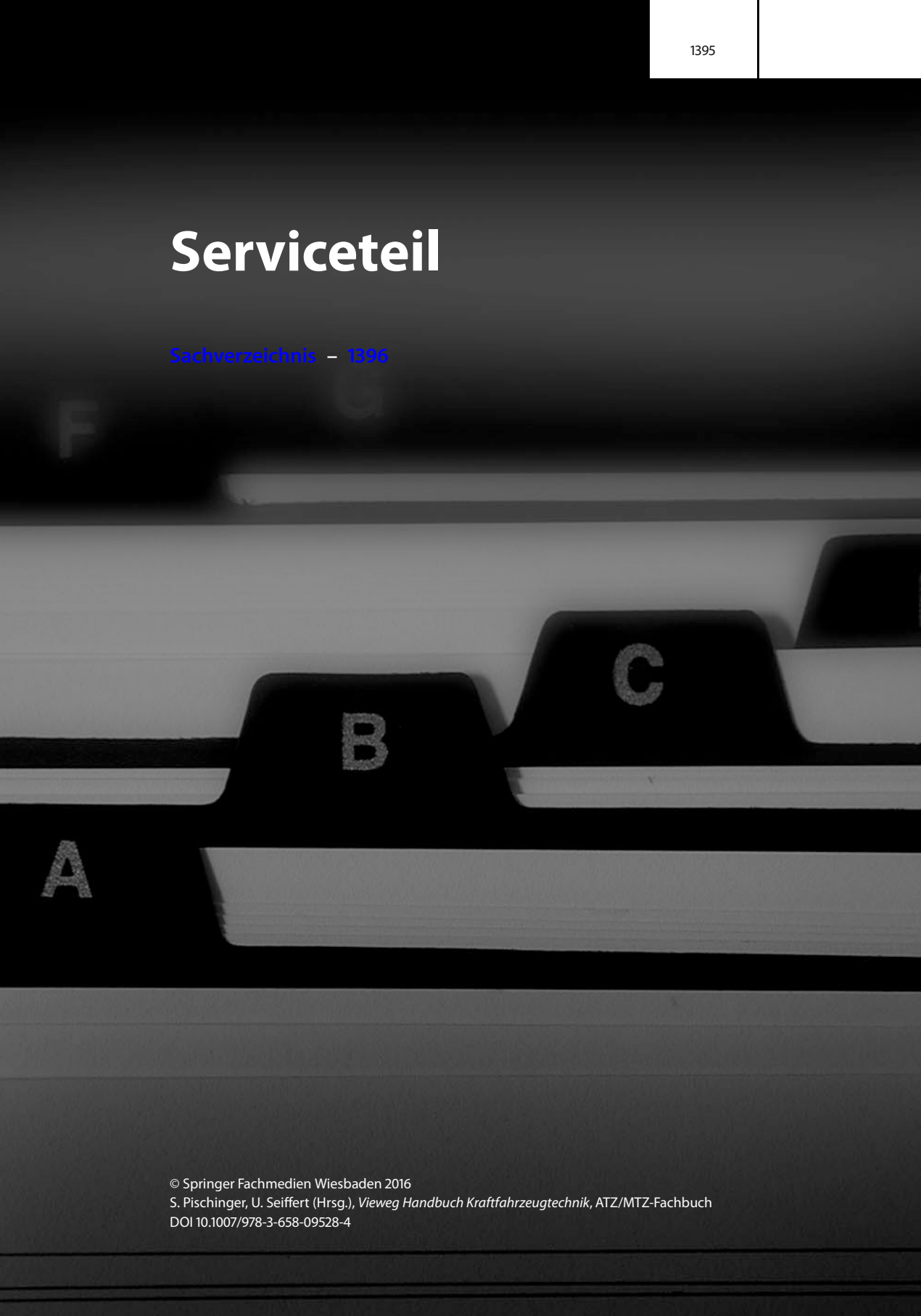


## Literatur

1. Süddeutsche.de Spätzünder: Hersteller setzen wieder verstärkt auf die Brennstoffzelle. Zugegriffen: 26.01.2016
2. VDI-Positionspapier: Wie viel passive Fahrzeugsicherheit brauchen wir in Zukunft? November 2015
3. Grote, C.: BMW Connected Drive-Effizienz, Komfort und Sicherheit durch Vernetzung. AAET (2012)
4. VDA; Verband der Automobilindustrie: Technischer Kongress März 2016, Ludwigsburg

# Serviceteil

Sachverzeichnis – 1396




© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016
S. Pischinger, U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch
DOI 10.1007/978-3-658-09528-4

# Sachverzeichnis


1 K-Epoxid-Klebstoff, 1206
1-Box-Design, 143
2-Takt-Motor, 520
3-Box-Ausführung, 143
5 % Frau, 159
5-Sitz-Konfigurationen, 720
49 CFR 571.301 (FMVSS 301), 542
70/156 EWG, 542
70/221/EWG, 542
95 % Mann, 159

## A

Abgas, 69, 299
Abgasanlage, 106, 293, 495
Abgasanlage aus Titan, 1186
Abgasanlagenschwingungsverhalten, 503
Abgasbestandteil
– limitierter, 15
Abgasemission, 246
Abgasenergie, 373
Abgaskatalysator, 299
Abgasklappe, 495
Abgaskomponente, 330, 331
Abgaskrümmer, 495
Abgaskühler, 79
Abgasminderung, 394
Abgasnachbehandlung, 317, 323, 342, 361, 376, 389, 393, 394
Abgasrückführung, 316, 327, 411
Abgasschleppe, 69
Abgasturboaufladung, 324, 404
Abgasturbolader, 373, 394
Abgasverhalten, 519
Abkühlkurve, 87
Ablösungen an vorstehenden Teilen, 73
Abrisskante, 69
Abrollen, 822
Abrollkomfort, 839
Abrollprüfung
– zweiaxiale, 822
Abrollradius, 810
ABS Ventilkonfiguration, 764
ABS-Bremsen, 809
Absicherungsmaßnahmen, 415
Absorber
– idealer, 1185
Absorption, 101
ABSplus, 783
ABS-Pumpe, 762
ABS-Regelalgorithmus, 783
ABS-Regelung, 780, 782
– aktive, 783
ABS-Regelungszyklus, 781
ABS-Software, 782
Abstandsmessung, 776
Abstandsregelsystem, 788
Abstandssensor, 776
Abstandswarnsystem, 1063
Abwendungszeiten, 663
Abwicklungsverhältnis, 1210
ACC, 491
Achsantrieb, 420
Achsbrücke, 852
Achsgetriebe, 418, 420, 430, 443, 444, 852
Achskinematik, 744, 834
Achskonzept, 744
Achslastveränderung
– dynamische, 742
Ackermannbedingung, 839
Active Rollover Protection, 787
Adaptive Cruise Control (ACC), 788, 1047
adaptive Werkstoffe, 820
Adaptronik, 1232
Adhäsion, 809
Adsorberkatalysator, 338
Adsorptionseffizienz, 705
Adsorptionskapazität, 705
Aeroakustik, 613, 1291
Aeroakustik-Entwicklung, 74
Aerobalance, 1385
Aerodynamik, 57, 63, 576, 850, 1282, 1291
Aerodynamikentwicklung, 74
Aerodynamische Effizienz, 1385
Aerogel, 1228, 1229
A-Fläche, 725
Aggregateanordnung, 150, 151
Aggregatversuch, 1331
Ähnlichkeitsgesetz, 1335
Air Knifes, 1182
Airbag, 716
Airbag-System, 19
Akkommodationsleistung, 673
Akkumulator, 84
aktive Hinterradlenkung, 901
aktive Lenksysteme, 895, 900
Aktives Gaspedal, 678
Aktivkohlebehälter, 15
Aktivkohlefilter, 705
Aktoren, 460
Akustik, 716, 724, 1290
Akustik-Management, 58
Akustik-Windkanal, 1334
akustische Anzeigen, 674
Akzeleration, 684
Alkoholkonsum, 14
Allgemeine Betriebserlaubnis ABE, 422
Allradantrieb, 154, 444, 465, 487
Allradkonzept, 154, 492
Allradlenksysteme, 902
Allrad-Verteilergetriebe, 421
Altautoverordnung, 726
Altautoverwertung, 1222
Alterungsvorgang
– zeitabhängiger, 1338
Alu-Gussrad, 826
Aluminium, 271, 272, 274, 292, 298, 590, 629, 1164
Aluminium-Gussrad, 827
Aluminiumlegierung
– hochfeste, 1175
Aluminium-Rad, 822, 827
Aluminiumschaum, 1184
Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse, 272
Alu-Polyolefin-Sandwich, 716
Alu-Schmiederad, 826
ambiente Beleuchtung, 715
analoge Anzeigen, 671
analoge Bedienelemente, 676
Analyse
– kinematische, 834
Anbausteuergerät, 491
Änderungsmanagement, 1275
Anfahrdrehzahlbegrenzung, 461
Anfahrelement, 417, 422, 433, 445, 446, 450
Anfahrkupplung, 429
Anfahrmomentenbegrenzung, 461
Anfahrnickausgleich, 837
Anfassqualität, 716
Anhängefahrzeug, 58
Anhänger Stabilisierungs Logik (ASL), 492
Anlässe für Mobilität, 4
Anodenversorgung, 196
Anodisieren, 1201
Anpressdrucksteuerung, 448
Ansauganlage, 292, 293, 298, 305
Ansauggeräusch, 298
Ansaugrohr, 298
Ansaugsystem, 297
Anschaffungskosten, 1349
Antenne, 1037
Antennendiversity, 1039
Anthropometrie, 683
anthropometrische Ergonomie, 660
Antiblockiersystem (ABS), 776

Anti-Fingerprintausrüstung, 1183
Antireflexbeschichtung, 1230
Antreiben, 810
Antrieb
– alternativer, 22
Antriebskonzept, 151
Antriebsmomentenverteilung, 465
Antriebsprüfstand, 1334
Antriebsregelung, 465
Antriebsschlupf, 777
Antriebsschlupfregelung (ASR), 21, 783
– Bremsenregelung, 783
– Motorregelung, 784
Antriebsstrangkonzept, 150, 151
Antriebs-Stützwinkel $\varepsilon$, 837
Antriebswiderstand, 61
Anzeigen, 667
Aramid, 1188
Arbeitsprozess, 254, 259, 286, 328
AR-HUD, 672
armierte Schlauchleitungen (Flexleitungen), 761
Aromat, 356
Arretierbarkeit, 676
ASAM, 1339
A-Säule, 74, 577
ASC (Automatic Stability Control), 487
ASPECT-Programm, 688
ASR (Antriebs-Schlupf-Regelung), 487
Assistenzsystem, 776
ästhetisches Gefühl, 665
ATF (automatic transmission fluid), 438
Audi Sportdifferenzial, 478
Audioqualität, 1338
Audi-Space-Frame (ASF), 590
Aufbauausprägung, 143
Aufbaueigenfrequenz, 858
Aufbauform, 143
Aufheizung, 86
Aufladung, 297, 323, 351, 353, 371
– elektrostatische, 542
Aufprallversuch, 542
Aufstützen, 838
Auftrieb, 68
Auftriebskraftbeiwert, 64
Aufweiten, 1208
Aufweitstauchen, 1208
Augenellipse, 685
Ausblasfühler, 713
Ausfallrate, 1346, 1347
Ausfallwahrscheinlichkeit, 1346
Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte, 1346
Ausfederweg, 838
Ausferrit, 1175
Ausgleichbehälter, 550, 759
Ausgleichselement, 281, 290
Ausgleichswelle mit direkter Wälzlagerung, 1243
Ausgleichvolumen
– externes, 550
– internes, 550
Auslagerungstemperatur, 1176
Auslassventil, 257, 277, 278, 280, 281, 781
Auslegungsparameter, 853
Ausrücker, 422
Ausrücklager, 424
Außenabmessung, 142
Außengeräusch, 15
Außengeräusch-Prüfstand, 1334
Außenhaut, 576
Außenspiegel, 74
Austenit, 1171
Austenitisches Gusseisen, 1174
Austenitisieren, 1173
Autoklaven, 1192
Automatgetriebehydraulik, 439
Automatic Transmission Fluid (ATF), 432, 438
Automatikgetriebe, 18
automatische Kupplungsbetätigung, 425
automatisierte Getriebe, 418
automatisierte Schaltgetriebe, 433
Automobil, 12
Automobildesign, 665

# B

Bainitisches Gusseisen, 1174
Bake Hardening Stahl, 1169, 1170
Bake-Hardening Effekt, 1169
Balkenanzeige, 671
Bandscheibendrücke, 690
Bandtacho, 671
Bariumtitanat, 1200
Basislack, 654
BASR, 783
Batteriekühlplatte, 91
Batteriekühlung, 89
Bauform
– asymmetrische, 710
– symmetrische, 710
Baukasten, 165
Bauraumbedarf, 160
Bauteilelastizität, 839
Bauteiltemperatur, 71
Bauteilversuch, 1331
Beanspruchung, 663
Bedienelement, 675
Bedienelemente, 660, 668
Bedienkomfort, 666
Bedienungsfehler, 1331
Beduftung, 703
Befeuchtertechnologie, 206
Befeuchtung, 196, 201
Beimischquote, 525
Beinraum, 579
Belaglamelle, 437
Belagreibwert, 764
Belagverschleiß, 422
Belastung, 663, 1330
Beleuchtung, 715
Beleuchtungskonzept, 715
Belüftung, 710
Belüftungsebene, 709
Benzin-Direkteinspritzung, 342
Benzineinspritzung, 21, 307
Berechnung, 724, 816
Berufsverkehr, 1063
Beschlagfreihaltung, 712
Beschleunigungssensor, 774
Beschleunigungsverhalten, 449
Beschleunigungswiderstand, 61, 62
Betätigungshaptik, 675, 715
Betätigungswegsensor, 773
Betriebserlaubnis, 342
Betriebsfestigkeit, 1282
Betriebsfestigkeitsprüfung, 1334
Betriebskosten, 1350
Betriebspunktverlagerung, 323
Betriebsstrategie, 244, 246, 342, 343
Betriebszustand, 1331
Beurteilungskriterien, 803
Bewegungscodierung, 669, 676, 679
Bewertung
– subjektive, 1338
Bewertungskriterium, 803
– quasiobjektives, 1338
Biegeschwingung, 105, 422
Bi-Fuel-Fahrzeug, 558
bildhafte Anzeigen, 671
Biodiesel, 527, 532
Bio-Fuel, 19
Biokraftstoffe, 525
Biomass-to-Liquid (BtL), 532
Biomechaniker, 14
Bionik, 1184
Blech
– plattiertes, 1186
Blechteile, 595
Blechvorbeschichtung, 647
Blei-Zirkon-Titanat – PZT, 1232
Blockbildung, 162
Blockierbremse, 809
Blockiergrenze, 780
Bluetooth (BT), 1062
BMW M3, 1193
BMW X-Drive, 476
Bodenaufstandsfläche, 809, 811, 817

Bodenverkleidung, 724
Bodywork, 1377
Bonddraht, 1188
Boosten, 89
Booster
– aktiver, 785
BorgWarner, 476
Bor-legierte Stähle, 1167
Boxermotor, 261, 263
brake-by-wire, 493
Brandtest, 542
Bremsanlage
– Entlüften der, 765
Bremsassistent (BAS), 785
– elektronischer, 758, 785
– hydraulischer, 786, 787
– mechanischer, 785
Bremsbelag, 770
Bremsdruckbegrenzer, 761
Bremsdruckmodulation, 781
Bremse, Topf-, 772
Bremsen, 809, 810
Bremsen auf unterschiedlichen Reibwerten, 848
Bremsen in der Kurve, 848
Bremseneingriff, 421, 487, 783
Bremsenfading, 787
Bremsenkennwert $C^*$, 764
Bremsflüssigkeit, 760
Bremskraftbeiwert, 777, 778
Bremskraftbeiwert-Kurve, 778
Bremskraftverstärker, 758
– aktiver, 758, 786
– Ausfall, 787
– extern ansteuerbarer, 785
Bremskraftverstärkerunterstützung, 787
Bremskraftverteiler, 761
Bremskraftverteilung, 742
Bremskreisaufteilung, 749
Bremsleitung, 761
Bremsnickausgleich, 837
Bremspedal, 677, 678, 756
Bremsregelsysteme, 493
Bremsregelung, 465
Bremsrohrleitung, 761
Bremsrückschaltung, 462
Bremssattel, 764
– Steifigkeit eines, 766
Bremsscheibe, 764, 768
– innenbelüftete, 768
– Schirmung, 769
– schwimmend gelagerte, 769
– Werkstoffe, 769
Bremsschlauch, 761
Bremsschlauchleitung, 761
Bremsschlupf, 488, 777, 778
Brems-Sperr-Differential, 487
Bremsstützwinkel, 837
Bremssystem, 746, 763
Bremssystemkomponente, 756
Bremstrommel-Werkstoff, 772
Bremsweg, 780
Bremswiderstand, 62
Brennstoffzelle, 22, 51, 195
Brennstoffzellenantrieb, 195
Brennstoffzellen-Fahrzeug, 205
Brennstoffzellen-Stacks, 199
Brennstoffzellentyp, 196
Brennstoffzuheizer, 82, 83
Brennverfahren, 311, 316, 317, 322, 338
Brennverlauf, 328
Briefkasten
– persönlicher, 20
Brombutylkautschuk, 1194
Bruchdehnung, 852, 1172
Brummgeräusch, 105
B-Säule, 576
Buckyball, 1226
By-wire-Lenksysteme, 896

# C

C/SiC-Bremsscheibe, 770, 772
CAD, 1282
CADmould, 725
CAD-Techniken, 685
Canning, 499
Carbonfaser, 1188
Carrera GT, 1179
Carsharingangebot, 21
Cass Test, 824
Central Information Display, 669
Cetanzahl, 353, 387
CFD, 298
CFD (Computational Fluid Dynamics), 702
Chemisch Nickel, 1201
Chiller, 91
Chiptuning, 342
Chlor, 1194
Chrom Cr(VI), 1219
chromatische Aberration, 674
Chromsäureverfahren, 1202
Clinchen, 1203, 1204
CMMI, 1342
$CO_2$-Laser, 1202
Cockpit/Tunnelkonsole, 719
Codesysteme, 669
CommonRail, 18
Complexphasen-Stahl, 1170, 1171
Composite, 828
Composite-Rad, 828
Continuous Variable Transmission (CVT), 242
Cordierit, 1198
Cornering Brake Control (CBC), 488, 489, 783
Coupé, 168, 576
cracken, 275
Crashlänge, 151
– freie, 162
Crash-Struktur, 1290
Crashverhalten, 294
Crossover-Konzept, 170
customer satisfaction index, 21
CVD, 1185, 1199
CVD-Schicht, 1202
CVS-Methode, 334
CVT (Continuously Variable Transmission), 445, 446
CVT-Getriebe, 240, 1244

# D

Dachhimmel, 722
Dachrahmen
– hydrogeformter, 594
Dachverkleidung, 715
Dämmung, 842
Dämmungseinbruch, 101
Dampfblasenbildung, 766
Dämpfer-Durchbiegung, 850
Dampfmotor, 236
Dämpfung, 841
Data-Mining-Verfahren, 207
Datenbussystem (CAN), 457
Datenkontrollmodell, 726
Datenkontrollprozess, 1271
Datenschutz, 1063
Dauerfestigkeit, 1176
Dauerlauf, 1339
Dauerlauf-Fahrzeuge, 1332
Dauerversuch, 1331
Death Valley-Sommer, 1332
Decklack, 654
Decklackierung, 654
DeDion-Achse, 853
Defrosterdüsen, 719
Dehngrenze $R_{p0,2}$, 1174
Dehnwerte, 721
Dekarbonisierung, 524
Dekormaterial, 1215
$DeNO_x$-Katalysator, 337
Design, 576
– of Experiments, 1339
– to Testability, 1339
Design for Recycling, DFR, 1221
Design-Freeze, 1278
Designmodell, 74
Detailoptimierung, 67
Diagnose, 463

– Off-Board-, 1351
Diagnoseassistent-System, 1338
Diagnosesystem, 342
Dichten, 649
Dichtung, 1290
Diebstahlschutz, 1350
Dieseldirekteinspritzer, 358
Dieselkraftstoff, 354, 387
Dieselmotor, 12, 254, 260, 261, 272, 278, 282, 297, 337, 344, 345, 348
Dieselpartikel, 357
Dieselpartikelfilter, 495
Differenzialgetriebe, 420
Digital Car, 1338, 1339
Digital Mockup, 724
Digital Mockup – Digitale Attrappe (DMU), 170
digitale Bedienelemente, 676
digitale Menschmodelle, 685
digitaler Prototyp, 1278
Dimensionalität, 676
DIN, 806
DIN 70000 Straßenfahrzeuge, 127
direkte Sicht, 692
Direkteinspritzung, 17, 308, 317, 324, 339
direktes Warmumformen, 1173
Direktverschraubung, 1205
Diskomfort, 665
Doppel-Differenzial-Einheit, 468
Doppelgelenk-Federbeinachse, 848
Doppelgelenk-Federbein-Vorderachse, 855
Doppelkupplungsgetriebe, 418
Doppelpuls-Holographie, 1335
Doppelquerlenkerachse, 849, 851
DOT, 806
Downsizing, 323, 413
Drallströmung, 317
Drehbeschleunigung, 739
Drehdrücksteller, 677
Drehkraft, 265, 281
Drehmoment, 254, 258, 265, 281, 298, 307, 319, 323
Drehmomentsteigerung, 17, 18
Drehmomentwandler, 426, 433
Drehschwingung, 424
Drehschwingungsdämpfung, 424
Drehzahlfühler, 494
Drei-Wege-Katalysator, 15, 306, 331
Dritte-Element-Dämpfer, 1382
Drogenkonsum, 14
Drosselklappe, 294
Drosselklappensteuerung, 488
Drosselregelung, 295
Druckabbau, 781
Druckabfall, 703
Druckaufbau, 781
Druckguss, 1175, 1214
Druckhalten, 781
Druckminderer
– druckabhängiger (festeingestellter), 761
– lastabhängiger, 761
Druckplatte, 422
Druckregelventil, 243
Druckregler, 460
Drucksensor, 775
Drucksteuerung, 461
Druckumlaufschmierung, 289
Druckverlauf, 261, 320, 328
Druckverteilung, 70, 689, 808
Druck-Volumen-Arbeit, 345
Drückwalze, 827, 828
Druckwellenaufladung, 373
Druckwiderstand, 64
DSC, 489
Dualphasen-Stahl, 1170, 1171
Duktilität, 721
dummies in the loop, 1331
Dünnschichtüberzug, 1201
Duo-Servo-Trommelbremse, 771
Duplex-Beschichtungen, 648
Duplex-Trommelbremse, 771
Durchbrennfunktion, 328
Durchsetzen, 1208
Durchsetzfügen, 1203, 1204
– einstufiges, 1205
– mehrstufiges, 1205
Durchsetzfügevorgang, 1204
Durchströmungsgeräusch, 73
Duroplaste, 632
Düsenhalter, 367–369
DVP (design validation plan), 415
Dynamic Brake Control (DBC), 491
Dynamic Stability Control (DSC), 489
Dynamiklenkung, 896

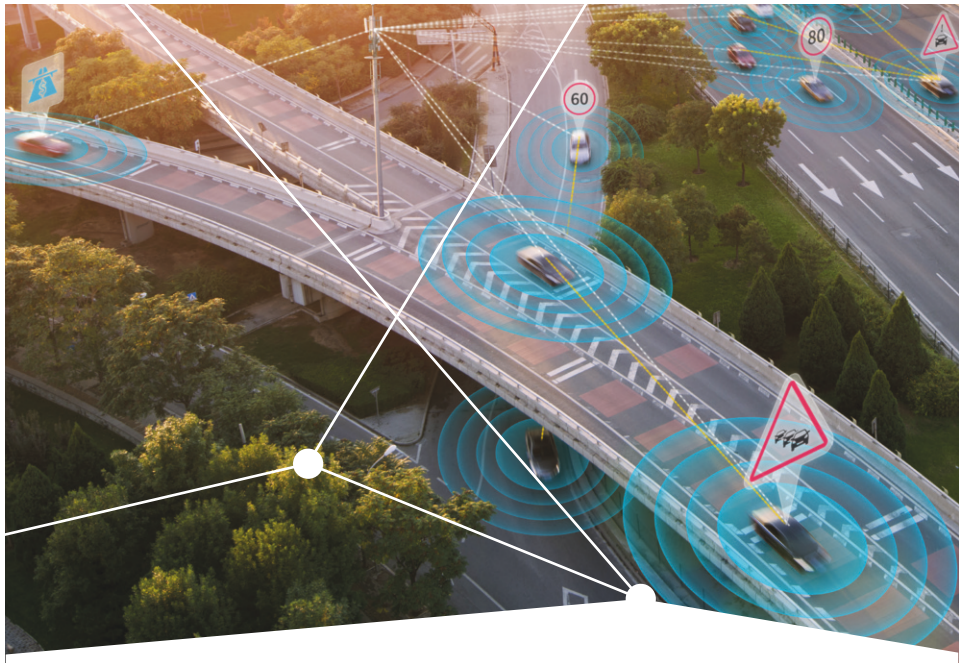
# E

E/E-Komponenten, 727
Easy Entry, 720
EBA, 785
EBMx, 492
ECE R34, 543
ECE-Regelung 30, 806
Echtzeit-Erfassung, 117
Edelmetall, 332, 1187
EFQM-Modell, 1341
EHB, 493
Eigendiagnose, 341
Eigenfrequenz-Abstimmung, 107
Eigenfrequenzniveau, 105
Eigenlenkgradient, 1281
Eigenlenkverhalten
– elastokinematisches, 744
Eigenmode, 804
Eigenschaft
– tribologische, 1185
Einfederweg, 838
Einfügedämmmaß, 101
Einfügedämmung, 100
Einhandbedienung, 715
Einheit
– lichttechnische, 993
Einlassventil, 254, 280, 281, 307, 317, 781
Einlauflänge, 813
Einlaufverhalten, 812
Einlochdüse, 368
Einpresstiefe, 821
Einscheibensicherheitsglas (ESG), 1196
Einspritzdüse, 352, 365, 366, 370
Einspritzleitung, 352, 366, 368, 371
Einspritzpumpe, 368, 370
Einspritzstrahl, 308
Einspritztechnik, 314
Einspritzung, 307, 308, 340, 342
– piezoelektrische, 18
Einspritzventil, 298, 305, 307
Einspritzverlauf, 352, 362, 368, 370
Einwirkung
– biologische, 1330
– chemische, 1330
– Festkörper-, 1330
– mechanische, 1330
Einzeleinspritzung, 307
Einzelkraft, 70
Einzelradaufhängung, 834, 850, 851, 853
– ebene, 853
– räumliche, 855
– sphärische, 854
Elastizität, 839
Elastokinematik, 834, 839, 1291
Elastomer, 1194
– thermoplastischer, 1194
Elastomerlager, 839, 840
elektrisch angetriebener Turbolader, 201
elektrisch unterstützte Aufladung, 412
elektrische Bremse, 679
elektrische Feststellbremse, 788
– mit direkt betätigtem Kombisattel, 789
– mit direkt betätigten Duo-Servo-Feststellbremsen, 789
– Seilzug mit Zentralaktuator, 789
elektrische Zuheizung, 82
Elektrizität, 537
Elektroantrieb, 195, 203
Elektroden, 196
Elektrofahrzeug, 92, 195
Elektrolyse, 530, 535

Elektrolyt, 196
elektrolytische Verzinkung, 647
elektromagnetisches Feld, 1037
Elektromotor, 195, 206
Elektronenmikroskop, 1336
Elektronische Bremskraft Verteilung (EBV), 488, 782
Elektronische Getriebesteuerung (EGS), 439, 457
Elektronisches Bremsen Management (EBM), 491
elektronisches Gaspedal, 678
Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP/DSC/VSC), 784
Elektrotauchlackierung, 653
EMB, 493
Emission, 330, 331, 334, 338–340, 343
Emissionsgrenzwert, 307, 316, 336, 337, 342, 544
Emissionsvorschrift, 14
– amerikanische, 544
EMV, 1291
Ende der Einspritzung, 366
endlosfaserverstärkte Thermoplaste, 1188
Energiebedarf, 320
Energiebilanz, 602, 1222, 1223
Energieeffizienzklasse, 807
Energiefluss, 102
Energierückgewinnungssysteme, 1378
Energieträger, 527
Entdröhnfolie, 101
Entfetten, 651
entfeuchten, 706
Entflammung, 318–320, 322
Entlüftung, 703
Entropie, 234
Entsorgung von Altfahrzeugen, 1218
Entwicklung
– virtuelle, 1272
Entwicklungsablauf, 724
Entwicklungseffizienz, 1337, 1338
Entwicklungskosten, 166
Entwicklungsphase
– frühe, 1276
Entwicklungsprozess, 1278
EOBD, 342
Erdgas, 528
Erdöl, 528
Ergonomie, 659, 715
Erleiden, 665
Erprobungsort, 1332, 1334
Ersatzteil, 1355
Erschöpfung, 664
ESP, 489, 493
ESP-Anlage, 763
Ethanol, 527
ETRTO, 806, 821
EU-Label, 806
EURO 4, 15
EURO 5, 15
EURO 6, 15
Europäischer Fahrzyklus, 334
Evolventen-Verzahnung, 430
Expansionsventil
– thermostatisches, 84
Exterieur, 1278
Extrembedingung, 1333

# F

F1-Antriebseinheit, 1377
Fahraufgabe, 660
Fahrbahnoberfläche, 808
Fahrbahnquerneigung, 850
Fahrbahnunebenheit, 736, 741
Fahrdämpfer, 424
Fahrdynamik, 62, 736–738, 1281, 1291
Fahrdynamikfläche, 1333
Fahrdynamikmodell, 1279
Fahrdynamikregelung, 492
Fahrdynamiksensorik, 489, 494
Fahrdynamiksimulation, 1281
Fahreigenschaft, 839
Fahrerassistenz, 1043
Fahrerassistenzsystem, 737, 1042, 1044
– prädiktives, 1044
Fahrerhaltung, 689
Fahrerplatz, 160
Fahrerunterstützung, 16
Fahrgeräusch, 98
Fahrgleichung, 417
Fahrkomfort, 802, 804, 1291
Fahrleistung, 66, 527
Fahrleistung und Verbrauch, 1282
Fahrleistungsdiagramm, 61
Fahrpedal, 677
Fahrroboter, 1095
Fahrsicherheit, 68, 802
Fahrsimulator, 1280, 1338
Fahrstabilität, 780, 802
Fahrstrategie, 449
Fahrtroutenplanung, 20
Fahrverhalten, 62, 68, 804, 818, 839
Fahrversuch, 1331
Fahrwerk, 743
– Aufgaben, 736
– Definition, 736
Fahrwerkregelsystem, 737, 746
Fahrwerkskraft, 738
Fahrwiderstand, 59, 62
Fahrwiderstandskurve, 419
Fahrwiderstandslinie, 323
Fahrzeug, Stabilisierung, 741
Fahrzeugbreite, 163
Fahrzeugdynamik, 98
Fahrzeugerprobung, 1273
Fahrzeugfreiheitsgrade, 738
Fahrzeugführungsaufgabe, 737
Fahrzeugfunktion, 1278
Fahrzeuggewicht, 746
Fahrzeuggrundform, 141, 143
Fahrzeughöhe, 163
Fahrzeuginformationssystem, 669
Fahrzeuginnenraum, 16
Fahrzeugklasse, 142
Fahrzeugkombination, 58
Fahrzeugkommunikationssystem, 1043
Fahrzeugkonzept, 131, 140, 141, 1276, 1277
Fahrzeuglänge, 162
Fahrzeuglastenheft, 1276
Fahrzeugmodelle, 817
Fahrzeugpackaging, 683
Fahrzeugphysik, 58
Fahrzeugsicherheit
– unfallfolgenmildernde, 14
Fahrzeugsound, 98
Fahrzeugstabilisierung, 1044
Fahrzeugtechnik, 16
Fahrzeugvariante, 165
Farbcodierung, 669
Farbe, 673
Faserverbunddruckspeicher, 202
Faserverbundkunststoff, 1167
Faustrahmensattel, 767
Faustsattel, 767
– kombinierter, 767
Faustsattel FN, 767
Faustsattel FNR, 767
Faustsattel-Bremse, 764
FCKW, 1219
FDS – Flow Drill Screws, 599
Federal Motor Vehicle Safety Standard, 14
Federbeinachse, 840, 855
Federkraft
– elastische, 739
Feder-Masse-Aufbau, 724
Feder-Masse-System, 101
Federschwerpunkt, 854
Federsteifigkeit
– dynamische, 841
Federungsauslegung, 861
Federungssystem
– aktiv geregeltes, 744
Fehlersimulation, 1336
Feinblech, 1169
FEM-Analyse, 817
Fensterführung, 70
Fernbereichslidar, 1046




# Driving the future of automotive electronics

For leading solutions in automotive electronics from the pioneer in the industry, turn to Infineon Technologies. Choose our semiconductors for your body, powertrain, safety, and hybrid and electric vehicle applications and profit from products resulting from nearly 40 years of experience in automotive applications and standards. Our commitment to innovation and high quality means you can count on us to successfully drive your applications into the tomorrow and beyond.

- Car IT-security and connectivity
- Hybrid and electric powertrain
- Safety and ADAS
- Body and convenience
- Powertrain

www.infineon.com/automotive

Fernbereichsradar, 1045
Fersenpunkt, 160, 162, 163, 166
Festigkeit, 1290
Festkörper
– nanoporöse, 1228
Festkörperlaser, 1202
Festsattel, 766
Festsattel-Bremse, 766
Feststoff, 331
Feuchtesensor, 713
Feuerverzinkung, 647
Filament-Winding-Verfahren, 1192
Filter, 81
Finanzdienstleistung, 1064
Finite-Elemente (FE), 1279
Fischer-Tropsch, 530
Flachgewebe, kaschiert, 1195
Flamme
– laminare, 357
Flammenfront, 328, 329
Flammensynthese, 1228
Flexible Fuel, 557
Fliehkraftpendel, 51
Fließpressen, 1190
Flottenmanagement, 52, 1060
Flottenversuch, 207
Flow-Forming, 827
Flüssiggas, 529
Flüssigkeit
– magneto-rheologische, 1231
Flüssigkeitskühlung, 287, 288
Flüssigwasserstoffspeicherung, 205
Flüsterasphalt, 15
FMVSS 301, 543
Fogging, 1194, 1196, 1215
Fog-Wert, 1219
Fondbelüftung, 709
Fondfußraum, 709
Form, 675
Formcodierung, 669
Formel-Fahrzeug, 1374
Formgravur, 1210
formhärtbarer Stahlwerkstoff, 1173
Formhärten, 1173
Formoptimierung, 66
Formparameter, 1346
Formwerkzeughälfte, 1211
Frachtverfolgung, 1064
Fraktionsabscheidegrad, 705
Freigangsuntersuchung, 834
Freizeitverkehr, 4, 1063
Fremdkraftbremse, 493
Frequenz, 1037
Frischluft, 704
Frischluft-Umluftautomatik, 712
Frontantrieb, 154
Frontend-Trägermodul, 1217
Frontlängsmotor, 154
Frontmittelmotor, 167
Frontmotoranordnung, 151
Front-Quer-Antrieb, 443, 446
Frontquermotor, 154
Frostschutzmittel, 76
frühe Entwicklungsphase, 1277
Fuel-Emission, 544
Fügetechnik, 1202
Fügeverfahren, 598
Führerscheinausbildung, 14
Führungsaufgabe, 661
Funkenzündung, 322
Funktion, 667
– parametrische, 1280
funktionale Ergonomie, 667
Funktionsmaßkonzept, 726
Funktionsversuch, 1331
Fußgängerschutz, 1290
Fußpunktimpedanz, 1037
Fußraumzone, 709
Fußstellteile, 668
Fußstütze, 690

# G

GADSL (**G**lobal **A**utomotive **D**eclarable **S**ubstance **L**ist), 1218
Galileo, 1059
galvanische Trennung, 1179
Galvanneal, 648
$\Gamma$-Synthese, 1091
Gangstufung, 419
Gangwechsel, 433, 435
Ganzstahlkarosserie, 1164
Gasinjektion, 1216
Gasinnendrucktechnik (GIT), 1216
Gaskraft, 265
Gaskraftzerlegung, 268
Gaspedal, 678
Gasphasenabscheidung
– chemische, 1228
– physikalische, 1228
Gasphasenkondensation, 1228
Gasturbine, 237
Gaswechselorgane, 297
GB 18296, 542
GCIE-Austauschlisten, 687
Gebläse, 703
Gebläsekennlinien, 705
Gebläsetrakt, 704
Gebrauchseigenschaften, 801–803
Gebrauchstüchtigkeit, 1329
Gebührenerfassung, 1063
Gefahrstoffrecht, 1218
Gefallen, 665
Gefügehärtung, 1169
Gegenstrom-Prinzip, 297
Gegenstrom-Zylinderkopf, 297
Gehäusewerkstoff, 431
Geländewagen, 421, 465
Gelenkfunktion, 841
Gelenkwelle, 421
Gelschicht, 818
Gemischaufbereitung, 1290
Gemischbildung, 295, 305–307, 317, 324, 327, 329
– inhomogene, 519
genadelte Watte, 1195
Geodäsie, 1064
Gepäckraum, 723
Geräusch, 806, 807
Geräuschdämpfung, 819
Geräuschemission, 358, 361
Geräuschniveau, 16
Geräuschpegel, 716
Geräuschsymbol, 807
Geräuschverhalten, 518–520
gerautes Gewirke, kaschiert, 1195
Geruch, 85, 715
Geruchsstoffemission, 361
Gesamtfahrzeug, 58
Gesamtfahrzeugkonzept, 1277
Gesamtfahrzeugsimulation, 1279
Gesamtpegel, 98
Gesamtwiderstand, 59
Gesenkschmieden, 1214
Gesetz
– packagerelevantes, 159
Gesetzgeber, 12
Gesetzgebung, 14
gesetzliche Anforderungen, 806
Gesten, 676
Gestensteuerung, 682
Getriebe, 417
– automatisiertes, 433
– hydrodynamisches stufenloses, 445
– stufenloses, 445
Getriebeaufnahme, 105
Getriebehydraulik, 439
Getriebeölkühler, 75
Getrieberasselgeräusche, 424
Getrieberasseln, 424
Getriebeschaltkennfeld, 442
Getriebeschaltung, 432
Getriebeschema, 435
Getriebesteuergerät, 458
Getriebesteuerung
– elektronische, 450, 457, 459
– hydraulische, 458
Getriebesteuerungsmodul, 459
Getriebewandlung, 417
Getriebewirkungsgrad, 427, 448, 449
Gewichtsreduzierung, 625

Giant Magnetoresistance, 1226
Gierbewegung, 736
Gierdämpfung, 741
Giermoment, 742
Giermomentenregelung, 764, 774, 784, 785
Gierneutralität
– stationäre, 907
Gierrate, 763
Gierratenkompensation, 783
Gierratensensor, 775
Gießprozess, 272, 277
Gießsimulation, 1290
Gießtechnik, 1212
GKN, 476
G-Lader, 324
Glasfaser, 1188
Glashaus, 691
Gleichdruckprozess, 349
Gleichlaufgelenke, 421
Gleichraumprozess, 245, 259, 260, 327, 349
Gleichteilkonzept, 719
Gleitbereich, 809, 811
Gleitebene, 1180
Gleitgeschwindigkeit, 808
Gleitschutzkette, 830
Gleitsystem, 1180
Globalisierung, 21
Glühkerze, 359, 360
Glühzündung, 327
Glykol-Bremsflüssigkeit, 760
GMR-Effekt, 1226
Gough-Diagramm, 812
Grauguss, 272, 276, 1168, 1174
Greenhouse, 691
Greifarten, 681
Grenzschichtbeeinflussung, 65
Grob-Lastenheft, 1277
Groblayout, 1278
Größencodierung, 669
Grundgesetz
– physikalisches, 58
Grundlack, 654
Grundlackierung, 654
Gummihaarmatte, 1195
Gummihysterese, 816
Gummilager, 839, 840, 843
Gummiverhalten, 815
Gurtanlegepflicht, 691
Gürtel, 800
Gusseisen, 1174
– austenitisch-ferritisches, 1174
– bainitisches, 1174
– mit Kugelgraphit, 1174
– mit Lamellengraphit, 1174
– mit Vermiculargraphit, 1174
Gussteile, 597
Guss-Werkstoff, 598
Gütegrad, 260, 261
Güterverkehr, 4, 1060

# H

H-Punktmessmaschine, 687
$H_2$-Brennverfahren, 242
$H_2$-Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung, 243
$H_2$-Brennverfahren mit innerer Gemischbildung, 244
$H_2$-DI-Motorkonzept, 244
$H_2$-Einblaseventil, 243
$H_2$-Gassensor, 243
$H_2$-Gemischbildungssystem, 242
$H_2$-Motor, 245
$H_2$-Rail, 243
$H_2$-Verbrennung, 243
$H_2$-Verbrennungsmotor, 242
H-Abstraktions-Ethin-Additionsmechanismus, 356
Haftbereich, 809, 811
Haft-Gleitreibung, 117
Haftvermittler, 1217
Halbhohlniet, 598, 1204
Halbzeugkosten, 1189
Haldex, 473
Hall-Effekt, 495
Haltbarkeit, 804
Handbremse, 772
Handhabbarkeit, 666
Handling, 1279
Handlingkur, 1333
Handschaltgetriebe, 418, 429
Handstellteile, 668
Haptik, 714, 715
haptische Anzeigen, 675
Hardpoints, 170
Hardware in the Loop, 1331, 1337
Hartanodisieren, 1202
Hartguss, 1174
Harz, 1192
Hauptbrennraum, 358, 359
Hauptdruck, 461
Haupteinspritzung, 366, 370
HBA, 785, 786
HC-Emission, 269, 288, 307, 320, 328, 329
Head-up-Display (HUD), 1230
Heckdiffusor, 67
Heckneigungswinkel, 67
Heckscheibe, 1040
Heckströmung, 69
Heckverschmutzung, 70
Heizen, 81
Heizgerät, 81
Heizklimagerät, 719
Heizkörper, 81, 703
Heizkreislauf, 81, 86, 703
Heizleistung, 81, 82
Heizungssystem, 72
Helium, 235
Herstellungskosten, 538
Hertz'scher Dipol, 1037
High Purity Mg-Legierung, 1177
High Value CVT, 1244
Hill Descent Control (HDC), 491
Himmel, 1195
Hinterachsgetriebe, 420
Hinterachslenksysteme, 903
Hinterachs-Schräglaufregelung, 906
Hinterspritztechnik, 1216
Hinterspritzverfahren, 723
Hinweise, 674
HIP, 1184
HNBR, 1194
hochfeste Faser, 1192
Hochfrequenzschweißen, 1203
hochkristallines Polypropylen, 1188
Hochmodulfasern, 1192
Hochspannungs-Kondensatorzündung, 319
Hochspannungsverteilung, 319
Höchstgeschwindigkeit, 418, 443
Hochvoltbatterie, 196
Höhenkompensation, 462
Höhenschlag, 814
Hohlraumkonservierung, 655, 656
Holz, 1164
Holzfaserformstoff, 1219
Holzspeiche, 1164
Honen, 272
HP (high purity), 1177
H-Punkt, 687
H-Punkt-Messmaschine, 684
Hubkolben-Verbrennungsmotor, 254
Hubraum, 258, 263, 318, 323
Hubschwingung, 863
HUD, 672
Hüftpunkt, 579
Human Builder, 686
Hutze, 719
Hybrid, 238
Hybridantrieb, 18, 240, 1245
Hybridantriebssystem, 1337
Hybridbremse, 494
Hybridtechnik, 1217, 1337
Hydraulik-Bremskraftverstärker, 758
hydraulische Getriebesteuerung, 441
hydraulische Steuerung, 438
Hydrolager, 106, 843
Hydro-Mec-Verfahren, 1210

– aktives, 1210
hydrophil, 1229
hydrophob, 1229
Hysterese, 809
Hysteresereibung, 809

# I

IF-Stahl, 1170
IHU, 1209
IHU-Verfahren, 1209
Impact Test, 824
Impulsrad, 773
indirekte Beleuchtung, 715
indirekte Sicht, 692
indirektes Formhärten, 1173
Individualisierungsangebot, 727
Individualität, 714
Industrial Design, 666
Informatik, 1059
Informationsfluss, 666
Informationsflüsse, 660
Infrarotsensor, 776
In-Mould-Decoration, 1218
Innenhochdruckumformen, 642, 1208, 1209
Innenhochdruck-Umformung (IHU), 597, 1209
Innenraum, 714
Innenraumabmessung, 146
Innenraumklima, 72
Innenraummaßkonzeption, 159
Innenraumtemperaturfühler, 713
Innenraumvariabilität, 146
Innenzahnradpumpe, 438
innerer Wärmeübertrager, 84
Innovationsmanagement, 1265
Insassenschutz, 1290
In-situ-Erzeugung, 1228
Inspektion, 1344
Instandhaltbarkeit, 1345, 1352
– Anforderung, 1359
Instandhaltung, 1343, 1344
Instandhaltungskonzept, 1358
Instandhaltungsstrategie, 1358
Instandhaltungszeit, 1353
Instandsetzung, 1344, 1345
Instrumententafel, 719
Integral-Aktivlenkung, 906
Integrallenker-Achsen, 851
Integrallenker-Hinterachse, 850
Integrated Chassis Management (ICM), 746
Integration, 727
integrierte Bedienelemente, 677
intelligenter Reifen, 820
Intelligenz
– technische, 50
Intelligenz technischer Systeme, 50
Interaktionsdiagramm, 1082
Interieur, 1278
Interieurabmessung, 146
Interieurbauteil, 1290
Interieurmaß, 148
Intermodalität, 4
Internet-Technologie, 1059
Interstitial Free, 1169
Ionenstrom, 321
Isobare, 348, 349
Isochore, 234, 348
Isolationswert, 101
Isolationswirkung, 841
Isotherm, 234, 348
Isotropenexponent, 349

# J

JACK, 686
Job Number One, 1276
JTEKT, 476
Just-in-Sequenz, 726
Just-in-Time, 726
Just-In-Time-Steuerung, 1061

# K

Kabelbaum mit Schaltern, 719
Kalibrierung, 597
Kaltbandstahl, 1169
Kälteanlage, 83
Kältekreislauf, 81, 84–86, 703
Kälteleistung, 85
Kältemittel, 83–85
Kaltfließpressen, 1211
Kaltstart, 288, 307, 319, 334, 338
Kaltstartbetrieb, 343
Kaltstartemission, 15
Kaltumformung, 1172
Kammermotor, 350, 359
Kamm'scher Reibungskreis, 779
Kanalabschaltung, 318
Kantenlauf, 834
kapazitive Elemente, 719
Karkasse, 800
Karosserie
– verzinkte, 16
Karosseriebauweise, 575, 576
Karosseriebrummen, 421
Karosseriebrummgeräusche, 424
Karosserieentwicklung, 576
Karosseriekonstruktion, 648
Karosseriekonzept
– aluminiumintensives, 1167
Karosseriekonzept ASF, 592
Karosserieleichtbau, 590
Karosseriesteifigkeit, 587
Kaschiertechnik, 1216
Kaskade-Vorhersagemodells, 688
Katalysator, 196, 294, 299, 319, 329, 332, 333, 495
Katalysatormaterial, 332
kathodischer Korrosionsschutz, 1182
Kautschuk, 1194
Kautschukmischung, 1194
Kavitation, 352
Kegelrollenlager, 1235
Keilriemen, 293
Keilrippenriemen, 293, 294
Kennfeld, 259, 261, 288, 323, 324, 340–342
Kennfeldoptimierung
– modellgestützte, 1339
Kennfeldthermostat, 80
Kennzeichnung, 806
Keramik, 272, 278, 332, 1197
Keramikbremsscheibe, 1198
Keramik-Preform, 1168
Kerbempfindlichkeit, 1179
Kette, 279, 281, 294
Kieler Puppe, 685
Kinematik, 1291
Kinetic Energy Recovery System (KERS), 241
Kipphebel, 280, 281, 284
Kippneigung, 787
Klangeindruck, 99
Klappen, 1290
Klarlack, 654
Kleben, 600, 649, 1206
Klebstoffsystem, 1206
Klimaanlage, 81
– , vollautomatische, 712
– halbautomatische, 711, 712
– manuelle, 711
– vollautomatische, 711
Klimagerät, 81, 85, 703
Klimakanal, 1335
Klimakompressor, 293, 341
Klimakondensator, 79
Klimasystem, 72
Klimatisierung, 81, 1291
Klimatisierungssystem, 703
Klopfen, 260, 319, 329, 340
Klopfgrenze, 329
Klopfregelung, 319, 329, 340
Klopfsensor, 329, 1199
Knarzgeräusch, 117
Knieraum, 579
knockback, 765
Know-how-Recycling, 1339

kognitive Ästhetik, 665
Kohlendioxid, 327, 330, 351
Kohlenmonoxid, 15, 306, 330, 337, 339, 351, 357
Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, 1190
Kohlenstoffnanoröhre (CNT), 1232
Kohlenwasserstoff, 15, 258, 306, 328, 329, 331, 334, 337, 339, 351, 356, 357, 388, 400, 545
– polyzyklischer aromatischer, 356
Kolben, 254, 257–259, 261, 264, 265, 275, 276, 286, 290, 317, 328, 329
Kolbendichtring, 765
Kolbenkraft
– resultierende, 265, 268
Kolbenkühlung, 290
Kolbenlauffläche, 272
Kolbenmulde, 351
Kollisionswarnsystem, 1064
Komfort, 664, 665
Komfortausströmer, 702
Komfortdüse, 710
Komfortempfinden, 702
Komforterleben, 664
Komfortmechanik/Elektrik, 720
Komfortpyramide, 666, 701
Komfortregelung, 712
Komfortwinkel, 685
Kommunikationsbordnetz, 977
Kommunikationssystem, 20
Kommunikationstechnologie, 1061
Kompatibilität, 667
Komplexität, 51
Kompressibilität, 770
Kompressionsverhältnis, 519
Kompressor, 84, 712
Kompressoraufladung, 403
Kondensator, 83, 84
Kondenswasser, 706
Konizität, 814, 815
Konstantfahrtgeräusch, 98
kontaktanaloge Anzeigen, 672
kontaktanaloges Head-Up-Display, 672
Kontaktdruck, 808, 816
Kontaktgriff, 681
Kontaktkorrosion, 1177, 1179
Kontrast, 673
Konvertierungsrate, 333
Konzeptalternative, 1277, 1278
Konzeptentwicklung, 1267
Konzeptphase, 1276, 1282
Konzeptsegment, 143
Konzeptsynthese, 1278
Kopf-Thorax-Airbag, 721
Korngrößenverteilung, 1226
Körperhaltungen, 685
Körperschall, 104–106, 503
Körperschalldämpfungsschicht, 716
Körperstamm, 684
Körperumrissschablonen, 684
Korrosion, 1200
Korrosionsbeständigkeit, 1200
Korrosionsprüfung, 1338
Korrosionsschutz, 646, 1200
Kosten-Management, 58
Kraft
– 1. Ordnung, 266
– 2. Ordnung, 266
Kraftrad, 58
Kraftschluss, 810, 811, 816
Kraftschlussbeiwert, 777, 808, 810, 831
Kraftschlusspotenzial, 811, 813, 821
Kraftschlussverhalten, 808
Kraftstoff
– synthetischer, 398
Kraftstoffanteil, 328
Kraftstoff-Ausgleichsbehälter, 550
Kraftstoffbehälter, 542
– Anordnung, 547
Kraftstoffbeständigkeit, 542
Kraftstoffdampf, 544
Kraftstoffdruck, 308
Kraftstoffdurchlässigkeit, 542
Kraftstoffe, 527
Kraftstoffpermeation, 1194
Kraftstoffpumpe
– bedarfsgesteuerte, 17
Kraftstoffsystem, 541
Kraftstoffsystem mit externem Ausgleichsvolumen, 550
Kraftstoffverbrauch, 62, 449, 519, 520, 804, 810
Kraftstoffverdunstungsemission, 543, 545
Kraftstoffverteilung, 305
Kraftübertragung, 808
Kraftwagen, 58
Kreislaufeignung, 1221
Kreisplatte, 1333
Kreisprozess, 257, 260
– idealer, 349
Kriechfestigkeit, 1178
Kriechmoment, 433
Kronenrad Differenzial, 470
Kugelgewinde-Antrieb, 1244
Kugelgraphit, 1174
Kühlerbauart, 77
Kühlerquerschnitt, 72
Kühlkreislauf, 75
Kühlluftführung, 766
Kühlmittel, 83, 287, 295
Kühlmittelkühler, 75, 77, 78, 80, 81
Kühlmittelpumpe, 80
Kühlmittelstrom, 80, 81
Kühlmitteltemperatur, 288
Kühlmittel-Thermostat, 76
Kühlmodul, 76, 77, 79
Kühlsystem, 71, 80, 287
– elektronisch geregeltes, 288
Kühlung, 71, 286, 289
Kundenbeziehung, 1359
Kundenerwartung, 1343
Kundenwunsch, 12, 13
Kunstfaser, 1194
Kunststoff, 630, 1188, 1336
Kunststoff-Rad, 828
Kupplung, 422
Kupplungsbetätigung, 424
– automatische, 425
Kupplungspedal, 677, 679
Kupplungsscheibe, 422
Kurbelgehäuse, 272
Kurbeltrieb, 263
Kurbelwelle, 254, 258, 263–265, 274, 281, 290, 321
Kurbelwinkel, 263–265, 283, 328
Kurshaltung, 741
Kurzhuber, 365
Kurzstreckenbetrieb, 320
Kutschenbau, 1164

# L

Laborversuch, 1331
Lackierung, 1202
Ladedruckregelung, 341
Ladeluftkühler, 75, 77, 78
Ladeluftkühlung, 80, 411
Laderaum, 723
Ladungsbewegung, 317, 318, 327
Ladungswechsel, 257, 281, 297, 298, 327, 350
Ladungswechselverlust, 261, 285
Ladungswechselvorgang, 518
Lager, 844
– aktives, 846
– schaltbares, 844
Lagerauslegung, 847
Lagerungsmatte, 499
Lamellenbremse, 436
Lamellenkupplung, 436
Lampe, 998
Landwirtschaft, 1064
Lang-Faserverstärkte-Thermoplaste (LFT), 1189
Langglasfaser-Technologie, 1188
Langglasfaserverstärkung, 1189
Langhuber, 365
Längsdynamik, 741
Längsfederung, 744, 839, 849

A Nidec Group Company

GPM

All for dreams

# Individuell, integriert, innovativ.

## Die neue Generation der Kühlmittel- und Ölpumpe



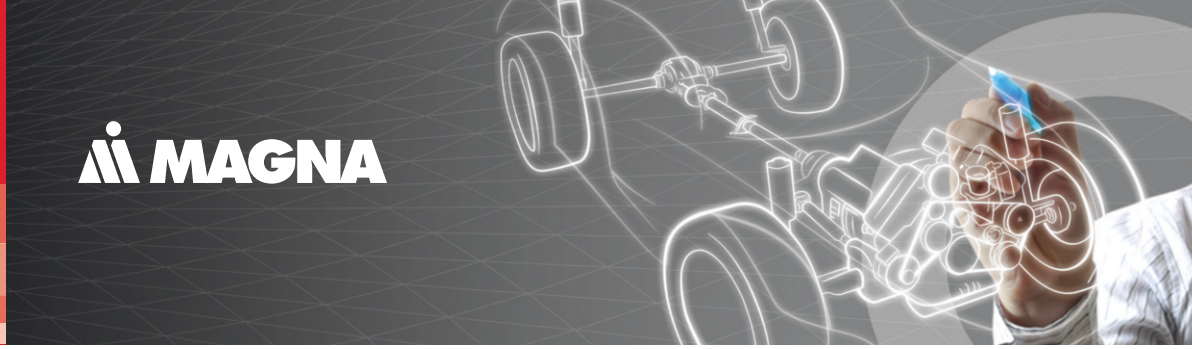

Die schaltbare Kühlmittelpumpe

Mit ausgereiften, innovativen Thermomanagement-Lösungen sind wir einer der weltweiten Technologieführer.

Unsere mechanisch angetriebenen Wasserpumpen regeln den Volumenstrom der Pumpe voll variabel. Dies führt zu einer schnelleren Motorerwärmung nach Kaltstart und erheblicher Kraftstoffeinsparung im NEFZ.

Gemeinsam mit Partnern aus der Nidec-Gruppe entwicklen wir neue mechatronische Öl- und Kühlmittelpumpen für die Bordspannungen 12V und 48V.

NIDEC GPM GmbH • Schwarzbacher Str. 28, D-98673 Auengrund OT Merbelsrod • Tel. +49 (0) 36878 64-0 • www.nidec-gpm.com • info@nidec-gpm.com



# JETZT EINSTEIGEN

## beim Weltmarktführer für Allrad & Getriebe!

Das umfangreiche Produktportfolio von **Magna Powertrain** umfasst eine breite Palette von Allradprodukten für längs- und quermotorisierte Fahrzeuge, unterschiedliche Motor- und Getriebekomponenten sowie Anwendungen zur Optimierung im Thermalmanagement.
Mit dem Getriebespezialisten GETRAG an Bord wird der größte, unabhängige Lieferant für Allradsysteme zum Systemlieferant für den Antriebsstrang.

Werden Sie jetzt Teil unseres Teams von über 28.000 Mitarbeiter/innen weltweit!
Wir bieten Ihnen das professionelle Umfeld eines erfolgreichen Konzerns mit internationaler Ausrichtung, interessanten Aufstiegsmöglichkeiten und einer ausgeprägten Unternehmenskultur.

**Unsere Standorte in Europa:**

**Bulgarien:** Plovdiv, **Deutschland:** Bad Homburg, Bad Windsheim, Hueckeswagen, Köln, Köln-Merkenich, Köln-Niehl, München, Neuenstadt, Neuenstein, Roitzsch, Rosenberg, St. Georgen, Untergruppenbach, **Frankreich:** Bordeaux, **Italien:** Benevento, Campiglione, Modugno, **Österreich:** Albersdorf, Ilz, Lannach, St. Valentin, Traiskirchen, **Slowakei:** Kechnec, **Schweden:** Göteborg, **UK:** Halewood

Aktuelle Ausschreibungen finden Sie unter **job.magnapowertrain.com**

magnapowertrain.com



Längslenker, 853
Längslenkerachse, 851
Längspol, 834
Längsschlupf, 813
Längssperre, 487
Langzeitdiskomfort, 690
Langzeitqualität, 1339, 1341
Laschenkette, 446
Laser-Doppler-Anemometrie, 1335
Laserlöten, 1203
Laserschweißen, 1202
Laserstrahl-MIG-Hybridschweißen, 600
Laserstrahlschweißen, 600
Lasertechnik, 1335
Lastabhängigkeit, 350
Lastenheft, 724, 1266, 1277
Lastkollektiv, 1330
Lastschaltgetriebe, 433
Lastschaltung, 433
Lastwechsel, 848
Latschverformung, 812
Laufband, 65
Laufstreifen, 800
Launch-Freigabe, 1275
Leasingangebot, 21
Lebensdauer, 998, 1290, 1291, 1343, 1346
Lebensdauerprüfung
– Zeitraffertest, 1338
Lebenslaufkosten, 1344, 1349
Leckage, 102
LED-Anzeigen, 674
Leder, 1164, 1194, 1195
Leerlaufdämpfer, 424
Leerlaufdrehzahlregelung, 340
Leerlaufverbrauch, 62
Leichtbau, 585, 612, 622, 625, 828
Leichtbau-Differenzial, 1245
Leichtbaugüte, 591
Leichtbau-Rad, 830
Leichtbauweise, 17
Leichtmetall, 1167, 1175
Leichtmetallrad, 826
Leistungssteigerung, 17, 18
Leistungsverlust, 286
Leiterplattentechnik, 458
Leitrad, 426
Leitungspackage, 165
Lenkachse, 834
Lenkbarkeit, 778, 780
Lenkbewegung, 739
Lenkdrehachse, 838
Lenkelastizität, 850
Lenkgetriebe, 886
– Kugelmutterumlauf-, 887
– Zahnstangen-, 888
Lenkmoment, 889
Lenkpräzision, 889
Lenkradwinkelsensor, 775
Lenkrollhalbmesser, 838
Lenkrollhalbradius, 838
Lenksäule, 102
Lenksäulen-Elastizität, 850
Lenkstockhebel, 677
Lenksystem
– elektromechanisches, 893
Lenkungsunterstützung, 893
Lenkunterstützung, 889
– elektrische, 893
– elektrohydraulische, 892
– hydraulische, 890
Lenkverhalten, 839, 850
Lenkwinkeländerung, 740
Lenkwinkelkomponente, 740
Lenkwinkelsensorik, 495
Lepelletier, 443
Lepelletier-Getriebesystem, 436
Lepelletiersystem, 443
Leuchtdichte, 993
Leukoplastbomber, 1165
LEV II, 544
Lichtleiter-Endoskopieverfahren, 1335
Lichtmaschine, 293
Lichtstärke, 993
Lichtstrom, 993
Lieferantenbeziehung, 1359
Liefergrad, 298
Lift-off-Verfahren, 1229
Li-Ion Batterie, 90
Limousine, 576
LIN-Bus-Ansteuerung, 713
Lithium-Ionen-Batterie, 204
LKW Maut, 1063
Location based services, 1061
Lordosenunterstützung, 720
Losbrechmoment, 841
Löten, 1203
Lotus-Effekt, 1225, 1229
LPE/LPS-Prozess, 722
Luft fördern, 703
Luft reinigen, 703
Luft temperieren und entfeuchten, 703
Luft verteilen, 703
Luftansaugung, 703
Luftaustritte, 703
Luftdrall, 351
Luftdruck, 819
Luftdrucküberwachung, 819
Lufteinlassöffnung, 69
Luftentfeuchtungsfunktion, 712
Lüfter, 77, 79, 80
Lüfterantrieb, 76
Lüfterrad, 704
Luftfederung, 868
Luftfilter, 294
Luftführungen, 703
Luftgüte, 705
Luftgüteautomatik, 713
Luftgütesensor, 713
Luftionisation, 703
Luft-Kraftstoff-Gemisch, 254
Luftkühlung, 286
Luftmassenmesser, 294
Luftmodul, 201
Luftschall, 100
Luftspalt, 773
Lüftspiel, 765, 770
Luftüberschuss, 306, 316, 327, 348, 353, 354
Lüftungssystem, 72
Luftverhältnis, 306, 307, 331
Luftversorgung, 196
Luftverteileinrichtung, 703
Luftverteilungssymbolik, 713
Luftwiderstand, 60, 62, 63
Luftwiderstandsbeiwert, 17
Luxus, 664

# M

Magerbetrieb, 297, 316, 338, 342, 343
MAGNA Pro-aktive Kupplung, 476
MagneRide, 1231
Magnesium, 271, 273, 292, 630, 1176, 1180
Magnesium-Blech, 1179
Magnesium-Gusslegierung, 1178
Magnesium-Gussrad, 828
Magnesiumgusswerkstoff, 1177
Magnesium-Knetlegierung, 1179, 1180
Magnesium-Legierung, 1176
Magnesiumrad, 822, 1168
Magnesium-Schmiederad, 828
magnetische Stecker, 488
Magnetkupplung, 85
Magnetpulverkupplung, 446
Magnetventil, 367, 371, 439, 460
Magsimal-59, 1175
man in the loop, 1331
Mangan, 1176
MAN-M-Verfahren, 358
Manöverplanung, 661
manuelle Klimaanlagen, 711
market pull, 50
Martensit, 1171, 1173
Martensitphasen-Stahl, 1170, 1171
Maskierungseffekt, 666
MASR, 784
Masse
– oszillierende, 264
– ungefederte, 828, 853
Masse-Absorber-System, 101
Massenkraft, 264, 265

– oszillierende, 276
Massenmoment, 265
Massenträgheitsmoment, 239
Massivumformverfahren, 1211
Maßkette, 161
Maßkonzeption, 159, 161
Material, 675
Materialanteil, 1167
Materialdämpfung, 840
Materialentwicklung, 820
Materialgesetz, 816
Materialien der Karosserie, 575, 620
Materialkreislauf, 1221
Materialleichtbau, 602
Materialprüfung
– zerstörungsfreie, 1336
Materialverhalten, 815
Matrixwerkstoff, 1188
MBA, 785
McPherson-Achse, 855
mechanische Fügeverfahren, 1203
Mechatronikmodul, 440
Medienbeständigkeit, 1336
Mehrfarbigkeit, 714
Mehrkolbenaggregat, 491
Mehrkomponenten-Fahrzeugprüfstand, 1335
Mehrlochdüse, 368
Mehrphasenstahl, 1169
Mehrventiler, 17
Mehrventilmotoren, 297
Mehrwegeausbreitung, 1038
Mehrzonigkeit, 711
Membran-Elektroden-Anordnung (MEA), 196, 198
Membranfeder-Druckplatte, 422
Mensch-Maschine-Schnittstelle, 170, 1061
Messgelände, 1333
Messrobotic, 715
Messsystem, 1332, 1333
Messtechnik, 1329, 1331
Metallabrieb, 291
Metall-Kunststoff-Metall-Verbund, 1187
Metallsalzlösung, 1201
Metallschaum, 1184
Methanisierung, 530, 536
Methode
– parametrische, 1282
Mg/Al-Verbundkurbelgehäuse, 1168
M-Getriebe
– sequentielles, 21
Mg-Gussrad, 826
Mg-Schmiederad, 826
MGU (Motor Generator Unit), 1378
Microhybride, 88
MIG-Löten, 1203
MIG-Schweißen mit Impulslichtbogen, 598
Mikroelektronik, 50
Mikrofaservlies, 705
Mikroprozessor, 458
milde Hybride, 89
Minderluftdruck, 804
Mini-SHED, 545
Mischbauweise, 635
Mischungsverhältnis, 306, 331
– stöchiometrisches, 305, 327
Missbrauchtest, 1331, 1333
Mitsubishi, 477
Mitteldruck, 298, 328
– effektiver, 258, 261, 298
Mittelklasse, 166
Mittelmotoranordnung, 168
Mittelmotorausführung, 151
Mittelwert, 683
Mixed-Sensitivity-Entwurf, 1093
Mobilfunksystem, 1060
Mobilität, 2, 1064
Mobilitätsbedarf, 12
Mobilitätsbedürfnis, 3
Mobiltelefon, 1061
Mockup, 725
Modalanalyse, 1290
Modellmaßstab, 65
Modellunsicherheit, 1090
Modellversuch, 1331, 1335
Modul, 294
Modularisierung, 165
Moldflow, 725
Momentanachse, 853
Momentanpol, 834
Momentanschraubachse, 853
Monoblockbauweise, 520–522
Monocoque, 1375
Monolith, 332, 499
Monolith-Lagerung, 499
Monotonie, 664
Montage, 726
Motor, 62
Motoranregung, 105
Motorbetriebspunkt, 445
Motorbremsmoment, 742
Motoreingriff, 435, 461
Motor-Getriebe-Lagerung, 105
Motor-Getriebe-Management, 461
Motorkonzept, 151
Motorkühlung, 79
Motorleistung, 258
Motormanagement, 339, 342, 343
Motoröl, 19
Motorordnung, 99
Motorpackage, 294
Motorraum, 164
Motorraumdurchströmung, 164, 1291
Motorschleppmoment, 784
Motor-Schleppmomenten-Regelung (MSR), 488, 784
Motorsteuerung, 292, 307, 321, 340–343
– elektronische, 329, 339
Motortragbock, 105
MSR, 784
Müdigkeit, 664
Mullit, 1198
Multifunktionalität, 51
Multi-Material-Design, 1168
multimodal, 4
multimodale Interaktionen, 676
Multipointeinspritzung, 17
Mündungsgeräusch, 502
$\mu$-Schlupf-Kurve, 778
$\mu$-Split, 782, 783
M-Verfahren, 361

# N

Nachfahr-Prüfstand, 1338
Nachfahrversuch, 1334
Nachhaltigkeit, 48–50, 246, 659, 1232
Nachlaufkühlung, 288
Nachlaufstrecke $n$, 838, 849
Nachlaufversatz $n_\tau$, 838
Nachlaufwinkel $\tau$, 838
Nachtsichtgeräte, 672
Nachwachsende Rohstoffe (Nawaro), 1219
Nadellager, 1234, 1235
Nahbereichssensor, 1046
Nanokomposit, 1228, 1230
Nano-Kompositmaterial, 1228
Nanopartikel, 1231
Nanoprodukt, 1229
Nanotechnologie, 1196, 1225
Nanotubes, 1226, 1231
Nassgriff, 806, 807
Nasshaftungskennwert, 807
Nasshaftungsklasse, 807
Nasslacke, 655
Naturfaser, 1194, 1219
Navigationsaufgabe, 661
Nebenaggregat, 293
Nebenkammer, 346, 351, 361
NECAR, 205
Neck-Injury Criteria, 721
Nennleistung, 258
Netz
– neuronales, 1092, 1339
neue Technologien, 50
Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff, 357
Nichtoxidkeramik, 1198
Nickausgleich, 837

Nickbewegung, 63, 738
Nickschwingung, 863
Nicksteifigkeit, 741
Nickwinkel, 743
Niederdruck-Kokillenverfahren, 272
Niveauregulierung, 868
$NO_x$-Emission, 354, 359, 396, 400
$NO_x$-Produktion, 397
$NO_x$-Rohemission, 397
$NO_x$-Speichermodell, 343
$NO_x$-Speichertechnologie, 338
Nockenwelle, 278, 280, 281, 283, 285, 290, 317
Nockenwellensteller, 283
Non-Crimp Fabrics (NCF), 1192
Non-Fuel Emission, 545
Nordland-Winter, 1332
Nordpol, 774
Normung, 806
Normzustand, 258
Notbrems-Assistenz-Funktion, 787
Notfahrbetrieb, 341
Notfallmeldung, 20
Notlaufeigenschaft, 818
Notruf, 20
Nullfehler-Planung, 1340
numerische Simulation (CFD), 65
numerisches Verfahren, 1282
Nutzung
– energetische, 1222
NVH, 524
$n$-Wert, 1172

# O

OBD, 321, 342
OBD II, 545
Oberfläche, 725
Oberflächenbeschichtung, 1199, 1200
Oberflächenhaptik, 675
Oberflächenschutz, 645, 647
objektive Bewertung, 803
Objektivierung, 1096
Occupational Packaging Toolkit, 689
Ohr, 674
Ökobilanz, 1222
Oktanzahl, 348
Ölablagerung, 521
Öldruck, 291
Olfaktorik, 714, 715
Ölfilter, 289, 291
Ölfüllmenge, 432
Ölpumpe, 289, 290, 294
Ölstandskontrolle, 291
Ölsumpf, 289, 290
Ölverbrauch, 269
Ölversorgung, 438
Ölwechselintervall, 292
On-Board-Diagnose, 19, 321, 342
One-Shot-Technik, 1215
ÖPNV, 1061
Optik, 714
Optimierungsverfahren, 1280
Organoblech, 1188
orifice tube, 84
ORVR-Test, 544
Otto
– August, 295
Ottomotor, 12, 254, 260, 261, 272, 273, 276, 281, 292, 295, 297, 298, 305, 306, 316–318, 322–324, 328, 331, 334, 337, 338, 342, 343
Oxidationskatalysator, 15, 338, 339, 360, 394, 396
Oxidieren
– anodisches, 1201
Oxidkeramik, 1198
Ozon-Vorläufersubstanz, 357

# P

Package, 131, 140, 141, 159, 164, 289, 293, 295, 522
Package Designer, 689
Package-Grenzflächen, 170
Packaging, 669
Panamera, 1167
Panhard-Stab, 852, 853
Pannenlauf, 818
Papillartaster, 716
Parameterschwankung, 1090
Parametrisierung, 1280
Parkbremse
– elektrische, 772, 788
Parkleitsystem, 1061
Parkraummanagement, 20
Parksperre, 440
Partikel, 15
Partikelbelastung, 705
Partikelemission, 357, 359, 390
Partikelfilter, 394, 495, 705
Passgenauigkeit, 715
PCM (Phase Change Material), 89
Pedalcharakteristik, 425
Pedale, 677
Peltier-Effekt, 1224
PEM-Brennstoffzelle, 196
Perlvelour, 723
Permeation, 1194
Personenverkehr, 4, 1060
Persönlicher Digitaler Assistent, 1062
Perzentil, 683
Pflichtenheft, 802
Phasendiversity, 1039
Phasenumwandlung, 236
Phosphatierung, 652
Physiologie, 715
piezoelektrisch, 1199
Piezokeramik, 1198
Pkw-Maßkonzeption, 686
Planetendifferenzial, 468
Planetengetriebe, 435
Planetensatz, 435, 436
Planetenträger, 436
Planlauf, 829
Planungsfreigabe, 1271
Plasmalöten, 1203
Plasma-Spritzverfahren, 272
Plasmazündung, 322
Platin, 196, 199
Plattform, 165
Pleuel, 275
Pleuellager, 290
Pleuelstange, 265, 275
Pleuelstangenverhältnis, 263
PMV (Predicted Mean Vote), 701
Poissonsche Gleichung, 349
Polsterstoff, 1195
Polsterung, 689
Polstrahl, 837
Polyamide (PA), 1188
Polyester (PET), 1188
Polymer, 1215
Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM), 196
Polymer-Membran, 196
Polypropylen (PP), 1188
Polyurethan-Schaum, 1195
Polyurethan-System, 1219
Poly-V-Riemen, 293
Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB), 1198
Porsche Ceramic Composite Clutch (PCCC), 1199
Porzellan, 1198
Positionsbestimmung, 1060
Positionscodierung, 669
Powder Slurry, 655
Powerpack, 892
Power-to-Gas, 531
Power-to-Liquid, 537
Powertrain Controller, 459
PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), 701
Präzisionsanflug, 1064
Preforming-Route, 1192
Prepreg, 1188, 1192
Prepreg-Route, 1192
Presshärten, 1173
Primäraluminium, 829
primäre Fahraufgabe, 660
Primärenergiebedarf, 528

Primer, 654
Probefahrt
– virtuelle, 1339
Product Lifecycle Management (PLM), 1269
Produkt Daten Management (PDM), 1268
Produktbeschreibung, 1278
Produktentstehung, 12
Produktentstehungsprozess, 21
Produktergonomie, 659
Produktionsdatum, 806
Produktionsergonomie, 660
Produktivitätssteigerung, 21
Produktlebenszyklus, 602
Produktplanung, 1263
Produktqualität, 1340
Produktreife, 1329
Produktsicherheit, 51
Produkttechnologie, 50
Produktvision, 1276
Profil, 801
Profilabnutzungsanzeiger, 806
Projektorganisation, 1261
PROMETHEUS, 51, 52
Proportionsstudie, 1278
Proportionsunterschiede, 684
ProTec, 1196
Prototyp, 1338
– digitaler, 1280
Prototypen, 726
Prozess
– adiabatischer, 349
Prozessqualität, 1340
Prozessreife, 1329
Prozesssicherheit, 51
Prozesstechnologie, 50
Prüfablauf, 1336
Prüfgelände, 1333
Prüfstand
– virtueller, 1331, 1339
Prüfstandsversuch, 1331
Prüfvorschrift, 1339
Psychologie, 715
Psychophysik, 666
PTC-Heizung, 82, 83
Pufferbatterie, 196
Pull Rod, 1381
Pulsstufenregelung, 487
Pulverlacke, 655
Pumpe-Düse, 370, 399
Pumpe-Düse-Einheit, 370
Pumpeneinheit, 762
Pumpenelement, 352, 367
Punktschweißkleben, 1202, 1207
PUR-Klebstoff, 1206
PUR-Schäume, 716
Push Rod, 1381
PVB-Folie (Polyvinylbutyral), 1196
PVC-Klebstoff, 1206
PVD, 1185, 1199
$p$-$V$-Diagramm, 348, 349
PWM-Ventile, 460

# Q

QFT-Entwurfsverfahren, 1094
Qualifizierung
– objektive, 117
Qualität, 19
Qualitätskreis, 1341
Qualitätsmanagement, 1340
Qualitätssteuerung, 348
Qualitätssystem, 1340
Quantitative Feedback Theory (QFT), 1093
Quantitätsregelung, 297
Quarz, 1200
Quasiobjektiv, 1338
Querbeschleunigung, 740
Quer-Beschleunigungssensor, 775
Querbewegung, 740
Querdynamik, 738
Querkraftausgleich, 855
Querlenkerlagersteifigkeit, 744
Querpol, 834, 837
Querrohrträger, 719
Querschlupf, 813
Querschnittsfläche, 17
Quersperrung, 742
Querspülung, 518
Quersteifigkeit, 813
Querstromkopf, 297
Querstrom-Prinzip, 297
Querverschiebung, 740
Quietschgeräusch, 117

# R

Rad, 821
– besondere Aspekte, 828
– Entwicklungsziele, 822
– Fertigungsverfahren, 826
– Gewichtsrelation, 828
– Größenrelation, 828
– Herstellverfahren, 822
– Normung, 821
– Prüfstandserprobung, 823
– Recycling, 829
– Reifen, 828
– Terminologie, 822
– Umweltschonung, 830
Radaufhängung, 63, 851
– ebene, 853
– sphärische, 853
Radaufstandsfläche, 739
Raddrehzahlfühler, 487, 494
Raddrehzahlsensor, 773
– induktiver, 774
– induktiver (passiver), 773
– magnetoresistiver, 774
– magnetoresistiver (aktiver), 773
– passiver, 773
Räderprüfung
– zweiaxiale, 824
Radführung, 739
Radführungskinematik, 741
Radführungskraft, 739
Radgeschwindigkeitssensorik, 494
Radiallastprüfung, 823
Radialreifen, 800, 801
Radialschlagtest, 824
Radialwellendichtring, 432
Radlager, 1239
Radlagermodul mit Stirnverzahnung, 1242
Radlast, 812, 823
Radsatz, 435, 436
Radschlupf, 810
Radschüssel, 826
Radstellung, 848
Radsturz, 739
Radträger, 839
Raffungsfaktor, 1338
Rahmenheft, 169
Rahmensattel, 767
Rahmensattel-Bremse, 764
RAMSIS, 686
Range Extender Vehicles, 92
Rankine-Prozess, 236
Rapid Prototyping, 1338
Rapid-Manufacturing, 726
Rasseln, 421
Rastertunnelmikroskop (Scanning Tunnel Microskope (STM)), 1226
Rauigkeit, 716
Raumlenkerachse, 851
Ravigneauxsatz, 436, 443
Recyclefähigkeit, 271
Recycling, 1189, 1220
Recyclingdreieck, 1221
Recyclingfähigkeit, 21
Recyclingfähigkeit von Aluminium, 829
Recyclingquote, 1220, 1221
Reduktionsmittel, 339
Reflexion, 842
Reflexionen, 693
Reflexionsgrad, 996
Regeleinheit
– elektronische, 763

– hydraulisch/elektronische, HECU, 761
Regelsystem, 740, 1089
– elektronisches, 763
– fahrdynamisches, 745, 746
Regelung, 81, 85, 711, 740
– adaptive, 1090
– Fuzzy-, 1091
– $H_8$-, 1093
– neuronale, 1092
– nichtlineare, 1096
– norm-optimale, 1092
– prädiktive, 1093
– robuste, 1093
Regelungsphase, 781
Regelungssystem, 1090
– Anforderung, 1089
Regelungstechnik, 1089
Regenerationsprozess, 339, 343
Regentropfen, 70
Registeraufladung, 373, 412
Regler
– elektronischer, 763
Reglerentwurf
– Ergebnis, 1095
– Vorgang, 1095
Reglerentwurfsverfahren, 1090, 1094
Reibbelag, 423
Reibbelagverschleiß, 772
Reibkoeffizient, 816
Reibkraft, 814
Reibmitteldruck, 281, 282
Reibungshysterese, 816
Reibungskuchen, 814
Reibungskupplung, 422
Reibungswiderstand, 63, 64
Reibwert, 716
Reichweite, 254
Reichweite eines E-Fahrzeugs, 93
Reifegradabsicherung
– Steigerung der, 1337
Reifen
– rollwiderstandsarmer, 60
Reifenaufbau, 800, 801
Reifenbeschriftung, 806
Reifendruckkontrolle, 819
Reifenfahrbahngeräusch, 804
Reifengleichförmigkeit, 814
Reifenindustrie, 1194
Reifenkennzeichnung, 806
Reifenkräfte, 812
Reifenmechanik, 815
Reifenmodell, 817
Reifennachlauf, 812, 839
Reifenparameter, 803
Reifenrückstellmoment, 739
Reifenrundlauf, 814
Reifenseitenkraft, 738
Reifensteifigkeit, 808
Reifenverhalten, 801
Reifenwulst, 800
Reihenmotor, 261, 263, 295
Reihenpumpe, 367, 368
Reinforced, 806
Reinigen, 651
Reiseinformation, 20
Reiseplanung, 20, 661
Reizarmut, 664
Rekuperation, 679
Rekuperation der Bremsenergie, 89
Relaxationslänge, 813
Reparaturkonzept, 600
Requirement Engineering, 1340
Reserven, 528
Reservierung, 20
Resin Transfer Moulding, 1192
Resonanz, 73, 105
Ressourcen, 528
Rest-Austenit-Stahl, 1171
Restgas, 352
Restriktion, 714
Restwärmeausnutzung, 713
Reynoldszahl, 64
Rezirkulationsgebläse, 202
RFID-Transponder, 821
Richtdiagramm, 1037
Ride, 1279
Ritzel, 888
Roadster, 168
Roboter, 655
Robot-Wheel, 1248
Rohemission, 316, 322, 334
Rohstoff
– nachwachsender, 1219
Rollachse, 838
rollback, 765
Rollenhebel, 281
Rollenkontakt, 280
Rollenprüfstand, 334, 1334
Rollfalzen, 600
Rollform, 1172
Rollgeräusch, 72
Roll-Over-Test
– statischer, 542
Rollsteuern, 834
Rollwiderstand, 17, 60, 62, 804, 806, 809, 810, 819
Rollzentrum, 837, 838
Rollzentrumshöhenänderung, 838
Rotationsbewegungen, 676
Rotationskette, 833
Rotationskolbenmotor, 269
Rotogrip-System, 833
Routenempfehlung, 1059
Routenplanung, 20
R-Punkt, 150, 159
Rubbeln, 769
Rückfahrlicht, 460
Rückfallebene
– hydraulische, 901
– mechanische, 901
Rückmeldung, 660, 667
Rückspiegel, 672
Rückstellmoment, 812
Runden im Strangpressen, 597
runderneuerte Reifen, 805
Rundlauf, 829
Rundstrickvelours, kaschiert, 1195
Rupfen, 423
Rupfschwingung, 422
Rußbildung, 354, 356, 363
Rußmischung, 810

# S

SAFEWORK, 686
Salzsprühtest, 824
Sandgussform, 1164
Sandwichblech, 1187
Sandwichverbund, 1186
Satellitennavigation, 1060
Sattelauslegung, 766
Satzverständlichkeit, 99
Sauganlage, 243
Saugrohr, 292
Saugrohrdruck, 307, 308, 341
Saugrohrlänge, 298
Saugrohrunterdruck, 317
Säulenverkleidung, 722
Schadstoff, 330, 334, 339
Schadstoffemission, 331
Schallabsorptionsmessungen, 716
Schallabstrahlung, 1290
Schalldämmmessungen (Petite-Cabine), 716
Schalldämpfer, 495
Schalldämpfervolumen, 164
Schallisoliersystem, 101
Schallpegel, 805
Schaltdrucksteuerung, 461
Schaltelement, 433, 435, 436
Schaltgetriebe, 18
– automatisiertes, 433
Schaltkomfort, 449
Schaltprogramm, 435, 441, 443, 457, 462
Schaltqualität, 441, 463
Schaltsaugrohr, 292, 293, 298
Schaltstrategie, 442
Schaltungsverhinderung, 462
Schaumdichte, 1184
Scheibenbremse, 764

Scheibenrad, 826
Scheiben-Werkstoff, 769
Scheibenwischer, 1335
Schicht, 1199
Schichtlade-Magerbetrieb, 342
Schiebedachwummern, 73
Schlechtwegstrecke, 1333
Schlepphebel, 280, 281
Schlupf, 810, 814
Schlupfgeschwindigkeit, 809
Schlupfregelhydraulik, 488
Schlupfregelsystem, 776
Schlupfregelung, 776
Schmelztauchschicht (Al, Zn, Sn, Pb und deren Legierungen), 1202
schmelztauchveredelt, 1170
Schmieden, 1214
Schmiederad, 828
Schmiedestahl, 1215
Schmierölkreislauf, 291
Schmierölverbrauch, 363
Schmierölverkokung, 286
Schmierung, 286, 289, 290
Schmierungssystem, 289
Schneekette, 830
Schnellfahrbahn, 1333
Schnellgangfaktor, 419
Schnellladung, 535
Schnellschaltgetriebe, 1380
Schnittstelle, 667, 719
Schräganströmung, 60
Schrägfederungswinkel, 837
Schräglauf, 812
Schräglaufsteife, 813
Schräglaufwinkel, 60, 739, 778, 812
Schräglenkerachse, 851, 854
Schraubenlader, 201
Schraubensteigung, 853
Schraubenverdichter, 324
Schrittmotor, 713
Schubabschaltung, 308
Schubgliederband, 446, 447
Schubumluft, 411
Schulterraum, 579
Schwächungsverfahren, 719
Schwankung
– turbulente, 74
– zyklische, 520
Schwefel, 388, 389
Schwefeldioxid, 354
Schwefelgehalt, 339
Schwefelvergiftung, 343
Schweißen, 1202
Schwerpunkt, 68
Schwerpunkthöhe, 739, 838
Schwerpunktlage, 68
Schwertlenker, 854
Schwimmrahmenbremse, 764
Schwimmrahmensattel, 767
Schwinghebel, 280
Schwingrohraufladung, 403
Schwingung, 421
Schwingungsisolation, 840, 841
Schwingungs-Management, 58
Schwingungssystem, 421
Schwingzahl, 858
Schwungrad, 239, 261, 268, 294
SCR-Verfahren, 339
Seebeck-Effekt, 1224
Sehzeichen, 673
Seiliger-Prozess, 349
Seilzugschaltung, 432
Seitenführungskraft, 778
Seitenkraft, 60, 265, 812, 814
Seitenkraftbeiwert, 64, 778
Seitenkraft-Elastokinematik, 850
Seitenkraftübertragungspotenzial, 834
Seitenscheibenbenetzung, 70
Seitenscheibenverschmutzung, 70
Seitenschlag, 814
Seitenschlupf, 778
Seitenverkleidung, 722
Seitenwand, 576, 801
Seitenwind, 68, 740, 850
Seitenwindempfindlichkeit, 68
Sekundäraluminium-Gewinnung, 829
sekundäre Aufgabe, 660
sekundäre Inkompatibilität, 680
Selbstentzündung, 329
selbsttragende Karkasse, 818
Selbsttragende Karosserie, 576
Selbstzündung, 254, 322, 344, 348, 351, 352, 361, 398
Selective Catalytic Reduction, 339
Select-low-Prinzip, 782
Self-Healing-Bearing, 1238
seltene Erden, 1178
Semi-Solid Metal, 1212
Sensor, 459, 772, 819
– aktiver, 494
– Infrarot-, 776
– Radar-, 776
Sensor für Fahrerassistenzsystem, 1045
Sensorcluster, 775
Sensorik, 19, 22, 1291
– Wank, 787
Sensorsignal, 340
Serienentwicklungsphase, 1276
Serienentwicklungsprozess, 246
Serienproduktion, 726
Serviceintervall, 19
Service-Prozess, 1351
Servotronic, 892
SgRP, 687
Shredderleichtfraktion, 1220
Sicherheit, 14, 716, 1064
– aktive, 776
– passive, 1282
Sicherheitsgurt, 1336
Sicherheitskonzept, 463
Sicherheits-Management, 58
Sicherheitssystem, 612
Sicht, 691
Sichtwinkel, 579
Siedeende, 389
Signalgebung, 14
Silafont 36, 1175
Silbenverständlichkeit, 99
Silikamischung, 810
Silikatechnologie, 820
Silikatkeramik, 1198
Silikonbremsflüssigkeit, 760
Siliziumnitrid, 1198
Simplex-Trommelbremse, 765, 771
Simpsonsatz, 436
Simulation, 362, 363, 371, 815
Simulationsprogramm, 459
Simulationstechnologie, 649, 1290
Simulatortechnik, 1279
Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess, 1258
Sintermetall, 279
Sitz, 720, 1290
Sitzbezug, 720
Sitzigkeit, 146
Sitzkonstruktion, 689
Sitzlochdüse, 369
Sitzpolsterung, 720
Sitzposition, 689
Sitzreferenzpunkt, 687
Sitzstruktur, 720
SizeAMERICA, 686
SizeGERMANY, 686
SizeITALY, 686
SMC (Sheet-moulding-Compound), 1188
Software, 50
Software in the Loop, 1337
Solarsensor, 713
Sol-Gel-Prozess, 1228
Sol-Gel-Verfahren, 1228
Sollgeschwindigkeit, 661
Sollkurs, 661
Sommerreifen, 809
Sonderstrecke, 1333
Sonneneinstrahlung, 72, 86
Sound, 495
Soundgestaltung, 98
Space-Frame, 589, 1176
Space-Frame-Technologie, 610
Spaltmaß, 715

AB Dynamics

# Lieferant hochentwickelter Testtechnologie weltweit




Wir entwickeln Produkte zum Testen von ADAS-Technologie und wir stellen diese seit vielen Jahren her. Die Top 25 Automobilhersteller nutzen unsere Produkte für Tests - Warum? Weil wir mit Qualität und Liebe zum Detail arbeiten. Wo Interaktionen zwischen mehreren Fahrzeugen oder zwischen einem Fahrzeug und einem Fußgänger oder Radfahrer stattfinden, müssen Sie sicher sein, dass Sie die besten Produkte verwenden.

Wir machen unserem Namen alle Ehre. Daher beliefern wir die großen Hersteller mit Produkten wie z.B.:

Fahrroboter – Lenkung, Bremse, Gas, Kupplung und Gangschaltung

Soft Targets – Guided Soft Target, Soft Crash Target und Soft Pedestrian Target

Fahrerlose Testsysteme – Kombinierte Gaspedal- und Bremsroboter

***AB Dynamics liefert innovative und professionelle Lösungen für die globale Automobilindustrie***

www.abd.uk.com

Spaltüberbrückbarkeit, 1203
Spannung, 1290
Spannungsrisskorrosion, 1201
Speichereinspritzsystem, 370
Speicherkatalysator, 338
Speichermodul, 809, 816
Speicherverdampfer, 89
Spektrumvergleich, 1000
Sperrdifferenzial, 420, 465, 742
Sperre, 468
Sperrmoment, 742
Sperrsynchronisierung, 431
Sperrwert, 470
Sphäroguss, 1174
SPICE, 1342
Spiegel, 672
Spiegelungen, 693
Spiralgehäuse, 704
Spiralkanal-Verdichter, 324
Spitzendruck, 353
Spitzentemperatur, 353, 361
Sport Utility Vehicles (SUV), 143, 168
Sportcoupé, 168
Sport-Prototypen, 1374
Spracheingabe, 1062
Sprachsignale, 674
Sprachsteuerung, 682
Spreizachse, 849
– virtuelle, 851
Spreizungsversatz $r_\sigma$, 839
Spreizungswinkel $\sigma$, 838
Spulenzündung, 319, 321
Spülkonzept, 518
Spülprozess, 519
Spülschlitz, 521
Spurhaltesysteme, 897
Spurweitenänderung, 838
Squeeze Casting, 1175, 1212
SSM-Guss, 1212
Stabilisierungsaufgabe, 662
Stabilitätsprogramm
– elektronisches, 784
Stabilitätssystem, 487
Stack, 196
Stahl
– CP-, 1172
– höherfester, 1169
– IF-, 1169
– mikrolegierter, 1169, 1170
– Verarbeitung, 1169
– weicher, 1169, 1170
Stahlerzeugung, 829
Stahlrad, 822, 826
Stahlrahmen, 1164
Stahl-Schalenbauweise, 1169
Stahlscheibenrad, 826
Stahlstrukturrad, 827
Stahlwerkstoff, 626
Standardabweichung, 683
Standardantrieb, 154, 443
Standardkonzept, 1277
Standardnormalverteilung, 683
Standübersetzung, 436
Stangenkraft, 265
Stanznieten, 598, 1203
Starrachse, 851, 852
Start-Stopp, 88
Static Stability Factor, 1280
Statistische Energieanalyse (SEA), 102
Staub, 69
Staubeintritt, 70
Staubkapazität, 705
Steatit, 1198
Stecker, 461
steer by wire, 740
steer by wire-Lenksysteme, 900
Steifigkeit, 1290
Steifigkeit der Radaufhängung, 840
Steigfähigkeit, 418
Steigungswiderstand, 61, 62
Steuerdiagramm, 279
Steuergerät, 340, 342, 343
Steuernockenkontur, 280
Steuertrieb, 278
Steuerung
– hydraulische, 438
Stickoxid, 15, 306, 327, 338, 351, 353, 356, 357, 366
Stickstoff, 235
Stickstoffmonoxid, 330
Stillstandsmanagement, 788
Stirlingmotor, 234
Stirlingprozess, 234
Stirnrad-Differenzial, 1245
Stirnwanddämmung, 101
Stoffkreislauf, 271
Störempfindlichkeit
– querdynamische, 741
Störgeräusch, 117
Störkrafthebelarm, 839
Stößigkeit, 889
Strahlausbreitung, 352, 362
Strak, 1270
Strangpressen, 1184
Strangpressprofil, 593, 594, 596
Straßenausbau, 14
Straßenfahrzeug, 58
Straßenseitenneigung, 741
Strategie
– adaptive, 441
Streckenverbrauch, 62
Streckgrenze, 1172
Streckgrenzenverhältnis $R_e/R_m$, 1172
Strichrichtung, 715
Strickvelour, 723
Stromfadentheorie, 76, 371
Strömung, 73
Strömungsablösung, 73
Strömungsberechnung, 67
Strömungsfeld, 352, 363
Strömungs-Management, 58
Strömungsrauschen, 73
Strömungswiderstand, 63
Strukturresonanz, 107
Strukturseitenkraft, 814, 815
Strukturtraganteil, 808
Stuckerschwingung, 106
Stufenautomatgetriebe, 433
stufenloses Getriebe (CVT), 240, 418
Sturz, 839
Sturzeinfluss, 812
Sturzwinkel, 834
Stützelement, 819
Stützring, 818
Stützwinkel, 837
StVZO § 45 und § 46 (BRD), 542
subjektive Bewertung, 803, 818
SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle), 15
Super Light Car, 1180
Superplastizität, 1229
SUV, 465
SUV Sport Utility Vehicle, 59
Synchronisierung, 430–432
Synchronisierungs-Systeme, 431
Synthesegas, 389, 390
Systemergonomie, 660, 666
Systemversuch, 1331

# T

Tailored blanks, 1202
Tailored products, 638
Tailored tubes, 596
taktile Anzeigen, 675
Talfahrt, 736
Tampon-Galvanisieren, 1201
Tandem-Hauptzylinder, 759
Tangentialkanal, 351
Tankentlüftung, 294, 341
Tank-to-Wheel (Fahrzeug), 399
Tassenstößel, 280, 281
Taumelscheibenkompressor, 85
Technikmodell, 1267
technische Intelligenz, 50
technische Narbung, 716
Technologievielfalt, 50
technology push, 50
Teilekonstruktion, 725
Teillast, 283, 288, 295, 317, 323, 328, 338

Teillast-Kraftstoffverbrauch, 306
Teilscheibenbremse, 764
Telekommunikation, 1059
Telematik, 1059
Telematikansatz
– intermodaler, 1060
Temperatur, 808
Temperatureinstellung, 713
Temperaturschichtung, 72
Temperaturverhalten, 815
Temperaturverteilung, 287
Tempergusseisen, 1174
Temperiereinrichtung, 703
Temperierung, 706
Tempomatanforderung, 463
Teppich, 723
tertiäre Aufgabe, 661
Testing, 726
Testpuppe
– anthropomorphe, 1338
Testzyklus, 334, 339
Textilie, 1194
Thermischer Komfort, 701, 714, 716
Thermodynamik, 254
thermodynamischer Wirkungsgrad, 245
thermoelektrischer Generator (TEG), 1224
Thermoelektrizität, 1223
Thermoelement, 1224
Thermographie, 1336
Thermoplaste, 632, 1188
– flächige, gewebeverstärkte, 1188
– glasmattenverstärktes (GMT), 1188
Thermoschockbeständigkeit, 1198
Thermospannung, 1224
Thermostat, 80, 287
Thixo Casting, 1212
Thixomolding, 1213
Thomson-Effekt, 1224
Tiefziehen
– hydromechanisches, 1209
Tiefziehsimulation, 1290
Tilger, 847
Timer, 458
Tippschaltung, 449
Tiptronic, 441
Titan, 1185
Titan-Legierung, 1185, 1186
Toroidgetriebe, 445
torque, 470
Torque Splitter, 477
Torque Vectoring, 477
Torsen-Differenzial, 470
Torsionsdämpfer, 422
Torsionsdämpferkennlinie, 424
Torsionsschwingung, 105, 421, 422, 426
Total Quality Management (TQM), 1340
toter Winkel, 673
Touchpad, 680
Touchscreens, 680
TPE, 1194
Tragarm, 105
Trägheitskräfte, 743
Tragverhalten, 808
Trajektorie, 662
Traktion auf Schnee, 811
Traktionssystem, 487
Transaxle, 154
Transformation Induced Plasticity (TRIP), 1171
Transistorzündung, 21, 319
Translationsbewegungen, 676
Transmissionsgrad, 996
Transportqualität, 5
Transportschutz, 656
Trapezpleuel, 275
TRIAS 33, 542
TRIAS 42, 542
Tribologie, 1197, 1331
Tribosystem, 1197
Triebkrafthebelarm, 839
Triebstrang, 62, 417–419
Triebstrangkonzept, 151
Triebwerkbelastung, 353
TriLok-Prinzip, 426
TRIP-Stahl, 1170, 1171
Trockensumpfschmierung, 291
Trommelbremse, 770
Tröpfchenbildung, 352
Tumble, 317
Tunnelkonsole, 719
Turbine, 237
Turbulenz, 306, 307, 329
Turbulenzlänge, 357
Turmalin, 1200
Türverkleidung, 722, 1195
Tütenwirbel, 70
TWI (Tread Wear Indicator), 806
Typschaden, 1290

# U

Überbremsung, 782
Überbrückungskupplung, 426, 429
Überforderung, 664
Überforderung durch Unterforderung, 663
Überlagerungsgetriebe, 897
Überlagerungslenkungen, 897
Überlagerungssteller, 899
Überrollbügel, 613
Überschneidungsschaltung, 434
Übersetzung, 417–420
Übersteuern, 785
Übertragungsfunktion, 804, 805
Übertragungsweg
– akustisch, 101
Übertragungswirkungsgrad, 417
ULEV (Ultra Low Emission Vehicle), 15
ULM Ultra-Leichtbauteile, 1180
ULSAB, 1187
ULSAB-Projekt, 1187
Ultrahochmodulfasern, 1192
Ultranahbereichssensor, 1045
Ultraschallsensor, 1199
Ultraschalltechnik, 1045
Umbug, 723
Umfangskraft, 810, 814
Umfassungsgriff, 681
Umformen
– hydromechanisches, 1209
Umformung, 1207
Umlaufbiegeprüfung, 823
Umlaufbiegung, 822
Umluft, 704
Umluftbetrieb, 86, 87
Umschaltventile, 460
Umschlingungselement, 446
Umschlingungsgetriebe, 445
Umweltergonomie, 660
Umweltverträglichkeit, 1218
Undichtigkeit, 72, 73
Unfallforscher, 14
Unfallort, 737
Unfallvorbeugung, 22
Ungleichförmigkeit, 265, 814
Ungleichförmigkeitsgrad, 268
Unterbau, 577
Unterboden, 164, 577
Unterbodenschutz, 655, 656
Unterbodenverkleidung, 68, 164
Unterbremsung, 782
Unterfluranordnung, 151
Unterforderung, 664
Untersteuern, 742, 785
Untersuchung, 1334
Untersuchungen mit dem Laser-Scanning-Vibrometer, 716
Unwucht, 829
– dynamische, 829
– statische, 829

# V

Vakuum-Booster, 758
Vakuum-Bremskraftverstärker, 758
Vakuum-Druckguss, 597, 1212, 1214
Vakuumpumpe, 759
Validierung, 1330, 1340
variable Schichtung, 711

Variantenmanagement, 727
Variator, 446, 447
Variatorverstellung, 448
VDA-Norm 2243-1, 1221
Vehicle Occupant Accommodation, 689
Veloursgewebe, 1195
Veloursteppich getuftet, 1195
Ventile, 278
Ventilgeschwindigkeit, 279
Ventilhub, 280, 283–286, 317
Ventilspielausgleich, 281
Ventilsteuerung
– elektromechanische, 285
– variable, 283, 297
Ventilsteuerzeit, 258, 300, 317, 327
Ventiltrieb, 269, 278, 279, 281–283, 285
Ventilüberschneidung, 281, 324
VE-Pumpe, 366
Verarbeitungs-Qualität, 1343
Verbindungstechnik, 1290
Verbraucherkennlinie, 705
Verbrennung, 245, 254, 297, 306, 307, 316, 319, 324, 327–329, 331, 334, 339, 345, 349–351, 353, 354, 362, 363, 396, 397, 399
– diskontinuierliche, 344
– verschleppte, 319
– vollständige, 354, 366
Verbrennungsablauf, 261, 328, 351, 352, 354, 358, 361, 365, 366
Verbrennungsgeräusch, 353, 360, 361, 365, 366, 368, 370, 393
Verbrennungsmodell, 328
Verbrennungsprodukt, 289, 327
Verbrennungsraum, 327
Verbrennungstemperatur, 327
Verbrennungsverfahren, 345, 358, 359, 361
Verbundachse, 851, 856
Verbundglas, 19
Verbundkonstruktion, 279
Verbundlenkerachse, 851, 857
Verbundlenker-Hinterachse, 857
Verbundscheibensicherheitsglas (VSG), 1196
Verdampfer, 81, 83–85, 703
Verdampferfühler, 713
Verdampfungskühlung, 288
Verdampfungsverlust, 15
Verdichter, 83, 85, 88
Verdichtung, 259
Verdichtungsverhältnis, 254, 260, 281, 297, 324, 328, 329
Verdunstungsemission, 543
Vereisungspunkt, 706
Verfahren
– luftgeführtes, 312
– strahlgeführtes, 309
– wandgeführtes, 310
Verfestigungsexponent, 1169, 1172
Verfügbarkeit, 1348
Verglasung, 1196
Vergleichsprozess, 259, 261, 297, 349, 350
Verifikation, 1340
Verifizierung, 1330
Verkabelung, 461
Verkehr, 5
– ruhender, 5
Verkehrsaufkommen, 3
Verkehrsinformation, 20
Verkehrskollaps, 1062
Verkehrsleistung, 3
Verkehrsmittel, 2
Verkehrsmittelwahl, 20
Verkehrsproblem, 12
Verkehrstelematik, 1059
Verkokung, 521
Verletzungsschwere, 1118
Verlustbeiwert $\tan\delta$, 809
Verlustfaktormessungen (Vibrometer-Methode für Schäume), 716
Verlustmodul, 809, 816
Verlustwinkel, 841
Verschiebegelenk, 421
Verschleißbeständiges legiertes Gusseisen, 1174
Verschleißnachstellung, 768
Verschmutzung, 69
Versicherungskosten, 1350
verstellbarer Düsenring, 409
Verstelldämpfersystem, 868
Versuchsbedingung, 1332
Versuchsfreigabe, 1341
Versuchsmethode, 1329
– deterministische, 1339
– statistische, 1339
Versuchsplanung, 1339
Versuchstechnik, 1329, 1331
Versuchsträger, 518, 520
Verteilereinspritzpumpe, 366, 367, 370
Verteilergetriebe, 482
Vertikaldynamik, 743
Verwindungssteifigkeit, 16
Verzahnung, 423, 430, 432
Video System, 1051
Video-Sensor, 1046
Vielstofffähigkeit, 239
Viertaktprozess, 350
Viertakt-Verfahren, 254, 295
Vigilanz, 663
Virtual-Reality-Methode, 1279
virtuelle Teststrecke, 1279
Viscokupplung, 471
Visco-Sperrdifferenzial, 420
visuelle Anzeigen, 669
V-Motor, 261, 263
VOC-Wert (**V**olatile **O**rganic **C**omponents), 1219
Vollbremsung, 779, 787
Vollgasrückschaltung, 462
Vollhybride, 91
Volllast, 265, 283, 317, 324, 342
Vollniet, 1204
Vollstanznieten, 599
Volumenaufnahme, 766
Vorbehandlung, 651
Vorbeifahrgeräusch, 807
Voreinspritzung, 354, 366, 370, 371
Vorförderpumpe, 366
Vorkammer-Dieselmotor, 358
Vorschrift
– gesetzliche, 541
– kundenspezifische, 541
Vorspur, 839
Vorspuränderung, 742, 834
– elastokinematische, 742
Vorspurverlauf, 849
Vorspurwiderstand, 60
Vorspurwinkel, 834
Vorverdichtung, 518
Vorwiderstandsgruppe, 711
VR-Motor, 263
VR-Technik, 1279
VTG, 409
VTG-Lader, 374
VW Käfer, 1176
VW Lupo, 1187

# W

Wählhebel, 440, 441
Wahlprogrammschalter, 442
Wälzgetriebe, 445
Wälzlager, 1234
Wandlerautomatgetriebe, 418
Wandlerdiagramm, 428
Wandlerkupplung, 461
Wandlerüberbrückungskupplung, 428
– geregelte, 428
Wandlung, 418, 461
Wandlungsbereich, 419
Wandwärmeverlust, 261, 286, 351
Wankbewegung, 738
Wankelmotor, 269
Wanken, 743
Wankfederrate, 838, 863
Wanklenken, 834
Wankmoment, 741, 838
Wankschwingung, 863

Wanksteifigkeitsverteilung, 743
Wankwinkel, 743, 834, 863
Wärmeabfuhr, 71
Wärmebehandlung, 276, 596
Wärmemanagement, 1291
Wärmepumpe, 82, 83, 93
Wärmerückgewinnung, 83
Wärmeübergang, 287, 289, 327
Wärmeverlust, 521
Warmfestigkeit, 1178
Warmlaufbetrieb, 343
Warmlaufprogramm, 462
Warnungen, 674
Wartung, 1344
Wartungsintervall, 291
Washcoat, 332
Wasserabscheidung, 703, 704
Wasserdampf, 351
Wasserkühlung, 76
Wassermanagementsystem, 201
Wasserpumpe, 288, 293, 294
Wasserschleppe, 70
Wasserstoff, 195, 235
Wasserstoff-Dosiereinheit, 202
Wasserstoff-Druckspeicherung, 202
Wasserstoffinfrastruktur, 211
Wasserstoffspeicher, 202
Wasserstoff-Verbrennungsmotor, 242
Wasserstoffversprödung, 1201
Wastegate, 373, 409
Webband, 1195
Wechselspannungszündung, 321
Wechselstromschweißzange, 1202
Wechseltorsionsprüfung, 825
Wegekette, 4
Wegfahrsperre
– elektronische, 21
Wegsensor, 773
Weibullverteilung, 1346
Wellenlänge, 1037, 1038
Wellgetriebe, 898
Well-to-Tank (Kraftstoff), 398
Well-to-Wheel, 195, 206
Werkstattausrüstung, 1354
Werkstattkosten, 1349, 1350, 1353
Werkstoff, 272, 281
Werkstoffanteil, 1167
Werkstoffbeschichtungssystem, 1200
Werkstoffprobe, 1331
Werkstoffprüfung, 825
– Betriebsstoff, 1336
Werkstofftechnik, 1164
Werkzeugkosten, 1216
Wertigkeit/Sicherheitsgefühl, 715
Wertschöpfungskette, 1340
Wettbewerb
– internationaler, 21
Whiplash-Test, 722
Widerstandsbeiwert $c_W$, 64
Widerstandspunktschweißen, 1202
Wilsonsatz, 436
Windabweiser, 73
Windgeräusch, 72, 73
Windkanal, 64, 1333, 1335
Windkanalmessung, 64
Windlast, 71
Wintereigenschaften, 811
Winterreifen, 804, 809
Wirbelkammer-Dieselmotor, 358
Wirbelkammerverfahren, 359
Wirkungsgrad, 245, 259, 297, 320, 324, 327, 345, 350, 359–361, 371
– akustischer, 100
– effektiver, 261
– indizierter, 261
– mechanischer, 261
– thermischer, 254, 259
Wirkungsgradkette, 259
Wirkungsgradverlust, 350
Wirtschaftlichkeit, 802, 804
Wissensmanagement, 1339
WLAN, 1061
W-Motor, 261
Wöhlerkurve, 1177
Wohlfühlatmosphäre, 714
Wohlfühlfaktor, 714
Workload, 663
Wummererscheinung, 101

# X

X-by wire-Technik, 1232
xDrive, 492

# Z

Zählfolge, 261, 263
Zahnradantrieb, 294
Zahnradgeräusch, 430
Zahnriemen, 279, 281
Zahnstangenlenkgetriebe, 888
Zahnstangenlenkung, 888, 889
ZAMAK, 1182
Zapfendüse, 368
Zeichencodierung, 669
Zeitraffertest, 1338
Zeitraffer-Verfahren, 1338
Zelldichte, 332
Zentraldifferenzial, 468
Zentrallenker-Hinterachse, 854
Zentralpunkt, 854
Zeolith, 1228
ZERO Emission (Null Emission), 15
Zerstäubungsgüte, 306
Zerstäubungsmodell, 363
Zerstäubungsqualität, 308
ZEV (Zero Emission Vehicle), 1233
Ziehwerkzeug, 1211
Zielkonflikt, 12, 50, 51, 744
Zink, 1180
Zinkdruckguss, 1181, 1182
Zink-Druckgusstechnik, 1164
Zinkelektrolyt, 1182
Zinkoxid, 1183
Zinkpest, 1164
Zufassungsgriff, 681
Zugfestigkeit $R_m$, 1174
Zug-Hochschaltung, 434
Zugkraft, 433, 445
Zugkraftausnutzung, 61
Zugkraftbedarf, 417
Zugkraftdiagramm, 61
Zugkrafthyperbel, 445, 449
Zugkraftunterbrechung, 433
Zuheizer, 703
Zuheizsystem, 82, 83
– elektrisches, 82
Zulassungsverfahren, 15
Zündanlage, 243, 318, 319
– elektronische, 319
Zündaussetzer, 321, 328, 341
Zündenergie, 319–321
Zündfolge, 261–263
Zündfrequenz, 520, 521
Zündfunke, 320
Zündgrenze, 297, 348
Zündgrenzen der Wasserstoff/Luft-Gemische, 245
Zündkennfeld, 319
Zündkerze, 277, 306, 318–322
Zündkerzenwechselintervall, 320
Zündort, 322
Zündspule, 319–322
Zündung, 318
– kontaktfrei, 17
Zündverzug, 351, 352, 361, 366
Zündwilligkeit, 388
Zündzeitpunkt, 307, 318–321, 328
Zusatzlenkwinkel, 898
Zuspannkraft, 766
Zustandsgleichung, 348
Zuverlässigkeit, 1345
Zuverlässigkeitskenngröße, 1346
Zuverlässigkeitsprüfung
– Zeitraffertest, 1338
ZWARP, 822, 825
Zweiaxiale Räderprüfung (ZWARP), 822, 824
Zweimassenschwungrad, 422, 424

Zwei-Platinen-Innenhochdruck-umformen, 1210
Zweischeibenkupplung, 422
zweistufig geregelte Aufladung, 410
Zweitaktentwicklung, 518
Zweitaktmotor, 517
Zweitaktverfahren, 257, 518
Zweiventilmotoren, 297
Zwischenmodulfasern, 1192
Zylinderabschaltung, 17
Zylinderbuchse, 272
Zylinderdruckverlauf, 328
Zylinderinnenströmung, 317, 1290
Zylinderkopf, 254, 257, 261, 263, 273, 276, 278, 280, 286–288, 290, 292, 297, 307, 308, 317, 318, 328, 351, 363, 365, 371
Zylinderkurbelgehäuse, 272, 273
Zylinderladung, 257, 317, 318
– geschichtete, 297, 306, 342
– homogene, 297, 342
Zylinderlauffläche, 272, 288

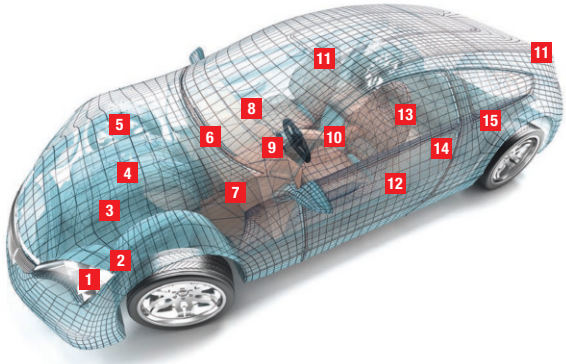
WÜRTH ELEKTRONIK

# Ein Auto ohne Elektronik?

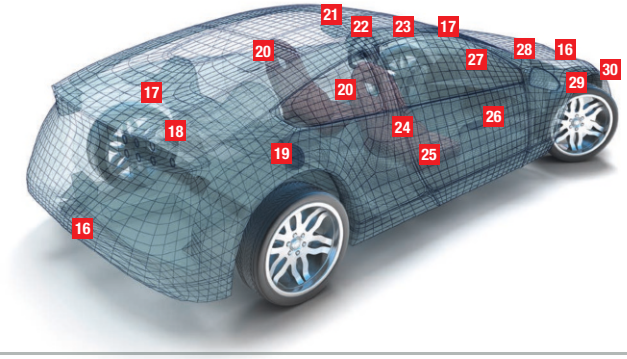
# Undenkbar!

Würth Elektronik ist führender Hersteller von Elektronik-Komponenten. Ob Leiterplatten in verschiedenen komplexen Technologien oder Komponenten zur Entstörung, sowie für Leistungs- und Hochstromanwendungen – unsere fachkundigen Spezialisten unterstützen Sie als Entwicklungspartner von der ersten Idee bis zur Realisierung Ihres Systems – **we drive solutions.**

1. Steuerung für LED/Xenon
2. Scheinwerferniveauregelung
3. Kühlerlüftermotor / Kühlwasserpumpe
4. Getriebesteuerung
5. Elektrische Servolenkung (EPS)
6. Intervallschalter Scheibenwischer
7. Pedalverstellung
8. Klimaregelung
9. Elektrische Lenkradverstellung & Lenkradverriegelung
10. Gangwahlschalter
11. Kamera im Front- und Heckbereich
12. Kraftstoffpumpe
13. Elektrischer Gurtbringer
14. Keyless Entry System
15. Elektronische Parkbremse




we drive solutions

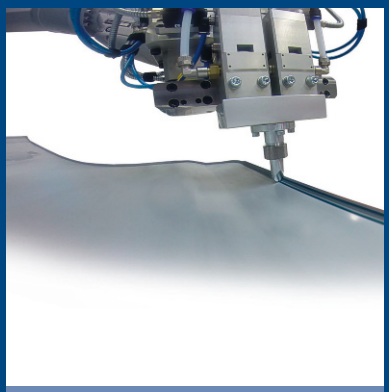



16. Heck- und Front-Radar Sensoren
17. Heck- und Frontwischer
18. Elektrischer Heckdeckel
19. EMV-Filteranwendungen
20. Elektrische Sonnenblenden der Heckscheibe und der Seitentüren
21. Antennensperrkreis
22. Elektrisches Schiebedach
23. Lenkwinkelsensor
24. Sitzheizung
25. Elektrischer Sitzversteller
26. Elektrische Fensterheber
27. Airbag
28. Electrical Braking System (EBS)
29. Adaptives Fahrwerk (ABC / DCC)
30. Anti Blocking System (ABS)

www.we-online.de

Für Kunden auf der ganzen Welt fertigen wir Pump- und Dosieranlagen sowie Steuerungstechnik für niedrig- und hochviskose Medien wie Klebstoffe, Leim oder Pasten, die in vielen Industriebereichen, vorwiegend in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen.

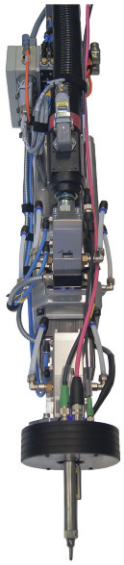
Unsere von Innovationen geprägte Firmenkultur ermöglicht die ständige Weiterentwicklung automatisierter Klebetechnik, die seit nunmehr 40 Jahren immer wieder die Wettbewerbsfähigkeit unserer Kunden verbessert.



***Das neue Doppeldüsensystem.***

## Optimierte Nahtabdichtung beim Falzkleben.

Besonders anspruchsvoll ist das Falzkleben, wenn zwei Bleche durch Umformen gefügt werden und ein Formschluss erzeugt wird. Bei der Verklebung von Automobiltüren hat intec eine Auftragstechnologie bis zur Serienreife entwickelt, die eine Optimierung des Klebstoff-Füllgrads bietet. Das System sorgt dafür, daß Falznähte trotz komplizierter Bauteilgeometrien und hoher Dosiergeschwindigkeiten an jeder Stelle die optimale Klebstoffmenge erfahren.



## Das Klebstoffauftragssystem und die Überwachungskamera laufen bedienerfreundlich in Echtzeit über nur noch eine PC-Einheit.

Einfacher, schneller und enorm effektiv: intec hat durch die Integration der Hightech Kameras des renommierten Herstellers Visiontools ein Bildauswertungstool geschaffen, das in der Produktion Prozesse deutlich optimiert.

Auftragssystem und Messsystem laufen über die gleiche PC-Einheit, so dass es für den Bediener viel einfacher wird, eine Qualitätskontrolle durchzuführen. Dabei werden die Klebenähte sofort nach Auftrag des Klebstoffs in Echtzeit gemessen und im Falle einer Störung erscheint die Fehlerart in der übersichtlichen und leicht zu steuernden Bedienmaske. Dieser effektive Kleberaupentest besticht durch einfaches Handling. Die meisten Funktionen sind mit nur einem Klick erreichbar.

Wir beraten Sie gerne!

**intec Bielenberg GmbH & Co. KG**
Otto-Hahn-Allee 9 · 50374 Erftstadt
Telefon: +49 (0) 2235/46558-0
E-Mail: intec@bielenberg.de







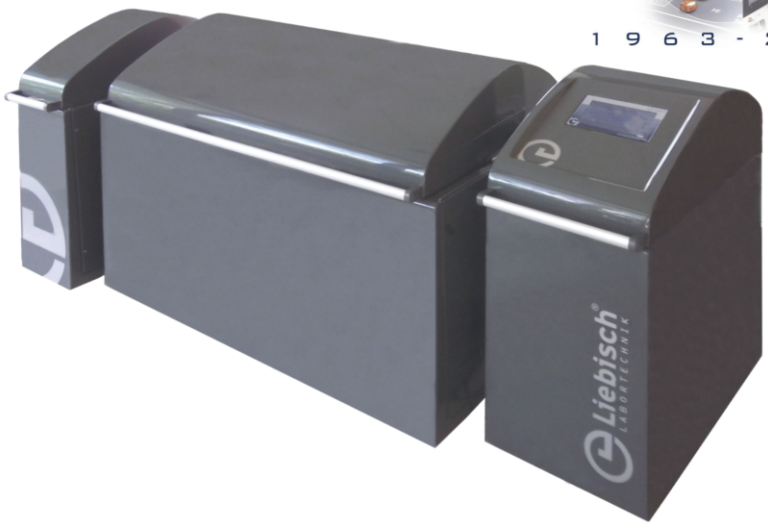




# Korrosion

## im Zeitraffer




modulare Freiheit!











## KORROSIONSPRÜFGERÄTE

nasschemische Qualitätsprüfung

Je nach Prüfanordnung können die Betriebssysteme Salznebel [S], Kondenswasser [K], Raum- [B], Warmluft [W] und Schadgas [G] sowie geregelte relative Luftfeuchte [F] einzeln oder kombiniert (Wechseltestprüfungen) in über 70 Varianten kombiniert werden. Optional sind Prüfklimate bis **-20°C** (niedrigere Temperaturen auf Anfrage) und Beregnungsphasen (z.B. Volvo STD 423 und Ford CETP: 00.00-L-467) problemlos möglich. Die Geräte sind intuitiv bedienbar, wahlweise als praktische manuelle bzw. komfortable automatische Lösung.

Liebisch® LABORTECHNIK

im Zeichen der Zukunft

Gebr. Liebisch GmbH & Co.KG
Eisenstraße 34
33649 Bielefeld | Germany
Fon +49/521/94647-0
Fax +49/521/94647-90

www.liebisch.de
sales@liebisch.com

# Kunststoff.
# **Machen wir.**



Abdichten, Funktionsintegration, technische Sauberkeit und Gewichtsreduzierung: Ganz gleich, welche Anforderungen Sie an Ihr Bauteil stellen. Wir entwickeln gemeinsam mit Ihnen die Lösung. – Neugierig geworden? Rufen Sie uns einfach an: **+49 4442 982-6010**.

Machen Sie die Onlinebetriebsbesichtigung:
**www.poeppelmann.com/k-tech**



PÖPPELMANN

K-TECH®