

Gustav K. von Schulthess

Röntgen, Computer- tomografie & Co.

Wie
funktioniert medizinische
Bildgebung?

 Springer

Röntgen, Computertomografie & Co.

Gustav K. von Schulthess

Röntgen, Computertomografie & Co.

Wie funktioniert
medizinische Bildgebung?

1. Auflage



Gustav K. von Schulthess
UniversitätsSpital Zürich
Zürich, Schweiz
gustav.vonschulthess@usz.ch

ISBN 978-3-662-53930-9

ISBN 978-3-662-53931-6 (eBook)

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

Springer

© Springer Berlin Heidelberg 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Die eingetragene Gesellschaft ist „Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg“

Widmung

All denen – Gesunde und Kranke –, die sich wundern, wie man in den menschlichen Körper hineinschauen kann.

Neujahrsblatt der Gelehrten Gesellschaft in Zürich auf das Jahr 2017,
180. Stück (Als Fortsetzung der „Neujahrsblätter der Chorherrenstube“ Nr. 238)
Bisherige Neujahrsblätter der Gelehrten Gesellschaft in Zürich seit 1838:
www.gelehrte-gesellschaft.ch

Vorwort

Ein Mitglied der Gelehrten Gesellschaft in Zürich ist im Laufe seiner Mitgliedschaft verpflichtet, mindestens einen gelehrteten Text zu schreiben, der dann jeweils ab dem 2. Januar des vorgesehenen Jahres in den Verkauf gelangt. Die Käufer leisten damit einen Beitrag an das sog. „Stubenhitzen“, ein alter Brauch, der eben früher zum Zwecke hatte, den verschiedenen Zürcher Gesellschaften genügend Mittel zu beschaffen, dass sie ihre Stube heizen konnten.

Der Präsident hat mir erlaubt, ein „ungelehrtes“ Buch zu schreiben. Die Idee, ein solches Buch zu schreiben, kam dem Autor wegen eines Aufrufs eines bedeutenden Naturwissenschaftlers, dem ehemaligen Direktor des Biozentrums in Basel, Prof. Gottfried Schatz. Er schrieb in einem Leitartikel einer Tageszeitung, dass man sich als Naturwissenschaftler nicht wundern müsse, wenn sich viele Laien irgendwelche „esotherisch“-unfundierte Erklärungen zu Eigen machen. Wir Naturwissenschaftler bemühten uns viel zu wenig, die spannenden Erkenntnisse so darzustellen, dass auch ein Laie sich ein Bild über naturwissenschaftliche Zusammenhänge machen könne.

Tatsächlich war das Schreiben, eines „ungelehrten“ Buches wie eben z. B. über die Medizinische Bildgebung eine völlig unterschätzte Herausforderung. Ein Wissenschaftler hat sich an viele Begriffe gewöhnt und muss daher konstant auf der Hut sein, nicht in den Fachjargon zu verfallen. Er weiss nicht, wie weit er sich vom Laien entfernt hat, und muss Schritt um Schritt diese Distanz wieder zurückgehen. Jedenfalls war trotz des grossen Zeitaufwandes zum Verfassen dieses Buches dieser Prozess für mich interessant und ich hoffe, dass einige der Analogien so treffend sind, dass sie es dem Leser leichter machen, in die zum Teil eher komplexe Materie einzusteigen.

Danksagung

Viele Freunde haben mich bei diesem Projekt unterstützt. Allen sei von Herzen gedankt. Einige haben sich die Mühe genommen, den Text ganz oder teilweise durchzulesen und zu kommentieren. Sie sind entscheidend dafür verantwortlich, dass unverständliche Passagen in diesem Text eliminiert werden konnten. Zu allererst danke ich meiner Frau Yela und meiner Tochter Alexandra von Schulthess, die als „Schneepflug“ wirkten. Alexandra hat auch in der Konzeptionsphase wichtige Teile von Illustrationen und Skizzen angefertigt. Folgende Personen haben den Text ganz oder teilweise durchgelesen und engagiert kommentiert: Corry Eberle, Carole Koch, Brigitte Weiss-Jentsch, Brigit Läubli, Prof. Paul Michel, Prof. Martin Pruschy, Conrad Schwyzer und Benjamin von Schulthess. Die Idee zu Abbildung 3.2 und zu einer vollständigen Revision von Abbildung 3.1 hat mir Prof. Michel gegeben. Ohne all den wertvollen Input der Genannten wäre der Text schlicht unlesbar geworden. Ich bin ihnen zum grössten Dank verpflichtet!

Der Autor



Gustav von Schulthess, MD, PhD, MD (Hon) von Zürich
Nuklearmediziner und Radiologe

Leitende Funktionen

Seit 2014	Leiter internationales Fortbildungsprogramm Nuklearmedizin USZ und Berater USZ-PET-Radiopharmazie. Co-Direktor des Internationalen Diagnostik Kurses Davos mit Hauptkurs in Davos, Tochterkursen in Athen, Peking, Hong Kong und Rio de Janeiro.
2005–2007	Ärztlicher Direktor USZ
1987–2014	Interimsleiter (1987–1991) und Direktor (1991–2014) Klinik für Nuklearmedizin
1985–1987	Oberarzt und Leitender Arzt Radiologie und Nuklearmedizin USZ
1984–1985	Forschingsfellow UC San Francisco, USA
1983–1984	Oberarzt Kantonsspital St. Gallen

Facharztausbildung

1980–1983	Assistenzarzt in Innerer und Nuklearmedizin Unispital Zürich (USZ)
1980	PhD in Physics Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge und MD Harvard Medical School, Boston, USA
1974	Physikdiplom ETH-Zürich

Während seiner Zeit am USZ führte er verschiedenste neue Technologien ein, so MR, interventionelles MR, PET mit Zyklotron, PET/CT und PET/MR, wobei mehrere der Technologien als Erster in Europa oder gar weltweit. Ehrenmitglied der Fachgesellschaften ESMRMB (1995), RSNA (2008), Ehrendoktor Uni Kopenhagen (2007). Über 300 Fachpublikationen, 5 Fachbücher, mehr als 20 Kapitel in Fachbüchern.

Inhaltsverzeichnis

Widmung	V
Vorwort	VII
Danksagung	IX
Der Autor	XI
1 Einleitung	1
1.1 Einleitende Bemerkungen	1
1.2 Gebrauchsanleitung zum Lesen dieses Buches	2
2 Röntgenbilder	5
2.1 Unsichtbare „X“-Strahlen sichtbar machen	5
2.2 Röntgenbilder machen	6
2.3 Röntgen im 21. Jahrhundert	7
2.4 „Gewöhnliches“ Röntgenbild	8
2.5 Röntgenkontrastmittel	9
2.6 „Röntgenkino“	10
2.7 Zusammenfassung	11
3 Röntgen-Computertomographie (CT)	13
3.1 CT-Schichtbilder aufnehmen	14
3.2 Heutige medizinische Anwendungen der CT	17
3.3 Röntgenröhren, Detektoren und Röntgentische	18
3.3.1 Röntgenröhren	18
3.3.2 Detektoren	18
3.3.3 Stromzufuhr zum rotierenden Ring und Datenauslese ..	18
3.4 Schichtbilder des Patienten berechnen	20
3.5 Zusammenfassung	23

4 Nuklearmedizin (NUK), Positronenemissionstomographie (PET) und Hybridverfahren	25
4.1 Radioaktive Tracer: die Strahlenquellen bei NUK und PET	26
4.2 Anwendungen der NUK- und PET-Bildgebung	28
4.2.1 Herz- und Lungenerkrankungen	28
4.2.2 Hirnerkrankungen	29
4.2.3 Tumoren im Körper	30
4.2.4 Weitere Anwendungen der NUK-Verfahren	30
4.3 Radioaktive Atome	31
4.4 Medizinische Bilder mit radioaktiven Tracern	32
4.4.1 Konventionelle NUK-Kameras	32
4.4.2 Positronenemissionstomographie	34
4.4.3 Schwächungsproblem der Gammastrahlen	36
4.5 Die Hybridverfahren SPECT/CT, PET/CT und PET/MR	36
4.6 Zusammenfassung	37
5 Magnetresonanzbildgebung (MR)	39
5.1 Von Atomkernen, Kreiseln und Magnetfeldern	40
5.2 Die MR-„Röhre“ und die Technik um sie herum	41
5.2.1 Supraleitung	43
5.2.2 Radiosender, -Empfänger und Zusatzmagnetspulen	43
5.3 Bilder von tanzenden und singenden Magnetkreiseln	43
5.3.1 Schichtwahl	44
5.3.2 Ortung in der Schicht	45
5.4 Medizinische Anwendungen des MR-Verfahrens	47
5.4.1 Hirn, Gesicht und Hals	47
5.4.2 Lungen, Herz und Gefäße	48
5.4.3 Oberbauch und Becken	48
5.4.4 Muskeln, Gelenke, Knochen und Weichteile (Musculoskeletal-System)	48
5.5 Weiterführende Informationen zur MR-Technik	49
5.5.1 Analyse des „Ton“-Gemisches	49
5.5.2 Weitere Verfahren zum Orten der Signale in der dritten Dimension	50
5.5.3 Pulssequenzen	51
5.5.4 Radiowellen im menschlichen Körper	52
5.6 Zusammenfassung	53
6 Ultraschall (US)	55
6.1 Wie verhalten sich Schallwellen	55
6.1.1 Grundbegriffe	55
6.1.2 Streuung und „Spiegelung“ von Schallwellen	56
6.2 Ultraschall (US)-Bildaufbau	59
6.2.1 Echomessungen senkrecht zum Schallkopf	59
6.2.2 Echomessungen von bewegten echogebenden Strukturen	59

6.2.3	Ortung der Echo-gebenden Strukturen parallel zum Schallkopf	60
6.2.4	Schallgeber- und Empfänger	60
6.3	Medizinische Anwendungen von Ultraschall (US)	61
6.4	Zusammenfassung	62
7	Kontrastmittel und radioaktive Tracer für die medizinische Bildgebung	65
7.1	Kontrastmittel- und Tracer-Dosen	66
7.2	Röntgen-Kontrastmittel	67
7.3	MR-Kontrastmittel	69
7.4	Kontrastmittel für Ultraschalluntersuchungen	70
7.5	Die Welt der radioaktiven Tracer	70
7.6	Zusammenfassung	72
8	Strahlenschutz	75
8.1	Ionisierende Strahlen: Röntgen- und Gammastrahlen	76
8.2	Radiowellen im MR	80
8.3	Ultraschall-Wellen	81
8.4	Zusammenfassung	81
9	Was und wie wir sehen können	83
9.1	Wellen	83
9.1.1	Elektromagnetische Wellen	84
9.1.2	Schallwellen	85
9.1.3	Wellenlängen und Frequenzen	86
9.2	Wie können wir Objekte abbilden und sehen?	87
9.3	Bilder aus dem Körperinneren	88
9.3.1	Warum keine Bilder des Körperinneren mit Lichtwellen?	88
9.3.2	Wir brauchen Abbildungssysteme, um zu sehen	89
9.3.3	Röntgenbilder	90
9.3.4	Insektenaugen-Prinzip	90
9.3.5	Bilddetektoren	92
9.4	Zusammenfassung	93
10	Atome und ihre Eigenschaften	95
10.1	Modellvorstellungen zum Aufbau der Atome	95
10.1.1	Atomkerne und Elektronen	96
10.1.2	Atome, Grundbausteine der Welt	97
10.1.3	Die Elektronenhülle	97
10.2	Quantenphänomene	98
10.2.1	Elektronenschalen um den Atomkern herum	98
10.2.2	Elektronen aus einem Atom reissen und Strahlen erzeugen	100
10.2.3	Das Pauli-Ausschlussprinzip: Basis der Vielfalt der Erscheinungsformen um uns herum	101

10.2.4 Chemische Bindungen: Diamanten, Palmen und Chamäleons entstehen	101
10.3 Zusammenfassung	104
11 Der Atomkern	105
11.1 Struktur des Atomkerns	105
11.2 Stabile und radioaktive Isotopen	106
11.3 Radioaktive Zerfallsarten	107
11.4 Positronen: Teilchen der Antimaterie	108
11.5 Wie entstehen radioaktive Isotope	109
11.6 Zusammenfassung	110
12 Digitale Bildgebung	111
12.1 Festkörper	112
12.1.1 Metalle	112
12.1.2 Isolatoren und Halbleiter	112
12.2 Digitalkameras	113
12.3 Computer	115
12.4 Zusammenfassung	117
13 Bei welcher Krankheit welche Bilder	119
13.1 Die „Zehn Gebote“ der medizinischen Bildgebung	119
13.2 Klinische Anwendungen der medizinisch-bildgebenden Verfahren	122
13.2.1 Hirn	122
13.2.2 Herz und Gefäße	124
13.2.3 Lunge	126
13.2.4 Tumoren	127
13.2.5 Andere Erkrankungen	128
13.3 Zusammenfassung	132
Index	135

1.1 Einleitende Bemerkungen

Bilder aus dem Körperinnern sind aus der modernen Medizin nicht mehr wegzudenken. Vor der Entdeckung der Röntgenstrahlen am 8. November 1895 war es überhaupt nicht möglich, mit Strahlen das Körperinnere auszuleuchten, und bis zu den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts waren Bilder aus dem Körperinnern nur zweidimensional. Röntgenuntersuchungen waren oft auch schmerhaft und die Resultate unpräzise. Der Siegeszug der modernen medizinischen Bildgebung begann um 1970 mit der Einführung der Schnittbilduntersuchungen wie der Computertomographie mit Röntgenstrahlen in der Radiologie, dann mit nuklearmedizinischen Bildverfahren, mit Radiowellen in der Magnetresonanztomographie (MR) und mit Ultraschalltechniken. Heute sind solche Untersuchungen präzise, hochauflösend, führen oft direkt zur korrekten Diagnose, sind weitgehend schmerzfrei für den Patienten und können zum Teil in wenigen Minuten durchgeführt werden. Man muss etwas ruhig liegen können und darum etwas Geduld haben. Die Röhre, d. h. die MR-Systeme sind wegen der Enge der Röhre und wegen des Hämmerns der Systeme bei der Bildaufnahme nicht jedermanns Sache, aber ebenfalls schmerzfrei und bei Röntgen- und nuklearmedizinischer Bildgebung stehen oft diffuse und unberechtigte Ängste vor Strahlen im Raum.

Die moderne medizinische Bildgebung, d. h. die Erzeugung von Bildern der inneren Strukturen des Menschen, ist ein Kind der grossen physikalischen Erkenntnis, die am Anfang des 20. Jahrhunderts durch eine Reihe bedeutender Physiker gemacht wurden. Namen wie Wilhelm Conrad Röntgen, Marie Curie und Albert Einstein sind Ihnen vielleicht geläufig: wir werden Sie in diesem Buch wiederfinden. Moderne medizinische Bildgebung wäre ohne die immer leistungsfähigere Computertechnologie ebenfalls nicht denkbar, wobei diese wieder auf den gleichen physikalischen Kenntnissen, insbesondere Erkenntnissen zur Physik der festen Körper und der daraus resultierenden Halbleitertechnologie beruht. Moderne medizinische Bildgebung bedient also die Schnittstelle moderner Physik, Technik und Medizin. Dank der Tatsache, dass wir heute auch biologische Moleküle (Proteine, Nuklein-

säuren, Zucker, Fette) im Körper verfolgen und darstellen können, rücken moderne biomedizinisch-molekulare Erkenntnisse ebenfalls zunehmend in diese Schnittstelle.

Dieses Buch möchte Ihnen die faszinierenden Bildgebungstechniken näher bringen, was etwas einer Gratwanderung gleicht. Das Buch ist ein Sachbuch, das versucht die Dinge „so einfach wie möglich darzustellen, aber eben nicht einfacher“, wie das Albert Einstein einmal so schön formuliert hat. Das Buch offeriert also etwas „Hirngymnastik“. Dies ist nicht zu vermeiden, aber wie neue Erkenntnisse zeigen, ist es mit dem Hirn wie mit den Muskeln. Wenn man das Hirn jeden Tag mit neuen Gedankengängen stimuliert, funktioniert es besser und länger.

1.2 Gebrauchsanleitung zum Lesen dieses Buches

Das Buch ist in drei Teile gegliedert. Grundsätzlich können Sie mit dem Lesen in jedem Kapitel anfangen. Innerhalb des Kapitels werden Sie an andere Kapitel verwiesen, wenn Sie sich eingehender informieren möchten. Wenn Sie also übermorgen eine Röntgen- Computertomographie (CT)-Untersuchung haben, können Sie mit dem Lesen dieses Kapitels beginnen. Wenn Sie etwas über die Gefahren von Strahlen lernen wollen, dann können Sie das entsprechende Kapitel anschauen. Der erste Teil beschreibt- wie man sie eben im Fachjargon nennt – die verschiedenen medizinisch bildgebenden Verfahren, die es ermöglichen, Bilder des Körperinnern eines lebenden Organismus zu erhalten. Es sind dies:

- Röntgenbilder und Röntgen-„Kino“
- Röntgen-Computertomographie
- Nuklearmedizin (NUK), Single Photon- und Positronenemissionstomographie (SPECT und PET)
- Magnetresonanz-Tomographie (MR, MRT, MRI)
- Ultraschallverfahren (Sonographie, Ultrasonographie)

Das für Sie vielleicht fremde Wort „Tomographie“ kommt vom Griechischen und heisst Schnittbilder anfertigen, denn die moderne medizinische Bildgebung erzeugt Schnitte durch den Körper, also dreidimensionale Datensätze. Wenn Sie nämlich die Schnitte aufeinanderstapeln, erhalten sie die untersuchten Teile oder gar den ganzen Patienten dreidimensional abgebildet. Jedem der Verfahren ist ein Kapitel gewidmet. Der Anfang der Kapitel beschreibt die Technik, in der Mitte wird zusammengefasst, bei welchen Krankheiten das entsprechende Verfahren gut eingesetzt werden kann und am Schluss der Kapitel werden – falls sinnvoll – weiterführende Informationen geliefert. In der Zusammenfassung jedes dieser Kapitel wird auch kurz über die Kosten der Untersuchungen gesprochen. Diese variieren von Land zu Land¹. Die Kapitel über die verschiedenen bildgebenden Verfahren sind nicht alle gleich verständlich. Dies hat weniger mit dem Autor als mit dem Verfahren zu tun. Wahrschein-

¹ Wir geben hier ungefähre Kosten für die Schweiz.

lich die komplexeste Technologie ist das MR-Verfahren. Der Autor hat sich entschlossen, Ihnen etwas tieferen Einblick zu geben und nicht einen Text zu schreiben unter dem Motto: „Heidi muss morgen in die Röhre, was nun?“

Wenn Sie die medizinisch bildgebenden Verfahren etwas eingehender verstehen wollen, müssen Sie mindestens eine Vorstellung haben, was zum Beispiel eine Lichtwelle oder Ultraschallwelle ist, und sie müssen mindestens wissen, dass ein Atom aus einem positiv geladenen Kern und um diesen Kern herum negativ geladenen Teilchen (Elektronen) besteht. Sie sollten auch eine minimale Vorstellung haben, wie Ihre moderne Digitalkamera z. B. in Ihrem Mobiltelefon funktioniert. Vielleicht sagen Sie sich: Genau das sind Themen, mit denen ich mich immer schon einmal auseinandersetzen wollte: Wie sind denn die Atome und Atomkerne aufgebaut, wie kann man überhaupt mit Wellen Bilder machen, warum ist es möglich, dass ein Computerchip in meiner Fotokamera am Schluss ein Bild produziert? Um Ihnen den Zugang zu diesen Themen zu erleichtern, sind in 4 Kapiteln die Grundzüge der entsprechenden physikalischen Erkenntnisse zusammengefasst. Ein Kapitel befasst sich mit Wellen, eines mit der Atomhülle, eines mit dem Atomkern und eines mit digitalen Techniken der Bildaufnahme.

Schliesslich könnte es auch sein, dass Sie eine bestimmte Krankheit haben. Dann fragen Sie sich vielleicht, welches medizinisch bildgebende Verfahren wird zur Abklärung dieser Krankheit eingesetzt, in welcher Reihenfolge werden die Verfahren eingesetzt, welche Alternativen zu dem Verfahren, das Ihnen vorgeschlagen wurde. Entsprechend wird am Schluss ein Überblick über die Anwendung der medizinisch-bildgebenden Verfahren aus Sicht der häufigsten Krankheiten gegeben.

Und wenn Sie nun zum Lesen schreiten, dann bedenken Sie einen Satz, welchen der Autor einmal von einem Mathematikprofessor in einer Vorlesung vorgesetzt bekam. Er formulierte es so: „Vielleicht verstehen Sie jetzt noch nicht genau, was ich Ihnen erkläre, aber sie werden sich im Weiteren schon daran gewöhnen“. Dieser Satz ist deshalb interessant, weil er das „Verstehen“ dem „Gewöhnen“ gleichsetzt. Tatsächlich stellt sich immer wieder die Frage – und sie hat auch den Autor beim Schreiben dieses Buches immer wieder eingeholt –, ob man denn die Dinge wirklich versteht. Ich denke, Verstehen hat viel damit zu tun, dass man die Zusammenhänge eines Wissensgebietes kennenlernt. Auch beim Erlernen einer Sprache lernen Sie in Zusammenhängen, wie man Wörter braucht. Sie gewöhnen sich schon früh als Kind daran, dass eben etwas das einen Stamm hat und oben grün ausfranst, Baum heisst. Sie schauen ein Wort einmal im einen und im anderen Kontext an, und wenn Sie sich an ein paar Begriffe gewöhnt haben, dann beginnen Sie die Sprache plötzlich zu verstehen. So wird es Ihnen auch mit der medizinischen Bildgebung gehen und den paar naturwissenschaftlichen Konzepten, die hinter dem Herstellen von Röntgenbildern oder Schnittbildern mit CT, MR, Nuklearmedizinischen Verfahren oder Ultraschall stehen. Also, tauchen Sie ein, wo immer Sie Lust haben.

Die geheimnisvollen, durchdringenden X-Strahlen

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen verdanken wir Wilhelm Conrad Röntgen, der am 8. November 1895 in seinem Labor feststellte, dass in Experimenten offenbar Strahlen entstanden, welche lichtdicht verpackte Fotofilme schwärzen konnten, also die Verpackung durchdringen konnten. Die Entdeckung war eine bedeutende physikalische Entdeckung, die wichtige Informationen zum Aufbau der Atome lieferte (Kap. 9–11). Aber ebenso wichtig, wenn nicht noch bedeutender, erlaubten die Röntgenstrahlen erstmals, in den menschlichen Körper hineinzusehen, ohne ihn mittels eines chirurgischen Eingriffs zu öffnen. Entsprechend war die Entdeckung so sensationell und ihre Anwendungsmöglichkeiten am Menschen so rasch offensichtlich, dass es die Röntgenstrahlen auf die erste Seite vieler bedeutender Zeitungen wie der „New York Times“ schafften.

2.1 Unsichtbare „X“-Strahlen sichtbar machen

Die Entdeckung der X-Strahlen (heute im deutschen Sprachraum Röntgenstrahlen genannt) war eine zufällige Entdeckung. Allerdings verlangte sie einen vorbereiteten Geist und Röntgen war offenbar kritisch und neugierig genug, die Anomalien in seinen Experimenten zu analysieren und weiter zu verfolgen und sie nicht als Laborfehler abzutun. Röntgen hatte also eine Strahlung entdeckt, welche – anders als sichtbares Licht – durch Materie hindurchdringen kann. Rasch stellte er fest, dass die Schwärzung (Belichtung) des Fotofilms durch Metallobjekte im Strahlengang – wie etwa Münzen – verringert werden konnte, dass also Metall die Strahlung abschwächte. Die Vermutung lag nahe, dass dichtere (schwerere) Materialien X-Strahlen stärker schwächen als weniger dichte. Anschliessend liess er seine Frau ihre Hand über eine licht-dicht verpackte Fotoplatte halten. Er schickte die X-Strahlen durch ihre Hand auf die Fotoplatte, entwickelte den Film und siehe da: das erste Röntgenbild eines menschlichen Köpfeils war entstanden.

Der Mensch besteht aus dichteren und weniger dichten Organstrukturen. Dicht sind z. B. Knochen, mässig dicht sind Muskeln, die Leber, Hirngewebe, nochwen-

ger dicht ist Fettgewebe und am wenigsten dicht ist das Lungengewebe, das vorwiegend aus Luft besteht. Alle diese Strukturen im Körperinnern konnte man auf Röntgenbildern einfach erkennen: eine medizinische Sensation. Man sah, ob ein Patient „einen Schatten auf der Lunge“ hatte, was auf eine Lungenentzündung hindeuten konnte, oder ob der Patient einen Knochen gebrochen hatte. Und all diese Information wurde erhalten, ohne den Patienten anzufassen. Nicht überraschend standen schon zwei Jahre nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen in wichtigen Krankenhäusern Röntgengeräte. Röntgen erhielt für seine Leistungen den ersten Nobelpreis für Physik, der 1901 an ihn verliehen wurde.

Die frühen Anwender von Röntgenstrahlen wussten noch nicht, dass zu hohe Dosen von Röntgenstrahlen Gefahren bergen und so erkrankten sie teilweise schwer. Marie Curie starb an den Folgen einer Strahlenkrankheit. Dank diesen Erfahrungen hat man gelernt, vorsichtig mit Röntgenstrahlen umzugehen. Die noch in den 1950er Jahren verwendeten Durchleuchtungsgeräte für die Füsse sind längst aus den Schuhgeschäften verschwunden. Heute darf das Röntgen mit Fug und Recht als ein ungefährliches Verfahren bezeichnet werden. Was dies im Detail heisst, erfahren Sie in Kap. 8.

2.2 Röntgenbilder machen

Wie kann man denn mit Röntgenstrahlen überhaupt Bilder machen? Es braucht für die Herstellung eines Röntgenbildes erstens eine möglichst punktförmige Röntgenstrahlenquelle und zweitens in einem gewissen Abstand von der Strahlenquelle einen Strahlendetektor, sei dies eine Fotoplatte, ein fluoreszierender Schirm oder eine digitale Detektorplatte, ähnlich wie wir sie in einer digitalen Fotokamera finden (Fotodetektor-Chip Kap. 12). Schalten wir die Röntgenstrahlenquelle ein, fallen die Röntgenstrahlen gleichmäßig auf den Strahlendetektor. Ein mit Röntgenstrahlen belichteter Schwarz-Weiss-Film ist nach dem Entwickeln überall gleich grau. Je dunkler der Film, desto stärker waren die auftreffenden Röntgenstrahlen. Wenn wir nun einen Patienten zwischen Quelle und Film stellen, dann treten die Röntgenstrahlen durch ihn hindurch. Weil die Organe im Patienten für Röntgenstrahlen verschieden durchlässig sind, wird die Fotoplatte nicht gleichmäßig geschwärzt. Liegen z. B. Knochen im Strahlengang, absorbieren sie Röntgenstrahlen stark und der dahinterliegende Film wird nicht stark geschwärzt: Die unsichtbaren Röntgenstrahlen verwandeln so innere Körperstrukturen, wie z. B. die Lungen, in ein sichtbares Bild (Abb. 2.1). Die Quelle der Röntgenstrahlen nennt man Röntgenröhre. Röntgenröhren sind seit Ende des 19. Jahrhunderts über die Zeit zu hoch-komplexen technischen Wunderwerken geworden, aber ihre Funktionsweise ist heute noch immer ähnlich wie damals.

Um zu verstehen, wie Röntgenstrahlen entstehen, müssen wir etwas über Atome und ihre Struktur wissen. Die Natur besteht aus Atomen mit ihrem elektrisch positiv geladenen Kern und den in Schalen angeordneten negativ geladenen Elektronen. Weiterführende Informationen finden Sie in den Kap. 10 und 11. In einer Röntgenröhre heizt man einen Metallfaden – ähnlich einer Glühbirne – so, dass schwach

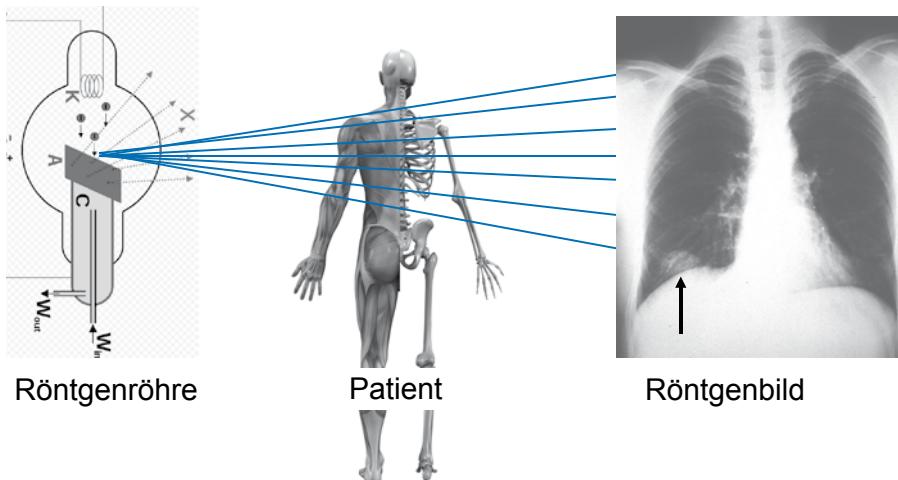


Abb. 2.1 Schematische Anordnung zur Durchführung von Röntgenaufnahmen. Die Röntgenstrahlen gehen von einem Punkt in der Röntgenröhre aus (s. Text). Sie treten durch den Patienten, in welchem sie teilweise geschwächt werden. Dahinter treffen sie auf eine Fotoplatte oder einen digitalen Detektor. Wo viele Strahlen hinfallen, wird das Bild stärker geschwärzt, also z. B. wenn die Strahlen vorwiegend Lungengewebe durchstrahlt haben. Dort, wo der Film wenig geschwärzt ist, gelangten wenige Röntgenstrahlen hin, z. B. wenn die Röntgenstrahlen vorwiegend durch Knochen durchgetreten sind. Es ist einfach, den Krankheitsherd als hellere Struktur im dunklen Lungenhintergrund zu sehen (Pfeil)

gebundene Elektronen aus dem Faden austreten. Sehen Sie sich dazu die linke Seite von Abb. 2.1 an. Die Elektronen werden mit einer Hochspannung von 30–130 Kilovolt vom glühenden Faden (K) „weggesogen“ und auf eine aus dem chemischen Element Wolfram bestehende Metallocberfläche geschleudert (A), wo sie mit grosser Geschwindigkeit auftreffen. Beim Auftreffen der Elektronen geschieht folgendes. Die Elektronen werden akut abgebremst und beim Abbremsen entsteht Röntgenstrahlung (X). Zusätzlich schlagen sie andere Elektronen aus den Atomen der Metallocberfläche heraus, und zwar Elektronen, die eng an die Atomkerne gebunden sind. Die so entstandenen „Elektronenlöcher“ werden wieder aufgefüllt, und auch dabei entstehen Röntgenstrahlen (Kap. 10 und 11). Weiter entsteht sehr viel Wärme, die sofort abgeführt werden muss, damit die Röntgenröhre nicht verglüht (C, W_{in} , W_{out}). Die Röntgenröhre ist so gebaut, dass die Röntgenstrahlen möglichst an einem Punkt auf der Wolfram-Metallocberfläche entstehen (Abbildung 2.1).

2.3 Röntgen im 21. Jahrhundert

Technisch hat man enorme Fortschritte gemacht, die sich vor allem darin manifestieren, dass heute mit kleinsten Strahlendosen in ganz kurzer Zeit scharfe Röntgenbilder angefertigt werden können. Strahlendosen sind heute kleiner, als die Strahlendosis, die ein Passagier auf einem Flug von Europa nach Amerika durch Strahlung aus dem

Weltall erhält (Kap. 8)¹. Man hat auch gelernt, viele Röntgenbilder in kurzer Sequenz zu „schiessen“ und so das „Röntgenkino“ entwickelt. Man hat röntgendichte Substanzen entwickelt, die sehr gut verträglich sind und in unsere Gefäße eingespritzt oder geschluckt werden können (Kap. 7). Damit kann man im Röntgenbild nicht nur Knochen, Weichteile und Luft im Körper sichtbar machen, sondern auch andere Organe, wie Blutbahnen oder den Darm. Weiter hat man den Röntgenfilm durch digitale Detektoren ersetzt, wie dies in der Fotographie auch geschehen ist (Kap. 9 und 12). Seit den 1970er Jahren wurde die (Röntgen-) Computertomographie entwickelt. Diese wird in Kap. 3 besprochen. All die Verbesserungen zur Herstellung von Röntgenbildern haben die Medizin in verschiedensten Gebieten entscheidend weitergebracht.

2.4 „Gewöhnliches“ Röntgenbild

Wer von uns hat nicht schon einmal eine Röntgenuntersuchung gehabt? Und die Älteren unter Ihnen erinnern sich an die spannende Durchleuchtung der Füsse beim Schuhkauf. Vor hundert Jahren waren die Röntgenanlagen brummende und funkennde Monster, wie das z. B. Thomas Mann in seinem „Zauberberg“ sehr eindrucksvoll beschreibt. Heute sind Anlagen zur Aufnahme gewöhnlicher Röntgenbilder leise surrende Geräte, die vom Zahnarzt bis zum Hausarzt in vielen Praxen zu finden sind. Röntgenbilder kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn wir eine Lungenerkrankung oder Probleme mit Knochen oder Zähnen haben.

Der hervorragende Kontrast zwischen Gewebe und Luft und die sehr gute räumliche Auflösung machen das Röntgenbild auch noch heute zu einer wichtigen und raschen Methode, um Krankheiten der Lunge zu finden und sie zu charakterisieren. Lungenentzündungen und – bei nicht mehr ganz jungen Menschen – Lungentumoren werden häufig zuerst im Röntgenbild entdeckt. Man sieht aber dank der hervorragenden Bildauflösung auch feinste Gewebsveränderungen der Lungen, die mit Rauchen, Allergien und vielen anderen Krankheiten einhergehen können. Auch eine Veränderung der Herzkontur oder eine Zunahme der Weichteilstrukturen in der Mitte der Lunge hinter dem Brustbein sind gut zu sehen. Allerdings sind die Strukturen dort anatomisch kompliziert und bestehen aus Gefäßen, Lymphdrüsen, der Speiseröhre etc. Bei der Abgrenzung dieser Strukturen voneinander versagt das gewöhnliche Röntgenbild, denn eine Abgrenzung verschiedener Weichteile ist seine Sache nicht: der Röntgenkontrast zwischen verschiedenen Arten von Weichteilen ist im Röntgenbild eher gering. Dort wird mit Vorteil die Computertomographie eingesetzt (Kap. 3)

Das zweite grosse Einsatzgebiet des gewöhnlichen Röntgenbildes sind Knochenveränderungen. Auch der Kontrast zwischen Knochen und Weichteilen ist im Röntgenbild sehr hoch und so sind Knochen und ihre Veränderungen im Röntgenbild gut sichtbar. Knochenveränderungen können durch Entzündungen bedingt sein, selten auch durch Tumoren, und sehr wichtig durch Knochenschäden, wie Knochenbrüchen

¹ Die Röntgenstrahlung aus dem Weltall wird von der Atmosphäre praktisch vollständig abgefangen. Beim Fliegen ist sie wesentlich höher, da der wichtigste Teil der Atmosphäre zwischen der Erdoberfläche und den 10 Kilometern Höhe liegt, auf welcher Verkehrsflugzeuge fliegen.

im Rahmen von Unfällen. Im Alter nutzen sich die Knochen vor allem in den Gelenken ab (Arthrose) und das Ausmass der Gelenksschädigung wird auf einem Röntgenbild sichtbar. Ebenso im Alter haben vor allem ein Teil der Frauen einen Knochenschwund (Osteoporose), der mit speziellen Röntgengeräten genau vermessen werden kann (sog. Osteodensitometrie). Hat jemand Schmerzen nach einem Unfall, wird häufig geröntgt. Ein Knochenbruch kann leicht festgestellt werden. Nach einer Behandlung, bei welcher Metallplatten, Schrauben und dergleichen Material in den Verunfallten eingesetzt wurden, ist das Röntgenbild eine hervorragende Methode zur Kontrolle des Behandlungsresultates. Man kontrolliert, ob auch alles wieder anatomisch korrekt aussieht. Das Röntgenbild leistet dies, weil Metallteile auch röntgendicht und damit gut sichtbar sind. Gewöhnliche Röntgengeräte sind so in jeder Notfallstation zu finden. Beim Zahnröntgen lassen sich der Wurzelkanal, Knochenschwund und auch Entzündungen der Knochen an der Zahnwurzel sehr gut beurteilen.

2.5 Röntgenkontrastmittel

Gewöhnliches Röntgen wird für die Untersuchung des Kopfs nur noch selten eingesetzt, denn das Hirn besteht aus verschiedenen Weichteilstrukturen, die beim Röntgen zu wenig Kontrast hergeben, um sie zu differenzieren. Das gleiche gilt für den ganzen Bauch mit seinem langen Darm, der Leber etc. Das Röntgenbild ist zu wenig kontrastreich, und eine Abgrenzung sich überlagernder Bauchorgane, wie der Leber, der Bauchspeicheldrüse und der Nieren gelingt nur schlecht. Um den Kontrast zu verbessern, haben sich Röntgenärzte deshalb schon früh für den Einsatz von Röntgenkontrastmitteln interessiert und diese standen ab ca. 1930 zur Verfügung (Kap. 7).

Röntgenkontrastmittel sind Moleküle, die möglichst röntgendicht sind und rasch wieder ausgeschieden werden, denn sie sollen sich im Körper nicht längerfristig anlagern (Kap. 7). Dank ihrer hohen Röntgendichte können mit Kontrastmitteln gefüllte Strukturen gut von den Weichteilen abgegrenzt werden. Heute enthalten Kontrastmoleküle vor allem die Elemente Jod und Barium, ersteres in Molekülen gebunden für die Kontrastierung von Gefäßen, Gelenken und Darmstrukturen, letzteres nur für Darmstrukturen. Jodkontrastmittel sind Moleküle, die mehrere Jod-Atome enthalten und – wie gesagt – rasch ausgeschieden werden. Bariumkontrastmittel werden als einfache Salze verabreicht. Während früher die Injektion von Jodkontrastmitteln schmerhaft sein konnte, sind die in den letzten 30 Jahren entwickelten jodhaltigen Moleküle gut verträglich. Sie werden rasch und meist gänzlich frei von Nebenwirkungen² wieder durch die Nieren ausgeschieden. Heute stehen dafür verschiedenste gute Produkte zur Verfügung.

² Je mehr ein Röntgenkontrastmittel einem Salz ähnelt, also viele positive oder negative Ladungen trägt (Kapitel 10), desto schmerzhafter ist seine Injektion. Heute sind die meist verwendeten Substanzen sog. „nicht-ionisch“, tragen also nur wenige Ladungen und sind damit viel besser verträglich. Die Injektion von Kontrastmitteln verursacht vor allem ein leichtes passageres Wärmegefühl. Gelegentlich zeigen Patienten eine allergische Reaktion auf jodhaltige Röntgenkontrastmittel. Ist eine solche Allergie bekannt, können die Kontrastmittel nicht verwendet werden und es müssen andere bildgebende Verfahren eingesetzt werden.

Kontrastmittel werden in Gelenke eingespritzt, um Gelenksschäden sichtbar zu machen oder um sicherzustellen, dass ein nachfolgend gespritztes Arzneimittel auch an den richtigen Ort gelangt. Gelegentlich werden auch heute noch Kontrastmittel geschluckt und zur Darstellung der Speiseröhre und des Magens oder als Einlauf zur Darstellung des Dickdarms verabreicht. Am wichtigsten ist jedoch das Einspritzen von Röntgenkontrastmitteln in Gefäße. Das Kontrastmittel mischt sich rasch mit dem Blut in den Gefäßen, schwächt damit die Röntgenstrahlen viel stärker als Blut allein, und so sieht man Gefäße im Röntgen ähnlich wie Knochen als helle Strukturen. Kontrastmittel kann direkt in die Schlagadern (Arterien) oder die Venen eingespritzt werden. Bei Krampfadern können die Beinvenen dargestellt werden, heute verwendet man hierfür allerdings meist CT und MRT (Kap. 3 und 4), denn man kann auch im CT und MRT Kontrastmittel anwenden.

Besteht der Verdacht auf Gefässverengungen der Arterien im Rahmen einer Arteriosklerose, werden die Hirn-, die Herz-, die Darm oder die Beinarterien selektiv angespritzt. Bei der Darstellung von Blutgefäßen mittels Röntgen kommt immer das „Röntgenkino“ zum Einsatz.

2.6 „Röntgenkino“

Genauso wie der Kinofilm einer Abfolge von Fotografien entspricht, ist das „Röntgenkino“ eine zeitliche Abfolge von Röntgenbildern. In der aufgenommenen Bildsequenz kann man sich dann das Bild mit der besten Kontrastierung der interessierenden Gefäße aussuchen, und zudem sieht man beim Abspielen des Kinofilms, wie das Blut durch einzelne Organe fliesst. „Röntgenkino“ wird heute immer noch bei der Untersuchung von verschiedenen Organen eingesetzt, insbesondere um die Herz- und die Hirngefäße darzustellen oder die Gefäße in anderen Strukturen wie den Nieren oder der unteren Extremitäten zu beurteilen. Allerdings sind heute CT- und MRT-Scanner, also dreidimensionale Bildverfahren so schnell, dass bei Gefässdarstellungen oft diese Verfahren zum Einsatz kommen. Die dreidimensionale Information von CT und MR wird der zweidimensionalen Information des Röntgenbildes oft vorgezogen, denn Strukturen können so überlagerungsfrei abgegrenzt werden. In den letzten Jahren wird die CT auch zur Beurteilung der Herzgefäße eingesetzt, was eine viel aufwändigere Untersuchung erübriggt, bei der Kontrastmittel direkt in die Herzarterien eingespritzt werden muss (Koronarangiographie).

Kontrastmittelverstärktes Röntgenkino wird immer eingesetzt, wenn Verengungen oder Veränderungen von Gefäßen behandelt werden sollen. Verengungen von Schlagadern treten im Rahmen der Arterienverkalkung häufig auf. Moderne Katheter (Schläuchlein) mit Ballonen und Maschengittern an der Spitze können in die Gefäße eingeführt werden. Am Ort der Verengung wird der Ballon aufgeblasen, die Verengung „gesprengt“ und nach Bedarf das zylinderförmige Maschengitter zurückgelassen. Dies soll sicherstellen, dass die Verengung nicht wieder auftritt. Die Anwendung von Röntgenstrahlen nicht zur Diagnose, sondern zur Führung von Instrumenten zur Behandlung, also im wahrsten Sinne des Wortes die Benützung der „Röntgenbrille“ soll in diesem Buch nicht weiter diskutiert werden.

Haben Sie bis hierhin gelesen, haben Sie verstanden, wie Röntgenbilder entstehen und wie sie in der modernen Medizin eingesetzt werden. Hoffentlich sind Sie neugierig, wie man 3D oder gar 4D Bilder mit Röntgenstrahlen aufnimmt. Dies wird im folgenden Kapitel 3 beschrieben.

2.7 Zusammenfassung

Röntgenstrahlen sind für uns unsichtbar und durchdringen mehrheitlich den Körper. Damit eignen sie sich, Bilder aus dem Körperinnern zu machen. Dichte Materialien wie Knochen schwächen die Röntgenstrahlen mehr, weniger dichte Materialien wie Fett oder gar Lungengewebe schwächen sie weniger. Die Strahlen gehen quasi von einem Punkt in der Röntgenröhre aus und treten durch den Patienten hindurch. Dahinter fallen sie auf einen Röntgenfilm oder digitalen Detektor, und es entsteht damit ein Projektionsbild des durchstrahlten Körperabschnitts des Patienten, z. B. des Brustkorbes. Der Patient übernimmt so die Rolle eines farbigen Kirchenfensters und der Röntgenfilm oder –Detektor die Rolle unserer Augen, welche das verschieden gefärbte durchtretende Licht wahrnehmen. Der Röntgenfilm oder –Detektor wandelt dabei die unsichtbaren Röntgenstrahlen in für uns sichtbare Strukturen um. Röntgenstrahlen werden mithilfe von Röntgenröhren erzeugt. Dank Hochspannung werden elektrische Ladungen stark beschleunigt auf ein Material geschleudert und dabei entstehen Röntgenstrahlen, die praktisch punktförmig von der Röhre abstrahlen.

In der Medizin werden heute Röntgenbilder vor allem zur Beurteilung von Lungen- und Knochenerkrankungen verwendet. Wenn Röntgenkontrastmittel zur Darstellung der Gefäße zur Anwendung kommt, eignet sich Röntgen in einem Kinomodus (eine ganze zeitliche Sequenz von Röntgenbildern wird dabei abgelichtet) dazu, z. B. Gefäßverengungen ohne chirurgischen Eingriff zu behandeln. Dann wird Röntgen als „Röntgenbrille“ eingesetzt.

Ein Röntgenbild kostet 50–100 CHF, eine Serie entsprechend mehr. Röntgen-„Kino“-Untersuchungen können rasch über 1000 CHF kosten und eine Darstellung der Herzarterien mit Kontrastmittel und Röntgenkino kostet mehrere Tausend CHF.

Röntgen-Computertomographie (CT)

3

Was hat ein Sudoku mit Schnittbildern eines Patienten zu tun?

Im vorherigen Kapitel wurde dargelegt, wie man Röntgenbilder erhält: Röntgenstrahlen kommen von einer Röntgenröhre, laufen durch verschiedene Gewebe im Patienten, seien dies Luft, Fettgewebe, Weichteile oder Knochen, und werden dabei mehr oder weniger geschwächt. Anschliessend werden sie mittels eines Detektors gemessen. Ein Detektor ist eine Vorrichtung, mit der Strahlen gemessen und in sichtbare Signale umgewandelt werden. Beim Röntgen war der Detektor früher einfach ein Fotofilm, der ein Röntgenbild des Patienten aufnahm. In modernen Röntgen- und auch in CT-Systemen ist der Röntgendetektor ein digitaler Computerchip, ähnlich dem, den Sie in Ihrer Digitalkamera finden (Kap. 12). Der Detektor in Ihrer Digitalkamera und ebenso der Röntgendetektor sind in kleinste Quadrate aufgeteilt, sog. Detektorpixel. Modernste Röntgendetektoren für CT-Systeme haben quer zum Patienten bis zu 1000 Pixel in einer Detektorzeile und 300 Pixel in einer –Spalte: Ein Röntgendetektor hat also bis zu 300.000 einzelne Detektorelemente.

Wie wir sehen werden, müssen wir hunderte von Röntgenaufnahmen um den Patienten herum aufnehmen können, um CT-Schichten zu berechnen, und dafür sind CT-Systeme ausgelegt. Auf einem massiven, aufrechtstehenden Metallring von ca. 100–120 cm Durchmesser ist in einem CT auf der einen Seite eine Hochleistungs-Röntgenröhre und auf der gegenüberliegenden Seite der mit vielen kleinen Detektorelementen bestückte Röntgendetektor angebracht (Abb. 3.1). Weiter besteht das CT-System aus einem Röntgentisch. Der Patient liegt auf diesem Tisch und kann mit dem Tisch durch den Ring geschoben werden. Schieben wir nun den Tisch mit dem Patienten einmal so weit vor, dass sein Bauch im Strahlengang der Röntgenröhre liegt und lassen die Röntgenröhre strahlen. Es dringen dann viele Strahlen durch den Patienten und fallen auf die gegenüberliegenden Detektorelemente. Das entstandene Bild entspricht einer Bildzeile eines normalen Röntgenbildes, allerdings digital aufgenommen. Nun drehen wir den Ring etwas und nehmen erneut eine Bildzeile auf und so weiter. Wenn wir so z. B. alle 0.3° oder 0.4° Winkelgrad eine Bildzeile aufnehmen, haben wir nach einer Ringdrehung von 360° rund 1000 digitale Einzelzeilen von Röntgenaufnahmen des Patienten aus verschiedenen Richtungen erhalten.

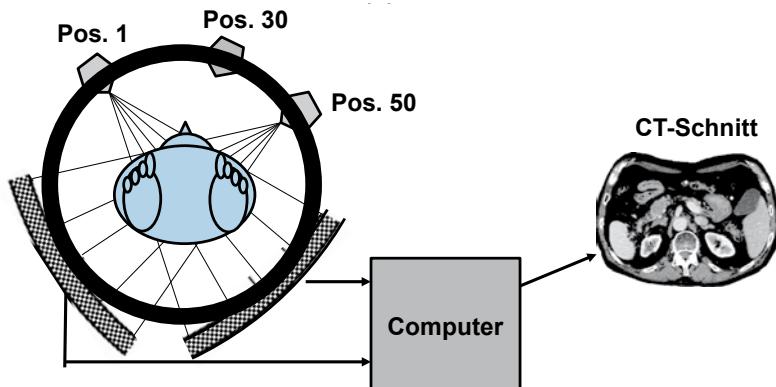


Abb. 3.1 Schematische Zeichnung eines Patienten im CT. Der Patient liegt auf dem CT-Tisch. Der Tisch ist umgeben von einem Ring mit der Röntgenröhre in verschiedenen Positionen (Pos. 1, 30 und 50) und der gegenüberliegenden Detektorbank. Wenn der Tisch durch das Zentrum des Rings vorgeschieben wird, kann der Reihe nach zuerst der Kopf, dann Hals, Lungen, Bauch und Beine gescannt werden. Die Daten gehen an einen Computer und werden dort zu CT-Schnittbildern umgerechnet

3.1 CT-Schichtbilder aufnehmen

Der wichtige Gedankenschritt¹ vom normalen Röntgen zur Röntgen-Computertomographie ist folgender. Hat man viele Röntgenbilder aus verschiedenen Richtungen um den Patienten herum angefertigt, kann man aus diesen vielen Bildern Schnittbilder berechnen, den Patienten tomographieren². Das Wort „Computer“ ist im Wort Computertomographie enthalten, weil das Rechnen der Schnittbilder aus Röntgenbildern ohne Computer nicht denkbar ist, wie wir am Ende dieses Kapitels sehen werden. Da bei einem normalen Röntgenbild des Bauches die Röntgenstrahlen im Körper je nachdem Haut, Knochen, Leber, Bauchspeicheldrüse, Fettgewebe, Rippen und Muskeln durchlaufen, stellt das Bild die verschiedenen Organe und Gewebe überlagert dar. Das CT erlaubt die Gewebe überlagerungsfrei darzustellen. Die im CT erhaltenen Schnitte sind nun aber nicht mehr Ansichten des Patienten, sondern Scheiben, wie sie etwa beim Schneiden einer Salami entstehen. Je nach Einstellung des „Salami“-Schneidgerätes sind die Scheiben dicker oder dünner, z. B. 5 Millimeter. „Schneidet“ oder schichtet man einen Patienten so in Form von CT-Schichten von Kopf bis Fuss durch, hat man einen dreidimensionalen überlagerungsfreien Datensatz des Patienten erhalten³.

¹ Die Erfinder des CT sind Sir Geoffrey Hounsfield und Allan McLeod Cormack, die 1979 den Nobelpreis für Medizin für diese Leistung erhielten. Cormack entwickelte die mathematische Methode, wie man aus Projektionen auf die Strukturen innerhalb einer Schicht schliessen kann.

² Tomographieren kommt aus dem Griechischen und heisst so ungefähr „Schnitte zeichnen“

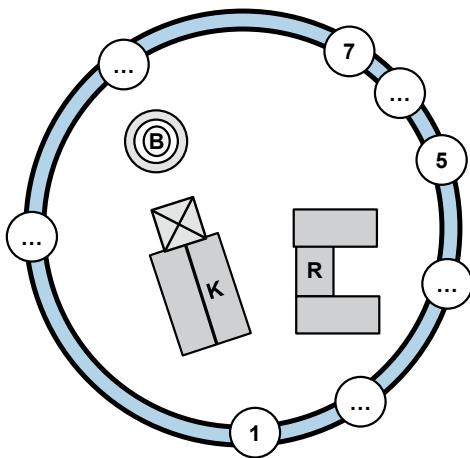
³ So wie man die Salamischeiben wieder zu einer ganzen Salami aufeinanderlegen kann, kann man aus übereinander liegenden CT-Scheiben den ganzen Menschen aus Schnittbildern rekonstruieren.

Das Problem, wie man von vielen quer durch den Körper aufgenommenen Einzelbildern zu einem Schnittbild („Salamischeibe“) kommt, lässt sich mit folgender Analogie veranschaulichen. Stellen Sie sich vor, Sie müssten einen Grundriss eines kleinen Städtchens erstellen, dies aber ohne eine Luftaufnahme z. B. aus einem Helikopter machen zu dürfen. Es bleibt Ihnen nur, das Städtchen auf der Stadtmauer zu umrunden. Sie machen alle 50 Meter halt, schauen über die Dächer und notieren, in welcher Lage zueinander die Gebäude stehen. (Abb. 3.2). Jeder dieser „Lageberichte“ entspricht einer Röntgenaufnahme für eine CT⁴. Sie müssen nun alle diese Daten zu einem Grundriss umwandeln und dieser Grundriss zeigt die Lage der Gebäude, wie wenn man sie aus der Vogelperspektive sehen würde. Die Vogelperspektive entspricht in diesem Fall einem CT-Schnittbild durch den Körper, das nicht direkt aufgenommen werden kann, ebenso wie der Plan des Städtchens ohne Vogelperspektive eben nicht direkt sichtbar gemacht werden kann. Tatsächlich existiert ein mathematisches Verfahren, das die Tüftelei für uns ausführen kann¹, um die entsprechenden örtlichen Zuweisungen der Gebäude innerhalb der Stadtmauer zu machen. Das Verfahren braucht aber viel Rechenleistung und daher eben den Computer. Es wird nicht nur bei CT, sondern in verwandter Form auch bei NUK und PET und teilweise auch beim MR zur Rekonstruktion der Schnittbilder eingesetzt.

Der Schritt vom zweidimensionalen Röntgenbild zu dreidimensionalen Bilddaten des Menschen dank CT ist ein enormer diagnostischer Vorteil. Entsprechend sind alle modernen bildgebenden Verfahren Schnittbildverfahren, nicht nur die (Röntgen)-CT, sondern auch die MR-(Tomographie) (Kap. 5) oder Positronen-Emissions-Tomographie (PET) (Kap. 4), wie in den folgenden Kapiteln besprochen wird. CT-Schichtbilder können berechnet werden, wenn wir die Abschwächung von vielen Röntgenstrahlen senkrecht zur Körperlängsachse durch den Körper messen. Bei einer modernen CT Untersuchung brauchen wir hunderte von Millionen solcher Messungen, die dann in einem Computer zu Schichtbildern umgerechnet werden. Offenbar müssen wir über ein sehr effizientes System verfügen, um diese vielen Messungen rasch durchzuführen, sonst springt uns der Patient vom Untersuchungstisch. Tatsächlich sind die leistungsfähigsten heutigen CT-Systeme beinahe unfassbar schnell. Es können mehr als hundert Schnittbilder eines Menschen in weniger als einer Sekunde aufgenommen werden, der ganze Mensch in 10–20 Sek. Mit einem 50x15 cm Detektor können wir das ganze Hirn oder Herz mit einer einzigen Umdrehung des Rings durchschichten. Es ist faszinierend, wie viel intelligente Technologie zu diesem Zweck entwickelt wurde. Davon sollen Sie nun einen Eindruck erhalten.

Wir wollen vorerst nur eine Bildzeile von Detektorelementen anschauen, also nur die Strahlen, die durch eine einzige „Patienten-Salamischeibe“ laufen. Wenn wir die Röntgenröhre kurz strahlen lassen, dann misst jedes der Detektorelemente einen Röntgenstrahl, der durch die betrachtete Einzelschicht des Patienten gelaufen ist. Rotieren wir den Ring mit Röhre und Detektorelementen um den Patienten ohne den

⁴ Eine kleine Schwäche hat die Analogie mit dem Städtchen. Während die Gebäude im Städtchen nicht durchsichtig sind, sind die Körperstrukturen für Röntgenstrahlen teils durchsichtig. Am Prinzip des Vorgehens ändert diese Tatsache aber nichts.



Position 7: R links, K in der Mitte, B rechts. Bei jeder Position sammeln wir neue Information. Um die Lage der einzelnen Bauten zu definieren, müssen wir ziemlich nachdenken, was im CT eben der Computer für uns besorgt

Abb. 3.2 Stadt-Analogie zur CT-Berechnung. In Stadt-Analogie zur CT-Aufnahmetechnik stellen wir uns vor, wir müssten einen Lageplan von verschiedenen Gebäuden eines Städtchens zeichnen, welches von einer Stadtmauer umgeben ist. Wir umrunden das Städtchen auf der Stadtmauer (wie eben der CT-Ring den Patienten). Wir beginnen bei Position 1. Die Beschreibung der relevanten Bauten ist aus diesem Blickwinkel wie folgt: 1: Das Rathaus (R) steht deutlich sichtbar rechts neben der Kirche (K), den Brunnen (B) sieht man nicht. (Position ...), Position 5: Das Rathaus verdeckt das Schiff der Kirche, der Turm ist jedoch sichtbar; rechts des Turmes der Springbrunnen. (Position ...).

Tisch zu verschieben, erhalten wir Messungen der gleichen Schicht aus vielen Richtungen. Wollen wir Schichtbilder von ausgedehnteren Körperregionen, z. B. des Bauchs erhalten, verschieben wir den Tisch mit dem Patienten, wiederholen den beschriebenen Vorgang und können so den Patienten schrittweise „durchscheiben“. Die aufgenommene Datenmenge ist sehr gross. Pro Schicht liegt sie bei rund 1 Million Pixelwerten, bei 300 Patientenschichten also bei 300 Millionen Pixelwerten, und jedes Pixel kann eine Zahl von 0–4000 annehmen⁵.

Die Rotation des Ringes mit Röntgenröhre und Detektorbank um den Patienten und damit die Datenaufnahme sogar für eine einzige Schicht dauerte früher viele Sekunden. Um von diesen frühen CT-Systemen zu den heutigen zu gelangen, war viel technische Innovation nötig. Um hoch effiziente CT-Systeme zu bauen, mussten drei grosse Probleme gelöst werden.

1. Immer leistungsfähigere und robustere Röntgenröhren mussten und müssen entwickelt werden, die den enormen Fliehkräften widerstehen, denen ein mit hoher Geschwindigkeit um den Patienten rotierender CT-Ring ausgesetzt ist und welche die enorme Wärme abführen können, die mit den entstehenden Röntgenstrahlen einhergeht.
2. Kostspielige immer leistungsfähigere digitale Röntgendetektoren mussten und müssen entwickelt und hergestellt werden. Wie gesagt, bestehen diese heute aus bis zu 300x1000 Detektorelementen.
3. Techniken wurden benötigt, welche den Strom von aussen zur Röntgenröhre bringen, welche auf dem rotierenden CT-Ring montiert ist. Gleichzeitig mussten

⁵ Dies entspricht einem Datensatz von ca. 2 Gigabyte = 2'000 Megabyte.

Hochleistungs-Datenübertragungs-Systeme entwickelt werden, welche erlauben, die Messdaten vom rotierenden Ring herunterzuladen.

Im Überblick haben Sie nun verstanden, wie die Daten in einem modernen CT aufgenommen werden. Die Umrechnung dieser Daten zu Bildern und einige weitere technische Aspekte werden am Ende dieses Kapitels besprochen. Als Nächstes wollen wir die medizinischen Anwendungen von CT-Untersuchungen zusammenfassen.

3.2 Heutige medizinische Anwendungen der CT

CT-Systeme stehen als „Arbeitspferde“ in jeder Notfallstation. Von Notfalluntersuchungen der Hirndurchblutung bei Schlaganfällen über die Suche nach Tumoren bis hin zu Knochenbrüchen und der Untersuchung von Verengungen der Herzkrankgefäße sind CT-Systeme heute täglich weltweit hunderttausendfach im Einsatz und aus der modernen Medizin für die Diagnostik und die Planung von Eingriffen nicht mehr wegzudenken. Da die Röntgendifferenzen von Knochen, Weichteilen und Luft sehr verschieden sind, können speziell diese Gewebe kontrastreich unterschieden werden. Damit wird die CT sehr häufig bei den verschiedensten Lungenerkrankungen eingesetzt. Während bei einer Lungenentzündung oft ein normales Röntgenbild ausreichend ist, wird ein Patient bei einer anderen Lungenerkrankung wahrscheinlich eine CT-Untersuchung haben. Dies gilt insbesondere für Lungentumoren und in Situationen, wo Blutgerinnsel in den Lungengefäßen (Lungenembolien) vermutet werden. Lungentumoren, aber auch viele Tumoren in anderen Organen und deren Ableger (Metastasen) im Körper, werden mit der CT regelmässig untersucht. Bei schweren Unfällen wird notfallmässig eine CT gemacht, sei dies um eine unfallbedingte Hirnschädigung mit Blutungen auszuschliessen, sonstige Organschäden oder Blutungen im Körper zu finden oder Knochenbrüche zu orten und deren Behandlung zu planen. CT wird zur genauen Operationsplanung beim Einsetzen von Metallimplantaten wie beispielsweise Gelenksprothesen herangezogen. Auch bei Gefässerkrankungen und deren Behandlung wird CT eingesetzt. Eine relativ neue Anwendung der CT ist die Darstellung der Herzarterien. Dies verlangt den Einsatz der absolut leistungsfähigsten Systeme. Oft sind Verengungen dieser Gefäße Ursache von Herzbeschwerden, die schliesslich zum Herzinfarkt führen können. Bis vor kurzem konnten gute Bilder der Herzarterien nur mittels „Röntgen-Kino“ (Kap. 2) unter Einspritzen von Kontrastmittel (Kap. 7) in die Herzarterien selbst gemacht werden (sog. Koronarangiographie), eine nicht völlig komplikationsfreie Untersuchung. In der Herz-CT muss man kein Kontrastmittel in die Herzschlagadern, sondern lediglich Kontrastmittel in eine Armvene spritzen, was wesentlich weniger unerwünschte Nebenwirkungen hat. Bis in 5 Jahren werden Gefässuntersuchungen zur Darstellung von Verengungen wohl im Herzen nur noch mit CT durchgeführt. Koronarangiographien werden dann nur noch eingesetzt, um eine Behandlung, z. B. die Erweiterung der Verengung mit einem Ballon, mittels Röntgenkino zu überwachen.

Es folgen nun weitergehende Informationen über die moderne CT-Technik, die interessieren können, und abschliessend legen wir dar, wie CT-Schnitte berechnet werden.

3.3 Röntgenröhren, Detektoren und Röntgentische

3.3.1 Röntgenröhren

Der rasch rotierende Ring eines modernen CT-Systems bringt grosse technische Vorteile, wie wir unten sehen werden. Er verursacht aber auch Probleme. Das erste Problem lag und liegt auch heute noch bei der Röntgenröhre. Je rascher man CT-Bilder schiessen will, desto schneller muss sich die Röhre um den Patienten drehen. Sie rotiert in einem modernen CT innerhalb einer Sekunde bis viermal um den Patienten, also mit etwa 40 km/h und ist enormen Flieh- und anderen Kräften ausgesetzt. Weiter muss sie desto stärkere Röntgenstrahlen aussenden können, je leistungsfähiger das CT-System ist, also u. a. je schneller der Ring rotiert. Da sehr viel Hitze auf dem Metall in der Röntgenröhre entsteht, von welchem die Röntgenstrahlen herstammen, sind spezielle Techniken zum Ableiten der Wärme aus der Röntgenröhre gefragt, sonst würde die Röntgenröhre nach kurzer Zeit verglühen. Moderne Röntgenröhren für CT-Systeme sind technische Wunderwerke, die pro Stück 100.000 Euro oder mehr kosten!

3.3.2 Detektoren

Moderne CT-Systeme können in ihren Detektoren bis zu hunderttausende von Detektorelementen haben. Die modernen CT-Detektoren sind in ihrer Bauart dem digitalen Chip in Ihrer Digitalkamera sehr ähnlich (Kap. 12). Die Detektorbank ist leicht gekrümmmt, und so haben alle Röntgenstrahlen von der Röntgenröhre bis zu den entsprechenden einzelnen Detektorelementen immer einen gleich langen Weg (Abb. 3.1). Über jedem der submillimetergrossen Detektorelemente ist ein quadratisches Metallrörchen angebracht, welches die Abbildungsschärfe verbessert. Diese Anordnung sieht etwa aus wie eine Bienenwabe. Damit gleicht eine moderne CT-Detektorbank auch einem Insekten-Facettenauge (Kap. 9)⁶. Eine moderne CT-Detektorbank ist ein technisch-elektronisches Wunderwerk.

3.3.3 Stromzufuhr zum rotierenden Ring und Datenauslese

Das rotierende Ringsystem mit Röhre und Detektor (Abb. 3.1), durch welches der Patient während der Untersuchung schrittweise vorgesoben wird, verursacht erhebliche Probleme. Einerseits muss elektrischer Strom für die Erzeugung der Röntgenstrahlen auf den Ring gebracht werden und anderseits müssen die riesigen digi-

⁶ Wird ein Strahl im menschlichen Körper nicht abgeschwächt, sondern wird im Patienten gestreut, d. h. er ändert die Richtung, spricht man von Streustrahlen. Diese beeinträchtigen die Bildqualität. Beim CT sorgen die Facettenaugen-Bienenwabenstrukturen dafür, dass diese Streustrahlen nicht auf die Detektorelemente gelangen und so die Abbildungsqualität erhalten bleibt (Abbildung 9.1).

talen Datenmengen, die im Detektor in jeder Sekunde während einer Untersuchung anfallen, aus dem rotierenden Ringsystem ausgelesen werden. Bei den ersten CTs machte man es sich einfach. Man leitete mit entsprechenden Kabeln den Röntgenröhrenstrom auf den Ring und die Daten vom Ring. Der Ring konnte sich so aber maximal nur einmal um seine Achse drehen. Dann musste er wieder zurückgedreht werden, denn sonst hätten sich die Kabel aufgewickelt. Dieser Prozess war langsam, und so dauerte die Erzeugung einer einzigen CT-Schicht anfänglich dutzende von Sekunden.

Anfang der Neunzigerjahre hatte nun Prof. Willi Kalender in Erlangen eine brillante Idee. Auf dieser Idee basieren heute alle CT-Systeme. Mit Schleifringen oder elektromagnetischer Koppelung wird heute die Elektrizität zur Erzeugung von Röntgenstrahlen auf den rotierenden Ring übertragen. Das Auslesen der Messdaten aus dem rotierenden Detektor gelingt über optische oder andere leistungsfähige Datenübertragungssysteme, mit denen riesige digitale Datenmengen übertragen werden können. Entsprechend kann dann der Ring kontinuierlich und sehr schnell um den Patienten rotiert werden. Heute werden hohe konstante Rotationsgeschwindigkeiten des Rings mit Röhre und Detektor von bis zu 40 km/h oder mehr verwendet, von denen man als Patient während der Untersuchung außer einem leichten Summen nichts merkt. Weiter wurden Rechenmethoden entwickelt, die erlauben, Schnittbilder aus Messdaten rückzurechnen, welche unter gleichzeitiger Drehung des Rings und Vorschub des Patiententisches erhalten wurden. Diese Technik heisst Spiral-CT, weil die Röntgenröhre und die Detektoren bei gleichzeitigem Tischvorschub aus der Sicht des Patienten eine Spirale um ihn herum beschreiben. Der Patient kommt also auf den Tisch zu liegen und während der Untersuchung rotieren Röhre und Detektoren im CT-Gerät gleichförmig um ihn herum. Gleichzeitig merkt er, wie der Untersuchungstisch vorgeschoben wird. Damit dauern heute Untersuchungen mit Schichten vom Scheitel bis zum Becken und mehreren tausend Schichtbildern weniger als eine Minute.

Zusammenfassend besteht also ein CT-System aus einem Ring, auf welchem Röntgenröhre und Detektor montiert sind. Dieser Ring dreht sich um den Patienten, der auf dem Patiententisch liegt, und das Röhren-Detektorsystem misst kontinuierlich während der Drehung die Stärke der auf den Detektor auftreffenden Röntgenstrahlen. Diese werden beim Durchtritt durch den Patienten abhängig von der Art der Gewebe, wie Muskeln, Fettgewebe oder Knochen und der Messrichtung verschieden geschwächt. Weil der Patient während dieses Prozesses durch den Ring geschoben wird, wird in kurzer Zeit der ganze Körper durchgemessen. Anhand der anfallenden Messdaten werden die vielen CT-Schichten berechnet, was einen Hochleistungscomputer erfordert. Zur Betrachtung werden dann die gerechneten Bilder als Graustufenbilder auf den Computerbildschirm abgerufen.

Falls Sie einmal in einem CT liegen und ein leises Summen hören, ist das der drehende CT-Ring mit Röhre und Detektor, der mit bis zu 4 Umdrehungen pro Sekunde um Sie herumkreist. Während Sie auf dem CT-Tisch vorgeschoben werden, werden laufend unmerkbar Röntgenstrahlen durch Ihren Körper geschickt und deren Abschwächung auf der Gegenseite gemessen. Die Anzahl der durchgeführten Messungen liegt im Milliardenbereich. Sie profitieren heute von den fantastischen Leis-

tungen, die Physiker, Chemiker und Ingenieure in den letzten 150 Jahren vollbracht haben. Ein Ende der Neuerungen bei der Entwicklung von CT-Systemen ist nicht in Sicht.

3.4 Schichtbilder des Patienten berechnen

Ich habe Ihnen bisher verschwiegen, wie das mathematische Verfahren etwa aussieht, mit dem man die Schichtbilder aus den Messungen der abgeschwächten Röntgenstrahlen berechnet. Diese Schichten verlaufen senkrecht zur Körperlängsachse des Patienten, ähnlich Salamischeiben. Schauen Sie sich einmal Abb. 3.3 an. Dort sehen Sie eine CT-Schicht durch den Bauch eines Patienten. Wir schauen von den Patientenfüßen her auf diese eine Schicht⁷. Stellen Sie sich jetzt vor, die Schicht durch den Patienten sei in kleine Quadrate (Pixel) aufgeteilt⁸. In Abb. 3.3 haben wir eine Aufteilung in nur 9x9, also 81 Pixel vorgenommen. In einem CT dagegen hat der Raster etwa 1000x1000 Pixel und damit hat das CT-Bild eine viel höhere Auflösung, aber schon mit 9x9 Pixeln können wir verstehen, wie CT-Schichten berechnet werden.

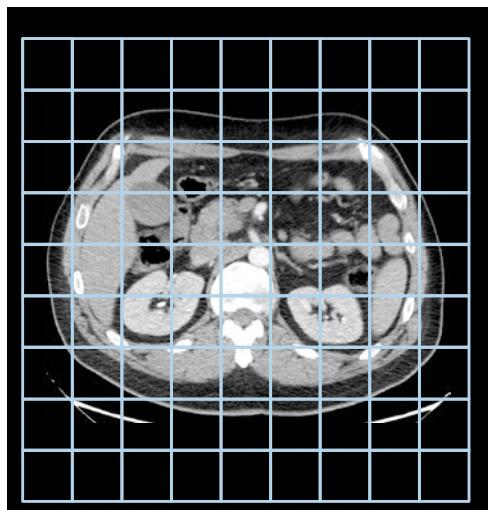
Auf der einen Seite der Patientenschicht stellen Sie sich die Röntgenröhre vor. Sie sendet Strahlen durch die 9 Kolonnen von Pixeln im Raster. Jeder Pixel ausserhalb des Patienten enthält Luft oder die Strukturen des CT-Tisches. Ein Pixel im Patienten enthält zum Beispiel Lebergewebe, Nierengewebe, Fettgewebe oder Knochen der Wirbelsäule oder Luft im Darm. Jedes Gewebe hat eine ihm eigene Röntgendichte und eben diese bilden wir im CT-Bild ab: ein CT ist ein Pixelbild von Röntgendichten. Es stimmt zwar bei einem 9x9 Raster nicht, dass immer nur ein einziges Gewebe in einem Pixel liegt. Der Raster ist zu grob und in einem Pixel können Anteile von verschiedenen Geweben liegen. Aber beim CT arbeiten wir mit einem 1000x1000 Pixelraster und es stimmt ziemlich gut, dass in jedem Pixel nur ein Gewebe zu liegen kommt.

Läuft der Röntgenstrahl durch den Menschen, schwächt jeder durchstrahlte Pixel den Röntgenstrahl ein bisschen, bis er auf ein Detektorelement hinter dem Patienten trifft. Das Detektorelement misst also einen abgeschwächten Röntgenstrahl. Die Schwächung ist abhängig von den Röntgendichten aller Pixel im Strahlengang. Tatsächlich ist die Schwächung eine Funktion der Summe aller Röntgendichten (Zahlen) der einzelnen Pixel. Wir können also die Summe aller Röntgendichten der Pixel in einem Strahl messen, aber nicht die Röntgendichten der einzelnen Pixel. Um die Röntgendichtewerte der einzelnen Pixel aus den geschwächten Röntgenstrahlen zu berechnen, kommt uns ein mathematischer Satz zu Hilfe. Dieser sagt, dass wenn wir z. B. die 81 Röntgendichtewerte im 9x9 Raster berechnen wollen, genau 81

⁷ Die Sicht auf tomographische Querschnitte findet (vom Schnittbildverfahren unabhängig) gemäss einer Konvention von den Füssen her statt. Man könnte gleich gut vom Kopf auf die Schnitte schauen, müsste dann aber die Schichten um eine vertikale Achse spiegeln.

⁸ Achtung! Wir sprechen hier nicht von den pixelförmigen Detektorelementen eines Röntgendetektors, sondern von einem imaginären Pixelraster in einer CT-Schicht, die wir durch den Patienten berechnen wollen.

Abb. 3.3 CT-Schicht durch den Oberbauch eines Patienten, über die wir ein Pixelraster gelegt haben. Der CT-Rechenprozess misst die Röntgendiftichte in jedem der Pixel des im Patienten liegenden Rasters. In den Pixeln um den Patienten herum ist Luft (schwarz), in diejenigen im Patienten kommen verschiedene Organe zu liegen. Schon bei der Auflösung des Feldes in nur 9x9 Pixel würden bei 10 Graustufen mindestens die Körperumrisse sichtbar. Bei einer CT werden Raster mit 1000x1000 Pixeln und 4000 Graustufen aufgenommen. Dies führt zu scharfen Bildern



verschiedenartige Summenmessungen zur Berechnung brauchen. Für das Raster mit 81 Pixeln braucht es also 9 Messungen, bei denen je 9 verschiedene Summen gemessen werden. Aus den 81 Summandenkönnen dann die Röntgendiftichtewerte jedes einzelnen Pixels berechnet werden. Bei einem Pixelraster wie im CT mit 1000x1000 Pixeln braucht es entsprechend 1 Million Messungen, um die Röntgendiftichtewerte jedes einzelnen Pixels zu berechnen! Ordnet man die Dichtewerte in den Pixeln in einem CT einer Grautonskala zu (z. B. 0= schwarz, 1–999 abnehmend grau und 1000 weiss), haben wir das Bild erhalten, das Sie in Abb. 3.3 sehen.

Die vielen benötigten Messungen machen wir, indem wir Röntgenröhre und -Detektor schrittweise um den Patienten rotieren. Bei 81 Pixeln braucht es 9 Rotations-schritte, bei welchen je 9 Messungen gemacht werden, bei einer Million Pixel braucht es 1000 Schritte, bei denen je 1000 Messungen gemacht werden. Die Röntgenstrahlen fallen bei jedem Rotationsschritt von verschiedenen Seiten auf die betrachtete Schicht durch den Patienten und laufen so immer wieder in einer anderen Richtung durch die eingebildeten Pixel in Abb. 3.3. Entsprechend ändert sich die gemessene Abschwächung der Strahlen mit jeder Messung. Wir erhalten immer wieder neue Messwerte, die neuen Summen von abschwächenden Pixeln entsprechen.

Der Prozess der Berechnung von CT-Schichtbildern ist nicht wesentlich verschieden vom Lösen eines Sudoku. In beiden Fällen wissen wir nicht, welche Werte die einzelnen Pixel (Quadrate) haben, wir haben aber gewisse Vorgaben, wie wir die Werte in den einzelnen Pixeln berechnen können, Schwächungssummen im CT und Vorgaben, wie die Zahlen von 1–9 im Sudoku ins Raster einzufüllen sind (s. Abbildungslegende Abb. 3.4). Wissen Sie nicht, was ein Sudoku ist? Sie finden eines in Abb. 3.4 (die Auflösung finden Sie in Abbildung 12.2). Beim Lösen des Sudoku werden Sie sehen, dass es schon bei einem 9x9 Pixelraster etwas Zahlenakrobistik braucht. Zur Berechnung einer CT-Schicht mit einem 1000x1000 Raster braucht es offenbar sehr viel Zahlenakrobistik, denn wir haben nicht nur $9 \times 9 = 81$ Messungen

	8	9				1	7	
			7	8	2			
		3				8		
	6		8		3		9	
	7		9		6		3	
		1				3		
			3		5			
	9	2				6	4	

Abb. 3.4 9x9 Sudoku. In einem Sudoku müssen in die Felder jeder Zeile, jeder Spalte und jedem der stark umrahmten 3x3 Quadrate die Zahlen 1–9 so eingefüllt werden, dass sie nur einmal vorkommen. Einige Zahlen sind bei einem Sudoku schon eingefüllt. Versuchen Sie, das Sudoku zu lösen. Sie haben dann etwa verstanden, wie eine CT-Schicht vom Computer berechnet wird (Auflösung in Abbildung 12.3)

zu verarbeiten, sondern $1000 \times 1000 = 1$ Million Messungen, was wir lieber dem Computer überlassen.

Wenn Sie das Sudoku in z. B. einer Viertelstunde gelöst haben (und dann sind Sie schnell), haben Sie im Prinzip auch verstanden, wie man CT-Schichten mit 1000×1000 Pixel berechnet. Leider würde Sie die Berechnung einer einzigen! CT-Schicht aber $1.000.000 / 81$ also gegen 10.000 Viertelstunden oder 2500 Stunden kosten. Wir brauchen den Computer unabdingbar! Wie Sie sich erinnern, haben wir aber nicht nur Röntgenstrahlen durch eine Schicht im Patienten geschickt, sondern durch mehrere hundert Schichten. Man muss also zur Berechnung eines CT-Datensatzes nicht nur ein „Riesen-Sudoku“ lösen, sondern einen Stapel von hunderten von „Riesen-Sudokus“.

Hat der Computer einmal alle Zahlen im Raster berechnet, wird – wie schon oben gesagt – die CT-Schicht in einer Graustufenskala⁹ auf einem Computermonitor dargestellt und das digitale Bild erscheint vor uns. Je höher der Wert der Zahl in einem Pixel, desto heller wird es z. B. auf dem Monitor wiedergegeben¹⁰.

⁹ Wir könnten auch eine Farbskala verwenden, aber eine Grauskala ist meist vorteilhaft, weil unser Auge Graustufen als kontinuierlich wahrnimmt, Farben dagegen nicht.

¹⁰ Ein Computerbild besteht aus Zahlen in Pixeln. Ob wir sagen, die höchste Zahl entspricht weiss und die kleinste Zahl schwarz oder umgekehrt, ist frei wählbar. Im CT und MR ist die Konvention, dass hell grossen- und dunkel kleinen Zahlen entspricht. Im CT ist also röntgendichtetes Gewebe wie Knochen weiss und röntgendifurchlässiges Gewebe wie Luft schwarz. In der Nuklearmedizin ist es meist umgekehrt. Dunkle Strukturen entsprechen Herden, die viel Strahlen aussenden, während aus hellen Regionen wenig Strahlen kommen.

3.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend messen wir bei einer CT die Schwächung sehr vieler Röntgenstrahlrichtungen beim Durchlaufen durch die verschiedenen Organe des Patienten in einer Schicht. Dabei generieren wir die Millionen von Messdaten, die es erlauben, die CT-Schichten quer durch den Körper in Rastern von typischerweise 1000x1000 Pixeln (1 Megapixel) rückzurechnen. Die Rückrechnung hat zum Ziel die Röntgendiffektionen von kleinsten (z. B. 0,5x0,5x0,5 mm) imaginären Kästchen im Patienten zu berechnen. Alle in einer Schicht liegenden Kästchen (Pixel, Voxel) ergeben ein Schnittbild durch den Patienten ähnlich einer Salamischeibe. Das entstehende Bild ist ein Abbild der Röntgendiffektionen, die im Menschen verschieden sind. So können in einer Schicht durch den Bauch die Leber, die Nieren und andere Bauchorgane vom umliegenden Fett und Knochen, vom lufthaltigen Darm und anderen Strukturen gut abgegrenzt werden. Die Rückrechnung der CT-Schichtbilder ist zwar in den Grundzügen nur Summenmathematik, aber braucht enorme Rechenleistungen. Die Computertomographie und auch alle anderen Schnittbildverfahren der bildgebenden Medizin sind daher Kinder des Computerzeitalters und entsprechender digitaler Technologien. Wenn Sie verstanden haben, wie man ein Sudoku löst, haben Sie in wichtigen Ansätzen verstanden, wie man CT-Schichten berechnet.

CT kommt zum Einsatz bei der Beurteilung aller Gefässe im Körper. Bei Not- und Unfällen wird CT von Kopf bis Fuss eingesetzt. Abklärungen der Lunge sind die Domäne der CT. CT wird aber auch bei Abklärungen der Hals- und Bauchstrukturen eingesetzt und wenn immer Knochen primär involviert sind, also bei Knochenbrüchen und beim Einsetzen von Prothesen zu Planungszwecken.

Die CT-Untersuchung einer Körperregion kostet 400–500 CHF. Zusätzliche Anwendung von Kontrastmitteln kostet zusätzlich 100–150 CHF. Werden verschiedene Organe zuerst ohne und dann mit Kontrastmittel mit CT geschichtet, kann eine CT-Untersuchung bis 1500 CHF kosten.

Nuklearmedizin (NUK), Positronenemissionstomographie (PET) und Hybridverfahren

Radioaktivität im Körper?

In der Nuklearmedizin (NUK) und in der Positronenemissionstomographie (PET) verwendet man sog. radioaktive Tracer zur Herstellung von Bildern aus dem Körperinnern eines lebenden Menschen. Ein radioaktiver Tracer besteht aus einem biologischen Molekül, das an ein radioaktives Atom gekoppelt ist (Kap. 7). Der Tracer wird dem Patienten meist in ein Blutgefäß gespritzt, worauf er sich im ganzen Körper verteilt, um sich dann an bestimmten Orten anzureichern, z. B. in Tumorherden. Die radioaktiven Atome verraten so, wo sich die radioaktiv markierten biologische Moleküle im Körper befinden. Es gibt eine Vielzahl radioaktiver Atome, die sich an biologische Substanzen binden lassen. Um Bilder aus dem Körperinnern zu machen, werden radioaktive Atome verwendet, die durchdringende Strahlung, sog. Gammastrahlen, aussenden. Diese Strahlen sind den Röntgenstrahlen eng verwandt (Kap. 10 und 11). NUK- und PET-Bilder zeigen oft wenig Anatomie. Zum Beispiel zeigen sie herdförmige Anreicherungen in Tumoren (Abb. 4.1). Es hat sich darum als vorteilhaft erwiesen, bildgebende Systeme zu bauen, welche NUK- oder PET- mit CT oder MR-Scannern in einem Gerät vereinen. Man nennt diese SPECT/CT-, PET/CT- und PET/MR-Verfahren zusammenfassend Hybridverfahren.

Der grosse Vorteil der NUK- und PET-Verfahren ist, dass die verwendeten radioaktiven Atome im Prinzip an beliebige biologische Moleküle angekoppelt werden können. So können radioaktive Tracer als „Spione“ verschiedenste Stoffwechselprozesse im Patienten sichtbar machen. Wir können z. B. relativ einfach und rasch sichtbar machen, wo Zucker im Körper gebraucht wird (Abb. 4.1), ob die Schilddrüse regelrecht Jod aufnimmt oder Medikamente im Hirn auch wirken. Dies ist mit Röntgen-, CT-, MR- und Ultraschall-Verfahren nicht möglich (Kap. 7). Wir stellen also mit NUK- und PET-Verfahren primär nicht etwa physikalische Eigenschaften der menschlichen Organe dar, wie ihre Röntgendichten (CT) oder ihre magnetischen Eigenschaften (MR), sondern biologische Eigenschaften von Organen oder Geweben des Patienten. Weil wir Menschen nicht radioaktiv strahlen, macht es keinen Sinn, sich in einen NUK- oder PET-Scanner zu legen und ein Bild machen lassen: man sieht nichts. Nur wenn wir etwas Radioaktivität in uns haben, sieht man in den NUK- und PET-Systemen etwas. Wenn Sie mir also sagen: „ich habe morgen eine



Abb. 4.1 Zucker (FDG) -PET-Bild. FDG-PET-Bild eines Patienten mit einem bösartigen Tumor, der sich im Körper ausgebreitet hat. Das Hirn braucht viel Zucker und FDG wird über die Nieren in die Blase ausgeschieden. Entsprechend sind diese Organe gut sichtbar. Die Tumorherde – vor allem in der Lungengegend liegend – sind ebenfalls gut sichtbar. Welchen Organen sie genau zuzuordnen sind, ist auf einem FDG-PET-Bild schlecht ersichtlich, mit der PET-Hybridtechniken dagegen schon.

Das dargestellte Bild wurde nicht zweidimensional aufgenommen, sondern in «Salamischeibenförmigen» Schichten. Diese wurden dann in einer vorne-hinten-Ansicht projiziert. Man könnte den vorhandenen 3D PET-Datensatz auch verwenden, um einzelne Schichten anzuschauen, oder um eine seitliche oder eine schräge Projektion des Patienten darzustellen

PET-Untersuchung des Hirns“, bleibt vieles unklar. Sie müssen mir sagen, mit welcher Substanz die Untersuchung durchgeführt wird. Erst dann verstehe ich, welche NUK- oder PET-Untersuchung bei Ihnen genau durchgeführt wird.

Bei jeder medizinisch bildgebenden Untersuchung brauchen wir eine Strahlenquelle, den Patienten und einen Detektor, also ein System, das die vom Patienten kommenden Strahlen registriert und sie sichtbar macht. In der NUK und der PET sind die Strahlenquellen die radioaktiven Atome in den Tracern. Wir wollen so vorgehen, dass wir zuerst etwas über Tracer sagen, dann die medizinisch wichtigsten Anwendungen von NUK- und PET-Verfahren zusammenfassen, geeignete radioaktive Atome als nuklearmedizinische Strahlenquellen kennenlernen und schliesslich darlegen, wie Kamerasysteme mittels der genannten Tracer Bilder aus dem Körperinnern herstellen können.

4.1 Radioaktive Tracer: die Strahlenquellen bei NUK und PET

Wie gesagt, ist das Elegante der NUK- und PET-Verfahren, dass sie mit radioaktiven Atomen markierte Moleküle abbilden, die sich im Körper je nach Molekültyp verteilt haben und von dort nach aussen strahlen und so als „Mini-Strahlenquellen“ funktionieren. Dies steht im Gegensatz zu den Röntgen- (Röntgen und CT), MR- (Radiowellen) und Ultraschall-Verfahren, bei denen zur Herstellung medizinischer Bilder von aussen Strahlen in und durch den Patienten gesendet werden. NUK und PET stellen damit biologisch-biochemische Prozesse im Patienten dar, machen also Stoffwechselprozesse im Bild sichtbar. Oft zeigen die Bilder aber wenig anatomischen Details.

Durch die chemische Verbindung eines radioaktiven Atoms mit einem Molekül entsteht ein Tracer (von Englisch „to trace“ = eine Spur suchen). Typischerweise wird der Tracer dem Patienten eingespritzt, kann aber – je nach Anwendung – auch eingeatmet oder geschluckt werden. Im Patienten geht der Tracer dorthin, wo er gebraucht wird. Spritzen wir z. B. radioaktiven Zucker, wird er sich dort anreichern, wo eben viel Zucker gebraucht wird, nämlich im Hirn und bei Patienten mit bösartigen Tumoren in den Tumorherden. Dank seiner biologischen Eigenschaften vermag der Tracer sich so in die Stoffwechselvorgänge im Patienten einzuschleusen und sich an gewünschten Orten anzureichern. Die Tracer verraten ihren Aufenthaltsort dank der Gammastrahlen, die von den an sie gebundenen radioaktiven Atomen stammen. Die verwendeten Detektorsysteme schliesslich machen ein Bild der Verteilung der Tracer im Körper des Patienten.

Seit den Anfängen der NUK wurde eine Vielzahl von radioaktiven Tracern entwickelt und auf ihre Anwendungen hin untersucht. Tracer sind pharmazeutische Wirkstoffe, also Medikamente. Medikamente wirken auf spezifische Körperfunktionen. Sie kommen aber in der NUK und der PET nur in ganz kleinen Mengen zum Einsatz und entfalten damit keine Medikamentenwirkung. Der berühmte Grundsatz von Paracelsus: „Die Dosis macht das Gift“ oder „Dosis facit venenum“ gilt für radioaktive Tracer in doppeltem Sinne. Erstens werden die Tracer-Medikamente in so kleinen Dosen angewendet, dass sie in unserem Körper keine Medikamentenwirkung entfalten (Kap. 7), und zweitens ist die Radioaktivität so gering, dass sie mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit keine negativen Effekte auf den Patienten hat (Kap. 8). Die Strahlung genügt aber dazu, Bilder herzustellen. Weil Tracer eben biologische Substanzen sind und es davon unbegrenzt viele gibt, sind der Phantasie der Entwicklung neuer Tracer praktisch keine Grenzen gesetzt. In den letzten 60 Jahren wurde eine Vielzahl von radioaktiv markierten Tracern entwickelt. Aber ebenso wie es schwierig ist, ein gutes neues Medikament für eine Krankheit zu finden, ist es schwierig, gute Tracer herzustellen, die medizinisch wichtige Informationen aus dem Körperinnern liefern. Wir werden die wichtigsten radioaktiven Tracer für die medizinische Bildgebung in Kapitel 7 auflisten.

Der Untersuchungsablauf einer NUK- oder PET-Untersuchung ist trotz der Verschiedenheit der verwendeten Tracer meist ähnlich. Zuerst wird der radioaktive Tracer in den Patienten eingebracht und dann eine gewisse Zeit gewartet. Während dieser Zeit gelangt der Tracer im Patienten an seinen Bestimmungsort. Dieser hängt eben von den biologischen Eigenschaften des Tracers ab. Radioaktiver Zucker wird beispielsweise in den Zuckerstoffwechsel der Körperzellen eingeschleust. Nach einer vorgegebenen Wartezeit (Minuten bis Stunden) wird die Untersuchung durchgeführt. Wenn beispielsweise ein radioaktiver Tracer sich in Tumorgewebe anreichert, verrät er durch seine Strahlung Orte im Patienten, wo sich Tumorherde festgesetzt haben (Abb. 4.1). Immer ist das Ziel, wichtige diagnostische Information zu gewinnen, um den Patienten optimal zu behandeln. Das könnte im gezeigten Beispiel dann heißen: Der Tumor kann herausoperiert werden, weil er keine Ableger (Metastasen) hat, oder er wird sinnvollerweise bestrahlt oder mit Medikamenten behandelt, weil er sich schon weiter ausgebreitet hat. Medizinische Anwendungen der Nuklearmedizin und der PET besprechen wir im nachfolgenden Unterkapitel.

Da die radioaktiven Tracer sich zum Teil hoch konzentriert in Tumorherden anreichern, können die von ihnen ausgehenden Strahlen auch direkt zur Behandlung von Tumoren verwendet werden. Statt eines radioaktiven Atoms, das aus dem Körper austretende Gammastrahlen aussendet, verwendet man dann im Tracer radioaktive Atome, die ihre Strahlung lokal und dort für das Tumorgewebe schädlich depo-nieren. Der Tumor wird so präzise bestrahlt. Die Anwendungen der Radioaktivität zu Behandlungszwecken soll hier aber nicht weiter besprochen werden.

4.2 Anwendungen der NUK- und PET-Bildgebung

4.2.1 Herz- und Lungenerkrankungen

Eine der wichtigsten Anwendungen von NUK-Verfahren ist die Beurteilung der Herzdurchblutung. Ist eine Herzschlagader verengt, muss dies nämlich nicht zwingend heissen, dass die Blutversorgung des entsprechenden Herzmuskelteils ungenügend ist. Blut könnte diese Herzmuskelteile auch auf Umwegen über andere Herzschlagadern erreichen. Zur Darstellung der Durchblutung werden Tracer verwendet, die im Verhältnis zum Blutfluss im Herzmuskel stecken bleiben: Dort wo viel Blut durchs Herz fliest, bleibt viel Tracer stecken, dort wo wenig fliest, bleibt fast nichts hängen. Damit zeigt die aus dem Herzen kommende radioaktive Strahlung, in welche Teile des Herzmuskels das Blut gut hingelangt, und es lässt sich abschätzen, ob eine mit Gefäßröntgen oder CT festgestellte Gefäßverengung (Kap. 2 und 3) wirklich behandelt werden muss oder nicht. Mit PET kann die Herzdurchblutung noch genauer untersucht werden. Oft ist das aufwändiger PET-Verfahren aber nicht notwendig. PET kann aber zusätzlich auch den Zuckerstoffwechsel im Herzen darstellen. Damit werden Gebiete des Herzmuskels identifiziert, welche chronisch schlecht durchblutet sind, aber noch lebende Zellen und nicht nur toten Herzmuskel enthalten. Die so identifizierten Herzmuskelanteile können dann von einem Eingriff profitieren, der die Herzdurchblutung verbessert.

Ähnliche Untersuchungen wurden bis vor wenigen Jahren auch zur Darstellung der Lungendurchblutung eingesetzt. Bluterinnse in Lungengefäßen behindern die Durchblutung und damit kommen weniger Strahlen vom Durchblutungstracer aus Lungenregionen, die schlecht durchblutet sind. Findet man bei einem Patienten mit Atemnot solche Gerinnse, kann dies sehr gefährlich sein, und der Patient muss mit Blutverdünnung behandelt werden. Heute können Lungenbluterinnse mit CT direkt dargestellt werden und so setzt man bei dieser Frage heute meist die CT ein (Kap. 3). Noch immer werden jedoch nuklearmedizinische Lungenuntersuchungen gebraucht, um vor einer Operation festzustellen, ob ein Teil einer Lunge entfernt werden kann, ohne die Atmung und damit die Sauerstoffaufnahme des Patienten zu stark zu behindern.

4.2.2 Hirnerkrankungen

Hirnuntersuchungen mittels NUK- und PET-Verfahren sind heute nur beschränkt im Einsatz. Für PET könnte sich dies jedoch in den nächsten Jahren rasch ändern. Neu verfügbare Tracer können charakteristische Molekülablagerungen im Hirn von Alzheimer-Patienten darstellen, wie unten besprochen.

1. **Hirndurchblutungsmessungen** – vor allem mit PET – werden bei schwierigen Hirngefässoperationen zur Diagnose und Verlaufskontrolle eingesetzt.
2. Bei der **Parkinson-Krankheit** kommen NUK- und PET-Untersuchungen mit radioaktiven Tracern zum Einsatz, welche die Verteilung und die Menge der verfügbaren Signalmoleküle identifizieren, die bei Patienten mit dieser Krankheit in zu geringen Mengen vorhanden sind. Je nach verwendetem Tracer stellen sich gewisse Signalmoleküle vermehrt oder vermindert dar. Entsprechend den Resultaten des NUK- oder PET-Scans kann man die richtige Therapie wählen und sie für den Patienten optimieren.
3. **Demenzen:** Wir wissen heute, dass es ganz verschiedene Typen von Demenzen gibt. Bei offensichtlicher Demenz eines Patienten erlaubt eine Zucker-PET-Messung dank der Verteilung radioaktiven Zuckers im Hirn die Demenzerkrankung besser zu klassifizieren und – wenn verfügbar – eine gezielte Behandlung zu starten. Für die wichtigste Demenz, die Alzheimer-Krankheit gibt es leider noch keine gut etablierten und erfolgreichen Behandlungsmethoden. Es wurden aber in den letzten zehn Jahren verschiedene PET-Tracer entwickelt, welche die krankhaften Ablagerungen von gewissen Molekülen im Hirn (dem sog. Amyloid) bei der Alzheimer-Krankheit darstellen können. Amyloid-PET kann sehr früh – und lange bevor der Patient Zeichen von Demenz zeigt – darstellen, ob solche Amyloidmoleküle im Hirn des Patienten eingelagert werden. Weiter vermag Amyloid-PET festzustellen, ob mit neuartigen Behandlungen die Amyloidmoleküle aus dem Hirn verschwinden. Wenn dies gezeigt werden kann, scheint sich der Zustand des Patienten mit einer länger dauernden Behandlung mindestens zu stabilisieren, eventuell sogar zu verbessern. Im Moment werden weitere PET-Tracer entwickelt, die andere Typen von Demenzen charakterisieren können. Nicht nur Amyloid, sondern auch weitere Moleküle können sich krankhaft im Hirn einlagern und gehen mit anderen Demenzen einher.
4. **Hirntumoren:** Eine wichtige Anwendung von PET betrifft die Diagnose und Verlaufskontrolle bei Hirntumoren. Dazu können radioaktiv markierter Zucker, aber der Treffsicherheit wegen noch besser radioaktiv markierte Aminosäuren eingesetzt werden. Aminosäuren-PET ist die beste Methode um festzustellen, welche Tumoranteile die bösartigsten sind, und ob nach einer Therapie weiterhin aktive Anteile des Tumors vorhanden sind.

4.2.3 Tumoren im Körper

NUK- und vor allem PET-Verfahren werden sehr häufig bei Tumoren vor der Behandlung und bei der Nachkontrolle eingesetzt, um die Ausdehnung des Tumorbefalls festzustellen.

4.2.3.1 Aggressive Tumoren

Insbesondere PET mit radioaktivem Zucker (Kapitel 7) ist eine hervorragende Methode, um die Ausdehnung vieler bösartiger Tumoren aufzuzeigen. Die wichtigsten dieser Tumoren sind Hals/Nasen-, Lungen-, Darm-, Brust-, Speiseröhren-, Magen-, Gebärmutter- und Gebärmutterhals-Krebs sowie Lymphome und Melanome. Die von PET gelieferte Information ist für eine richtige Behandlung unabdingbar. Über 95 % aller heute durchgeführten PET-Untersuchungen werden für die Beurteilung von aggressiven Tumoren durchgeführt. Allerdings lassen sich einige Tumoren mit radioaktivem Zucker nicht speziell gut oder erst in einem sehr fortgeschrittenen Stadium darstellen.

4.2.3.2 Prostatakrebs

Beim Prostatakrebs ist radioaktiv markierter Zucker als PET-Tracer ungeeignet, ausser in spätesten Stadien. Daher hat sich in den letzten Jahren eine Untersuchung mit radioaktiv markierten Zellwand-Bausteinen (Cholin-PET) durchgesetzt. Auch Aminosäuren kommen zum Einsatz. Als weitere Untersuchung bei Prostatakrebs und offenbar noch wesentlich besser als Cholin-PET kommt heute eine PET-Untersuchung zum Einsatz, die einen radioaktiv markierten Tracer verwendet, der an ein Molekül auf den Zelloberflächen des Prostatakrebses andockt (PSMA-PET). Wenn der üblicherweise kontrollierte Prostata-Tumormarker im Blut (PSA-Wert) nach einer Prostataoperation wieder ansteigt und damit anzeigt, dass der Tumor wieder wächst, kann insbesondere die PSMA-PET sehr früh zeigen, wo der neu wachsende Tumorherd ist. Damit kann er dann gezielt behandelt werden.

4.2.3.3 Seltene Tumoren

Auch gewisse seltene Tumoren können mit speziellen PET-Tracern untersucht werden, die sich im Zucker-PET nicht darstellen. Dazu gehören neuroendokrine Tumoren, die mit Tracern dargestellt werden, die ebenfalls auf der Zelloberfläche des Tumors an spezielle Oberflächenmoleküle andocken (DOTA-Peptide PET). Weiter gehören dazu Schilddrüsentumoren, die jedoch meist nicht mit PET- sondern NUK-Verfahren mit radioaktivem Jod dargestellt werden. Auch gutartige Schilddrüsenerkrankungen brauchen manchmal ein nuklearmedizinisches Verfahren zur genauen Diagnose.

4.2.4 Weitere Anwendungen der NUK-Verfahren

Die NUK verfügt über eine breite Palette von Tracern, um Entzündungen zu diagnostizieren und zu lokalisieren. Entzündungen werden oft mit Röntgen, CT oder MR näher charakterisiert, wenn dies überhaupt nötig ist. Entsprechend stehen NUK-

Verfahren eher im Hintergrund. Hingegen sind bei Entzündungen, die nicht durch Bakterien verursacht werden, wie z. B. Rheumaleiden, die NUK und PET gut anwendbar. Mit anderen Verfahren kann die Ausdehnung der Krankheit im ganzen Körper nicht so elegant dargestellt werden. Es werden hauptsächlich radioaktive Tracer verwendet, die Entzündungen von Knochen und Gelenken darstellen. Die verwendeten Tracer reichern sich vermehrt im geschädigten Knochen an (Skelettszintigraphie, Fluorid-PET). Knochentracer kommen aber auch bei Unfällen, Knochenbrüchen, manchmal Knochentumoren zum Einsatz. Während die bildgestützte Suche nach Knochenmetastasen, also Tumor-„Ablegern“ in den Knochen, früher eine sehr häufige Anwendung der Skelettszintigraphie war, wird eine Skelettszintigraphie zu diesem Zweck heute nicht mehr oft angewendet. Die Zucker-PET vermag bei einem bösartigen Tumor alle Herde von bösartigen Tumoren, auch diejenigen im Knochen aufzuspüren. Die separate Suche nach Knochenherden ist daher nicht mehr notwendig. Die Fluorid-PET ist der Skelettszintigraphie weit überlegen, aber kostspieliger, und so ist ihr Einsatz momentan eingeschränkt.

Eine relativ häufige Anwendung der NUK ist die Darstellung und Messung der seitengetrennten Nierenfunktion. Ihr Einsatz ist vor allem in der Operationsplanung bei Nierenleiden von Bedeutung. Weitere in der NUK und im PET durchgeführte Spezialuntersuchungen werden hier nicht besprochen. Während die NUK-Verfahren in der Medizin in ihren Anwendungen nicht mehr wesentlich wachsen, ist das 21. Jahrhundert bisher das Jahrhundert der PET-Bildgebung, die in den letzten 20 Jahren in vielen Bereichen der bildgebenden Diagnostik sehr wichtig geworden ist.

Sie haben nun die wesentlichen Prinzipien der NUK und des PET und ihre Anwendungen verstanden. Kapitel 10 und 11 befassen sich mit den radioaktiven Atomen, die diese Verfahren zwingend benötigen. Im Folgenden soll auf die Technik der Scanner eingegangen werden, welche die Bilder der Verteilung der radioaktiven Tracer aufnehmen können.

4.3 Radioaktive Atome

In den nuklearmedizinischen Verfahren kommen – wie gesagt – Tracer zum Einsatz, die aus einem biologisch relevanten Molekül und einem radioaktiven Atom bestehen. Dazu werden radioaktive Atome gewählt, welche Gammastrahlen aussenden (Kap. 11). Gammastrahlen können den menschlichen Körper durchdringen und so auch nach aussen strahlen, wenn sich die strahlenden Atome im Patienten befinden. So verraten die Gammastrahlen den Aufenthaltsort der markierten Tracer.

Bei jeder Untersuchung mit Röntgenstrahlen (Röntgen und CT) oder den verwandten Gammastrahlen (Nuklearmedizin und PET) muss die Strahlendosis für den Patienten möglichst klein gehalten werden, denn in zu hohen Dosen können diese Strahlen schädlich sein. Eine Diskussion dieses Themas findet sich in Kap. 8. Es kommen zwei Typen radioaktiver Atome zur Anwendung, nämlich:

1. Tracer, deren radioaktives Atom einen einzigen Gammastrahl aussendet und in der NUK verwendet werden (Einzelphotonen-Strahler, daher der Name Single Photon Emission Tomography oder SPECT).
2. Radioaktive Atome, die zwei praktisch genau gegenläufige Gammastrahlen aussenden und in der PET zur Anwendung kommen, sog. Positronen-Strahler (daher auch der Name Positronen-Emissions-Tomographie = PET).

Ein tieferes Verständnis der entsprechenden radioaktiven Prozesse erfordert gewisse Grundkenntnisse der Atomphysik, die wir hier nicht besprechen wollen. Zu diesem Thema finden Sie vertiefende Informationen in den Kap. 10 und 11.

4.4 Medizinische Bilder mit radioaktiven Tracern

Ein Tracer – also die Verbindung eines biologischen Moleküls und eines radioaktiven Atoms – verteilt sich im Patienten nicht gleichmäßig, sondern nach Massgabe seiner biologischen Eigenschaften (Abb. 4.1). Entsprechend gibt die Verteilung Aufschluss über Krankheitsprozesse, z. B. Orte, wo sich ein bösartiger Tumor befindet. Die radioaktiven Atome im Patienten senden Gammastrahlung aus. Diese wird mit nuklear-medizinischen Kamerasyttemen bildlich erfasst. Wegen der Verschiedenheit der Strahlen, die in der NUK (ein Gammastrahl) beziehungsweise in der PET (zwei gegenläufige Gammastrahlen) verwendet werden, braucht es wesentlich unterschiedliche Kamerasytteme zum Messen dieser Strahlen: wir wollen sie nacheinander besprechen.

4.4.1 Konventionelle NUK-Kameras

4.4.1.1 Zweidimensionale NUK-Bilder

Ähnlich wie beim Betrachten einer Szene mit unseren Augen, kommen die von den Tracern im Patienten ausgesendeten Gammastrahlen aus allen Richtungen. Ohne eine Optik – z. B. eine Linse – erhält man dann keine scharfen Bilder. Um Bilder zu machen, braucht es Systeme, die die Herkunft der Strahlen so auf einen Detektor werfen, dass durch die Strahlen ein Bild entsteht. Gammastrahlen-Linsen aus Glas oder Plastik, wie in unseren Fotoapparaten, gibt es nicht. Ein anderes Abbildungssystem ist notwendig. Tatsächlich funktionieren NUK- „Linsen“ nicht wie unsere Augen, sondern ähnlich, wie die Facettenaugen von Insekten (Kap. 9). Die Gammastrahlen-Linsen bestehen aus feinsten bienenwabenartig dicht aneinander liegenden länglichen Röhrchen mit Bleiwänden (Abb. 4.2). Am einen Ende sind die Röhrchen offen und am anderen Ende liegen die Detektorelemente. Diese messen die Stärke der jeweils einfallenden Gammastrahlen. Strahlen, die nicht ziemlich genau entlang der Achse eines Röhrchens einfallen, treffen auf die Bleiwand eines Röhrchens und werden dort aufgenommen. So werden nur Strahlen detektiert, die von einem Ort herstammen, der ziemlich genau in der Achse eines bestimmten Röhrchens liegt

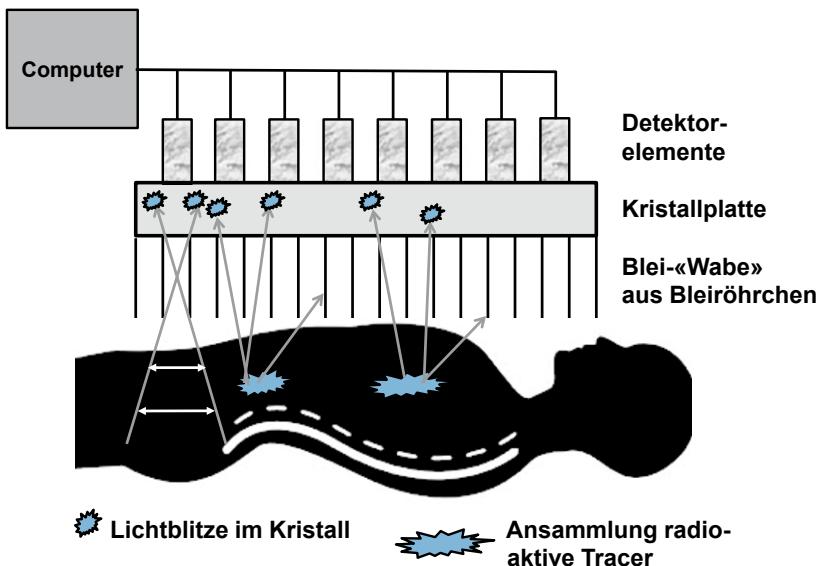


Abb. 4.2 Schematische Darstellung einer NUK-Kamera. Senden radioaktive Atome ihre Strahlen aus dem Patienten auf eine nuklearmedizinische Kamera, werden sie von einer „Gammastrahlen-Linse“ gebündelt (Blei-, „Wabe“). Sie besteht aus vielen aneinander liegenden Bleiröhrchen, im Bild in einem im Schnitt gezeigt. Wenn ein Strahl durch ein Röhrchen hindurchläuft und nicht in einer Bleiwand stecken bleibt, erreicht er die Kristallplatte, in welcher ein Lichtblitz erzeugt wird. Die Lichtblitze werden von fotoempfindlichen Detektorelementen registriert und an einen Computer gesendet (Insekten-Facettenaugen-Prinzip: Kap. 9). Es entsteht ein relativ scharfes Bild. Je weiter weg von der Kameraoberfläche ein strahlender Herd liegt, desto unschärfer wird er abgebildet (weiße Doppelpfeile)

(Abb. 4.2)¹. Der Detektor hinter den Bleiwandröhrchen besteht aus zwei Teilen, einer Kristallplatte und dem eigentlichen Detektor.

1. Gerade den Bleiröhrchen anliegend liegt heute meist ein bis zu $2 \times 40 \times 40$ cm messende grosse Kristallplatte: z. B. ein Kochsalzkristall. Diese ist für Licht durchsichtig. Man nennt die Platte den Szintillator (lateinisch: scintilla = der Funke), denn sie verwandelt eintreffende Gammastrahlen in Lichtblitze. Offensichtlich entstehen viele Lichtblitze im Kristall dort wo viele Gammastrahlen aus dem Patienten eintreffen, wo also im Patienten viele radioaktive Atome während der Aufnahmezeit des Bildes ihre Strahlen ausgesendet haben.
2. Der eigentliche Detektor liegt hinter dem Kristall und vermisst die im Kristall entstehenden Lichtblitze. Im Prinzip könnte der Detektor ein Röntgenfilm sein. Die Lichtblitze können aber mit viel effizienteren Detektorsystemen aufgenommen werden, die den ganzen flächigen Kristall „beobachten“. Bei jedem Licht-

¹ Abbildung 4.2 zeigt etwas Weiteres: Je weiter weg ein strahlender Herd von der Blei- „Wabe“ liegt, desto unschärfer wird er abgebildet.

blitz senden sie einen Strompuls an einen Computer, der zeigt, wo der Lichtblitz stattgefunden hat. Wenn man dann im Computer eine Pixelmatrix hinterlegt, die dem Kristall entspricht, wird jeder Blitz in ein Pixel der Matrix verortet. Nach der Bildaufnahme haben einige Pixel viele, andere weniger Strompulse gezählt. Die Zahlen in den Pixeln stellen dann ein Bild der Lichtblitze dar. Die Zahlen in den Pixeln können einer Grau- oder Farbskala zugeordnet werden, und ein Bild auf dem Bildschirm des Computers ist entstanden.

Technische Entwicklungen haben dazu geführt, dass heute auch digitale Detektoren zur Anwendung gelangen, bei denen die einzelnen Gammastrahlen direkt in eine gepixelte Matrix eines Materials eindringen, und ohne den „Umweg“ über Lichtblitze in einem Kristall Strompulse generieren, die dann wiederum an einen Computer zur Bildspeicherung und -darstellung weitergeleitet werden. Diese Systeme sind dem Aufbau nach modernen digitalen Fotokameras sehr ähnlich (Kap. 12).

4.4.1.2 Nuklearmedizinische Schichtbilder

Ein Szintigramm ist ein Bild ähnlich einem Röntgenbild. Die gemessenen Strahlen sind ähnlich (Gamma- statt Röntgenstrahlen). Sie strahlen vom Inneren des Patienten nach aussen, werden also nicht von aussen durch den Patienten geschickt. Tracer-Ansammlungen aus verschiedenen Körpertiefen überlagern sich in diesen Bildern aber ebenso, wie im Röntgen die Röntgendichten der durchstrahlten Organe überlagern. Genau wie man aus Röntgenbildern aus verschiedenen Richtungen Schichten durch den Patienten rückrechnen kann (Kap. 3), ist dies auch für die NUK-Bilder möglich. Wieder misst man aus vielen Blickrichtungen um den Patienten herum Bilder und rechnet diese Bilder in Schichtbilder quer durch den Patienten um. Das der CT entsprechende nuklearmedizinische Verfahren heisst SPECT (Single Photon Emision Computed Tomography) und die Berechnung der Schnittbilder erfolgt, wie in Kap. 3 beschrieben.

4.4.2 Positronenemissionstomographie

PET-Bilder werden nur als Schichtbilder angefertigt. Dies hat damit zu tun, dass das radioaktive Atom im PET Tracer zuerst ein Positron aussendet. Positronen sind Antimaterieteilchen und nicht stabil (Kap. 11). Sie reagieren sofort mit einem Elektron in der unmittelbaren Umgebung des radioaktiven Atoms und die ganze Masse der beiden Teilchen wird in zwei Gammastrahlen umgewandelt. Diese strahlen in gegen gesetzter Richtung (Abb. 4.3). Ein PET-Scanner besteht aus einem Detektorring, auf welchem viele Detektorelemente angebracht sind. Während der Bildaufnahme wird der Patient schrittweise mit dem Patiententisch durch den Detektorring geschoben ähnlich wie bei der CT (Kap. 3). In der Körperlängsachse hat der Detektor eine Ausdehnung von 15–25 cm und enthält 40–60 aneinander liegende Ringe. In jedem dieser Ringe befinden sich rund 400–600 Detektorelemente, womit ein PET-Scanner gut 30.000 einzelne pixelförmige Bilddetektoren haben kann, die ringförmig um den Patienten herum angeordnet sind. Der Detektionsvorgang ist einfach zu verstehen.

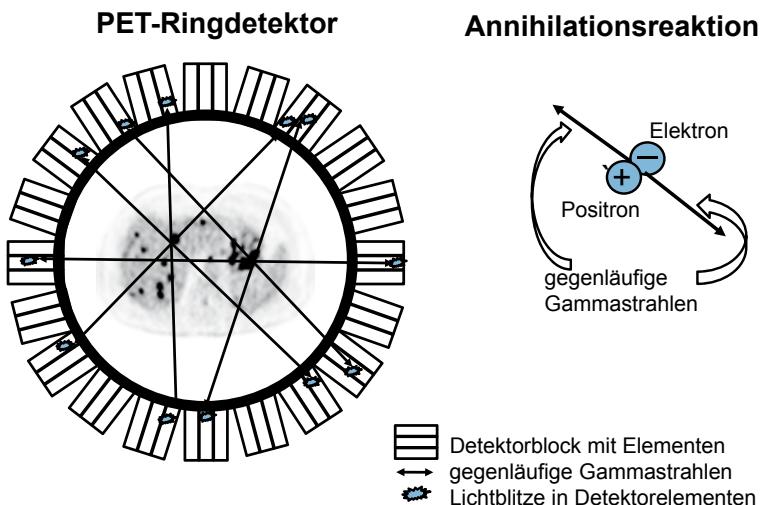


Abb. 4.3 Funktionsprinzip eines PET-Scanners. Eine Ansammlung von radioaktiven Atomen im Patienten (hier ein Schnitt auf Leberhöhe) sendet Positronen aus. Ein Positron findet unmittelbar um seinen Entstehungsort ein Elektron. Beide Teilchen werden bei der Begegnung vernichtet und es entstehen zwei Gammastrahlen, die vom Entstehungsort in entgegengesetzter Richtung wegstrahlen. Diese werden in einem Detektorring um den Patienten mit vielen tausend Detektorelementen detektiert. Wenn praktisch gleichzeitig zwei Strahlen in gegenüberliegenden Detektorelementen detektiert werden, weiß man, dass entlang der Verbindungsgeraden zwischen beiden Detektorelementen ein radioaktiver Zerfall stattgefunden hat

Wenn einer der zwei Gammastrahlen auf einem Detektorelement auftrifft, „warten“ die gegenüberliegenden Elemente darauf, dass sehr kurze Zeit später der gegenläufige Gammastrahl in einem von ihnen registriert wird². Nur solche Ereignisse werden vom Scanner als relevant identifiziert. Die beiden gegenläufigen Gammastrahlen definieren so Verbindungsgeraden durch den Patienten, auf denen das radioaktive Atom des Tracers zerfallen ist. Der Scanner hat also in einer Schicht durch einen Patienten nach einer gewissen Zeit viele solche „Zerfallsgeraden“ registriert. Dort wo sich viele Linien kreuzen, haben offensichtlich viele Zerfälle stattgefunden und es handelt sich um Herde von radioaktiven Tracer-Ansammlungen (Abb. 4.3). Es lassen sich sehr gute PET-Bilder aus den so erhaltenen Datensätzen rückrechnen. Werden ausgedehntere Körperregionen abgescannt, wird nach der Messung einer Körperregion (ca. 2–5 Min.) die Tischplatte mit dem Patienten um 15–25 cm vorgeschoben. Nach 7–12 Verschiebungen der Tischplatte ist der ganze Patient in mehreren hundert Schichten durchgeschichtet.

² Die Lichtgeschwindigkeit ist 300.000 km/sec oder 300.000.000 m/sec. Um eine Distanz von z. B. 60 cm zurückzulegen braucht das Licht also $0.60\text{m}/300.000.000\text{ sec} = 2/100.000.000\text{ sec} = 2\text{ Nanosekunden (10}^{-9}\text{ sec)}$. Moderne PET-Scanner können Zeitdifferenzen von bis zu 300–400 Picosekunden (10^{-12} sec) auflösen, was den Ort, wo die Gammastrahlen entstanden sind, auf etwa 6 cm begrenzt. Dies verbessert zwar nicht direkt, aber indirekt die Bildqualität.

4.4.3 Schwächungsproblem der Gammastrahlen

Gammastrahlen sind die „Geschwister“ der Röntgenstrahlen. Sie werden entsprechend wie diese beim Durchlaufen des Patienten von seinen Organen mehr oder weniger geschwächt. Im Röntgen und CT resultiert die ortsabhängige Schwächung der Röntgenstrahlen in Bildkontrast (Knochen sieht man, weil sie die Röntgenstrahlen stärker abschwächen als z.B. die Leber). Bei Gammastrahlen ist die Schwächung dagegen ein Ärgernis. Sie führt bei NUK- und PET-Untersuchungen dazu, dass Gammastrahlen aus tief im Körper liegenden Tracer-Ansammlungen auf ihrem Weg zur Körperoberfläche des Patienten mehr geschwächt werden, als solche an der Körperoberfläche. Was beim Röntgen den Bildkontrast ausmacht – eben die organabhängige Schwächung der Röntgenstrahlen –, muss in der NUK und im PET nach Möglichkeit aus den Bildern herausgerechnet werden! In den letzten zwei Jahrzehnten hat man gelernt, dieses Ärgernis elegant zu korrigieren. Man braucht dazu am besten CT-Bilder. Die Korrekturen sind vor allem bei PET wichtig, und mit den heute weitverbreiteten Hybridsystemen (SPECT/CT oder PET/CT) sind die CT-Daten für diese Korrektur auch einfach verfügbar. Tatsächlich ist der Siegeszug dieser Hybridverfahren dadurch erklärt, dass CT einerseits eine einfache Zuordnung der radioaktiven Herde zu Organstrukturen ermöglicht und andererseits eben elegant zur Korrektur der Gammastrahlenabschwächung herangezogen werden kann.

4.5 Die Hybridverfahren SPECT/CT, PET/CT und PET/MR

Das Wort Hybrid bedeutet: zwei verschiedene Dinge integrieren. In ein Hybridauto sind ein Elektro- und ein Benzimotor integriert, in der medizinischen Bildgebung integrieren heutige Hybridgeräte ein molekulares Verfahren, also NUK oder PET und ein vorwiegend anatomisches Verfahren, also CT oder MR.

Die Vorteile von Hybridsystemen, insbesondere der PET/CT sind so offensichtlich, dass sich das Hybridverfahren PET/CT völlig durchgesetzt hat: es gibt keinen PET-Scanner ohne integrierten CT mehr zu kaufen. Wie wir gesehen haben, bilden NUK und PET Stoffwechselvorgänge ab und damit haben entsprechende Bilder oft sehr wenig anatomische Information. In einer PET-Untersuchung z.B. mit radioaktivem Zucker (Abb. 4.1) ist es nicht einfach, einen Tumorherd genau dem Organ oder Gewebe zuzuordnen, in dem es sich befindet. Ob aber ein Ableger (Metastase) eines Darmkrebses in der Leber liegt oder gerade daneben in einem Lymphknoten, ist absolut entscheidend für die Behandlung. Im ersten Fall kann man operieren, im zweiten Fall bringt eine Operation nichts mehr.

Zum Vorteil der richtigen Zuordnung von in der NUK oder der PET gesehenen Strukturen kommt dazu, dass eben mit der CT die normale Abschwächung der Gammastrahlen durch den Patienten (s.o.) elegant rechnerisch korrigiert werden kann. PET/CT-Bilder sind für die Ärzte damit präziser zu interpretieren. Ähnliches gilt für SPECT/CT. Das neuste Hybridverfahren ist PET/MR. Anwendungsgebiete von PET/MR werden heute mit vielen vergleichenden Studien definiert. Während dank

des MR im PET/MR die Zuordnung von radioaktiven Herden im Patienten zu Organen ebenfalls einfach ist, kann mit MR-Daten die Abschwächung der Gammastrahlen nicht einfach korrigiert werden. MR-Bilder sind keine Röntgen- (Gammastrahlen-) Abschwächungsbilder, sondern stellen magnetische Körpereigenschaften dar (Kap. 5).

4.6 Zusammenfassung

NUK und PET verwenden radioaktiv markierte Moleküle, sog. Tracer. Diese erlauben es, Stoffwechselprozesse im Menschen darzustellen, bei denen ein solches Molekül eine Rolle spielt. Beispielsweise kann Zucker radioaktiv markiert werden und zeigt dann – nachdem er dem Patienten eingespritzt wurde –, wo im Körper Zucker verbraucht wird. NUK- und PET-Scanner sind so gebaut, dass sie die Verteilung der eingespritzten Radioaktivität im Körper messen können. Da wir keine Radioaktivität in uns haben, und einzelne radioaktive Strahlen mit den Scannern gemessen werden können, sind NUK und PET Verfahren sehr empfindlich. Sie können Prozesse im Körper darstellen, die mit keinem anderen Verfahren sichtbar gemacht werden können.

Während heute NUK vor allem im Herzen und dem Skelett zur Darstellung von Krankheiten, wie Herz durchblutung oder von Knochenmetastasen zum Einsatz kommt und in seinen Anwendungen eher rückläufig ist, ist PET das am raschesten wachsende Verfahren in der medizinischen Bildgebung. Seine wichtigste Anwendung ist die Suche von Tumorherden (Metastasen) bei Patienten mit „Krebs“. Zunehmend werden PET-Untersuchungen des Herzens und des Hirns von Bedeutung, denn PET kann die Herz durchblutung quantitativ ausmessen und z.B. frühzeitig Ablagerungen im Hirn erkennen, die mit der Alzheimer-Krankheit einhergehen.

PET ist ein kostspieliges Verfahren. Die Untersuchung selbst kostet in der Schweiz ca. 1500–2000 CHF, die radioaktiv markierten PET-Tracer je nach Typ zusätzlich 350–2000 CHF. Damit liegen die Gesamtkosten einer PET/CT-Untersuchung bei 2000–4000 CHF, für eine PET/MR-Untersuchung bei 2500–4500 CHF, eben je nach Tracer. Die nuklearmedizinischen Verfahren sind kostengünstiger, solange nicht im Schnittbildmodus (SPECT) untersucht wird. Eine Szintigraphie (ein zweidimensionales NUK-Bild) kostet ca. 200–500 CHF, je nach Typ, eine SPECT-Untersuchung 600–1800 CHF. Die Kosten für die NUK-Tracer liegen zwischen 50 und 1300 CHF, wieder je nach Tracertyp.

Der Mensch als Radiosender und -Empfänger

MR-, MRT- oder MRI-Systeme (für **Magnet-Resonanz-Tomographie** oder **Imaging**) sind komplexe bildgebende Systeme. Ich habe das Kapitel so strukturiert, dass Sie schrittweise die Komplexität des Verfahrens erfassen können und zeige Analogien zu uns vertrauten Phänomenen auf. Diese sollen als Gedankenbrücken helfen. MR-Systeme sind kostspielige Radiosender und -Empfänger, die in einem starken Magnetfeld funktionieren, in welchem auch der Patient liegt. Dank den in den Patienten gesendeten und aus dem Patienten empfangenen Radiosignalen ist MR in der Lage, Bilder aus dem Körperinnern herzustellen.

MR-Systeme bestehen meist aus einer horizontalen Röhre mit viel Technik um die Röhre herum. In der Röhre herrscht ein starkes Magnetfeld. Wenn Sie eine MR-Untersuchung haben, werden Sie zuerst gebeten, sich umzuziehen und es wird sichergestellt, dass Sie keine Metallteile in sich tragen, denn nicht jedes Metall verhält sich im Magnetfeld harmlos. Dann wird allerlei in Plastik verpackte Technik auf Sie gelegt oder Ihr Kopf in eine helmähnliche Struktur eingebracht: Es sind dies die MR-Signal-Sende- und Empfangsspulen, die oft Oberflächenspulen genannt werden. So ausgerüstet werden Sie schliesslich in die Röhre geschoben. Während der Untersuchung hören Sie repetitives zum Teil sehr lautes Hämmern. Es röhrt davon her, dass während einer MR-Untersuchung laufend zusätzliche Magnetfelder eingeschaltet werden. Um den Lärm erträglicher zu machen, dürfen Sie einen Gehörschutz anziehen oder man spielt Ihnen Musik in einen Kopfhörer. Es kann Ihnen während der Untersuchung auch etwas warm werden. Wenn das immer wieder ansetzende Hämmern aufhört, ist ein Untersuchungsteil fertig. Eine MR-Untersuchung besteht aus mehreren solchen Teilen. Oft erhalten Sie auch Kontrastmittel eingespritzt (Kap. 7). Wie man von Ihnen in der Röhre dank all dem Krach und der Technik darum herum Bilder macht, lernen Sie im Folgenden Schrittweise verstehen.

Wie bei den anderen bildgebenden Verfahren werden beim MR-Verfahren Wellen benutzt, um Information über Krankheiten aus dem Körperinnern zu erhalten, und ebenso wie im Röntgen/CT und NUK/PET werden im MR Wellen verwendet, die für uns Menschen unsichtbar sind. Die verwendeten Wellen sind aber nicht Röntgen- oder Gammastrahlen, sondern Radiowellen. Radiowellen sind nicht die Töne, die

wir am Radio hören, denn was aus dem Radio kommt sind zwar auch Wellen, aber Schallwellen (Kap. 6). Das Wort Radio kommt vom Lateinischen Strahl, und Wellen und Strahlen werden oft gleichbedeutend verwendet. Radio ist natürlich auch im Wort Radio-logie enthalten: Strahlen-kunde.

Radiowellen sind ebenfalls elektromagnetische Wellen, haben aber viel längere Wellenlängen als sichtbares Licht und noch viel längere Wellenlängen als Röntgen- und Gammastrahlen. Durchstrahlt man einen Menschen mit Radiowellen¹, wird ein Teil wieder zurückgestrahlt. Die rückgestrahlten Wellen werden dann im MR empfangen, denn sie erhalten die Information, die wir brauchen, um Bilder zu machen. Ein anderer Teil der Wellen/Strahlen bleibt im Körper stecken und wird dabei in Wärme umgewandelt. Das kann ein Patient spüren, wenn er in der MR-„Röhre“ liegt: es wird dem Patienten etwas warm. Weitere Informationen über Wellen/Strahlen und das „Sehen“ von Wellen/Strahlen finden Sie im Kap. 9.

5.1 Von Atomkernen, Kreiseln und Magnetfeldern

Das MR-Verfahren basiert auf der Entdeckung, dass sich gewisse Atome mit ihren Kernen in grösseren Gruppen ähnlich wie Kreisel verhalten. Haben Sie schon einmal mit einem Kreisel gespielt? Einen Kreisel versetzt man in Rotation um die eigene Achse und gibt ihm damit einen sog. Drall. So lange der Kreisel rotiert, steht er aufrecht auf seiner Spitze und kippt (überraschenderweise) nicht um. Wenn man die Achse des aufrecht (senkrecht) stehenden und rotierenden Kreisels seitlich mit dem Finger antippt, fällt er ebenfalls nicht um. Während der Kreisel rasch um seine Achse rotiert, beginnt seine Achse nun langsam um die Senkrechte zu kreisen, oder wie wir es im Weiteren nennen wollen: zu „tanzen“. Spielen Sie einmal mit einem Kreisel!

Das MR benützt die Eigenschaft von Atomgruppen, sich ähnlich wie Kreisel zu verhalten. Dieses kreiselähnliche Verhalten kann nicht an einzelnen Atomen und ihren Kernen beobachtet werden. Es tritt nur auf, wenn man Atome in grossen Gruppen von Tausenden betrachtet. Sie wissen, dass auch bei uns Menschen Massenphänomene auftreten, die beim einzelnen Menschen nicht zu beobachten sind, z. B. im Fussballstadion „die Welle“. Ein einzelner kann keine „Welle“ aufbauen, erst wenn Tausende von Leuten im Stadion anwesend sind, kann eine „Welle“ im Stadion entstehen, indem die einen aufstehen während die anderen sich hinsetzen.

Das wichtigste Atom für das MR-Verfahren ist das Wasserstoffatom mit seinem Atomkern, denn der Mensch besteht etwa zu 70 % aus Wasserstoffatomen und ihren Kernen. Für das Verständnis von MR sind nur die Wasserstoffkerne wichtig (Kap. 10 und 11). Grosse Gruppen von Wasserstoffkernen zeigen das kreiselähnliche Verhalten sehr gut. Sogar in einem Kubikmillimeter eines Menschen hat es schier unvorstellbar viele Wasserstoffkerne, und so sind auch in kleinsten Submillimeterbereichen unseres Körpers sehr viele Wasserstoffkerne vorhanden. Wir können uns also vorstellen, wir seien vollgepackt mit Fussballstadien, in denen die Wasserstoffkerne

¹ Man könnte auch von Radiostrahlen sprechen, aber das ist nicht üblich und wäre natürlich etwas wie ein „weisser Schimmel“, weil „radio“ „ich strahle“ heisst.

„Welle“ spielen, oder sich eben ähnlich wie Kreisel verhalten. Wir wollen grosse Gruppen von Wasserstoffkernen „Magnetkreisel“ nennen. Wenn Magnetkreisel in einem starken Magnetfeld ausgerichtet werden, können wir sie mit Radiowellenpulsen zum „Tanzen“ um die Richtung des Magnetfeldes herum anregen, genau wie wir mit einem Finger einen rotierenden Kreisel zum „Tanzen“ um die Senkrechte bringen können.

Legen wir also einen Patienten in ein starkes Magnetfeld, dann richten sich die unendlich vielen Magnetkreisel in seinem Körper aus. Dies geschieht parallel zum Magnetfeld, das entlang der Längsachse der Röhre herrscht, ähnlich wie ein sich drehender Spielzeugkreisel senkrecht zum Schwerefeld der Erde stehen bleibt. Das „Sich im Magnetfeld Ausrichten“ kennen Sie auch von Kompassnadeln und so kann man sich die Magnetkreisel auch als Kompassnadeln vorstellen. Wenn Radiowellenpulse die ausgerichteten Magnetkreisel zum „Tanzen“ bringen, zeigen die Magnetkreisel nicht mehr in die Richtung des Magnetfeldes, sondern tanzen um diese Richtung herum. Gleichzeitig – und anders als bei einem gewöhnlichen Kreisel – beginnen die Magnetkreisel auch während des Tanzens zu „singen“, sie strahlen nämlich selbst wieder Radiowellen ab. Die aus dem Körper des Patienten abgestrahlten Radiowellen werden im MR mit einem Radioempfänger empfangen. Während ihres „Singens“ beruhigen sich die Magnetkreisel langsam wieder: Ihr Tanz wird weniger wild, bis sie am Schluss brav wieder entlang der Magnetfeldachse ausgerichtet sind. Nun haben verschiedene Organe und auch z. B. Tumorherde verschiedene magnetische Eigenschaften. Diese magnetischen Eigenschaften beeinflussen Tanz- und Gesangsverhalten der Magnetkreisel stark. Wie lange die Magnetkreisel ihre Tänze vollführen, hängt also stark vom Organ oder dem Gewebe des Patienten ab, in dem sie sich befinden: In der grauen Hirnsubstanz sind diese Zeiten anders als in der weissen Hirnsubstanz, in der Leber sind sie anders als im Fettgewebe. In Weichteilen sind die Zeiten im Bereich von Millisekunden bis Sekunden, im Knochen im Bereich von Mikrosekunden. Entsprechend können wir aus den verschiedenen Gesängen der Magnetkreisel in verschiedenen Organen in der MR-Bildgebung sehr kontrastreiche und damit sehr aufschlussreiche Bilder aus dem Körperinnern anfertigen. Im Folgenden stellen wir dar, wie man im MR mit „tanzenden“ und „singenden“ Magnetkreiseln Bilder aus dem Körperinnern gewinnen kann. Dann lernen wir die medizinischen Anwendungen von MR kennen, um abschliessend das Verständnis von MR noch etwas zu vertiefen.

5.2 Die MR-„Röhre“ und die Technik um sie herum

In der MR-„Röhre“ (wie man im Volksmund sagt), herrscht das Magnetfeld, das die Magnetkreisel im Patienten entlang der Röhrenachse ausrichtet. Das MR-System ist also zuerst einmal ein Magnet. Wenn Sie ein MR-Gerät von aussen besichtigen, sehen Sie ein voluminoses Gerät. Das Loch in der Röhre hat einen Durchmesser von 60–70 cm und die Röhrenlänge ist etwa 150–200 cm. Das Gerät um die Röhre wirkt voluminos, weil um die Röhre viel Technik angebracht werden muss. Tatsächlich ist es am einfachsten, ein geeignetes starkes Magnetfeld in einer Röhre zu erzeugen und

darum sind die meisten MR-Geräte röhrenförmig. Magnetfelder sind unsichtbar, Sie sehen in der Röhre also nichts als Luft. Aber Achtung! Wenn Sie mit einem eisernen Gegenstand in die Nähe des Magnetfeldes kommen, kann dieser mit unheimlicher Kraft in die Röhre gerissen werden, sodass Sie ihn nicht mehr halten können. Darum sind für Patienten und Personal im Umgang mit MR Vorsichtsmassnahmen notwendig, wie z. B. das Umkleiden des Patienten. Es dient dazu sicherzustellen, dass der Patient auch ja kein Metall auf sich trägt. Viele ältere Menschen haben heute aber auch Metallgegenstände im Körperinnern, wie künstliche Hüft- oder andere Gelenke. Diese Patienten können ohne Probleme untersucht werden, denn es wird nicht-magnetisches Metall verwendet. Aber bei gewissen in den Körper eingebauten Geräten, die elektrisch leitende Drähte haben, wie Herzschrittmacher und ähnliches, ist Vorsicht geboten. Also: wenn immer Sie eine MR-Untersuchung haben und einen Fremdkörper in sich tragen: melden Sie dies dem Untersuchungspersonal vor der Untersuchung!

Das Magnetfeld entlang der Röhrenachse ist etwa 10.000-mal stärker als das Erdmagnetfeld². Legen wir Sie nun in die Röhre, werden Sie magnetisiert (die Magnetkreisel richten sich aus). Sie spüren von der Magnetisierung allerdings nichts. Eine Magnetisierung hat auf unseren Körper bis zu höheren Magnetfeldstärken keine oder wenig wahrnehmbare Effekte. Dies steht im Gegensatz zum Elektrisieren, von dem Sie wissen, dass es gefährlich sein kann. Gefährliche Effekte eines Magnetfeldes haben wir beschrieben.

Nun zur Technik um die MR-„Röhre herum. In den dicken Wänden um die Röhre herum befinden sich da einmal kilometerlange, elektrisch leitende Drähte, die um die Röhrenachse gewickelt sind. In den Drähten fliesst ein starker elektrischer Strom, der das Magnetfeld erzeugt. Ein starker Strom in einem Draht heizt diesen ohne physikalisch-technische Kniffs stark auf. Schauen sie sich den Glühwendel in einer Glühbirne an, dann wissen Sie, was ich meine. Die Drähte beginnen zu glühen! Würde man ein MR-Magneten einfach mit normalen elektrischen Drähten betreiben, müsste erstens permanent neuer Strom eingespeist und zweitens mit Kühlsystemen viel Wärme abgeführt werden, um ein konstantes Magnetfeld aufrecht zu erhalten. Die Elektrizitäts- und Kühlkosten eines so gebauten Magneten für eine MR-Untersuchung wären sehr hoch und ein MR-System würde laufend so viel Strom verbrauchen wie hunderte von Haushalten.

² Die Magnetfeldstärke wird mit der Einheit „Tesla“ gemessen, benannt nach dem berühmten kroatischen Physiker Nikola Tesla (1856–1943). Meist haben heute MR-Geräte Magnetfeldstärken von 1,5 oder 3 Tesla (T), wogegen das Erdmagnetfeld eine Stärke von etwa 20 Mikrotesla hat, also rund 10.000 x schwächer ist. Im 3-T-MR-Magneten klagen einige Patienten, es werde ihnen etwas schwindlig, wenn man sie in den Magneten schiebt und auch das Wärmegefühl ist bei einer MR-Untersuchung im 3-T-Magneten ausgeprägter als bei kleineren Feldstärken.

Übrigens: Als das MR in den 1980er Jahren entwickelt wurde, waren die Feldstärken aus technischen Gründen noch tiefer und bei 0,15–1,5 T. Es wird berichtet, dass sich an einer wissenschaftlichen Konferenz zum Thema MR in den frühen 80er Jahren ein Vertreter der Feldstärke von 0,35 T und ein Vertreter der Feldstärke von 1,5 T einen Faustkampf lieferten. Dies zeigt Ihnen, dass auch in der Wissenschaft bei fehlenden sachlichen Argumenten die Gewalt überhand nehmen kann. Es ist noch heute so, dass man mit Fug und Recht darüber diskutieren kann, welche Stärke des Magneten für gewisse Anwendungen die beste ist.

5.2.1 Supraleitung

Zum Glück kann das Aufheizen der Drähte dank des physikalischen Phänomens der Supraleitung gelöst werden. Wenn man die kilometerlangen Drähte aus speziellen Metallen fertigt, sie in eine hervorragend thermisch isolierte Umgebung, also eine Superthermosflasche legt und mit einer Supereismaschine sehr weit hinunterkühlt, nämlich gegen die minus 260–270° Celsius, werden sie „supraleitend“. Der Strom in einem supraleitenden Draht fliesst ohne elektrischen Widerstand und heizt so den Draht nicht mehr. Wir müssen den Strom nur anfangs in die supraleitenden Drähte einspeisen. Er fliesst dann immerwährend und wird nicht „verheizt“. In einem supraleitenden MR-Magneten fliesst also immer ein sehr starker Strom und das Magnetfeld ist damit immer eingeschaltet. Die oben beschriebenen Gefahren des Magnetfeldes sind also nicht nur vorhanden, wenn ein Patient gerade untersucht wird, sondern immer! Der grösste Teil der dicken Wand um die ganze Länge der MR-Röhre besteht aus der Superthermosflasche, welche die supraleitenden Drahtwindungen um die Röhre enthält.

5.2.2 Radiosender, -Empfänger und Zusatzmagnetspulen

Es ist aber noch weitere Technik um die Röhre herum eingebaut. Gerade der sichtbaren Aussenwand der MR-Röhre anliegend sind Radioantennen angebracht, welche Radiowellen in den Patienten senden, um die Magnetkreisel zum „Tanzen“ zu bringen, und Empfangsantennen, die das „Singen“, also das Abstrahlen von Radiowellen der Magnetkreisel empfangen können. Für präzise Auflösung werden oft Empfangsantennen direkt auf den Patienten gelegt: die oben beschriebenen „Oberflächenspulen“. Weiter befinden sich in der Röhrenwand noch elektrische Leiterschleifen. Dank starken repetitiven Stromstössen durch die Leiterschleifen können kurzzeitig zusätzliche Magnetfelder erzeugt werden. Mit diesen kann das Hauptmagnetfeld über dem Patienten ortsabhängig verändert werden und dank dieser Zusatzmagnetfelder können wir feststellen, aus welchen Körperregionen der Gesang kommt (s.u.)³.

5.3 Bilder von tanzenden und singenden Magnetkreiseln

Um Bilder im MR aus dem Körperinnern zu erhalten, stören wir die entlang des Magnetfeldes ausgerichteten Magnetkreisel: wir regen sie zum „Tanzen“ an. Für eine gegebene Stärke des Magnetfeldes kann man dies nur mit Radiowellen einer einzigen, genau gegebenen Wellenlänge, oder gleichbedeutend: mit einer einzigen Fre-

³ Das Ein- und Ausschalten der starken Stromstöße ist für den Lärm verantwortlich, der bei der Untersuchung entsteht. Wenn nämlich ein Stromstoss durch einen elektrischen Leiter fliesst, der in einem starken Magnetfeld (in diesem Fall eben unser oben beschriebenes Hauptmagnetfeld) liegt, dann rütteln wiederholt starke Kräfte an diesem Leiter.

quenz (Kap. 9) bewerkstelligen⁴. Sie wissen, dass Sie einen FM-Sender am Radio wählen, indem sie seine Sendefrequenz wählen. Ein Radiosender sendet auf einer bestimmten Frequenz und beim FM-Radio liegen diese Frequenzen zwischen etwa 87 und 107 MegaHertz (MHz). Bei einem MR-System mit einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla können die Kreisel nur zum Tanzen angeregt werden, wenn man eine Radiowelle mit genau der Frequenz von 63,9 MHz in den Patienten einstrahlt, bei einer Feldstärke von 3 Tesla nur genau bei 127,8 MHz.

Wir senden also einen kurzen Radiowellenpuls (bei einem 1,5 Tesla System von 63,9 MHz) in den Patienten in der Röhre. Die Magnetkreisel beginnen, ihre Tänze zu vollführen, um sich dann zu beruhigen und wieder entlang des Hauptmagnetfeldes zu liegen. Und wie gesagt, „singen“ die tanzenden Magnetkreisel, während sie sich wieder beruhigen und entlang der Achse des Hauptmagnetfeldes ausrichten. Sie strahlen selbst Radiowellen ab, und dies wieder mit genau der Wellenlänge oder Frequenz, die dem Magnetfeld entspricht, in welchem sie sich befinden.

5.3.1 Schichtwahl

Regen wir die Magnetkreisel zum Tanzen und Singen an, kommt der Gesang aus dem ganzen Körperteil des Patienten, der im Magnetfeld liegt. Um Bilder zu machen, müssen wir feststellen, woher genau die abgestrahlten Radiowellen kommen. Hierzu verwenden wir die oben erwähnten zusätzlichen Magnetfelder. Das erste Zusatzfeld wird während des Radiowellenpulses entlang der Körperachse des Patienten eingeschaltet. Weiter kopfwärts herrscht dann z. B. ein leicht stärkeres-, weiter gegen die Füsse ein leicht schwächeres Magnetfeld. Wir präparieren den Patienten quasi wie ein Klavier (Abb. 5.1). Wenn wir eine Taste auf der Klaviatur anschlagen, ertönt genau ein Ton, und wenn wir einen Radiowellenpuls einer bestimmten Wellenlänge (Frequenz) in den Patienten senden, regt dieser nur genau die Magnetkreisel in einem einzigen interessierenden Querschnitt (einer „Salamischeibe“) im Patienten zum Tanzen an. Regen wir mit einer etwas höheren Frequenz des Radiowellenpulses an, werden nur Magnetkreisel in einer Schicht weiter gegen den Kopf zum Tanzen angeregt, brauchen wir eine tiefere Frequenz, wird eine Schicht näher den Füßen angeregt. Die Analogie zum Klavier ist offensichtlich, wo ein Anschlag rechts auf der Klaviatur zu einem hohen-, ein Anschlag links zu einem tieferen Ton führt.

Ist der kurze anregende Radiowellenpuls vorbei, der die Magnetkreisel zum Tanzen bringt, kommt der Gesang nur noch von Magnetkreiseln aus der angeregten Schicht. Wir haben also schon in einer der drei Raumdimensionen – nämlich in einem Querschnitt durch den Patienten – geortet: Wir wissen, aller „Gesang“, den wir mit dem Radiosender empfangen, kommt aus einer spezifisch ausgewählten Patientenschicht.

⁴ Die Frequenz einer Welle besagt, wie viele Wellenberge (oder gleichbedeutend: Wellentäler) eine Welle innerhalb einer Sekunde hat. Radiowellen haben Frequenzen im Megahertz-Bereich, also Millionen von Wellenbergen pro Sekunde. Licht hat Milliarden von Millionen Wellenbergen pro Sekunde und Röntgen- und Gammastrahlen noch viel viel mehr!

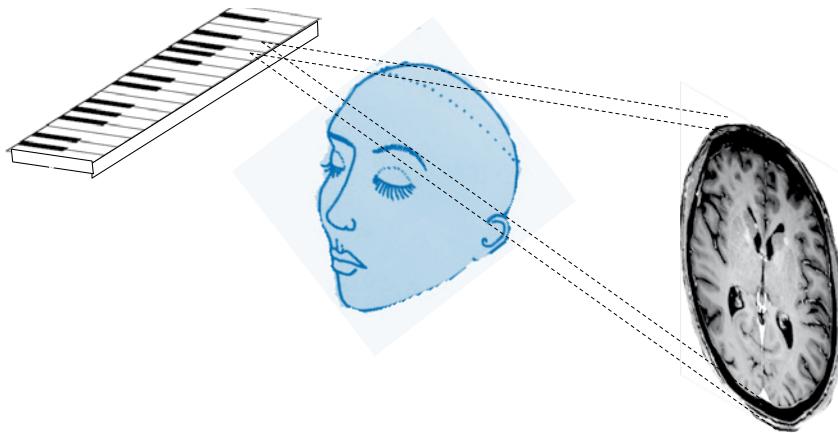


Abb. 5.1 MR-Schichtwahl im Patienten. Eine Schicht wird im MR-Verfahren so gewählt, dass nur Magnetkreisel in einer einzigen Schicht – hier durch den Kopf des Patienten – angeregt werden. Beim Klavier sind die Töne von links nach rechts so präpariert, dass links die tieferen und rechts die höheren Töne liegen. Ähnliches geschieht im Patienten. Durch Anlegen eines kurzeitigen Magnetfeldes entlang des Patienten ist das Magnetfeld scheitelnahe grösser, halsnahe kleiner. Damit sind die Magnetkreisel im Patienten so präpariert, dass je kürzer die Radiowellenlängen sind, desto näher liegen die angeregten Schichten gegen den Scheitel des Patienten

5.3.2 Ortung in der Schicht

In einem zweiten Schritt schalten wir während des „Singens“ der Magnetkreisel aus der angeregten Schicht erneut ein Zusatzmagnetfeld ein. Dieses wird quer statt längs zur Körperachse des Patienten gelegt, was die Magnetkreisel in der Schicht zwingt, verschieden schnell, also mit leicht verschiedenen Frequenzen zu „tanzen“ und zu „singen“. Warum? Erinnern Sie sich, die Magnetkreisel tanzen und singen nur genau mit derjenigen Frequenz, die der dort herrschenden Magnetfeldstärke entspricht (Abb. 5.2). Wenn wir also ein von links nach rechts sich änderndes Magnetfeld über der untersuchten Schicht einschalten, wird diese quasi in nebeneinanderliegende „Stäbe“ aufgeteilt. In jedem der Stäbe herrscht das gleiche Magnetfeld. Der aus der so präparierten Schicht kommende „Gesang“ ist dann eine Mischung von Wellenlängen / Frequenzen aus den verschiedenen Stäben. Wir haben die Gesänge der Magnetkreisel in vertikalen „Stäben“ durch den Patienten „Frequenz-codiert“ und ihn quasi wieder wie ein Klavier „präpariert“, denn beim Klavier wissen wir, dass tiefe Töne von den Klaviertasten links und hohe Töne von Tasten rechts kommen. Das Tongemisch aus allen singenden Stäben wird digitalisiert und wir können es dann mit einem Computer in seine Komponenten zerlegen. Wir wissen dann, wie stark das Summensignal aus jedem einzelnen Stab in der Körperschicht ist; in Analogie zum Klavier, wie stark die verschiedenen Klaviertasten im Akkord angeschlagen wurden. Beim CT haben wir erfahren, dass wir beim Durchgang eines Röntgenstrahls die Summe der gesamten Strahlenschwächung durch einen solchen Körper-

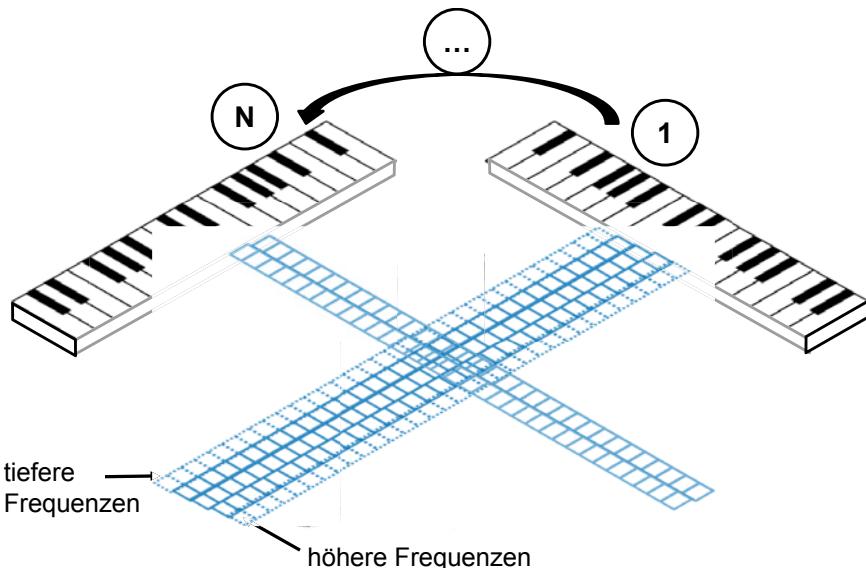


Abb. 5.2 Anregung von verschiedenen orientierten Stäben in einer Schicht. Wurde eine Körperschicht ausgewählt – hier als Hirnschicht dargestellt –, kann man die aus der Schicht zurückkommenden MR-Signale einzelnen Stäben zuordnen, wenn man den Patienten beim Empfang der Radiowellensignale mit zusätzlichen Magnetfeldern „präpariert“. Die Stäbe durch die linke Seite des gezeigten Hirnschnitts liefern Signale mit tiefen Frequenzen, analog zu tiefen Tönen im Klavier, Stäbe durch die rechte Seite des Hirnschnitts Signale mit hohen Frequenzen, analog zu hohen Tönen auf dem Klavier. Wir drehen dann das beim „Singen“ angelegte Magnetfeld schrittweise, sodass Stäbe zuerst schräg (Position...), dann von rechts nach links (Position N) und schliesslich wieder von oben nach unten durch den Patienten gerichtet sind. Bei jeder Richtung des Zusatzmagnetfeldes wird wieder gemessen. Der Prozess läuft analog ab, wie auch in Abbildung 3.2 dargestellt

„Stab“ messen. Im MR messen wir keine Schwächung, sondern die Summe des „Gesangs“ aller Magnetkreisel in einem durch eine Patientenschicht gedachten Stab.

Um die „Gesänge“ der Magnetkreisel einzelnen Stabwürfelchen (Voxeln) (Abb. 5.2) zuzuordnen und damit dann auch innerhalb der Schicht jedem Bildelement einen Wert zuordnen zu können, wiederholen wir den beschriebenen Vorgang mit einer kleinen Ausnahme erneut: Erstens wird wieder ein gleich gearteter Radiowellensignal eingestrahlt unter Einschalten eines Zusatzmagnetfeldes entlang der Körperachse des Patienten. Es wird damit wieder die gleiche Schicht im Patienten und nur diese angeregt. Zweitens empfangen und analysieren wir die vom Patienten zurückgestrahlten Signale während wir wieder ein Zusatzmagnetfeld anschalten, dieses Mal aber nicht genau von links nach rechts, sondern etwas von links oben nach rechts unten. Und so wiederholen wir den ganzen Prozess hunderte von Male, nur dass wir jedes Mal das entsprechende Zusatzmagnetfeld etwas drehen, bis es von oben nach unten läuft und weiter, bis es wieder von links nach rechts angelegt ist. Nach vielen Repetitionen besteht das Messresultat dann am Schluss aus sehr vielen Summen von Radiowellensignalen, welche aus den Stäben in der ausgewählten

Körperschicht des Patienten stammen. Die Stäbe wurden anfänglich horizontal (Abb. 5.2) und dann verschieden schräg durch die Schicht gelegt. Aus den erhaltenen Daten kann man analog zur CT ein Schnittbild durch den Patienten rechnen (Kap. 3). Weitere Schichten erhält man durch Verschieben des Patienten auf dem Untersuchungstisch entlang der Körperlängsachse. Sind die Daten einer Schicht einmal im Computer vorhanden – es sind Signalstärken in einzelnen Bildelementen (Voxeln) –, können diese Signalstärken Grau- oder Farbstufen auf einem Bildschirm zugeordnet und die Bilder so betrachtet werden. MR-Bilder bilden Signalstärken von Radiowellen ab, die von an einem Ort singenden Magnetkreiseln ausgestrahlt wurden.

Wir können die Untersuchung beschleunigen, in dem wir – während wir die Magnetkreisel in einer Schicht tanzen und singen lassen – andere Schichten mit Radiowellenpulsen anregen. Wenn nämlich der Radiowellenpuls mit einer anderen Wellenlänge / Frequenz in den Patienten gestrahlrt wird, wird eine andere Schicht kopf- oder fusswärts angeregt. Es ist, wie wenn man eine andere Taste am Klavier anschlägt (Abb. 5.1). Man kann so ganze Schichtstapel rasch hintereinander anregen und dann fast gleichzeitig ausmessen. Trotzdem dauert die gesamte MR-Untersuchung eher lange und typischerweise kaum weniger als 30 Minuten.

5.4 Medizinische Anwendungen des MR-Verfahrens

MR-Systeme sind heute weit verbreitet (weltweit gibt es über 15.000 Systeme), und bei der Aufklärung von Krankheiten vor allem des Hirns, des Halses, der Leber, des kleinen Beckens, der Muskeln, Knochen und Gelenke sind sie von grosstem Nutzen. Notfalluntersuchungen sind nicht unbedingt die Sache des MR; oft wird eine CT vorgezogen, da der Untersuchungsablauf rascher, weniger komplex und bei Notfällen einfacher ist.

5.4.1 Hirn, Gesicht und Hals

Bei nichtakuten Hirnerkrankungen ist eine MR-Untersuchung heute die Methode der Wahl. Bei geringstem Kopfweh fordern die Patienten ein MR, auch wenn meist nichts zu sehen ist, denn gelegentliches Kopfweh, das nicht stetig stärker wird, ist normal. Wichtig ist MR bei den eher seltenen Hirntumoren, bei Gefässerkrankungen und Gefäss-Missbildungen des Hirns, bei der Diagnose und Kontrolle von multipler Sklerose und anderen entzündlichen Hirnerkrankungen. Bei degenerativen Hirnerkrankungen wie der Alzheimer-Krankheit zeigt MR zwar erst spät Krankheitseffekte, aber eine Untersuchung ist wichtig, um bei Auftreten von Gedächtnisschwächen andere Ursachen auszuschliessen.

5.4.2 Lungen, Herz und Gefäße

Erkrankungen der Lunge werden am besten mit CT abgeklärt. Bei Krankheiten der Weichteile des Brustkorbes kommt MR häufig zum Einsatz und auch bei der Beurteilung von Krankheiten des Herzens hat MR einen gewissen Stellenwert. Die Beurteilung der Herzkratzgefässe (Koronararterien) ist Sache des MR nicht, aber Missbildungen des Herzens, Veränderungen der Herzwände, des Flussmusters in den Herzkammern, grossen Herzgefäß und auch der Herzdurchblutung können mittels MR gut dargestellt werden. Eine wichtige Rolle spielt die MR bei der Beurteilung von Gefäßleiden auch der herzfernen grossen Gefäße in allen Körperteilen. Es können anatomische Veränderungen, aber auch Fließmuster in den grossen Gefäßen dargestellt werden. Bei Verengungen im Rahmen von Arteriosklerose, Gefäßentzündungen und -Missbildungen liefert MR wichtige Informationen zur Herkunft der Krankheit.

5.4.3 Oberbauch und Becken

Die Stärke des MR ist der gute Kontrast zwischen verschiedenen Organen und damit deren Abgrenzung von einander und von z. B. Tumoren. Daher wird MR im Bauch wahlweise mit CT bei vielen Erkrankungen der Bauch- und Beckenorgane eingesetzt. Bei Tumoren der Leber, der Bauchspeicheldrüse und des gesamten Verdauungstraktes (Speiseröhre, Magen, Darm) ist MR oft die definitive Untersuchung, die über den Sinn eines chirurgischen Eingriffs entscheidet. Bei Erkrankungen der Nieren, der Harnwege und der Blase wird MR vielfach angewendet. Für viele Erkrankungen der Beckenorgane ist MR ein besseres Verfahren als CT. So ist bei der Beurteilung eines Prostatakrebses die MR-Untersuchung unabdingbar und das gleiche gilt bei gutartigen und bösartigen Erkrankungen der Gebärmutter, des Gebärmutterhalses (Cervix) und der Scheide. Ebenso wird MR häufig bei Verdacht auf Brustkrebs eingesetzt.

5.4.4 Muskeln, Gelenke, Knochen und Weichteile (Muskuloskeletal-System)

Neben der Untersuchung von Hirn, Kopf und Hals, ist die wichtigste Anwendung von MR die Untersuchung von Erkrankungen des muskuloskelettalen Systems. Oft wird bei Rückenschmerzen schnell eine MR-Untersuchung angeordnet. Bandscheibenvorfälle, Veränderungen der Wirbelgelenke und Verengungen des Nervenkanals werden klar dargestellt, auch wenn der klinische Nutzen nicht immer offensichtlich ist: Oft führen leider gezielte Behandlungen der auf den Bildern dargestellten möglichen Krankheitsursachen nicht zu einer Besserung. Gelenkerkrankungen, die am häufigsten in den Wirbelsäulen-, Hüft-, Knie- und Schultergelenken vorkommen, werden hauptsächlich mittels MR untersucht. Viele früher mit operativen Eingriffen (vor allem z. B. Spiegelung der Kniegelenke) abgeklärte Erkrankungen werden heu-

te rasch und mit guten Resultaten im MR abgeklärt. Dabei werden Knochenmark- und Knorpelschäden identifiziert, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber der CT ist. Auch bei anderen Erkrankungen, wie Entzündungen in Knochen, Gelenken, Weichteilen und Muskeln kann durch MR Klarheit gewonnen werden, und das gleiche gilt für die eher selten auftretenden Tumoren dieser Strukturen.

Da MR keine Exposition durch Röntgen- oder Gammastrahlen erfordert (Kap. 8), bestehen tendenziell weniger Hemmschwellen, die Methode einzusetzen, als dies bei der CT und den nuklearmedizinischen Verfahren der Fall ist. Sie haben nun einen Einblick in die Technik und die medizinischen Anwendungen von MR erhalten. Im Folgenden wollen wir die MR-Technik noch etwas detaillierter beschreiben.

5.5 Weiterführende Informationen zur MR-Technik

Wir haben den grossen „Trick“ oben besprochen, wie die Radiowellensignale einzelnen kleinen Regionen (Voxel) im Patienten zugeordnet werden können und so gepixelte Bilder entstehen. Da eine bestimmte Wellenlänge oder Frequenz einer Radiowelle nur genau die Magnetkreisel anzuregen vermag, die sich in einer bestimmten Magnetfeldstärke aufhalten, können wir mit örtlich variierenden Magnetfeldern Orte als Wellenlängen / Frequenzen codieren. Durch schrittweises leichtes Ändern der Frequenz des eingestrahlten Radiowellenpulses können wir Magnetkreisel in verschiedenen Schichten zum „Tanzen“ bringen (Schichtwahl). Mit weiteren zusätzlichen Magnetfeldern präparieren wir die Magnetkreisel an verschiedenen Orten in einer Patientenschicht dann so, dass sie bei verschiedenen Frequenzen „singend“. Der Gesang von Magnetkreiseln mit gleichen Frequenzen kommt dann aus Stäben von rechts bis links in der gewählten Schicht („Stab“-wahl). Die aus einer Patientenschicht kommenden Signale sind ein Gemisch von Wellenlängen (Frequenzen) aus diesen nebeneinanderliegenden Stäben. Um die Signalstärke aus den einzelnen Stäben identifizieren zu können, müssen wir aufschlüsseln, wie viel Signal einer bestimmten Wellenlänge (Frequenz) im empfangenen Radiosignal vorhanden ist.

5.5.1 Analyse des „Ton“-Gemisches

Die Analyse des Wellenlängen-(Frequenz-) Gemisches aus den vielen Stäben einer Schicht gelingt mit einer Methode, die errechnen kann, wie viel Signal bei jeder Wellenlänge anfällt. Diese Analysemethode wurde vom französischen Mathematiker Joseph Fourier entwickelt (1768–1830, Fourier-Transformation⁵). Was kann die Methode der Fourier-Transformation leisten? Sie kann ein Gemisch von Wellen, seien dies Radiowellen, Lichtwellen oder auch Töne (Schallwellen) so verarbeiten, dass man am Schluss weiß, mit welcher Signalstärke eine bestimmte Wellenlänge (ein

⁵ Mit der Fourier-Transformation wurden der Natur über die letzten 2 Jahrhunderte mehr Geheimnisse entlockt, als mit allen anderen Datenanalysemethoden.

bestimmter Ton) im Gemisch vorhanden ist. Aufs Klavier bezogen könnte man mit dieser Methode einen Klavierakkord analysieren und herausfinden, welche Klaviertasten wie laut angeschlagen wurden.

5.5.2 Weitere Verfahren zum Orten der Signale in der dritten Dimension

Dank der Fourier-Analyse wissen wir nun, welche Signalstärke aus jedem der Stäbe aus einer Körperschicht kommt. Es bleibt die letzte Aufgabe, die Ortung in der dritten Dimension. Wieviel Signal kommt aus einem einzelnen Kästchen (Voxel) in einem Stab (Abb. 5.2)? Die oben beschriebene und generell gültige ist diejenige, dass man die Stäbe durch geeignete Wahl der zusätzlich eingeschalteten Magnetfelder immer wieder anders durch die Patientenschicht legt. Dann eignet sich auch im MR die von McCormack und Hounsfield erfundene Bildrekonstruktions-Methode, die bei der Rekonstruktion von CT- (Kap. 3) und NUK/PET- (Kap. 4) Bildern verwendet wird⁶. Dazu brauchen wir immer „genügend“ Messungen, nämlich genau so viele Messungen von Stabsignalen, wie wir Bildelemente in einer Schicht auflösen wollen. Diese Bildelemente (Voxel) haben die Abmessungen der Schichtdicke mal Kantenlängen der Bildelemente in der Schicht. Ein Stab besteht offensichtlich aus einer Aneinanderreihung von solchen Voxeln. Wenn wir also z. B. eine Schicht mit einer Auflösung von 500 x 500 Voxeln anfertigen wollen, brauchen wir $500 \times 500 = 125.000$ unabhängige Messungen. Die von McCormack und Hounsfield entwickelte Methode, die Signale von Voxelstäben aus verschiedenen Richtungen durch den Patienten zu verrechnen, kann bei jedem Schichtbildverfahren angewendet werden.

Es gibt spezifisch im MR noch andere Verfahren zur Rekonstruktion von Schichtbildern. Man kann Orte im Patienten nicht nur über die Wellenlänge (Frequenz) der Magnetkreisel örtlich codieren, sondern auch über den gerade durchgeführten Tanzschritt der Magnetkreisel im Vergleich zu anderen Magnetkreiseln. Wenn wir von oben auf die tanzenden Magnetkreisel schauen, zeigen die einen zu einer bestimmten Zeit Richtung 1 Uhr, andere Richtung 2 Uhr etc. auf einem gedachten Zifferblatt. Wir erwischen die einen Magnetkreisel quasi beim ersten, andere beim zweiten usw. Tanzschritt. Wenn wir entlang eines Voxelstabes die Magnetkreisel so präparieren, dass eben die obersten nach 1 Uhr, die untersten nach 12 Uhr zeigen und das zurückgeworfene Signal auch nach diesen sog. Phasenverschiebungen analysieren, können wir innerhalb des Voxelstabes orten, woher die Magnetkreisel singen, ob von oben im Stab oder unten im Stab. Diese sog. „Phasencodierung“ in der einen Schichtrichtung gepaart mit der Frequenzcodierung in der anderen Schichtrichtung enthält ebenfalls genügend Information, um eine Schicht durch den Patienten zu rekonstruieren.

⁶ Erinnern Sie sich? Beim CT sind die „Signale“ die Röntgendiffraktionen jedes Voxels, bei den SPECT und PET Methoden die Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Voxel und im MR das Signal der „singen“ Magnetkreisel in einem Voxel.

Die Zusatzmagnetfelder können beim Einschalten zur Schichtwahl und beim Signalempfang aus der Schicht beliebig um den Patienten herumgedreht werden. Damit können wir auch direkt Schichten parallel oder schräg zur Körperlängsachse anregen und entsprechende Daten aufnehmen. Statt „Salamischeiben“-Schnitte können wir so auch „Sandwich“-Schnitte durchführen. Oder wir können sogar schräg durch den Patienten schneiden. Insbesondere, wenn wir die Wirbelsäule anschauen, sind gewinkelte Schnitte sinnvoll. Schräge Schnitte brauchen auch bei Herzuntersuchungen. Da die Längs- und Querachsen des Herzens beide schräg zur Patientenlängsachse liegen und wir das Herz gerne in solchen Längs- und Querachsenschnitten betrachten, sind solche schrägen MR-Schnitte hilfreich.

5.5.3 Pulssequenzen

MR ist „trickreich“ und so kann man die Magnetkreisel auf ganz verschiedene Arten tanzen und singen lassen, um die Bildinformation zu erhalten. Man kann sie während ihres Tanzes plötzlich dazu anhalten, rechts- statt links herum zu drehen, sie zum Hin- und Herschaukeln bringen usw. Je nachdem braucht man andere Abfolgen von Radiowellenpulsen, zusätzlich angelegten Magnetfeldern und zeitlichen Messabfolgen der rückgestrahlten Wellen. Im MR ist die Stärke des „Gesangs“ in jedem einzelnen Voxel in einer Schicht bestimmt durch die MR-Gewebseigenschaften in diesem Voxel. Hat es in einem Organ viele Magnetkreisel, ist das Signal, das zurückkommt, stärker. Im Wasser dauert der Gesang länger als im Fett und je nachdem, in welchem Organ sich die Magnetkreisel befinden, stören sich die Kreisel gegenseitig mehr und dadurch wird der „Gesang“ kürzer. Je nachdem, wie lange man wartet, bis man den Gesang aufnimmt, strahlt jedes Organ oder Gewebe andere Signalstärken ab. Dies ist eben die Grundlage des grossen Kontrastes zwischen Organen und Geweben, mit dem MR-Bilder gemacht werden können. Aber alle Arten, MR-Bilder herzustellen, sind Abwandlungen des beschriebenen Prinzips: Mittels Zusatzmagnetfeldern und Radiowellenpulsen wird jedes Voxel im Patienten so präpariert, dass die von ihm stammenden Radiowellen durch eine bestimmte Wellenlänge (Frequenz) charakterisiert sind. Die Wellenlänge des Gesangs eines Magnetkreisels verrät, wo im Patienten er sich befindet, die Stärke seines Gesangssignals zu einem bestimmten Zeitpunkt liefert Information darüber, was für magnetische Eigenschaften die Struktur im Körper am Ort des Magnetkreisels hat.

Man braucht also Vorschriften, wie man die Magnetkreisel zum „Tanzen“ bringt und wie und wann man die „Gesänge“ der sich zurückdrehenden Magnetkreisel misst, bis man eine Bildserie erzeugt hat. Diese Vorschriften werden im Fachjargon MR-Pulssequenzen genannt. MR-Pulssequenzen sind Instruktionen an ein MR-System, wie es die Radiowellenpulse und Zusatzmagnetfelder ein- und auszuschalten hat, ähnlich wie musikalische Notenblätter Instruktionen sind, wie die verschiedenen Instrumente eines Orchester zu spielen sind. In Notenblättern sind die Instruktionen für die einzelnen Instrumente graphisch dargestellt und im MR Instruktionen für den Radiowellensender, den -empfänger und das Ein- und Ausschalten der zusätzlichen Magnetfelder in den drei Raumrichtungen.

Wenn Sie eine MR-Untersuchung über sich ergehen lassen müssen, werden immer mehrere Pulssequenzen gefahren, „mehrere Musikstücke werden gespielt“. Sie hören dies, denn bei jeder neuen Pulssequenz hämmert oder summt der MR-Scanner verschieden. Jede Pulssequenz liefert wieder andersartige Aussagen über die Eigenschaften der Organe und Gewebe in Ihrem Körper. Die einen Pulssequenzen lassen die Gefäße auf den Bildern hell erscheinen, andere die Flüssigkeiten in Hohlräumen, andere Fett und wieder andere Tumoren usw. Tumoren können mit geeigneten MR-Sequenzen vielfach sehr offensichtlich von der Umgebung abgegrenzt dargestellt werden. Die verschiedenen Strukturen im Hirn, wie graue und weisse Hirnsubstanz, verschiedene Strukturen im Becken und den Gelenken sind dazu ebenfalls gute Beispiele.

Wir haben erklärt, dass das Brummen, Surren oder Hämmern des MR auf das rasche Ein- und Ausschalten der Zusatzmagnetfelder zurückzuführen ist. In den letzten Jahren hat man nun auch Bildaufnahmetechniken (Pulssequenzen) entwickelt, bei welchen die zusätzlichen Magnetfelder nicht sehr rasch ein- und ausgeschaltet werden müssen. Die Ströme in den Drähten für die Zusatzmagnetfelder variieren dann nur langsam, und damit wird weniger an ihnen herumgerissen. Das MR ist dann viel leiser und man hört nur noch ein leises Summen. Vielleicht ist das laute Hämmern der MR-Geräte deshalb bald ein Ding der Vergangenheit.

5.5.4 Radiowellen im menschlichen Körper

Wichtig ist auch noch einmal folgendes zu betonen. Radiowellenpulse dringen einfach in den Körper ein und werden im Körper von den sich drehenden Magnetkreiseln nur schwach aufgenommen. Ebenso werden die rückgestrahlten Pulse der rückdrehenden Nadeln nur schwach im Körper aufgenommen. Damit ist das MR-Verfahren ähnlich wie Röntgen- und nuklearmedizinische Verfahren eben geeignet, Information aus dem Körperinnern herauszuholen. Wenn wir keine Wellen in den Patienten hineinbringen, können wir das Körperinnere auch nicht erkunden und damit nicht in den Patienten hineinsehen. Andere elektromagnetischen Wellen, seien dies Licht-, Ultraviolett-, Infrarot- oder Mikrowellen werden im Körper zu stark abgeschwächt, um für die medizinische Bildgebung brauchbar zu sein. Auch Radiowellenpulse werden im Patienten vom Gewebe etwas abgeschwächt und in Wärme umgewandelt. Die bei höheren MR-Feldstärken notwendigen kürzeren Radiowellen, die vor allem bei 3-T-Systemen gebraucht werden, werden im Patienten vermehrt aufgenommen und in Wärme umgewandelt. Sie verursachen im Patienten bei der MR-Untersuchung oft ein Wärmegefühl: Der Patient beginnt, etwas zu schwitzen. Das MR funktioniert diesbezüglich ähnlich wie ein schwacher Mikrowellenofen. Tatsächlich haben MR-Geräte Sicherungen, die verhindern, dass die Bestrahlung durch Radiowellenpulse nicht über eine gewisse Schwelle ansteigt und so den Patienten übermäßig aufwärmst. Man will den Temperaturanstieg im Patienten in siche-

rem Rahmen halten. Die Energie⁷ einzelner Radiowellen (-Strahlen) ist im MR so klein, dass Radiowellen im Gegensatz zu Röntgen- und Gammastrahlen (Kap. 2–4) keine Biomoleküle „zerreissen“ können. Wir werden die Nebenwirkungen durch die Strahlen der verschiedenen Bildgebenden Verfahren im Kap. 8 noch näher besprechen.

5.6 Zusammenfassung

Sie gehen wahrscheinlich nach Lesen dieses Kapitels mit mir einig, dass MR eine eher komplexe Angelegenheit ist. Wenn Sie aber verstanden haben, dass man mit dem Magnetfeld im MR Magnetkreisel erzeugt, die man dann mit Radiowellenpulsen „tanzen“ lassen kann und sie anschliessend zu „singen“ beginnen, haben Sie den ersten Schritt gemeistert. Wenn Sie verstehen, dass der Radioempfänger hinhört, was der „Gesang“ der rückklappenden Magnetkreisel uns mitteilt, haben Sie einen zweiten Schritt getan. Wenn Sie schliesslich verstanden haben, dass man die tanzenden und singenden Magnetkreisel so präpariert, dass sie an jedem Ort verschieden schnell tanzen und singen, und damit die Information in Orte codiert, wo aus dem Körper die verschiedenen Gesänge kommen, dann haben Sie MR im Wesentlichen verstanden. Als Analogie hat uns das Klavier begleitet. Von ihm wissen wir auch, dass verschiedene Töne von verschiedenen Orten kommen, von links oder von rechts im Klavier. Das MR macht mit Radiowellen etwas Ähnliches wie das Klavier mit Tönen. Im Klavier werden Töne und im MR Frequenzen von Radiowellen auf Orte abgebildet oder umgekehrt Orte auf Töne bzw. Frequenzen von Radiowellen. Es wurde erklärt, wie man aus den Informationen der Frequenzen (Tonhöhen) ein für uns sichtbares Bild erzeugen kann. Mit einem Hauptmagnetfeld, einem Radiowellensender und -Empfänger und zusätzlichen Magnetfeldern, die um den Patienten herum beliebig gedreht werden können, kann man viele „Musikstücke“ für das MR komponieren, welche die Magnetkreisel so tanzen lassen, dass die empfangenen Radiowellenpulse (Gesänge) immer wieder verschiedene dreidimensionale Bilder mit neuen Informationen aus dem Körperinnern hervorzaubern können.

Medizinisch wird MR vor allem im Hirn, den Knochen, Gelenken und Weichteilstrukturen angewendet. Es gibt aber auch verschiedenste wertvolle Anwendungen von MR im Kopf- und Halsbereich, im Herzen im Oberbauch und den Beckenorganen, wie z. B. der Prostata.

MR ist relativ kostspielig. Die Untersuchung eines Organs kostet 500–800 CHF und bei zusätzlicher Gabe von MR-Kontrastmitteln fallen weitere 150 CHF an. Werden mehrere Körperabschnitte untersucht, kann MR gut und gern 1500 CHF kosten.

⁷ Ein einzelner Röntgenstrahl (ein Photon, Kapitel 9) hat eine sehr hohe Energie im Vergleich zu einem einzelnen Radiowellenstrahl. Radiowellen sind niederenergetisch. Zur Herstellung eines Röntgenbildes oder einer CT brauchen wir aber im Vergleich zu einem MR viel weniger einzelne Strahlen. Das heisst, die gesamte Wärmeenergie, die bei einer MR-Untersuchung im Patienten stecken bleibt, ist viel höher als diejenige bei einem Röntgenbild oder bei einer CT-Untersuchung. Obwohl auch Röntgenstrahlen im Patienten in Wärme verwandelt werden, spüren wir daher beim Röntgen oder CT keine Erwärmung, wie das eben beim MR der Fall sein kann.

Mit den Ohren sehen

In diesem Kapitel wollen wir verstehen, wie man mit Schallwellen in den Patienten „hineinsehen“ kann. Dass man mit Schallwellen sehen kann, überrascht Sie vielleicht. Wenn Sie aber einen Ruf gegen eine Felswand machen und das Echo hören, wissen Sie etwa, wo die Felswand liegt. Sie wissen auch, dass wenn es lange dauert, bis das Echo zurückkommt, die Felswand weiter entfernt ist. Auch in der Nacht können Sie die ungefähre Lage und Distanz einer Felswand erraten, wenn Sie rundherum Rufe aussenden. Da wir zwei Ohren haben, können wir auch „Stereo“ hören. Der Schallpuls hat nur von vorne und hinten genau gleich lang zu beiden Ohren. Schräg einfallender Schall braucht hingegen zum einen Ohr ein ganz klein wenig länger als zum andern. Entsprechend können wir orten, aus welcher Richtung ein Schallsignal – z. B. ein Zuruf – kommt. Fledermäuse (und Delphine) nützen genau dieses Prinzip. Sie „rufen“ vor sich her. Objekte in ihrem Weg, wie Bäume, Häuser oder Menschen werfen Echos zurück, die verraten, wo sie sich in Relation zur Fledermaus befinden.

Ein Ultraschallgerät ist eigentlich nichts Anderes als eine „technische Fledermaus“. Es ermöglicht uns, mit Ultraschall das Körperinnere eines Patienten auszuloten. Um diese „technische Fledermaus“ zu verstehen, müssen wir zuerst verstehen, warum wir überhaupt mit Schallwellen in einen Patienten hineinsehen können. Dann skizzieren wir die Konstruktion eines US-Gerätes und besprechen medizinische Anwendungen der US-Bildgebung.

6.1 Wie verhalten sich Schallwellen

6.1.1 Grundbegriffe

Um ein tieferes Verständnis für medizinische US-Untersuchungen zu erhalten, müssen wir ein paar Grundbegriffe klären. Es geht dabei um Wellenlängen und Frequenzen. US-Untersuchungen funktionieren – wie ihr Name sagt – mit Schall und nicht

mit elektromagnetischen Wellen, wie die bisher besprochenen bildgebenden Verfahren. In Kap. 9 über Wellen wird detaillierter dargelegt, warum man nur mit US und nicht mit hörbarem Schall Bilder aus dem Körperinneren erhalten kann. Hier sei nur so viel gesagt. Der Mensch hört als höchste Töne Schallfrequenzen von maximal 16.000–20.000 Hertz (Hz = Schwingungen = Schallwellenberge oder -täler pro Sekunde). Die Schallgeschwindigkeit in der Luft beträgt etwa 300 Meter (m) pro Sekunde und es gilt, dass Schallgeschwindigkeit geteilt durch Frequenz gleich der Wellenlänge ist. Damit haben die kürzesten hörbaren Schallwellen von 16.000 – 20.000 Hz Wellenlängen um die 1.5 – 2 Zentimeter (cm). Mit hörbaren Schallwellen erzeugte Bilder wären entsprechend zu wenig gut auflösend, um zum „Sehen“ nützlich zu sein. Es gilt nämlich das Huygens'sche Prinzip (Kap. 9). Dieses besagt, dass Strukturen nur aufgelöst werden können, wenn sie vergleichbar gross oder grösser sind als die verwendete Wellenlänge. Auch die höchsten für uns hörbaren Schallwellen sind also ungeeignet, um Bilder aufzunehmen, sei dies für eine Fledermaus, um sich zu orientieren oder um medizinische Bilder aus dem Körperinneren zu erhalten. Wir brauchen „Ultraschall“.

Alle Schallfrequenzen von über 20.000 Hz oder Schallwellenlängen von unter 1,5 cm gehören zur Klasse der **Ultraschallwellen (US-Wellen)**. Eine Fledermaus ortet mit Wellenlängen um 100.000 Hz, also Wellenlängen um $300/100.000 = 3$ Millimeter (mm). So sieht die Fledermaus eben Objekte bis hinunter zu einer Grösse von 3 mm. Diese Auflösung reicht ihr offenbar „für den täglichen Gebrauch“. Die in der Medizin verwendeten Ultraschallgeräte arbeiten mit Frequenzen im 1–10 Millionen-Herz-Bereich, was Wellenlängen von um die $300 \text{ m} / 3.000.000 \text{ Hz} = 0.0001 \text{ m}$ oder einem Zehntelmillimeter entspricht. Mit US-Wellen im 3–10 MHz (1 Million Hertz)-Bereich können medizinisch relevante Strukturen also bestens aufgelöst werden. Ein normaler Lymphknoten (=Lymphdrüse) ist z. B. 3–5 mm gross.

6.1.2 Streuung und „Spiegelung“ von Schallwellen

Wenn eine Welle, in diesem Fall eine US-Welle, auf einen Gegenstand trifft, dann kann sie in alle Richtungen abgelenkt (= gestreut) werden. Dies ist ähnlich wie bei einem Billardball. Trifft einer auf den anderen, kann er in alle Richtungen abgelenkt werden. Die Streuung von Wellen im Allgemeinen hängt sehr stark von der Grösse des streuenden Gegenstandes, des sog. Streuzentrums ab. Ist dieses kleiner als die auftreffende Welle, findet die Streuung in allen Richtungen statt. Ist das Streuzentrum der Welle vergleichbar oder grösser, findet die Streuung vorwiegend gegen vorne statt, das Streuzentrum wirft wenig Wellen zurück. Wellen werden auch stark zurückgeworfen, wenn sie auf die Grenzfläche zwischen zwei grossen Strukturen stossen, die verschiedene Dichten haben. Wenn also Schall aus der Luft auf eine Wasseroberfläche (oder umgekehrt) trifft, wird er zurückgeworfen. Die Wasseroberfläche wirkt wie ein „Spiegel“. Ein Spiegel wirft ja Lichtwellen zurück.

Schauen wir uns nun Organe und Gewebe im Körper an. Eine Ultraschallwelle kommt aus dem Schallkopf des US-Gerätes und trifft auf die Haut des Patienten. Der

Mensch besteht praktisch aus Wasser und der US kommt aus der Luft. Er trifft also auf eine Luft-Wasser-Grenzfläche und wird dementsprechend zurückgeworfen. Um mit US in den Körper hineinsehen zu können, muss man den Schallkopf an unseren Körper „ankoppeln“. Dies gelingt mit stark wässrigem Gel, das dem Patienten dort auf die Haut gestrichen wird, wo wir mit dem Schallkopf des US-Gerätes in ihn hineinschauen wollen, also z. B. auf den Bauch einer Schwangeren, um das werdende Kind zu sehen. So hat es zwischen Schallkopf und der Haut des Patienten keine Luft mehr. Die US-Wellen werden in den Patienten „eingekoppelt“ und können in ihn eindringen.

Als nächstes betrachten wir, was mit den US-Wellen passiert, wenn sie in den Patienten eingedrungen sind. Im Patienten treffen sie auf unzählige Streuzentren und „Mikro“-Grenzflächen in den verschiedenen Organen und Geweben. Diese „Echo“-gebenden Strukturen sind Folge davon, dass menschliche Gewebe aus Zellen, Stützgewebe dazwischen, kleinsten Blutgefäßen und anderen Komponenten bestehen, die fein und inhomogen strukturiert sind und zum Teil durchaus kleiner oder vergleichbar mit den Wellenlängen der Ultraschallwellen sind. Damit wirken sie als Streuzentren oder als Grenzflächen. So werden echogebende Strukturen zum Teil zurückgestreut oder „gespiegelt“. Die Echo-Strukturen sind je nach Organ oder Gewebe sehr verschieden, denn jedes Organ ist anders strukturiert. Das eine Organ wirkt die US-Pulse entsprechend kräftiger zurück als ein anderes. Es lässt sich so z. B. Lebergewebe sehr gut von Fettgewebe unterscheiden und man sieht auch klar, wenn ein Patient wegen übermässigen Alkoholkonsums an einer Fettleber leidet. Die Leber ist auch gut von den Nieren, der Bauchspeicheldrüse und der Milz abgrenzbar und die Organe im Becken, wie Gebärmutter (bei Schwangerschaft mit werdendem Kind), die Prostata und die Blase sind gut darzustellen.

Treffen die US-Wellen auf eine homogene wässrige Flüssigkeit (z. B. Urin in der Blase oder das Fruchtwasser, welches das werdende Kind in der Gebärmutter umgibt), dringen sie problemlos ein. Weil in einer Flüssigkeitsansammlung keine Strukturen vorhanden sind, laufen die Wellen ungehindert durch, werden also nicht zurückgeworfen. Eine Flüssigkeitsansammlung kommt daher im US als echoarme (schwarze) Struktur zur Darstellung. Hinter der Flüssigkeitsansammlung finden sich wieder echogebende Strukturen, die US zurückwerfen und sind so ebenfalls sichtbar (Abb. 6.1). Ganz anders ist die Situation, wenn die Ultraschallwellen auf Luft im Körper auftreten. Diese ist z. B. als Darmgas im Bauch vorhanden oder auch ausgedehnt in der Lunge. Da der Schall aus einer wässrigen Umgebung (den Weichteilen des Patienten) kommend auf eine Grenzfläche mit Luft trifft, wird der ganze Schall an der Grenzfläche zurückgeworfen. Objekte hinter der Luftansammlung stellen sich nicht dar („Schallschatten“). Im Bauch ist dies ausser bei einem stark lufthaltigen Darm kein Problem und die Untersuchungsqualität normalerweise gut. In der Lunge ist das Problem aber so gross, dass sie nicht mit Ultraschall untersucht wird.

Ultraschalluntersuchungen des Herzens sind nur möglich, weil zwischen beiden Lungen und teilweise um das Herz herum Weichteilstrukturen liegen und das Herz so mit Schallwellen abgetastet wird, die nicht durch Luft laufen müssen. Wenn Schallwellen auf harte Knochen wie z. B. im Schädel treffen, werden sie ebenfalls praktisch völlig zurückgeworfen und dringen damit nicht weiter ein. Entsprechend

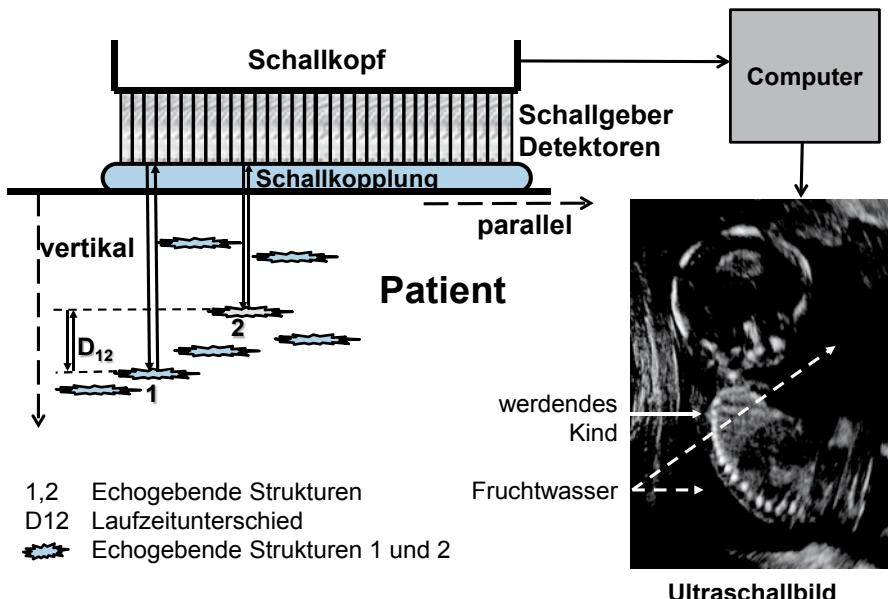


Abb. 6.1 Schematische Darstellung eines Ultraschallsystems. Ein Schallkopf mit seinen verschiedenen schallgebenden Elementen liegt auf der Körperoberfläche des Patienten auf. Zur Einkoppelung des Schalls liegt vor dem Schallkopf ein flüssigkeitsgefülltes Polster und der Patient wird am Untersuchungsort mit Gel überzogen. Echogebende Strukturen 1 und 2 liegen verschieden tief. Entsprechend braucht das Schallsignal vom Schallkopf bis zur Struktur 1 und zurück länger als das entsprechende Schallsignal zur Struktur 2. Eine Messung der Laufzeit kann damit die vertikale Lage der echogebenden Struktur ermitteln. Kurze Laufzeiten stammen von schallkopfnahen Strukturen, längere von weiter entfernten Strukturen. Je nachdem, welche der schallgebenden Elemente parallel zur Körperoberfläche durch zurückgeworfene US-Wellen angeregt werden, lassen sich echogebende Strukturen im vorliegenden Schema in der Richtung parallel zum Schallkopf verorten. Es entsteht ein zweidimensionales Schichtbild. Durch Verschieben oder Schwenken des Schallkopfes können andere Schichten dargestellt werden. Die Analyse der Daten ergibt das Ultraschallbild, hier von einem werdenden Kind im Bauch der Mutter

ist die Ultraschalluntersuchung auch für das Hirn ungeeignet. Kleinere Knochenstrukturen stören die Ultraschallwellen weniger, und so kann eine Ultraschalluntersuchung z. B. einer Hand nützliche medizinische Information zeitigen. Auch bei Neugeborenen, bei denen die Schädeldecke noch nicht geschlossen ist, ist Ultraschall ein gutes bildgebendes Verfahren zur Beurteilung der Hirnstrukturen und wird bei Frühgeborenen sehr häufig eingesetzt.

Sie verstehen nun, warum man mit Ultraschall und nicht mit gewöhnlichem Schall Strukturen im Körperinneren darstellen kann (s. auch Kap. 9). Echoreiche Organe und Gewebe werfen viele US-Wellen zurück, echoarme wenig. Im Folgenden gehen wir kurz darauf ein, wie Bilder mittels US-Gerät entstehen.

6.2 Ultraschall (US)-Bildaufbau

6.2.1 Echomessungen senkrecht zum Schallkopf

Senden wir senkrecht zum Schallkopf einen US-Puls in den Patienten, wird dieser irgendwo in der Tiefe gemäss der vorgängigen Diskussion als Echo zurückgeworfen. Wie tief die Welle in den Patienten eingedrungen ist, lässt sich einfach bestimmen. Betrachten wir Abb. 6.1. Der vom Schallkopf ausgesendete US-Puls, der von der echogebenden Struktur 1 im Körper zurückgeworfen wird, trifft etwas später wieder auf den Schallkopf, als der Puls, der von Struktur 2 zurückgeworfen wird. Je tiefer die echogebende (den US zurückwerfende) Struktur im Patienten liegt, desto später trifft das Echo wieder auf den Schallkopf. Man muss also nur für jeden US-Puls messen, wie lange er braucht, bis er wieder auf dem Schallkopf auftrifft und hat damit die Tiefe bestimmt, in welcher die echogebende Struktur liegt. Schickt man also eine grosse Anzahl von Pulsen kurz nacheinander senkrecht in den Patienten, erhält man ein Muster von Echostrukturen im Verlauf dieser US-Pulse. Da US in wässriger Umgebung etwa 1000 m/s zurücklegt, braucht es pro Puls nur etwa 2 zehntausendstel Sekunden, bis das Echo empfangen wird. Man kann also viele Tausend Messungen der Tiefenstrukturen pro Sekunde durchführen. Wie gesagt, sind die echogebenden Strukturen in verschiedenen Organen und Geweben, welche die US-Pulse durchlaufen, verschieden dicht. Läuft z. B. der US-Puls zuerst durch die echo-reiche Leber und dann durch echoarmes Fettgewebe, wird man anfänglich viele Echos empfangen, später wenige, denn der Schall braucht länger zum tiefer gelegenen echoarmen Fettgewebe und zurück. Entsprechend werden die echogebenden Strukturen im US-Bild in der Tiefe geortet.

6.2.2 Echomessungen von bewegten echogebenden Strukturen

Nehmen wir nun an, der US-Puls trifft auf ein Blutgefäß, in welchem die Blutkörperchen fliessen. Fliessen die Blutkörperchen dem US-Puls entgegen, wird die Wellenlänge der zurückgeworfenen Welle kürzer, fliessen sie vom US-Puls weg, wird die Wellenlänge länger. Sie kennen dies vom vorbeifahrenden Krankenwagen. Zuerst tönt die Sirene höher, denn relativ bewegen Sie sich zum Krankenwagen hin. Nach Vorbeifahrt tönt die Sirene tiefer, denn Sie bewegen sich relativ vom Krankenwagen weg. Je schneller der Krankenwagen fährt, desto grösser sind Tonerhöhung und –erniedrigung. Aus der Veränderung der Wellenlänge (US-Tonhöhe) des empfangenen Echos kann man so die Geschwindigkeit ableiten, mit welcher der Krankenwagen fährt, oder eben, mit welcher sich die Blutkörperchen bewegen. Damit erlaubt US auch, die Geschwindigkeit der Blutkörperchen in einem Gefäß, d. h. den Blutfluss zu messen. Der beschriebene Effekt wird Dopplereffekt genannt (Christian Doppler, 1803-1853, österreichischer Mathematiker und Physiker). Wird diese Technik beim US angewendet, nennt man die Untersuchung ein Doppler-US-Untersuchung. Sie erlaubt z. B., den Blutfluss in den Halsschlagadern zu messen, welche das

Hirn mit Blut versorgen. Es kann so gezeigt werden, ob eine Verengung dieser Gefäße den Blutfluss zum Hirn behindert.

6.2.3 Ortung der Echo-gebenden Strukturen parallel zum Schallkopf

Ein Schallkopf besteht grob aus vielen nebeneinanderliegenden Schallgebern (Abb. 6.1). Die Funktionsweise der einzelnen Schallgeber wird unten erläutert. Die Schallgeber werden elektronisch so betrieben, dass jeder Ultraschallpuls eine möglichst feine, langgestreckte, keulenartige Form hat. Einzelne vom US-Schallkopf ausgesendete Pulse werden daher „Schallkeulen“ genannt. Wenn der Durchmesser der Schallkeule im mittleren Bereich etwa 1 mm ist, dann entspricht das der Auflösung des angefertigten Schnittbildes in seiner Dicke. Der Schallkopf legt dann zum Beispiel ebenfalls in 1 mm Abständen sukzessiv Schallkeulen in einer Ebene nebeneinander parallel zum Schallkopf. Die Anordnung der Schallkeulen und die Tiefenortung in der Schallkeule mittels einer Messung der Zeit zwischen Puls und Echo lassen so ein zweidimensionales Bild entstehen. In Realität werden verschiedene nebeneinanderliegende Schallgeber zur Erzeugung der Schallkeulen und beim Empfang der Pulse verwendet. Durch seitliches Schwenken oder Verschieben des Schallkopfes können auch nebeneinanderliegende Schichtbilder erzeugt werden. Dies empfinden Sie, wenn der Untersucher den Schallkopf auf Ihnen hin- und herbewegt. Das Senden und Empfangen der Pulse in den Schallgebern wird von einem Computer im US-Gerät gesteuert.

Wir wollen nun die Schallgeber noch etwas näher betrachten.

6.2.4 Schallgeber- und Empfänger

Die Erzeugung von Ultraschallwellen in den Schallgebern geschieht mit kleinen Kristallelementen, sog. Piezokristallen, die eng nebeneinander aufgereiht sind (Abb. 6.1). Ein Piezokristall hat die Eigenschaft, dass er mechanisch zu schwingen beginnt und daher Schallwellen aussendet, wenn man an auf zwei gegenüberliegenden Seiten Elektroden an bringt und an diesen Elektroden eine elektrische Wechselspannung anlegt. Die Frequenz der Wechselspannung entspricht der Frequenz der erzeugten Schallwellen. Piezokristalle wandeln also elektrische Schwingungen in mechanische Schwingungen um, die dann z. B. als US wahrgenommen werden. Wenn umgekehrt ein US-Puls auf einen Piezokristall auftrifft, beginnt er zu schwingen und wandelt Schall in elektrische Wechselspannung um. So ist also ein Schallgeber zuerst der Schallsender und kurz darauf, wenn das Echo empfangen wird der Schallempfänger. Die zeitliche Verzögerung zwischen gesendeten US-Puls und empfangenem Echo sowie die Schallfrequenz des Echos werden als kleinster elektrischer Wechselstrom registriert, entsprechend den Erklärungen oben nach Pulslaufzeit und Frequenz analysiert und als zeitlich bewegte Bilder auf einem Computerbildschirm dargestellt, bzw. im Computer zur späteren Betrachtung gespeichert. Der Arzt erhält

so ein bewegtes Bild, welches Informationen über die Echostrukturen der untersuchten Organe und Gewebe und nach Bedarf auch des Blutflusses in Gefässen in diesen Organen oder Geweben enthält.

Die Ultraschall-“Köpfe“ mit ihren Schallgebern sind hochkomplexe Systeme, die sehr kostspielig sind und einen Grossteil der Kosten eines US-Gerätes ausmachen. Der Schallkopf ist diejenige Vorrichtung, die bei einer Untersuchung auf Sie aufgesetzt wird. Schallköpfe können rasch mehrere 10.000 CHF kosten. Es gibt heute aber auch ganz einfache US-Geräte, die insgesamt weniger als 10.000 CHF kosten und mit einem Mobiltelefon als Computer und Ausgabebildschirm betrieben werden können. Für viele Anwendungen ist heute das US-Gerät, was das Hörrohr für den Arzt der letzten zwei Jahrhunderte war.

6.3 Medizinische Anwendungen von Ultraschall (US)

US kommt als rasches und kostengünstiges Verfahren von Kopf bis Fuss zum Einsatz und ist heute weiter verbreitet, als die weit verbreiteten Röntgengeräte. Da US-Wellen keine ionisierenden Strahlen sind (Kap. 8), müssen die Betreiber keine spezielle Ausbildung im Umgang mit Strahlen besitzen, wie dies Radiologen und Nuklearmediziner haben. US-Geräte stehen in allen Spitätern und vielen Privatpraxen. Allerdings erfordert die Interpretation von US-Bildern viel Fachwissen. Es gilt wie für jedes medizinisch-bildgebende Verfahren: ein US-Bild ist nur so gut, wie derjenige der die Bilder interpretiert.

Die Anwendungen von US im Hirn sind aus oben erläuterten Gründen nur bei Säuglingen sinnvoll. Hingegen wird US zur Beurteilung der Weichteilstrukturen in Kopf und Hals sehr häufig eingesetzt. Die Augenhöhlen, die Gesichts- und Halsstrukturen z. B. bei Veränderungen durch bösartige Tumoren, die Schilddrüse und die Nebenschilddrüsen werden im Hals bestens mit US untersucht. Echo-Doppler wird viel verwendet.

Während die Lunge dem US nicht zugänglich ist, werden die Weichteilstrukturen zwischen beiden Lungenflügeln und insbesondere das Herz ausgedehnt mit US untersucht. Welcher Patient, der auch nur andeutungsweise Herzprobleme hat, hätte nicht einen Herz-US gehabt. Man sieht die Bewegung des sich zusammenziehenden und entspannenden Herzmuskels und der Herzkappen. Im Herzen kommen auch immer Echo-Doppleruntersuchungen zum Einsatz, denn sie liefern Informationen über den Blutfluss in den Herzkammern, den grossen Gefässen und um die Herzkappen herum. Die besten US-Bilder des Herzens erhält man mit Schallköpfen, die durch die Speiseröhre (sog. Endo-US) bis auf die Höhe des Herzens vorgeschoben werden. Da dies aber unangenehm ist, wird Endo-US nur in speziellen Situationen eingesetzt.

Im Oberbauch ist US bei Abklärungen von Leiden der Leber, der Gallenwege und der Bauchspeicheldrüse oft die bildgebende Erstuntersuchung. Hingegen sind Darmstrukturen wegen der Luft im Darm die Sache des US nicht. US der Nieren, Nebennieren, ableitenden Harnwege und der Geschlechtsorgane von Mann und Frau wird häufig durchgeführt und heute werden wohl die meisten schwangeren Frauen in der

westlichen Welt ihr werdendes Kind das erste Mal im US erblickt haben. Auch die weibliche Brust wird häufig mit US untersucht. Werden im Röntgenbild Herde identifiziert, bei denen man nicht sicher ausschliessen kann, dass sie bösartig sind, nimmt man den US zur Hand. In der Speiseröhre, im Magen, im Zwölffingerdarm und im Dickdarm kommen ebenfalls Endo-US-Verfahren zum Einsatz. Die bei einer Magenspiegelung eingeführte US-Sonde kann dabei nicht nur die Wände der genannten Organe sehen, sondern auch die umliegenden Strukturen. So kann z. B. die Bauchspeicheldrüse genau abgebildet werden.

Die grossen knöchernen Strukturen sind – wie gesagt – ungeeignet, um mit Ultraschall abgebildet zu werden. Ultraschall hilft bei der Abklärung von Gelenksleiden, bei Kleinkindern zur Abklärung der Hüften, bei Erwachsenen zur Abklärung von schmerzhaften Schulter-, Ellbogen- und Kniegelenken. Kleine knöcherne Strukturen, wie Finger- oder Fussknochen und die umliegenden Muskeln und anderen Weichteilstrukturen werden jedoch häufig mit US abgeklärt. So ist US ein wichtiges Verfahren unter anderem bei der Abklärung von kleineren Unfällen und Sportverletzungen. Die Beurteilung von anderen Weichteilen, wie Bindegewebe kann ebenfalls mit Ultraschall vorgenommen werden.

Leidet der Patient an einem bösartigen Tumor, ist die Untersuchung der Lymphknoten in der Umgebung des primären Tumors oft die Sache des US und auch bei entzündlichen oder arteriosklerotischen Veränderungen der Gefäße ist US oft erste bildgebende Methode, z. B. zum Aufspüren von Blutgerinnseln in den Beinadern, die in die Lunge abwandern können und dort die gefürchteten Lungenembolien verursachen. Ultraschall wird auch verwendet, um Nadeln zur Gewebsentnahme oder zur Entleerung einer Flüssigkeitsansammlung in den Patienten einzuführen. Der Arzt zieht dann die „Ultraschallbrille“ an, um die Nadel zu führen.

Kurz gesagt, ist der Ultraschall „Mädchen für fast Alles“.

6.4 Zusammenfassung

Ultraschall (US) ist das moderne „Hörrohr“ (Stethoskop) des Arztes und kommt bei vielen Erkrankungen als erstes bildgebendes Verfahren zum Einsatz. Nur wenn Knochen oder Luft im Weg der US-Pulse stehen, ist US ungeeignet, um Strukturen darzustellen. US-Pulse können einfach in Zonen von Weichteilen im Körper eindringen, werden dort von echogebenden Strukturen zurückgeworfen und detektiert. Damit entstehen Bilder der Echostrukturen der untersuchten Organe. Diese Strukturen sind in verschiedenen Organen und Geweben stark verschieden und führen daher zu gutem Bildkontrast.

Technisch basiert US auf der Erkenntnis, dass hochfrequente Schallwellen, eben US, hochauflösende Bilder erzeugen können. Der Untersucher kann sich mit US ähnlich im Patienten orientieren, wie die blinde Fledermaus sich dank US ein Bild ihrer Umgebung machen und danach navigieren kann. US-Bilder werden folgendermassen erzeugt: Viele in einem Schallkopf zusammengefasste Schallgeber – elektro-mechanische Wandler (Piezokristalle) – erzeugen abwechselungsweise US-Pulse, die in den Patienten gesandt werden und detektieren die zurückgeworfenen

Echos. Je tiefer eine echogebende Struktur im Körperinneren liegt, desto länger braucht das Echo, bis es den Schallkopf erreicht. Damit wird die Distanz senkrecht zum Schallkopf dank der Zeit zwischen gesendetem Puls und empfangenen Echo messbar. Da verschiedene Schallgeberelemente nebeneinander angeordnet sind, werden so auch echogebenden Strukturen parallel zum Schallkopf abgebildet: Ein zweidimensionales Bild entsteht. Durch Bewegung des Schallkopfes lateral über den Körper des Patienten kann auch die dritte Dimension erfasst werden. Bewegt sich eine echogebende Struktur, wie z. B. Blutkörperchen in Blutgefäßen, kann mit dem Echo-Doppler auch die Flussgeschwindigkeit im Blut gemessen werden.

Die Kosten von Ultraschalluntersuchungen sind im Verhältnis zu den anderen Schnittbildverfahren gering. Eine typische Ultraschalluntersuchung einer Körperregion kostet je nach Untersuchungsaufwand 50–200 CHF.

Kontrastmittel und radioaktive Tracer für die medizinische Bildgebung

7

Licht und Schatten aus dem Körperinnern

Kontrastmittel dienen dazu, in Röntgen-/CT-, MR- und Ultraschall-Bildern sichtbare Veränderungen herbeizuführen. Ein Kontrastmittel hat einen ähnlichen Effekt, wie wenn wir in einer Kinderzeichnung vorgegebene Flächen mit einer Farbe ausfüllen. Wie der Name besagt, sollen gewisse Organe oder Gewebe im Patienten besser von anderen Organen oder Geweben abgegrenzt werden, also der Kontrast zwischen ihnen verstärkt werden. Röntgenkontrastmittel machen zum Teil Strukturen transparenter. So wird Unsichtbares sichtbar gemacht. Im Röntgen sieht man nun die sonst unsichtbaren Blutgefäße, die verborgenen Gelenkkapseln oder die Darmwand. Das Aussehen und die Art, wie z. B. Kontrastmittel durch die Blutgefäße einzelner Organe oder Gewebe im Körper strömen und hängen bleiben, enthält wichtige medizinische Informationen, die ohne den Einsatz von Kontrastmitteln nicht zu gewinnen wären. Man kann mit Kontrastmitteln oft besser eingrenzen, was genau der Ursprung einer krankhaften Änderung ist: Tumoren sind beispielsweise häufig stark durchblutet und lagern Kontrastmittel ein. So sieht man sie besser.

Man erkannte schon um 1930, dass man durch Einbringen von Kontrastmitteln Strukturen in Röntgenbildern besser oder überhaupt erst von der Umgebung abgrenzen kann, seien dies Gefäße, Hohlräume oder Flüssigkeitsansammlungen. So wurden bis um 1970 immer mehr Röntgenuntersuchungen mit Kontrastmitteln durchgeführt. Bei der Einführung der CT um 1975 war ebenfalls sofort klar, dass auch in der CT Kontrastmittel von grossem Wert sind. Da in der CT die gleichen Substanzen als Kontrastmittel verwendet werden, wie im Röntgen, spricht man nur von Röntgenkontrastmitteln. Schliesslich fand man ab etwa 1990, dass Kontrastmittel auch bei MR mit grossen Vorteilen einsetzbar sind. Ultraschallkontrastmittel wurden in den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts entwickelt, werden aber seltener verwendet.

Als Kontrastmittel kamen und kommen Substanzen zum Einsatz, welche die in der medizinischen Bildgebung verwendeten Strahlen / Wellen so verändern, dass dies in den Bildern sichtbar wird.

Die in der NUK und im PET gebrauchten radioaktiven Tracer sind ein Spezialfall von Kontrastmitteln. Da ein Mensch praktisch keine Radioaktivität enthält, können

ohne Tracer überhaupt keine Bilder mit NUK- und PET-Systemen gemacht werden. Erst wenn etwas radioaktiv strahlende Tracer in den Körper eingebracht werden und sich dann nach Massgabe ihrer biologischen Eigenschaften im Körper verteilt haben, können wir ihren Aufenthaltsort mit NUK und PET Scannern bildlich darstellen. Tracer bringen „Licht ins Dunkel“. Sie Verändern also die Kontraste in den Bildern nicht, sondern lassen die Bilder überhaupt erst entstehen. Dies hat wichtige Vorteile, wie wir sehen werden.

7.1 Kontrastmittel- und Tracer-Dosen

Bei allen von aussen eingebrachten Substanzen müssen wir darauf achten, dass sie den Patienten nicht schädigen. Kontrastmittel müssen zum Teil in hohen Dosen verabreicht werden. So müssen Moleküle gefunden werden, die rasch wieder aus dem menschlichen Körper ausgeschieden werden. Kurz nachdem sie ihren Zweck erfüllt haben, erscheinen die meisten Kontrastmittel im Urin und so verlassen sie den Körper rasch. Sie wissen, dass für „richtige“ Substanzen die Ausscheidung rasch von stattet geht, denn nach Genuss von Spargeln riechen wir den Spargelgeruch in unserem Urin nach kurzer Zeit. Typischerweise braucht es nur rund 30 Minuten, bis fast das gesamte Kontrastmittel in den Urin ausgeschieden ist. Es gibt auch Kontrastmittel, welche über die Leber und Gallenwege in den Darm ausgeschieden werden und so den Körper wieder verlassen.

Um sicherzustellen, dass Kontrastmittel möglichst verträglich und unschädlich sind, wurde viel Forschungsarbeit geleistet. Entsprechend stehen heute Kontrastmittel zur Verfügung, die praktisch nebenwirkungsfrei sind und in der medizinischen Bildgebung hervorragende Dienste leisten. Ob eine Substanz ungefährlich ist, muss oft zuerst am Tier erprobt werden, bevor mit Versuchen an Menschen dann endgültig ihre Verträglichkeit und Tauglichkeit beurteilt werden kann. Grundsätzlich gilt, dass eine Änderung im Bildkontrast bei Röntgen/CT am meisten Kontrastmittel braucht. Um MR-Bilder zu kontrastieren braucht man etwa 10–100-mal weniger Moleküle. Da in der NUK/PET überhaupt nichts zu sehen ist, wenn keine Tracer gegeben werden, ist es nicht überraschend, dass man im Vergleich zu den anderen Verfahren viel weniger Moleküle im Patienten braucht, bis ein Bild aufgenommen werden kann. Tatsächlich sind die verwendeten Tracermengen 10.000–10.000.000-mal kleiner als die bei Röntgen und MR eingesetzten Kontrastmitteldosen. Dies hat wichtige Konsequenzen. Schon der berühmte Arzt Paracelsus hat im 16. Jahrhundert den Satz formuliert: „dosis facit venenum“, oder „Die Menge macht das Gift“. Bringt man ein Kontrastmittel oder einen Tracer in den Patienten ein, resultiert entweder

1. kein Effekt bei zu kleiner Menge,
2. ein gewünschter Effekt bei richtiger Menge, möglichst ohne Nebenwirkungen, oder
3. schädliche Effekte (Nebenwirkungen) bei zu grosser Menge.

Kontrastmittel-Substanzen müssen also so gewählt werden, dass sie zur zweiten Klasse gehören. Weil eben gefährliche Effekte von Kontrastmitteln/Tracern dosisabhängig sind, existieren viel weniger Röntgen- oder MR-Kontrastmittel, als NUK/PET-Tracer. Letztere können in kleinsten Dosen verabreicht werden und so Prozesse im Körper sichtbar machen, die durch kleinste Konzentrationen von Biomolekülen gesteuert werden. Entsprechend ist es auch nicht überraschend, dass viel weniger relevante Strukturen und Funktionen im Patienten mit Röntgen- oder MR-Kontrastmitteln dargestellt werden können, als mit NUK/PET-Tracern. Als Beispiel sei hier das im PET verwendete und mit Fluor markierte radioaktive Traubenzuckermolekül (FDG) angesprochen, welches im Kap. 4 und Kap. 10 erwähnt ist. Wir erinnern uns: Weil FDG fast wie Traubenzucker aussieht, reichert es sich im menschlichen Körper dort an, wo viel Zucker verbraucht wird. Dies ist normalerweise im Hirn der Fall, aber auch in bösartigen Tumoren (Abbildung 4.1). Grundsätzlich eignen sich fluor-markierte Substanzen auch als MR-Kontrastmittel. Allerdings müsste man so viel FDG in einen Patienten spritzen, um auf MR-Bildern eine Kontraständerung zu sehen, dass der Patient sofort an der Untersuchung sterben würde. FDG gehört also als radioaktiv markierter Tracer zur Klasse 2, als MR-Kontrastmittel zur Klasse 3. Um PET-Bilder zu erhalten, braucht es 100.000-mal weniger FDG als es brauchen würde, auf MR-Bildern einen Kontrasteffekt zu sehen. So bestehen eben nach der Regel „die Menge macht das Gift“ keine giftigen Effekte bei der Anwendung von FDG im PET, jedoch hätte eine Anwendung im MR fatale Effekte und es ist nicht möglich, FDG als Kontrastmittel im MR einzusetzen. Da die notwendigen Tracer-Mengen bei NUK/PET-Untersuchungen so klein sind, muss auch nicht gefordert werden, dass die Substanzen so rasch wie möglich aus dem Körper ausgeschieden werden.

7.2 Röntgen-Kontrastmittel

Röntgenkontrastmittel werden heute primär zur Kontrastverstärkung bei der Darstellung von Herz und Gefäßen, dem Darmhohlraum und von Gelenken angewendet. Ebenso Anwendung finden sie, weil sie sich in krankhaften Geweben in Organen und Geweben anreichern können. Da das Anreicherungsmuster anders ist, als dasjenige in den umliegenden Organen oder Geweben, lässt sich krankhaftes Gewebe nach Kontrastmittelgabe oft viel besser abgrenzen und auch charakterisieren. Als Röntgenkontrastmittel werden im Darm heute jod- und bariumhaltige Substanzen angewendet, bei anderen Anwendungen nur jodhaltige Substanzen. Diese letzteren Substanzen sind kleine Moleküle, die möglichst viele Jodatome enthalten. Jod ist ein schweres Atom (Kap. 10 und Kap. 11). Es kann damit die Röntgenstrahlen gut abschwächen und so die mit Kontrastmittel angereicherten Körperstrukturen sichtbar machen. Kontrastmittelhaltige Strukturen werden auf dem Röntgenbild „weisser“¹,

¹ Eigentlich werfen aber die Kontrastmittel einen Schatten auf das Röntgenbild (weniger Röntgenstrahlen führen zu schwächerer Belichtung auf dem Röntgenfilm).

denn wir haben gesehen (Kap. 2), dass eben geschwächte Röntgenstrahlen den Röntgenfilm weniger belichten und damit weniger schwärzen. Das gleiche gilt beim CT².

Röntgenkontrastmittel werden häufig eingesetzt. Bei Darmaufnahmen ermöglichen sie eine gute Beurteilung von Erkrankungen der Darmwand. Bei Gelenksaufnahmen leisten Röntgenkontrastmittel wichtige Hilfe. Die Behandlung von Gelenkerkrankungen erfordert oft, dass Medikamente in den Gelenksraum gespritzt werden. Dieser muss also mit einer Nadel angestochen werden. Um sicherzugehen, dass das Medikament auch ja in den Gelenksraum gelangt und sich dort gut verteilt, wird dem Medikament etwas Kontrastmittel beigegeben. Unter Röntgenkino (Kap. 2) sieht man dann sofort, ob das Medikament an den richtigen Ort gelangt. Röntgenkontrastmittel werden zwingend für die Darstellung von Gefäßen verwendet, insbesondere, wenn man mit der „Röntgenbrille“ Gefäßverengungen behandeln will (Kap. 2).

Das Gros der CT-Untersuchungen verwendet heute ein Kontrastmittel, welches in die Gefäße eingespritzt wird und bei Bauchuntersuchungen muss der Patient dazu auch noch röntgendichte Flüssigkeit trinken, um den Darm zu kontrastieren. Die wichtigsten Einsatzgebiete finden sich zur Darstellung von Gefäßverengungen oder Verschlüssen im ganzen Körper und zur Charakterisierung und Abgrenzung von Tumoren oder Entzündungen. Sie müssen also nicht überrascht sein, wenn man Ihnen bei einer CT-Untersuchung „eine Leitung legt“, d. h. einen Zugang in eines ihrer Blutgefäße, meist eines Gefäßes in der Armbeuge schafft. Durch diese Leitung kann das Kontrastmittel dann einfach in die Blutzirkulation eingebracht werden, hat aber noch einen zweiten Zweck, den wir jetzt besprechen.

Nichts ist ungefährlich, und so ist auch die Gabe von Röntgenkontrastmittel nicht ohne eine – allerdings sehr minime – Gefahr. Die möglichen Gefahren bei Patienten mit normaler Nierenfunktion sind so klein, dass wir Untersuchungen mit Röntgenkontrastmitteln ohne Bedenken durchführen und die Nierenfunktion eines jeden Patienten wird gecheckt, bevor er Kontrastmittel erhält. Die häufigsten unerwünschten Nebenwirkungen auf Kontrastmittel betreffen akute Reaktionen. Ein leichtes Wärmegefühl beim Einspritzen ist normal. Es können in seltenen Fällen aber Hautrötungen, Übelkeit oder Atemnot auftreten, und im Extremfall kann es zu einem Kreislaufzusammenbruch kommen. Dann ist es notwendig, sofort durch die gelegte Leitung die notwendigen Medikamente spritzen zu können. Kontrastmittelunverträglichkeit gehört in die Krankheitsgruppe der Allergien, der auch Heuschnupfen, Asthma und Bienenstich- oder Nahrungsmittelallergien zugehören. Entsprechend werden solche bei der Röntgenkontrastmittelgabe auftretenden Allergien so behandelt, wie andere Allergien. Geben Sie also bei einer Röntgenuntersuchung immer an, ob sie irgendwelche Allergien haben, denn jemand der Allergien hat, hat auch etwas häufiger Kontrastmittelallergien. Die Untersuchenden sind dann vorbereitet, wenn eine Komplikation auftritt. Es steht bei jedem Röntgengerät und CT ein Notfall-

² Sie erinnern sich: CT-Bilder sind Computerbilder und der Computerbildschirm stellt kleinste Regionen im Körper (Pixel) im Bild in Graustufen dar. Die Konvention ist: Je höher der Pixelwert (je weniger eine kleine Körperregion die Röntgenstrahlen schwächt), desto dunkler das Pixel, und so ist die Konvention so gewählt, wie die Graustufen beim Röntgenbild von Natur aus sind: Lungen sind im CT dunkel und Knochen und auch kontrastmittelverstärkte Strukturen sind hell.

schrank, in welchem die nötigen Medikamente und Instrumente bereitstehen. Wichtig zu wissen ist: Diese Reaktionen sind äusserst selten!

Sonst ist Jod für uns Menschen nicht gefährlich, denn die Schilddrüse verwendet Jod in kleinen Mengen zur Herstellung von Schilddrüsenhormon. Zu wenig Jod führt zu einem Kropf. Wie beschrieben, werden die jodhaltigen Kontrastmittel so gewählt, dass sie rasch aus unserem Körper ausgeschieden werden. Entsprechend ist auch eine normale Ausscheidungsfunktion der Nieren notwendig und das Funktionieren der Nieren wird – wie oben erwähnt – vor jeder Untersuchung mit einem Labortest überprüft. Bei ungenügender Nierenfunktion können Röntgenkontrastmittel nicht eingesetzt werden. Die wenigen Kontrastmittelmoleküle, die beim Patienten mit intakter Nierenfunktion noch vor dem Ausscheiden in ihre Komponenten zerlegt werden, enthalten ausschliesslich Substanzen, mit denen unser Körper gut umgehen kann. Damit können Röntgenkontrastmittel ohne weitere Bedenken angewendet werden.

7.3 MR-Kontrastmittel

MR-Kontrastmittel werden aus den gleichen medizinischen Gründen wie Röntgenkontrastmittel eingesetzt, nämlich zur besseren Abgrenzung von Organen, gesunden und auch krankhaften Geweben. MR-Kontrastmittel sind aber völlig verschieden von Röntgenkontrastmitteln. Sie müssen ja nicht Röntgenstrahlen beeinflussen, sondern die Magnetkreisel anders „tanzen“ und „singen“ lassen (Kap. 5), als dies im gleichen Organ oder Gewebe der Fall wäre, wenn dort kein Kontrastmittel wäre. Ähnlich wie beim Röntgen stehen MR-Kontrastmittel zur Verfügung, welche Gefässse besser sichtbar machen oder krankhafte Strukturen von Organen und Geweben abgrenzen können. Die wichtigste Kontrastsubstanz ist das Atom Gadolinium (Gd), ein „Exot“ in der Tabelle chemischer Elemente (Kap. 10) und ein chemisches Element, das für uns körperfremd ist. Entsprechend muss Gadolinium in ein Molekül eingebunden werden, das Gadolinium „ungiftig“ macht und der Gadolinium-Molekül-Komplex muss rasch ausgeschieden werden.

Da MR sehr häufig bei Hirnerkrankungen eingesetzt wird, kommen dort auch häufig MR-Kontrastmittel zum Einsatz, und das gleiche gilt für die meisten MR-Anwendungen im Körperstamm. Nur bei der Anwendung von MR bei Erkrankungen der Knochen und Gelenke wird MR-Kontrastmittel weniger eingesetzt.

Nebenwirkungen von MR-Kontrastmitteln existieren ebenfalls, sind aber anderer Art als Nebenwirkungen von Röntgenkontrastmitteln. Wieder wird auf eine intakte Nierenfunktion geachtet. Allergische Reaktionen auf MR-Kontrastmittel sind noch viel seltener als auf Röntgenkontrastmittel, denn die verwendete Konzentration ist 10–100-mal kleiner. Beschrieben sind bleibende Nierenschäden bei schlecht funktionierenden Nieren und wieder wird daher vor jeder Untersuchung die Nierenfunktion kontrolliert. Wenige Gadolinium-Atome können sich vom Molekülkomplex, in welchen sie gebunden sind, lösen und sich in gewissen Hirnstrukturen, im Knochen und Bindegewebe anlagern. Ob Anlagerungen nach vielfacher Anwendung von kontrastmittelverstärktem MR zu Langzeitschäden im Patienten führen, ist nicht be-

kannt. Nach Abermillionen von Anwendungen sind keine negativen Effekte gemeldet worden, also wären solche Schäden – wenn überhaupt vorhanden – sehr selten. Grundsätzlich gilt wie beim Einbringen jeglicher Substanz in den Menschen: Nur mit guten Gründen MR-Kontrastmittel einsetzen.

7.4 Kontrastmittel für Ultraschalluntersuchungen

Kontrastmittel im Ultraschall werden viel weniger gebraucht, als bei Röntgen-, CT- und MR-Untersuchungen. Sie ermöglichen im Wesentlichen eine bessere Darstellung der Blutgefäße. Die verwendeten Substanzen sind Mikroluftbläschen, die durch eine geeignete Bläschen-„Haut“ Luft eingeslossen halten können. Wenn die Bläschen mit der Blutzirkulation in den Untersuchungsbereich gelangen, beginnen sie zu schwingen oder platzen, wie wir dies bei grossen Seifenblasen beobachten. Dadurch werden die zurückgeworfenen Schallwellen und damit das Ultraschallbild verändert, eben kontrastiert. Genau wie bei den anderen Verfahren kann so die Durchblutung eines Organs oder Gewebes besser dargestellt werden, als in den Bildern ohne Kontrastmittel.

7.5 Die Welt der radioaktiven Tracer

Radioaktive Tracer sind in verschiedener Hinsicht ein Spezialfall von Kontrastmitteln. Erstens haben Menschen keine Radioaktivität in sich. Legt man Sie unter eine NUK/PET-Kamera, sieht man gar nichts. Dies ist grundsätzlich verschieden von den anderen bildgebenden Verfahren, mit denen Bilder des Patienten auch ohne Kontrastmittel erhalten werden. Zweitens – und weil eben gar kein Hintergrundsignal aus dem Patienten detektiert werden kann – können schon mit kleinsten Mengen extern zugeführter Radioaktivität Bilder erzeugt und so die verwendeten Tracermengen extrem klein gehalten werden. Dies hat drittens und wie besprochen, den enormen Vorteil, dass viel mehr Moleküle als potentielle Tracer für NUK/PET in Frage kommen, als Kontrastmittel für Röntgen, CT, MR und Ultraschall. Es gibt praktisch keine Moleküle, die in den Kleinstmengen schädlich sind, wie sie bei NUK/PET verwendet werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, eine Vielzahl von molekulärbiologischen Prozessen bildlich darzustellen.

Wie im Kapitel 4 erklärt und im Kapitel 8 vertieft, sollten radioaktive Tracer ihre „Strahlkraft“ relativ rasch (innert Stunden) verlieren und / oder den Körper rasch verlassen, damit der Patient nicht einer unnötigen Strahlenbelastung ausgesetzt ist. Als Folge davon kann man „gute“ radioaktive Tracer nicht lagern: sie zerfallen. Vor teilhafterweise entsorgen sich radioaktive Tracer selbst, sei dies schon im Patienten oder wenn sie den Körper z. B. als Urin verlassen haben; sie zerfallen einfach kurzfristig in nichtradioaktive Substanzen. Ein Problem mit der Entsorgung von kurzlebigen radioaktiven Substanzen gibt es damit nicht. Weil die bei NUK/PET verwendeten radioaktiven Atome so rasch zerfallen, müssen viele radioaktiven Tracer in jeder nuklearmedizinischen Abteilung täglich neu hergestellt oder von regionalen Radiophar-

maziezentren hergestellt und geliefert werden. Dies ist aufwändig und so sind die meisten radioaktiven Tracer kostspielig. Eine einzelne Dosis kostet rasch einmal mehrere hundert oder gar 1000–2000 CHF. Um radioaktive Tracer herzustellen, braucht es Geräte, die radioaktive Atome erzeugen können, sog. Zyklotrons oder im Volksmund auch Atomschleudern genannt (Kap. 11). Hat man diese hergestellt, muss man mittels chemischer Reaktionen Kleinstmengen von biologischen Molekülen mit den radioaktiven Atomen zu radioaktiven Tracern verarbeiten (Kap. 10).

Es ist wichtig, dass Sie als Patient wissen, dass radioaktive Tracer insbesondere im PET in technisch hoch komplexen Verfahren täglich neu hergestellt werden müssen. So gibt es auch gelegentliche Pannen in der Herstellung und Ihre Untersuchung muss dann kurzfristig verschoben werden. Dies steht ganz im Gegensatz zu Kontrastmitteln und den meisten Medikamenten, die nicht radioaktiv, sondern stabil sind und so langfristig gelagert werden können. Wie gesagt sind radioaktive Tracer, die für die medizinische Bildgebung eingesetzt werden, Medikamente. Sie dienen aber ausschliesslich dazu, Bilder zu machen und haben als biologische Moleküle keine gesundheitsfördernden oder schädigenden Effekte. Das Gefahrenpotential radioaktiver Atome und von verschiedenen Strahlenarten wird im Kap. 8 diskutiert.

Unten listen wir die Substanzklassen, die in der NUK/PET zur Anwendung kommen. Die Tracer, die ich auch gerne Stoffwechselspione nenne, erlauben es, verschiedene biologische Prozesse im menschlichen Körper auf ihre Funktionsfähigkeit zu überprüfen:

1. **Tracer zur Darstellung der Organdurchblutung**
Beispiel: radioaktives Ammoniak im PET
2. **Tracer, welche die Ausscheidungsfunktion der Leber in die Gallenwege darstellen**
3. **Tracer für die Darstellung des Jodstoffwechsels der Schilddrüse**
Beispiel: radioaktives Jod
4. **Tracer, die den Umbau von Knochen zeigen**
Beispiel: radioaktives Fluor (Fluor geht in den Knochen und die Zähne, wie Sie von Ihrer Zahnpasta wissen) zur Darstellung von Knochen- und Gelenkerkrankungen
5. **Tracer, die die Funktion beider Nieren seitengetrennt darstellen**
Beispiel: eine Substanz, die beim Durchfluss durch die Nieren gut ausgeschieden wird.
6. **Tracer, die den Zuckerstoffwechsel zeigen**
Beispiel: das mehrfach erwähnte FDG Molekül, ein radioaktiv markierter Zucker, welches bei vielen bösartigen Tumoren eingesetzt wird
7. **Tracer für den Aminosäuren-Stoffwechsel**
Beispiel: radioaktiv markiertes Methionin oder Tyrosin zur Darstellung von Hirntumoren
8. **Tracer, die das Entstehen von neuen Zellwänden zeigen**
Beispiel: radioaktiv markiertes Cholin zur Darstellung von Prostatatumoren
9. **Tracer, die die Ablagerung von speziellen Eiweissmolekülen zeigen**
Beispiel: die Alzheimerkrankheit ist durch die Ablagerung des sog. Amyloid

im Hirn charakterisiert. Tracer, die sich in Amyloid anreichern, werden im PET zur Alzheimer-Diagnostik verwendet

10. Tracer für spezielle Moleküle (Rezeptoren) auf Zellen

Beispiel: gewisse neuroendokrine Tumoren (z. B. Karzinoid-Tumoren) und viele Prostatakarzinome haben Oberflächenstrukturen, an die spezifische radioaktive Tracer sehr spezifisch „andocken“ können.

11. Tracer, die als Botenstoffe im Hirn und anderen Organen vorkommen

Beispiel: das Hirn funktioniert zum Teil mit chemischen Botenstoffen, die an sog. Rezeptoren („Empfänger“) andocken. Bei der Parkinson'schen Krankheit können Defizite an solchen Rezeptoren mit NUK- und PET-Tracern dargestellt werden oder es können die „Valium“-Rezeptoren im Hirn aufgezeigt werden.

12. Einige weitere Tracer für seltener Untersuchungen

Beispiele: Darstellung des Knochenmarks, der Nebenniere usw.

In dieser Liste sollte Ihnen die breite Palette von Molekülen auffallen, die in der NUK/PET zum Einsatz kommen und uns damit ein grosses Spektrum von Informationen über Krankheiten erschliessen. Die Kontrastmittel, welche in den anderen bildgebenden Verfahren zum Einsatz kommen, gehören im Wesentlichen den Gruppen 1, 2 und 5 an.

7.6 Zusammenfassung

Kontrastmittel sind aus der modernen medizinischen Bildgebung nicht wegzudenken. Kontrastmittel und radioaktive Tracer in der medizinischen Bildgebung helfen, Krankheiten zu finden, genauer zu charakterisieren und unter anderem bösartige Gewebe gegen gutartige Gewebe abzugrenzen. Sie werden auch beim Einsatz der „Röntgenbrille“ gebraucht, z. B. um Gefäße sichtbar zu machen, wenn eine Gefässverengung erweitert werden soll.

Für eine NUK / PET-Untersuchung müssen radioaktive Tracer zwingend eingesetzt werden, denn der Patient strahlt nicht von alleine. Da radioaktive Tracer in Kleinstmengen verwendet werden können, um in NUK / PET Systemen sichtbar zu werden, können sehr viele Substanzen radioaktiv markiert werden und als Tracer dienen. Die Gefahr einer „Vergiftung“ mit radioaktiven Tracern gibt es nicht. Im Gegensatz zu Kontrastmitteln für Röntgen, CT, MR und Ultraschall können radioaktive Tracer sehr spezifisch sein, z. B. an Rezeptoren im Hirn oder der Prostata andocken und dort spezifische Krankheitsprozesse identifizieren. Eine weiterführende und sehr interessante Anwendung in der NUK ist, wenn radioaktive Atome an die verwendeten Tracer gebunden werden, die ihre Strahlung lokal deponieren, statt aus dem Patienten heraus zu strahlen. Damit können Tumoren dank lokaler Bestrahlung behandelt werden. Auf weitere Ausführungen zu diesem Thema wird hier verzichtet.

Die Kosten für CT- und MR-Kontrastmittel belaufen sich auf 100–200 CHF pro Anwendung. Die NUK- und PET-Tracer kosten je nach Tracer ganz verschieden viel. Die Tracerkosten für eine Schilddrüsenszintigraphie sind nicht höher als 50 CHF. Die teuersten NUK-Tracer kosten 1200–1300 CHF und PET-Tracer kosten zwischen 350 und 2000 CHF.

Wo Wissen und Glauben sich treffen

„Strahlen sind gesund“ hat einmal einer meiner Chefs gesagt. „Jährlich zieht es die Leute in die Berge, wo es mehr Röntgen- und Gammastrahlen hat, als im Flachland“. Ist diese provokative Aussage korrekt? Jedenfalls zeigt sie, dass Nebenwirkungen auf die Gesundheit, die von Strahlen ausgehen, nicht so einfach zu fassen sind. Wenn wir von Strahlen, Strahlenwirkungen und Strahlenschutz reden, sei dies in der Medizin, bei einem Atomkraftwerk oder gar bei Atombomben, sprechen wir vor allem über Röntgen- oder kernassoziierte Strahlung, die wir **ionisierende Strahlung** nennen¹. Wie besprochen, finden sie in der Medizin bei Röntgen, CT, NUK und PET Verwendung. Ionisierende Strahlen werden aber auch zur Behandlung eingesetzt (Strahlentherapie, Radioonkologie). Dort sind aber die Stärke der Strahlen (die Strahlendosis) bis zu 1000-fach höher. Wir gehen hier nicht weiter auf die Strahlenbehandlungen ein: Dies ist ein Buch über medizinische Bildgebung.

Auch bei MR und Ultraschall werden Wellen verwendet und auch dort sind mögliche Nebenwirkungen zu beleuchten. Sie sind aber anders geartet. Was wir aus der millionenfachen Anwendung von allen Strahlen/Wellen in der medizinischen Bildgebung wissen ist: Die verwendeten Dosen (von Dosis = Mengen) sind extrem gering und unerwünschte Nebenwirkungen nur bei exzessiver Anwendung nachweisbar. Die Diskussion möglicher Nebenwirkungen auf den Patienten fokussiert in diesem Kapitel zuerst auf Röntgen- und Gammastrahlen und dann auf die Radiowellen und Ultraschallwellen, die beim MR, bzw. beim Ultraschall zum Einsatz kommen.

¹ Neben Röntgen- und Gammastrahlen sind auch Teilchenstrahlen, wie Elektronen, Protonen usw. je nach ihrer Energie ionisierend.

8.1 Ionisierende Strahlen: Röntgen- und Gammastrahlen

Ionisierende Strahlen können direkt chemische Verbindungen in unserem Erbgut zerreißen und so Schäden verursachen. Ebenso können sie höchst reaktive Sauerstoffverbindungen erzeugen, die dann unser Erbgut schädigen: Sie können eben Ionen erzeugen. Nun sind wir vom Weltall her und auch von Gesteinen in der Erde permanent kleinen Mengen von ionisierenden Strahlen ausgesetzt: Es existiert also eine „natürliche“ Strahlenbelastung. Diese ist in den Bergen höher, weil die dünnere Atmosphäre die Weltallstrahlen weniger abschirmt, und sie kann stark variieren, je nachdem, wo man sich auf der Erde aufhält. Es gibt Landstriche, in denen es viel radioaktives Gestein (Kap. 11) gibt, das Strahlen abgibt. Die Einwohner dort sind also ebenfalls höheren Strahlendosen ausgesetzt als anderswo. Die für die folgenden Betrachtungen relevante Masseinheit für eine Strahlendosis (Menge) ist das „Sievert (Sv)². Wir sind Strahlendosen durch die natürliche Bestrahlung aus dem Weltall und durch Gestein von circa 1–5 tausendstel Sievert pro Jahr ausgesetzt (Tab. 8.1). Die Zahlen der natürlichen Strahlenbelastung lassen sich mit den Strahlendosen vergleichen, die in der Medizinischen Bildgebung verwendet werden. An den erwähnten speziellen Orten kann die natürliche Strahlendosis wesentlich höher als 1–5 tausendstel Sv und bis zu 20 tausendstel Sv im Jahr betragen. Wie gesagt, ist die Strahlendosis auch in der Höhe wegen geringerer Abschirmung durch die Atmosphäre höher. Für Sie interessant dürfte sein, dass man bei einem Flug auf 10.000–12.000 Metern Höhe einer zusätzlichen Strahlendosis von etwa 5 millionstel Sv pro Stunde ausgesetzt ist. Bei einem Flug von Zürich nach Peking setzt man sich also einer zusätzlichen Strahlendosis von etwa 50 millionstel Sv aus. Ein Geschäftsreisender, der 20 Interkontinentalflüge pro Jahr absolviert, kann also mit einer zusätzlichen Strahlendosis von etwa 1 tausendstel Sv/Jahr rechnen. Wenn man in einem klimatisierten Steinhaus statt in einem Holzhaus wohnt, erhöht sich die Strahlendosis ebenfalls, denn Steinwände produzieren ein radioaktives Gas, das Radon. Ist das Haus klimatisiert, dann wird der grosse Teil der Luft rezirkuliert und ebenso das in der Luft enthaltene Radon. Vergleicht man zwei Häuser gleicher Bauart, ist die Strahlendosis im klimatisierten Haus höher als im nicht klimatisierten Haus. Die Strahlendosis einer beruflich strahlenexponierten Person, also eines Radiologen, eines Nuklearmediziners, eines Röntgenassistenten oder auch eines Linienpiloten darf einen Grenzwert von 2 hundertstel Sv im Jahr nicht übersteigen. Bei einem einmaligen Einsatz in Notfällen darf die Dosis maximal ein zehntel Sv total betragen. Wenn die Arbeiter beim Aufräumen im Kraftwerk Fukushima in Japan diesen Wert erreichten, wurden sie ausgewechselt. Die verschiedenen Zahlen sind zum Vergleich in Tab. 8.1 zusammengestellt.

Einfache Röntgenuntersuchungen verursachen eine zusätzliche Strahlendosis von um die 50 millionstel Sv. Dabei hat in den letzten 30 Jahren eine massive Dosisreduktion stattgefunden. Eine gleiche Untersuchung verursachte damals mindestens die zehnfache zusätzliche Strahlendosis, also > 0,5 tausendstel Sv. CT-Untersuchungen und Untersuchungen mit „Röntgenkino“ können Dosen von bis zu 20 tausends-

² Die Masseinheit ist nach Rolf Sievert, 1896–1966, schwedischer Arzt und Physiker, benannt.

Tab. 8.1 Belastungen des Menschen durch ionisierende Strahlung (Angaben in Millisievert, der Einheit für Strahlendosen)

Quelle	In tausendstel Sievert (Sv). Dosis	Bemerkungen
Generelle Strahlenbelastung		
Natürliche Strahlenbelastung	1–5/Jahr	An spez. Orten bis 20/Jahr
Nat. Strahlenbelastung auf 10.000 m Höhe	0,005/Stunde	
8-stündiger Interkontinentalflug	0,04–0,05	Pro Flug
20 Interkontinentalflüge im Jahr	1/Jahr	
*Linienvpilot = 200 Interkontinentalflüge im Jahr	10/Jahr	
Beruflich Strahlenexponierte	20/Jahr	Nicht mehr als 100 in 5 Jahren
Total zulässige Einzeldosis	100	
Normale Bevölkerung	1/Jahr	
5 % zusätzliche Tumorraten bei	1000	Langzeitige Bestrahlung 0,005 % bei 1 tausendstel Sv
Patientenbezogene Dosen		
Einfaches Röntgenbild	0,05	
Röntgenkino	bis 20	
CT	10–20	
Modernste CT-Untersuchungen	1–5	
FDG-PET/CT	8–10	
PET/MR oder PET/CT mit neusten Kameras	2–3	

* Ein Linienvpilot gilt als beruflich strahlenexponiert. Weitere beruflich strahlenexponierte Personen in der Medizin sind Ärzte, Röntgenassistenten und Laboranten, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit mit ionisierenden Strahlen zu tun haben.

tel Sv verursachen (Kap. 2 und Kap. 3). Die viel höhere Dosis bei CT und Röntgenkino im Vergleich mit dem normalen Röntgen ist einfach zu verstehen. CT braucht viele Röntgenbilder, um Schnittbilder rechnen zu können (Kap. 3) und das Röntgenkino ist eine Serie von vielen Röntgenbildern (Kap. 2). Wie bei den normalen Röntgenbildern, hat man in den letzten Jahren auch bei CT grosse Fortschritte gemacht, ionisierende Strahlen effizienter zu nutzen. So werden heute CT-Untersuchungen oft mit weniger als 5 tausendstel Sv oder gar unter 1 tausendstel Sv durchgeführt. Die Dosis hängt stark davon ab, wie eine CT-Untersuchung durchgeführt wird, z. B. ob mehrere Bildserien notwendig sind oder ob Kontrastmittel verabreicht werden (Kap. 7) und ein dickerer Patient erhält eine höhere Strahlendosis als ein schlanker Patient.

NUK- und PET-Untersuchungen verursachen zusätzliche Strahlendosen von 0,5–10 tausendstel Sv. Da die radioaktiven Tracer spezifisch an gewissen Orten anreichern, ist dort die Strahlendosis oft am höchsten. Mit den neusten PET-Kameras liegt heute die Strahlendosis einer FDG-PET-Untersuchung (Kap. 4) im Bereich von 3 tausendstel Sv. Alle Zahlen finden sich auch in Tabelle 8.1.

Wenn Sie die genannten Strahlendosen vergleichen, sehen Sie jedenfalls, dass die natürliche Strahlenbelastung stark variieren kann und die durch Röntgen, CT oder PET verursachten Zusatzstrahlendosen vergleichbar oder etwas höher als die Werte der natürlichen Strahlenbelastung sind. Es ist somit schwierig zu argumentieren, dass Strahlen schädlich sind. Wenn wir also z. B. drei Jahre in Biel leben und 1 tausendstel Sv Dosis pro Jahr erhalten und in dieser Zeit eine Untersuchung mit ionisierenden Strahlen von 3 tausendstel Sv über uns ergehen lassen müssen ($3 \times 1 + 3 = 6$ tausendstel Sv), ist das gleich, wie wenn wir drei Jahre im Bergell leben und 2 tausendstel Sv natürliche Strahlendosis pro Jahr erhalten (6 tausendstel Sv), ohne eine Röntgenuntersuchung gehabt zu haben. Ist dann die Untersuchung schädlich?

Wir wollen versuchen, die Strahlen-, „Gefahr“ einzugrenzen und sie in Relation zu anderen Gefahren setzen. Die grösste „Gefahr“ bei wiederholten Anwendungen ionisierender Strahlen ist eine Schädigung des Erbgutes. Diese Schädigung verursacht am ehesten zusätzliche bösartige Tumoren. Nun gibt es hunderte von Gründen, warum man an einem Tumor erkranken könnte (Umweltgifte, Rauchen, Alkohol, etc.). Wenn Sie also an einem bösartigen Tumor leiden, kann man nicht nachweisen, ob er nun auf eine zusätzliche Exposition mit ionisierenden Strahlen zurückzuführen ist: höchst wahrscheinlich nicht, wie unten gezeigt. Weiter wird, wenn Sie einen Tumor haben, die Bilduntersuchung auf diesen Tumor keinen Einfluss nehmen. In Tab. 8.1 steht, dass bei 1 Sv, also einer riesigen Strahlendosis maximal 5 % zusätzliche Tumoren entstehen. In der Schweiz verstarben im Jahr 2014 16.500 Patienten an Tumoren. 5 % davon wären dann 5×165 oder etwa 825 bei 1 Sv. Bei einer realen Strahlenbelastung von 1 tausendstel Sv würden also 0,825 oder ca. 1 zusätzlicher Todesfall durch Krebs verursacht, bei 10 tausendstel Sv maximal 8–9. Vergleichen Sie diese Zahl mit den ca. 250 Menschen, die 2015 an Verkehrsunfällen verstarben.

Ob es zulässig ist, von der einigermassen gesicherten Zahl 5 % zusätzliche Tumoren bei 1 Sv auf eine 1000-mal kleinere Dosis zu schliessen, ist ebenfalls nicht sicher. Es gibt Gruppen von Wissenschaftlern, die behaupten, dass der Mensch speziell bei tiefen Strahlendosen empfindlicher ist, aber es gibt keine Daten, welche diese Behauptung sicher stützen. Darum gibt es auch Gruppen, die das Gegenteil behaupten. Damit sind Diskussionen um Strahlenschädigungen durch die medizinische Bildgebung eine Art Glaubensfrage. Jedenfalls ist das Risiko, wegen einer bildgebenden Untersuchung mit ionisierenden Strahlen an einem neuen Tumor zu erkranken, sicher sehr klein. Das Entscheidende ist: Der Arzt muss eine vernünftige Risikoabschätzung machen. In dieser Risikoabschätzung überwiegt in der grossen Mehrzahl der Fälle der dokumentierte Nutzen für den Patienten gegenüber dem möglichen Risiko, welches sich nicht einmal genau eingrenzen lässt.

Eine weitere mögliche Schädigung durch ionisierende Strahlen ist eine Schädigung der Nachkommen durch Veränderungen im Erbgut. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass dieses Problem sehr gering sein dürfte. Zusätzlich geschieht der grösste

Teil der Anwendungen ionisierender Strahlung in der Medizin bei Patienten, die ihre Nachkommen schon gezeugt haben. Insgesamt ist es sicher so, dass Kinder strahlensensitiver sind und daher bei Kindern Untersuchungen mit ionisierenden Strahlen sehr zurückhaltend eingesetzt werden sollten. Weil die Strahlendosen auf der Uerde wesentlich höher waren, hatte vielleicht die natürliche ionisierende Strahlung und die dadurch möglicherweise immer wieder erzeugten Veränderungen im Erbgut einen Anteil daran, dass sich auf der Erde eine so grosse Artenvielfalt entwickeln konnte.

Die Natur hat uns Lebewesen mit Mechanismen ausgestattet, welche durch ionisierende Strahlen erzeugte Schäden am Erbgut sofort reparieren können, so lange die Bestrahlung nicht zu intensiv ist. Wir sehen auch hier wieder, dass der Satz von Paracelsus: „die Menge macht das Gift“ seine Gültigkeit hat. Wir wissen von den Atombombenabwürfen in Japan und vom Reaktorunfall in Tschernobyl, dass hohe Dosen an ionisierenden Strahlen gefährlich sein können. Das grosse Problem ist es, zu messen, ob es eine Schwelle gibt, unterhalb welcher Strahlen ungefährlich sind. Anzeichen besagen, dass es keine solche Schwelle gibt. Oben haben wir gesehen, dass bei geringen Strahlendosen aber das Zusatzrisiko an Krebs zu erkranken so klein ist, dass man eben ionisierende Strahlung zur Medizinischen Bildgebung bedenkenlos anwenden kann. Mit andern Worten ist der direkte Zusammenhang zwischen Schäden am Erbgut und dem Entstehen von bösartigen Tumoren nicht einwandfrei zu dokumentieren. Da wir nicht genau wissen, wie sich tiefe Dosen ionisierender Strahlendosen auf den Menschen auswirken, behaupten die einen das eine und andere etwas anderes. Wo keine Daten sind, da entstehen eben „Religionsgemeinschaften“!

Grundsätzlich macht es aber Sinn, mit Strahlen sorgfältig und bewusst umzugehen. Entsprechend halten sich alle Berufssparten, die mit Strahlen umgehen, an das sogenannte ALARA-Prinzip (**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable): Strahlen sollen so wenig eingesetzt werden, wie vernünftigerweise möglich. Es wird dem Arzt überlassen, eine Risikoabwägung zu machen, aber wie gesagt, kennen wir das Risiko nur ungenau. Wichtig ist, dass Sie die Strahlenmenge, der Sie bei einer medizinischen Untersuchung mit ionisierenden Strahlen ausgesetzt werden, in Relation zu Strahlendosen setzen, denen Sie sowieso ausgesetzt sind.

Wenn Sie also Angst vor ionisierenden Strahlen haben, dann beachten Sie folgendes. Überall auf der Welt hat es ionisierende Strahlen, Sie können also nicht wegrennen. Sie könnten sich bestenfalls ein Haus aus dicken Bleiwänden bauen, aber das wäre ein ungemütliches Haus ohne Fenster. Und klimatisieren dürften Sie es auch nicht. Sie können auf Ferienreisen im Flugzeug verzichten, um sich vor Strahlen zu schützen. Wenn Sie krank sind, dann sind sie durch die Krankheit viel stärker gefährdet, als durch eine CT- oder PET-Untersuchung, die es brauchen mag, um die Krankheit richtig zu behandeln. Entsprechend ist es eben dem Ermessen des Arztes überlassen zu entscheiden, wann er welche Untersuchung einsetzen will.

Vor ionisierenden Strahlen schützen müssen sich vor allem die beruflich strahlenexponierten Ärzte und Röntgenassistenten, denn im Gegensatz zu einem Patienten sind sie täglich in viele Untersuchungen mit ionisierenden Strahlen involviert. Es gibt drei Wege, sich vor Strahlen zu schützen:

1. **Abschirmung:** das Personal ist während einer Röntgen- CT-, NUK- oder PET- Untersuchung durch Bleiwände vom Röntgengerät oder dem Patienten getrennt. Blei absorbiert ionisierende Strahlen sehr gut.
2. Wenn wir uns vor Strahlen schützen wollen, müssen wir möglichst **Abstand** von der Strahlenquelle halten. Da bei NUK und PET nach Verabreichung eines radioaktiven Tracers der Patient eine Strahlenquelle ist, muss das behandelnde Personal so gut wie möglich Abstand vom Patienten halten.
3. Je länger man von einer Strahlenquelle bestrahlt wird, desto höher ist die Strahlendosis. Es muss also die **Aufenthaltsdauer** beim Patienten reduziert werden, wenn das Röntgengerät eingeschaltet oder der Patient wegen einer NUK- / PET- Untersuchung radioaktiv ist.

Abschirmung, Abstand und Aufenthaltsdauer nennt man die drei **A** des Strahlenschutzes.

8.2 Radiowellen im MR

MR wird generell als ungefährlich eingestuft. Magnetfelder und sich ändernde Magnetfelder haben bei den im MR verwendeten Stärken wenig Effekte auf den Menschen. Dies ist mit Grund, warum MR heute sehr häufig angewendet wird. Trotzdem ist von einem sorglosen Umgang mit MR ebenfalls abzuraten. Wir haben im Kap. 5 schon auf gewisse Gefahren von Magnetfeldern hingewiesen und fokussieren hier zuerst auf die Radiowellen, die das MR zum Anregen der Magnetkreisel in den Patienten sendet. Nach bestem Wissen sind Radio- und Mikrowellen, ihre Geschwister, ungefährlich und sie umgeben uns permanent. Fernsehen, Radio, Mobiltelefone, schnurlose Telefone, WiFi-Antennen im Haus, sie alle verwenden diese Wellen als Informationsträger. Wir „baden“ also permanent in Radio- und Mikrowellen. Wir wissen von Mikrowellen, die sich durch etwas kürzere Wellenlängen als die der Radiowellen auszeichnen, dass sie Nahrungsmittel erwärmen können (Mikrowellenofen). Radiowellen haben diese Fähigkeit ebenfalls, allerdings nur bei viel höheren Dosen. Entsprechende Sicherungen, um ein zu starkes Aufwärmn des Patienten zu verhindern, sind in den MR-Systemen eingebaut. Radiowellen sind nichtionisierende Strahlen. Sie können also die Erbsubstanz nicht direkt schädigen. Radiowellen können aber in Metallobjekten, die einem Patienten aus medizinischen Gründen eingesetzt wurden (Prothesen / Herzschrittmacherdrähte) Ströme erzeugen, die dann im schlimmsten Fall zu inneren Verbrennungen führen können. Entsprechend muss das Personal um die Metallobjekte wissen, die sich in Ihrem Körper befinden. Im Gegensatz zur Situation bei den ionisierenden Strahlen sind alle hier beschriebenen Gefahren, die mit MR einhergehen, kontrollierbar. Es sind Nebeneffekte, welche die Bildgebung nicht stören und die man, wenn man um sie weiss, beherrschen kann. Bei ionisierenden Strahlen hingegen werden eben die Strahlen zwingend gebraucht, um die Bilder anzufertigen.

Eine Gefahr durch Magnetfelder besteht nach heutigem Wissen nicht, solange der Patient keine magnetischen Materialien in oder auf sich trägt. Entsprechende Vor-

sichtsmassnahmen können einfach getroffen werden, wenn das Personal informiert ist. In den letzten Jahren wurde eine interessante Beobachtung gemacht. Eine MR-Untersuchung erzeugt – ähnlich wie die ionisierenden Strahlen – ebenfalls Doppelstrangbrüche der Erbsubstanz. Die Ursache ist unklar. Vielleicht werden die oben erwähnten Reparaturmechanismen solcher Schäden während der MR-Untersuchung durch die Magnetfelder behindert. Dann würden die durch die natürliche Bestrahlung mit ionisierenden Strahlen entstehenden Schäden im Erbgut weniger rasch beseitigt und nach einer MR-Untersuchung würde man entsprechend mehr davon sehen. Selbstverständlich ist man auch im MR der natürlichen Strahlenbelastung durch ionisierende Strahlen ausgesetzt. Was man mit dieser Information über einen Zusammenhang zwischen Schäden am Erbgut und einer MR-Untersuchung machen soll, weiß man nicht. Auch hier sind wir wieder dazu „verdammt“ zu glauben, dass MR ungefährlich ist, oder eben doch minimale Gefahren birgt.

Wie dem auch sei, die Gefahren sind so extrem gering, dass MR bedenkenlos angewendet werden kann.

8.3 Ultraschall-Wellen

Ultraschall wird in den Dosen, wie sie in der Diagnostik angewendet werden, als völlig ungefährlich angesehen. Wegen der Einfachheit der Ultraschallsysteme (Kap. 6) und ihrer Gefahrlosigkeit sind Ultraschallgeräte zu den Stethoskopen der modernen Medizin geworden und stehen heute fast in jeder Arztpraxis. Schallwellen erzeugen ebenfalls Wärme im menschlichen Körper und mit fokussiertem Ultraschall kann man sogar Tumoren im Körperinnern „verheizen“. Die von den Schallwellen auf die Körperzellen ausgeübten Scherkräfte können Zellmembranen schädigen und es gibt auch gewisse Hinweise, dass die Reparaturmechanismen des Erbguts ähnlich wie im MR ebenfalls behindert werden können. Auch hier tappen wir im Dunkeln und Warnungen vor Schäden basieren auf „Glauben“ und nicht auf experimentell gesicherten Tatsachen. Wieder darf aber mit gutem Gewissen gesagt werden: Falls tatsächlich Schäden durch Ultraschall-Untersuchungen auftreten, sind diese so gering, dass sie gegenüber dem medizinischen Nutzen völlig vernachlässigt werden können.

8.4 Zusammenfassung

Ionisierende Strahlen in hohen Dosen können Nebenwirkungen haben. Schäden am Erbgut, die nach geraumer Zeit zu zusätzlichen Tumoren führen können, sind bei hohen Strahlendosen dokumentiert. Bei den in der medizinischen Bildgebung zur Anwendung kommenden ionisierenden Strahlen sind die Dosen jedoch so gering, dass negative Effekte nicht nachweisbar sind. Mögliche Schäden sind daher immer in Relation zum möglichen Nutzen zu setzen. Wenn wir bedenkenlos in der Welt herumfliegen und uns in voll klimatisierten Steinhäusern aufhalten, dann können wir

uns auch bedenkenlos einer CT- oder PET-Untersuchung unterziehen. Die Strahlendosen verschiedener Untersuchungen sind in Tabelle 8.1 in Relation gesetzt.

MR und US können als vollkommen gefahrlos angesehen werden. Die wenigen Hinweise, dass eventuell doch negative Nebenwirkungen auftreten können, sind mit Vorsicht zu bewerten. Der Nutzen überwiegt fragliche negative Nebenwirkungen massiv. Eine leichte Körpererwärmung, die im MR fühlbar ist, ist unproblematisch. Um diese Erwärmung im Rahmen zu halten, sind entsprechende Sicherungen in den MR-Systemen eingebaut. Die Gefahr, die von metallischen Objekten im MR ausgeht, erfordert nur, dass der Patient vor der Untersuchung das Personal informiert.

„Es werde Licht“

Sehen ist lebensnotwendig. Und in den menschlichen Körper hineinsehen ist aus der modernen Medizin nicht mehr wegzudenken. Aber wie sehen wir überhaupt? Wir wissen, dass es Licht braucht. Im Dunkeln sieht man nichts. Aber warum sehen wir Licht? Es gibt auch viele Dinge zu „sehen“, die unseren Augen verborgen sind. Heute sind wir in der Lage, mit Hilfsmitteln kleinste Dinge, wie Atome zu sehen. Wir sehen kleine Dinge mit Mikroskopen, die schon im 17. Jahrhundert erfunden wurden und dafür verantwortlich sind, dass man erkannte, dass die Erde um die Sonne kreist und nicht umgekehrt. Wir sehen noch kleinere Dinge mit Elektronenmikroskopen. Wir sehen verborgene Dinge im Weltall mit modernen Fernrohren, unseren grossen Teleskopen und Antennen. Wir haben gelernt, dass uns mit unseren Augen nur ein sehr beschränkter Teil möglicher „Seh“-Erfahrungen zugänglich ist. Und schliesslich sehen wir eben heute mit verschiedensten Verfahren in den menschlichen Körper hinein und durch den Menschen hindurch. Während wir in den vorhergehenden Kapiteln die verschiedenen Arten, in den Menschen hineinzusehen besprochen haben, wollen wir uns hier etwas allgemeiner mit Sehen und Wellen befassen.

9.1 Wellen

Die Natur hat uns dazu befähigt, sichtbares Licht zu sehen, darum heisst es ja so. Licht gehört zur grossen Gruppe der **elektromagnetischen Wellen**, zu der auch Infrarot, Mikrowellen, Radiowellen, Ultraviolett und Röntgenstrahlen sowie ihre Schwestern, die Gammastrahlen gehören. Während wir Licht sehen können, können wir Wärme nicht sehen, sondern nur spüren. Aber bis zu einem gewissen Grad „sehen“ wir Wärme auch. Wir können mit einer Hand in einem kleinen Abstand über eine heisse Herdplatte fahren und wissen dann, wo sie sich etwa befindet. Andere elektromagnetischen Wellen können wir mit unseren Sinnesorganen nicht erfassen. Jedes schnurlose Telefon, jeder Radiosender, jedes WLAN sendet solche unsichtba-

ren elektromagnetischen Wellen aus, in diesem Fall Radiowellen¹, die wir nicht sehen und nicht spüren. Eine wichtige Eigenschaft von elektromagnetischen Wellen ist, dass sie über grosse Distanzen Information von einem Ort zum andern transportieren können. Wir sehen Lichtwellen, die aus unserer Umgebung kommen, mit unseren Augen und empfangen so zeitlich bewegte Bilder, wir können aber auch Sterne sehen, die weit weg sind. Immer sind dies Lichtwellen, die von einem Gegenstand in unsere Augen gelangen und es damit möglich machen, dass wir ihn sehen. Wir haben in den letzten paar Jahrhunderten gelernt, auch nicht sichtbare elektromagnetische Wellen sichtbar zu machen. Wie, werden Sie in diesem Kapitel erfahren.

Es gibt auch andere Wellen, wie z. B. Schallwellen. Für diese hat die Natur unser Gehör entwickelt. Auch Schallwellen kann man „sichtbar“ machen, Schall kann aber nicht über sehr weite Distanzen gelangen. Und es gibt Materiewellen und neuerdings sind sogar Gravitationswellen gemessen worden, die wir mit speziellen Geräten sichtbar machen können. Die letzten beiden Arten von Wellen erlauben uns zwar auch, hochinteressante Informationen über die Natur zu gewinnen, werden aber in der Medizinischen Bildgebung nicht verwendet.

9.1.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind Manifestationen der Natur und können elektrische Ladungen wellenförmig bewegen, ähnlich wie wenn ein Blatt auf einem See von einer Welle auf und ab bewegt wird: Das Blatt ist einmal auf einem Wellenberg, dann wieder in einem Wellental. Wenn wir einen Film des Blattes aufnehmen, und ihn abspielen, bewegt sich das Blatt in der Zeit auf und ab. Würden wir statt eines Blattes ein elektrisch geladenes Teilchen und statt einer Wasserwelle eine elektromagnetische Welle sehen können, würden wir das gleiche beobachten, allerdings würde das Auf-Ab sehr viel schneller ablaufen.

Albert Einstein und andere Physiker haben Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts mit ihren Experimenten gezeigt, dass sich elektromagnetische Wellen manchmal auch wie Teilchen verhalten können, die man „Photonen“ nennt. Dies ist eine aufregende Erkenntnis: eine Welle ist nicht nur eine Welle, sondern manifestiert sich manchmal auch als Teilchen, je nach der Beobachtungsweise. Ob man von Lichtwellen, Lichtstrahlen oder Lichtphotonen spricht, ist es das Gleiche. Wenn wir Beobachtungen über elektromagnetische Wellen machen, dann ist es manchmal einfacher, diese Beobachtungen zu verstehen, wenn wir sie als Teilchen betrachten und nicht als Wellen. Wir verstehen intuitiv, dass Objekte oder Subjekte einander herumschubsen können. Ich kann einem Kollegen einen Stoss versetzen oder eine Billardkugel kann eine andere wegstoßen. Es ist schwieriger, sich vorzustellen, wie eine Welle es fertig bringt, ein Objekt, z. B. ein Elektron, aus einem Atom wegzuschubsen.

¹ Radiowellen sind nicht die Wellen, die wir aus dem Radio kommen hören. Aus dem Radio kommen Schallwellen. Aber mit Schall können wir nur beschränkte Distanzen überwinden, während ein Radiosender mit den elektromagnetischen Radiowellen eine grosse Reichweite bis zu Ihrem Radio hat. Ein Radiogerät macht Radiowellen nicht sichtbar, aber hörbar!

Die Natur hat unsere Augen so eingerichtet, dass wir gewisse elektromagnetische Wellen sehen können, und zwar die, welcher die Sonne am intensivsten ausstrahlt: sichtbares Licht. Nachts bei Neumond hat es sehr wenig sichtbares Licht, aber Infrarotwellen hat es überall. Wir Menschen und Tiere strahlen Wärme ab, und Wärmestrahlung ist nichts anderes als Infrarotstrahlung. Wir Menschen sehen Infrarot nicht, aber können die Wärmestrahlung mit Nachtsichtgeräten (Infrarot-, „Brillen“) sichtbar machen. Nachtaktive Tiere sehen zusätzlich zum sichtbaren Licht oft auch einen Teil der Infrarotstrahlung. Wie wir sehen werden, kann man heute auch alle anderen nichtsichtbaren elektromagnetischen Wellen „sichtbar“ machen, also auch jene, für die wir keine Sinnesorgane entwickelt haben.

Elektromagnetische Wellen können auf verschiedene Weise mit Materie in Wechselwirkung treten. Sie können zurückgeworfen werden, wie ein Anteil sichtbaren Lichtes, wenn es auf z. B. einen Menschen trifft. Darum können wir auch unser Gegenüber sehen. Sie können aber von einem Menschen auch aufgenommen werden wie Infrarotstrahlen oder Mikrowellen, die dann unseren Körper wärmen. Gewisse elektromagnetische Wellen können durch einen Menschen hindurchtreten und werden dabei nur teilweise aufgenommen, wie z. B. Röntgenstrahlen. Beim sichtbaren Licht ist dies offensichtlich nicht der Fall. Licht kann aber zum Beispiel durch Glas hindurchtreten.

9.1.2 Schallwellen

Wir können nicht nur sehen, wir können auch Töne hören. Wir hören relativ tiefe Töne mit sehr langen Wellenlängen, aber bei kurzen Schallwellenlängen – sprich hohen Tönen – sind unsere Ohren in ihrer Hörfähigkeit nach oben eingeschränkt, insbesondere im Alter. Wir können hörend auch etwas „sehen“, denn wir hören, aus welcher Richtung ein Ton kommt. Diese Fähigkeit zur Ortung einer Schallquelle wird von Fledermäusen und Delphinen zum „Sehen“ benutzt: Wie gesagt, man kann eben auch ohne Augen Dinge „sehen“. Fledermäuse können sich in der Nacht orientieren, weil sie auch mit Tönen „sehen“. Fledermäuse und Delphine senden „Rufe“ aus. Diese liegen allerdings teilweise oder ganz im Ultraschallbereich, haben also Wellenlängen, die zu kurz sind, als dass wir sie hören können. Wenn wir selbst „Rufe“ aussenden, und sie beispielsweise von einer Felswand zurückgeworfen werden, wissen wir ungefähr, woher das Echo kommt, also wo die Felswand etwa steht. Wir „sehen“ so mit unseren Ohren. Fledermäuse und Delfine können dank ihrer sensiblen Ohren sehr genau mit den Ohren „sehen“.

Schallwellen sind Druckschwankungen in der Materie. Im Weltall, wo es keine Materie gibt, hört man nichts. Wenn wir vor einem grossen Lautsprecher stehen, spüren wir die tiefe Basstöne, die von ihm abstrahlen als Druckschwankungen. Wenn Schallwellen auf unsere Trommelfelle in den Ohren fallen, bewegen sich die Trommelfelle vor und zurück, sie vibrieren. Die so aufgenommene Vibration wird durch unsere Ohren ans Hirn weitergeleitet und wir hören einen Ton, je rascher die Vibrationen, je höher der Ton. Auch Schallwellen treten auf verschiedene Weise mit unserem Körper in Wechselwirkung. Schallwellen mit kurzen Wellenlängen werden

aufgenommen und erzeugen Wärme, wie Infrarot-Strahlen oder sie werden zurückgeworfen. Im Gegensatz zu Licht werden Schallwellen bei geeigneter Ankoppelung an den Körper aber an der Körperoberfläche nicht total zurückgeworfen, sondern dringen eine gewisse Distanz in den Körper ein und werden dann dort zurückgeworfen. Dieses Prinzip ist uns vom Echolot auf Schiffen bekannt. Schallwellen werden unter dem Schiff nach unten ausgesendet. Wasser wirft den Schall nur wenig zurück. Wenn die Schallwelle aber auf festen Grund trifft, wird sie zurückgeworfen und man kann durch das Messen der Laufzeit der Welle bestimmen, wie tief das Wasser an der gerade ausgemessenen Stelle ist.

9.1.3 Wellenlängen und Frequenzen

Alle Wellen sind durch eine Wellenlänge, beziehungsweise eine Frequenz charakterisiert. Die Wellenlänge ist Maß des Abstandes benachbarter „Berge“ und „Täler“ einer Welle. Die Frequenz einer Welle misst, wie viele Wellentäler und –Berge pro Sekunde an einem bestimmten Ort auftreten, und man misst sie in „Hertz“² (Hz). Wir kennen die „Hertz“-Angabe von unseren Radios oder Fernsehgeräten. Wellen mit kurzer Wellenlänge haben hohe Frequenzen und Wellen mit langer Wellenlänge haben tiefe Frequenzen. Es gilt ganz einfach: Wellenlänge mal Frequenz ist gleich der Geschwindigkeit einer Welle, welche bei allen elektromagnetischen Wellen inklusive Licht 300.000 km/s ist. Das sichtbare Licht hat für unsere Begriffe sehr kleine Wellenlängen von 4–8 Milliardstel Zentimeter, und die Frequenzen des sichtbaren Lichtes liegen im Bereich von 10^{14} Hz. Eine Lichtwelle hat also in einer Sekunde fast eine Million mal eine Milliarde Wellenberge- und Täler.

Schallwellen in Luft haben eine Geschwindigkeit von ca. 300 m/s, in Wasser etwa das dreifache. Die hörbaren Schallwellen haben Frequenzen von 20–20.000 Hz, was Wellenlängen von ca. 10 m bis 1 cm entspricht, wobei die obere Grenze im Alter auf unter 10.000 Hz absinkt. Gewisse Tiere wie Fledermäuse können aber Töne mit Frequenzen bis über 100.000 Hertz oder 100 kilo-Hertz (kHz) hören. Das hat etwas mit der besseren räumlichen Auflösung zu tun (s. unten). Wie wir sehen werden, sind die hörbaren Schallwellen für die Bildgebung ungeeignet, man braucht Ultraschall.

Das Fazit dieser Ausführungen ist: Wir sind für viele uns umgebende Wellen „blind“ oder „taub“. Wir haben **Sinnesorgane**, oder technisch ausgedrückt **Detektoren**, welche nur einen sehr beschränkten Frequenz- oder Wellenlängenbereich wahrnehmen könnten, unabhängig davon ob es sich um elektromagnetische- oder Schallwellen handelt. Ein grosser Teil der Physik der letzten zwei Jahrhunderte hat sich damit befasst, für den Menschen unsichtbare oder unhörbare Dinge „sichtbar“ zu machen. Heute haben wir „Fotoapparate“ und „Filmkameras“, welche die für uns unsichtbaren und unhörbaren Wellen wahrnehmen, eben mit geeigneten Detektoren detektieren können und dann mittels z. B. eines Computers so umwandeln, dass ein sichtbares Bild entsteht.

² Heinrich Hertz, deutscher Physiker, 1857–1894)

9.2 Wie können wir Objekte abbilden und sehen?

Eine der grössten wissenschaftlichen Erkenntnisse der Menschen ist tatsächlich: Es gibt noch andere Dinge zu „sehen“, als die Dinge, die wir sehen! Dazu haben Physiker fabelhafte Instrumente entwickelt. Auch haben die Physiker schon im 17. Jahrhundert verstanden, dass die Länge einer Welle bestimmt, was wir auflösen können. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts liegen, wie gesagt, um 5 milliardstel Zentimeter. Ohne „Tricks“ können wir – so lehren uns die Physiker – dann mit Licht eine maximale Auflösung von eben dieser Größenordnung erreichen (= sehen). Für unseren täglichen Gebrauch ist das mehr als ausreichend. Wir müssen bestenfalls ein Haar sehen können, das etwa einen Durchmesser von einem hundertstel Zentimeter hat. Ein Uhrmacher braucht immerhin ein Vergrößerungsglas für seine Arbeit. Für feinere technische Arbeiten, wie z. B. für die Herstellung eines Computerchips sind wir Menschen nicht zu gebrauchen: Es braucht dafür hoch-präzise Maschinen. Um mit einem Mikroskop menschliche Zellen mit Durchmessern von 5–20 tausendstel Millimeter zu sehen, reicht ein Mikroskop (das mit sichtbarem Licht arbeitet) aus. Aber die Bestandteile einer menschlichen Zelle, die kleiner als 1 zehntausendstel Millimeter sind, kann man mit dem Lichtmikroskop nicht sehen. Wir brauchen dann andere Systeme, wie zum Beispiel ein Elektronenmikroskop.

Unsere Augen detektieren Licht, also diejenigen elektromagnetischen Wellen oder Lichtstrahlen, welche unsere Sonne am häufigsten aussendet. Um zu verstehen, warum unsere Augen eben für sichtbares Licht ausgelegt wurden, nehmen wir einmal an, wir hätten Radiowellen-Augen. Es hat ja viele Radiowellen um uns herum und auch die Sonne strahlt Radiowellen ab. Radiowellenaugen sind für uns deshalb unbrauchbar, weil die Länge von Radiowellen im Bereich von 10 cm oder gar von Metern liegt. Mit so schlecht auflösenden Augen würden wir in jede Ampel am Straßenrand rennen und würden die Haustüre kaum finden, geschweige denn das Schlüsselloch. Zum Glück haben wir also Lichtaugen.

Wir können uns auch überlegen, wie es wäre, mit dem vielbeschworenen Röntgenblick herumzulaufen. Wäre das nicht wunderbar, wir könnten dann durch andere Menschen hindurchsehen und am Flughafen gäbe es keine aufwändigen Personenkontrollen. Stellen wir uns also vor, wir hätten Röntgenaugen. Die Wellenlängen der Röntgenstrahlen – und Ihrer Geschwister, der Gammastrahlen – sind sehr klein. Super! Dann könnten wir nicht nur durch andere Menschen hindurchsehen, sondern auch ganz kleine Dinge, vielleicht sogar Atome sehen! Die Realität ist aber: wir würden gar nichts sehen. Die Sonne und die Gegenstände in unserer Umgebung senden wenige Röntgenstrahlen aus. Wir könnten gar nichts sehen außer vielleicht ein leichtes Glimmen der Sonne und von Teilen des Weltalls, denn von dort kommen etwas Röntgenstrahlen (und deren Geschwister, Gammastrahlen). Wir würden vielleicht ganz wenige Gammastrahlen sehen, die aus Gesteinen kommen. Diese entstehen beim Zerfall von natürlich radioaktiven Atomen, von denen es einige in der Natur gibt, wie z. B. Uran (Kap. 11). In der Nähe eines Kernkraftwerkes würden wir auch nichts sehen, denn dort werden die Gamma- und Röntgenstrahlen aus dem Kernreaktor völlig abgeschirmt. Würden in unserer Welt permanent viele Röntgen- und Gammastrahlen vorhanden sein, könnte das auch Gefahren bergen, wie im Ka-

pitel 8 besprochen wurde. Mit Röntgenaugen könnten wir zwar im Prinzip Atome sehen, aber nur wenn sie mit Röntgenstrahlen beleuchtet würden. Und eben, auf der Erde gibt es wenig Röntgen-, „Licht“. Hätten wir Röntgenaugen, würden wir also nichts als pechschwarze Nacht sehen. Entsprechend würden wir wieder in jede Straßenampel hineinrennen. Offenbar ist es eben sinnvoll, dass die Natur uns mit unseren Augen ausgerüstet hat, denn es hat genügend sichtbare Lichtstrahlen um uns herum und sie werden von den Gegenständen um uns herum reflektiert, sodass wir uns ein Bild von unserer Umgebung machen können.

Schallwellen haben viel längere Wellenlängen als die elektromagnetischen Wellen des Lichts. Der Kammerton A, nach dem sich ein Orchester stimmt, hat eine Frequenz von 440 Hz und eine Wellenlänge von etwa 80 cm. Würden Fledermäuse als ihre Ortungssignale den Kammerton A aussenden, könnten sie nur Objekte von etwa 80 cm oder grösser auflösen (wie gesagt, die Bildauflösung entspricht etwa der Wellenlänge!). Das macht wieder wenig Sinn. Fledermäuse würden in jeden Ast eines Baumes hineinfliegen, und wir sehen doch, wie sie elegant um Hindernisse herumkurven. Sie orten deshalb mit Ultraschallwellen im Bereich von 100–160 kHz. Mit einem 10 kHz Ruf kann eine Fledermaus Objekte von ca. 3 cm auflösen, mit einem 100 kHz „Ruf“ von etwa 3 mm! Und so kurven die blinden Fledermäuse eben elegant um Objekte herum, statt in sie hinein zu fliegen.

Es braucht also Ultraschallwellen, nicht Schallwellen zum „Sehen“ von kleinen Strukturen mit Schall. Entsprechend brauchen auch die Mediziner Ultraschall- und nicht Schallgeräte. Beim Hineinschauen in unseren Körper wird es erst interessant, wenn wir Strukturen auflösen können, die nur ein paar Millimeter gross sind. Lymphknoten (-drüsen) sind ca. 5 mm gross und kleine wichtige Blutbahnen sind eher 1 mm im Durchmesser. Darum arbeiten Ultraschallgeräte in der Medizin auch mit Frequenzen von einigen Megahertz (Millionen Hertz), und können so Strukturen im Submillimeterbereich auflösen.

9.3 Bilder aus dem Körperinneren

Sehen und hören können heisst also zusammenfassend: Wir brauchen zuerst einmal die „richtigen Wellen“. Man kann nur sehen oder hören, wo es etwas zu sehen oder hören gibt und wir müssen geeignete Wellen haben, die uns auch erlauben, Strukturen sehend oder hörend aufzulösen, die für uns relevant sind, also grob gesagt, Strukturen von 1 Zehntelmillimeter. Um Bilder aus dem Körperinneren anfertigen zu können, brauchen wir aber auch Wellen, die in den Körper eindringen und ihn durchdringen können. Das können Lichtwellen offensichtlich nicht: Wir sehen nur die Oberfläche von Objekten um uns herum!

9.3.1 Warum keine Bilder des Körperinneren mit Lichtwellen?

Wir wissen, dass wir mit unseren Augen nicht durch das Gegenüber hindurchsehen können: Wir sind für sichtbares Licht nicht durchsichtig. Entsprechend kann ein Arzt

bei einer Krankheit die verborgenen Organe nicht „ansehen“ und feststellen, ob sie krankhaft verändert sind. Was heisst überhaupt durchsichtig? Glas ist durchsichtig, so durchsichtig, dass wir bei etwas Geistesabwesenheit in eine Glastür hineinlaufen können. Wenn ein Gegenstand durchsichtig ist, heisst dies, dass Licht von einer Lichtquelle hinter dem Gegenstand unverändert zu unsren Augen gelangt. Ein getöntes Glas lässt nicht alles Licht durch, ein blaugetöntes Glas hält rotes und gelbes und grünes Licht zurück, ist also ein Filter. Und ein schönes farbiges Kirchenfenster lässt entsprechend den abgebildeten Objekten an verschiedenen Orten selektiv verschiedenfarbiges Licht durch.

Ist ein Gegenstand nicht durchsichtig, also intransparent, dann wird überhaupt kein Licht durch den Gegenstand hindurchgelassen. Warum fast? Das Licht einer Taschenlampe im Mund oder unter dem Zeigefinger scheint noch etwas durch unser Gewebe. Wir sehen etwas rotes Licht, weil rotes im Vergleich zu blauem, gelbem und grünem Licht eine dünne Schicht menschlichen Gewebes noch durchdringen kann. Aber auch rotes Licht kann nur bis maximal etwa 1 cm in den menschlichen Körper eindringen. Auch für rote Wellenlängen ist der Mensch viel zu „undurchsichtig“, um mit ihnen Bilder aus dem Körperinneren machen zu können. Für Licht sind wir völlig eingeschwärzte Kirchenfenster.

Werden elektromagnetische Wellen wie Licht oder Infrarot nicht durch ein Objekt gelassen, werden sie aufgenommen (und wärmen), abgelenkt oder zurückgeworfen. Tatsächlich wird ein Teil des auf uns auftreffenden Lichts in unserer Haut in Wärme umgewandelt. Das spüren wir, wenn wir in der Sonne stehen und dadurch warm bekommen. Ein zweiter Teil des auf Objekte wie Menschen fallenden Lichts wird zurückgeworfen. Ein Spiegel wirft alles Licht zurück und zwar für alle Farben gleich gut. Verschiedene menschliche Gewebe werfen verschiedene Farben verschieden gut zurück. Unsere Haut ist rosa, gelblich oder braun, unsere Haare sind schwarz, orange oder blond. Blondes Haar wirft selektiv vor allem gelbe Farbtöne zurück, schwarzes Haar nimmt praktisch alle Farben auf. Es sind die von einem Objekt zurückgeworfen Lichtwellen, die wir sehen. Die meisten Gegenstände (eben ausser Glas, gewisse Kristalle und gewisse Arten von Plastik) werfen das Licht zurück, und so können wir ihre Oberfläche sehen. Da die Sonne die Objekte um uns herum am Tag mit viel Licht bescheint, und diese ein Teil des Lichtes zurückwerfen, haben wir eben Augen für sichtbares Licht. Das Licht kommt von der Sonne, trifft auf ein Objekt und gelangt von dort in unsere Augen.

9.3.2 Wir brauchen Abbildungssysteme, um zu sehen

Licht allein reicht nicht, um ein Bild zu machen. Wir wissen vom Fotoapparat und auch unserem Auge, dass es dazu auch eine Linse braucht. Die Linse oder – in Mikroskopen, Teleobjektiven und Fernrohren – mehrere Linsen sind Teil vieler Systeme, die Abbildungen machen. Die Lichtwellen, die in allen Richtungen vom Gegenüber zurückgeworfen werden, müssen durch die Linse „geordnet“ werden. Nur so entsteht auf dem Aufnahmesystem, dem **Detektor** ein scharfes Bild. Detektoren für sichtbares Licht sind unsere Netzhaut im Augenhintergrund, Fotofilme oder die elektronischen Chips

(Kap. 12) in einer modernen digitalen Fotokamera. Würden wir zum Bildermachen keine Linsen zwischen den betrachteten Gegenstand und den Detektor schieben, würde jeder Punkt eines Gegenstandes Licht auf den ganzen Lichtdetektor senden. Den Gegenstand könnte man so nicht oder nur sehr unscharf sehen. Ein Abbildungssystem mit Linse ist effizient. Unsere Augen können in kürzester Zeit ein einzelnes Bild machen und viele Bilder rasch hintereinander aufnehmen. So sehen wir auch Bewegungen.

Leider funktionieren Glas- oder Plastiklinsen zur Bündelung nicht für alle elektromagnetischen Wellen. Weder Röntgen- noch Gammastrahlen können durch Glaslinsen gebündelt werden. Zum Glück gibt es aber andere Möglichkeiten, scharfe Bilder zu erhalten und diese Möglichkeiten sollen hier besprochen werden.

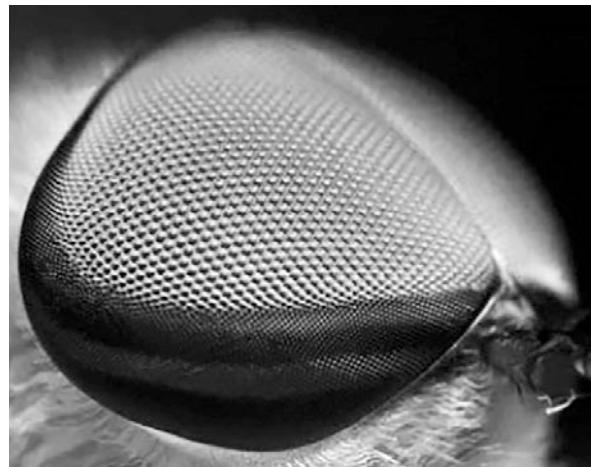
9.3.3 Röntgenbilder

Wir Menschen sind für Röntgenstrahlen teilweise durchsichtig. Die einen Organe sind durchsichtiger als die andern. Knochen sind wenig und Luft ist sehr durchsichtig für Röntgenstrahlen. Für Röntgenstrahlen sind wir also so etwas wie Kirchenfenster. Den verschiedenen gefärbten Teilen des Kirchenfensters entsprechen die verschiedenen Organstrukturen des menschlichen Körpers. Um ein scharfes Bild zu erhalten, erzeugen wir Röntgenstrahlen mittels einer Röntgenröhre, die von einem Punkt ausgehen. Strahlen von diesem Punkt laufen dann durch den Patienten und schwärzen den Röntgenfilm hinter dem Patienten, wie dies in Abbildung 2.1 gezeigt wird. In diesem Fall braucht es keine Linse; die Punktquelle sorgt dafür, dass die Abbildung gelingt.

9.3.4 Insektenaugen-Prinzip

Eine weitere Möglichkeit, Bilder mit sichtbarem Licht zu machen, ist beim sog. Facettenauge der Insekten verwirklicht. Haben Sie einen Insektenkopf schon einmal genau angesehen (Abb. 9.1)? Insektenaugen sind etwa wie Bienenwaben aufgebaut. Stellen sie sich viele kleinste Röhrchen vor, die wie in einer Bienenwabe eng gepackt nebeneinanderliegend angeordnet sind. Oben sind die Röhrchen offen, die Innенwände sind geschwärzt. Wenn also ein Lichtstrahl (eine Lichtwelle) schräg auf ein Röhrchen trifft, trifft er auf die schwarze Innenwand und wird dort aufgenommen. Nur Licht, das genau entlang eines der Röhrchen läuft, gelangt bis ans untere Ende und wird dort von einem Lichtdetektor aufgefangen. Um ein scharfes Bild zu machen, braucht ein Insektenauge keine Linse, denn nur der geradlinige Einfall eines Lichtstrahls wird registriert (Abbildung 4.2). Wenn wir nun z. B. 100×100 solche Röhrchen nebeneinander – eben bienenwabenförmig – aneinanderstellen, erhalten wir ein Bild, das $100 \times 100 = 10.000$ Bildpunkte (Pixel) hat. Die Lichtdetektoren am unteren Ende der Röhrchen der Insektenaugen messen die Helligkeit und die Farbe des einfallenden Lichtes und senden die gemessenen Signale ans Insektenhirn. Es ist offensichtlich, dass Länge und Durchmesser der Röhrchen die Auflösung der Bilder bestimmt (Abbildung 4.2). Die Röhrchen in den Facettenaugen der Insekten haben Durchmesser von etwa 0.03 mm.

Abb. 9.1 Facettenauge eines Insekts. Das Auge besteht aus Bienenwaben-förmig angeordneten Stäbchen. Trifft Licht senkrecht auf die Stäbchen erreicht es das am unteren Ende liegende Licht-empfindliche Sinnesorgan, welches das Signal ans Insektenhirn weiterleitet. Trifft ein Strahl schräg zur Achse eines Stäbchens auf, erreicht er das Sinnesorgan nicht. So entstehen treue Bilder der Umgebung



Wesentliche Elemente des Facettenaugenprinzips, also einer bienenwabenartigen Struktur, die dem Detektor vorgelagert sind, werden heute bei nuklearmedizinischen Aufnahmen angewendet. Statt der für Gammastrahlen ungeeigneten Glas- oder Plastiklinsen können diese Strukturen dazu verwendet werden, Gammastrahlen so zu bündeln, dass ein Bild entsteht. Das Prinzip, wie ein Bild erzeugt wird, ist in Abbildung 4.2 erklärt. In den in der Nuklearmedizin zur Anwendung kommenden Waben sind die „Waben“-Wände z. B. aus Blei. Schräg einfallende Gammastrahlen werden in den Bleiwänden abgefangen. So gelangen nur die in der Achse der Bleiröhrchen verlaufenden Strahlen auf die Detektoren. Bei nuklearmedizinischen Verfahren kommen ja die Gammastrahlen aus den leicht radioaktiven Molekülen, die sich im Körper z. B. in Tumorherden angesammelt haben. Dank der wabenförmigen Bleistruktur vor der nuklearmedizinischen Detektorfläche von z. B. 40 x 40 cm entsteht ein scharfes Abbild der Herde. Auch im Röntgen und im CT werden vor den Detektoren solche Wabenstrukturen angebracht. Die Röntgenstrahlen in diesen Systemen kommen zwar von einer Punktquelle, aber die Wabenstrukturen helfen, die im Patienten abgelenkten Strahlen, die also nicht gradlinig von der Quelle auf den Detektor laufen, herauszufiltern.

Auch im Ultraschall werden die Signale auf ähnliche Weise wie bei den nuklear-medizinisch-bildgebenden Verfahren geortet. „Keulenförmige“ Schallstrahlen werden in den Patienten gesandt. Wie oben gesagt, können Strahlen an der Oberfläche oder von tiefer liegenden Organen im Menschen zurückgeworfen werden. Das letztere ist allerdings nur möglich, wenn sie tief eindringen können. Da die Schallempfänger nur zurückgeworfene Schallstrahlen in den Detektor einlassen, die senkrecht auf die Oberfläche der Detektoren auftreffen, wird ähnlich wie im letzten Abschnitt beschrieben, wieder ein korrektes Bild angefertigt. Die Ultraschalldetektoren sind so gebaut, dass schräg eintreffende Strahlen nicht zum Detektor gelangen. Es gilt also im weiteren Sinne wieder das Facettenaugenprinzip, um eine gute Abbildung zu erhalten.

9.3.5 Bilddetektoren

Sind Strahlen erst einmal von der Strahlenquelle zum Patienten und wieder aus ihm hinausgelangt, brauchen wir Detektoren, um sie bildlich darzustellen. Für Lichtstrahlen haben wir gesehen, dass sie von den meisten Objekten zurückgeworfen werden. Wir sehen so nur die Oberfläche der Objekte. Für Licht ist unser körpereigener Detektor die Netzhaut in unseren Augen und in viel geringerem Masse unsere Haut mit Ihrer Wärmeempfindlichkeit. Auch in Fotoapparaten stecken Lichtdetektoren. Früher war dies ein Film und heute sind es die digitalen Chips. Sie werden in Kap. 12 noch näher besprochen. Sowohl die Netzhaut in unseren Augen als auch ein Detektorchip in einer Fotokamera haben kleinste Bildpunkte oder Pixel, welche Lichtstrahlen detektieren. Wir haben dann ein in diese Pixel aufgelöstes Bild. Am Ende der Kette Objekt – Abbildungssystem – Detektor braucht es ein Gehirn, dass die Bilder „sehen“ kann. Unsere Netzhaut sendet Nervenimpulse ins Hirn, wo das Bild wahrgenommen wird. Der digitale Chip in einer Digitalkamera sendet kleine Strompulse in den Minicomputer im Fotoapparat. Hirn oder Computer speichern die Bilddaten. Unser Hirn sieht das Bild dann direkt oder über die Darstellung auf einem Monitor. Bilder können also von unseren Augen direkt empfangen werden, oder unsere Augen erhalten ein Bild auf Fotopapier oder auf einem Bildschirm vorgeführt.

Benützen wir ein medizinisch bildgebendes System, das eben mit anderer Strahlung als sichtbarem Licht funktioniert, müssen die Detektorelemente die Strahlen so umwandeln, dass wir es dann im sichtbaren Bereich sehen können. Ein Röntgenstrahlendetektor, im simpelsten Fall ein Röntgenfilm wird durch die auftreffenden Strahlen genau wie ein Schwarz-Weiss-Film geschwärzt (Abbildung 2.1). Je stärker die Röntgenstrahlen beim Durchgang durch die Strukturen des Patienten geschwächt werden, desto weniger wird der Film geschwärzt. Der entwickelte Röntgenfilm hat damit die Röntgenstrahlen in ein für uns sichtbares Bild umgewandelt. Röntgenstrahlen werden so über einen Umweg sichtbar gemacht.

In den nuklearmedizinischen Verfahren werden Gammastrahlen detektiert, welche von radioaktiven Herden im Patienten herrühren, in denen sich Tracer angesammelt haben. Die Strahlendetektoren sind heute Systeme, bei welchen die hochenergetischen Gammastrahlen in einer grossen Kristallplatte in Lichtblitze umgewandelt werden (Abbildung 4.2). Eine erste Umwandlung von Gammastrahlen in sichtbares Licht findet hier also in der Kristallplatte statt. Da ein in die Kristallplatte eindringender Gammastrahl viele Lichtblitze erzeugt, ist das Detektorsystem sehr empfindlich: Einzelne Gammastrahlen können detektiert werden und entsprechend braucht es nur wenig Radioaktivität, um nuklearmedizinische Bilder anzufertigen. Die Lichtblitze könnte man wie im Röntgen mit einem auf den Kristall gelegten Film sichtbar machen. Man verwendet aber schon seit den 1960er Jahren Systeme, bei denen elektronische Detektoren mit ihren Elementen die in der Kristallplatte entstehenden Lichtblitze detektieren und verorten. Ein elektrischer Puls aus den Detektorelementen zeigt an, wo im Kristall gerade wieviel Licht entstanden ist, also Gammastrahlen aufgetroffen sind. Viele Pulse werden in einem Computer als digitales Bild gespeichert und auf dem Monitor ein zweites Mal in ein sichtbares Bild umgewandelt.

Heute werden in radiologischen und nuklearmedizinischen Detektorsystemen zunehmend Detektoren verwendet, die den digitalen Chips in digitalen Fotoapparaten ähnlich sind. Je nach der Energie der auftreffenden Strahlen werden kleine Kristallplättchen auf der Detektoroberfläche angebracht, um die auftreffenden Röntgen- oder Gammastrahlen in Licht umzuwandeln, das dann vom Chip gemessen wird oder der auftreffende Strahl wird direkt in einem chipähnlichen Detektor registriert. Die im Chip entstehenden Signale sind immer Strompulse, die an einen Computer weitergeleitet werden. Die Detektorplatten können grosse digitale Chips sein, die Abmessungen von bis zu 40 x 40 cm haben können, um so z. B. eine ganze Lungenaufnahme zu machen (Kap. 2). Bei der Röntgencomputertomographie (Kap. 3) kommen digitale Röntgendetektoren schon seit ihren Anfängen zum Einsatz.

Im MR funktioniert die Signaldetektion und Ortung vollkommen anders. Dies muss zwingend so sein, denn wir haben am Anfang dieses Kapitels gelernt, dass Radiowellen auf die übliche Art wegen der zu langen Wellenlänge keine scharfen Bilder aus dem Körperinneren machen können. Im MR wird aber nicht direkt eine Abbildung mit Radiowellen erzeugt. Die Bilder entstehen, weil den empfangenen Radiowellen-Pulsen im Rahmen eines Codier-Schrittes Informationen über ihren Herkunftsraum aufgepropft wird³. Die Detektoren im MR sind Antennen, welche die Radiowellenpulse aus dem Körperinneren empfangen und dann nach Stärke und Wellenlänge / Frequenz analysieren können. Das ist genau das, was ein Radio ebenfalls kann. Weiterführende Informationen finden Sie im Kapitel 5 über die MR-Bildgebung.

Im Ultraschall schliesslich werden die aus dem Patienten zurückgeworfenen Echos mit den gleichen Kristallen detektiert, die auch die Schallwellen erzeugen. Die verwendeten Kristalle werden von einer angelegten elektrischen Wechselspannung zu Schwingungen angeregt: Es entstehen Schallwellen. Wenn die aus dem Patienten zurückgeworfenen Schallwellen auf den Detektor treffen, geschieht das Umgekehrte. Die Kristalle werden beim Auftreffen der Schallwellen mechanisch in Schwingung versetzt, verformen sich entsprechend periodisch, und das führt zu einem schwachen elektrischen Wechselstrom, der aus den einzelnen Schallelementen abgeleitet und gemessen wird.

9.4 Zusammenfassung

Wir haben gesehen, dass es viele für unsere Sinnesorgane nicht wahrnehmbare Wellenarten gibt. Die Natur hat uns mit Sinnesorganen für Wellen ausgerüstet, die uns relevante Information über unsere Umwelt liefern. Wir können uns daher in unserer Umgebung orientieren. Ob wir einen Gegenstand auflösen können, hängt wesentlich von der Wellenlänge ab. Lichtwellen haben so kurze Wellenlängen, dass wir die re-

³ Die Stärken der im MR empfangenen Radiowellensignale enthalten die Bildinformation. Die dank der Zusatzmagnetfelder leicht veränderten Wellenlängen / Frequenzen der Signale enthalten Informationen über den Herkunftsraum. Die Zusatzmagnetfelder codieren die Ortsinformation in die einzelnen Radiowellen.

levanten Objekte in unserer Umgebung auflösen können. Schallwellen können zwar auch zur Ortung verwendet werden, wie uns das beispielsweise Fledermäuse zeigen, aber sie haben zu lange Wellenlängen für eine brauchbare Auflösung. Leider sind auch Lichtwellen ungeeignet, um Bilder aus dem Körperinneren zu erhalten, dies aber, weil unsere Körper für sichtbares Licht nicht durchsichtig sind.

Trotzdem können wir heute Bilder aus dem Körperinneren erhalten, dies dank verschiedenen Arten von Wellen, die wir mit unseren Sinnesorganen nicht wahrnehmen können. Mit moderner Technik sind diese Wellen für uns heute ebenfalls sichtbar. Verschiedene unsichtbare elektromagnetische (Licht-verwandte) Wellenarten können in unsern Körper eindringen und damit in uns hineinsehen und Ultraschall hat Wellenlängen, welche relevante Strukturen im Körper auflösen können. All diese Wellen werden durch unseren Körper so verändert (geschwächt, zurückgeworfen), dass kontrastreiche Bilder entstehen. Dank geeigneten Abbildungssystemen und Detektoren können diese Wellen nach Durchgang durch Köperteile eines Patienten empfangen und dann so umgewandelt werden, dass wir auf Bildschirmen auch Bilder sehen können, die mit diesen nicht wahrnehmbaren Wellen erzeugt wurden. Der einfachste Wandler von unsichtbaren zu sichtbaren Wellen ist der Röntgenfilm. In modernen Systemen sind die Bildaufnahmesysteme aber weitgehend digitalisiert, ähnlich wie dies bei modernen Fotoapparaten der Fall ist. Wir können heute also die „Röntgenbrille“ dank Röntgenverfahren und der Röntgencomputertomographie „, die „Gammabrille“ dank der Nuklearmedizin und der Positronenemissionstomographie, die „Radiowellenbrille“ dank der Magnetresonanztomographie und die „Ultraschallbrille“ dank den Ultraschallgeräten „, anziehen und so in den Patienten hineinschauen. Als erster brachte Wilhelm Conrad Röntgen 1895 „Licht ins Dunkel“ dieser unsichtbaren Welten und Wellen.

Es werde Licht!

Diamanten, Palmen und Chamäleons

In diesem Kapitel wollen wir uns ein Bild von der Struktur von Atomen machen. Atome sind die Bausteine, aus denen ja alle feste, flüssige und gasförmige Materie und auch wir Menschen aufgebaut sind. Letztlich definiert der Aufbau der Atome die Vielfalt der Erscheinungsformen um uns herum, und ermöglicht eben, dass Diamanten, Palmen und Chamäleons entstehen. Wenn wir nicht etwas über den Aufbau der Atome wissen, können wir auch die Grundlagen der Medizinischen Bildgebung nur sehr beschränkt verstehen. Röntgenstrahlen entstehen nämlich in der Atomhülle.

10.1 Modellvorstellungen zum Aufbau der Atome

Man kann sich ein Atom teilweise wie unser Sonnensystem vorstellen, in welchem die Planeten um die Sonne kreisen. Dieses ursprüngliche Atommodell stammt von Ernest Rutherford (englischer Physiker, 1881–1937) und Niels Bohr (dänischer Physiker, 1885–1967, Nobelpreis für Physik 1922) und entstand zwischen 1911 und 1913. Allerdings ist das „atomare Sonnensystem“ enorm viel kleiner, nämlich etwa um 20 Zehnerpotenzen oder 100.000.000.000.000.000 kleiner als unser Sonnensystem. So wie uns unser Sonnensystem unendlich gross erscheint, erscheint uns die Welt der Atome unendlich klein. Die Welt der atomaren Teilchen ist für uns aber viel fremder, als die Welt von Planeten, die um unsere Sonne kreisen. Die geltenden Naturgesetze sind im Mikrokosmos wesentlich anders als im Makrokosmos, in dem wir uns täglich zurechtfinden müssen. Wir sehen die Himmelskörper ja zum Teil von blossem Auge und Atome eben nicht. Wenn man etwas nicht sehen kann, muss man sich Modellvorstellungen schaffen. Und das haben wir hier mit Rutherford und Bohr zusammen gemacht. Wir haben gesagt, man kann sich ein Atom wie das Sonnensystem vorstellen! Natürlich ist auch unsere Vorstellung des Sonnensystems ein Modell, aber dieses Modell ist uns geläufig.

Das naturwissenschaftliche Forschen basiert immer auf dem gleichen Prozess. Man macht sich eine Modellvorstellung, dann testet man, ob das Modell auch mit den Experimenten – also der beobachteten Natur – übereinstimmt. Dank dem

Wechselspiel von Modellvorstellungen und Experimenten lernt man schrittweise zu verstehen, wie sich die Natur verhält, und so haben die Physiker im Lauf der letzten 150 Jahre entschlüsselt, wie die kleinsten Teile der Materie zusammengebaut sind.

10.1.1 Atomkerne und Elektronen

Ein Atom enthält einen Atomkern. In Analogie zu unserem Sonnensystem entspricht der Atomkern der Sonne. Je nach Typ enthält der Atomkern wenige oder viele positiv geladene identische Teilchen. Man nennt sie Protonen. Jedes Proton trägt eine Einheitsladung und in der Natur kommen Atome vor, die im Kern 1–92 Protonen haben: Das Wasserstoff hat im Kern 1 Proton und das Uran deren 92. Der Atomkern wird normalerweise von gleich viel elektrisch negativ geladenen Teilchen, den Elektronen – ähnlich den Planeten – umgeben. Die Elektronen tragen ebenfalls eine Einheitsladung, aber von -1, sind also negativ geladen. Sie sind dank den elektrischen Anziehungskräften, die zwischen positiv und negativ geladenen Teilchen herrschen, an den Atomkern gebunden und damit ist ein Atom ladungsneutral. Die Natur vermeidet nach Möglichkeit elektrisch geladene Strukturen. Ein Atomkern ist tausende Male kleiner als das ganze Atom mit seinen Elektronen und ein Elektron ist fast 2000 Mal leichter als ein Proton. Das heißt, praktisch das ganze Gewicht eines Atoms ist im Kern konzentriert, wie das ja eben auch bei unserem Sonnensystem der Fall ist: Die Sonne enthält fast die ganze Masse. Ebenfalls wie bei der Sonne und den Planeten hat es zwischen einem Atomkern und den dazugehörigen Elektronen sehr viel „Nichts“. In diesem Kapitel befassen wir uns mit der Elektronenhülle eines Atoms, im nächsten Kapitel (Kapitel 11) befassen wir uns dann mit der Struktur von Atomkernen.

Während elektrisch ungleich geladene Teilchen sich stark anziehen, stoßen sich negativ (oder auch positiv) geladene Teilchen, wie z. B. die Elektronen untereinander stark ab. Elektrische Anziehung und Abstossung erfahren wir im täglichen Leben wenig, denn die uns umgebende Materie ist normalerweise nicht elektrisch geladen: Die Materie enthält gleich viele Protonen und Elektronen, die nur mit Kraftaufwand zu trennen sind. Vielleicht haben Sie schon einmal beobachtet, dass bei trockener Luft beim Kämmen die Haare abstehen: Durch das Kämmen haben Sie etwas positive und negative Ladungen voneinander getrennt. Die elektrisch gleich geladenen Haare stoßen sich gegenseitig ab. Und wenn man einen kleinen elektrischen Schlag beim Anfassen des Wasserhahns verspürt, dann ist das eine Folge davon, dass man gegenüber dem Wasserhahn etwas elektrisch positiv oder negativ aufgeladen ist. Es fließt ein kurzer, heftiger Strom. Die extremste Form eines Stromschlages nach Trennung von elektrischen Ladungen in der Atmosphäre ist ein Blitz. Dass hier enorme Kräfte im Spiel sind, haben die meisten von uns glücklicherweise nur am grellen Lichtblitz und dem darauffolgenden Donner erfahren.

10.1.2 Atome, Grundbausteine der Welt

Wenn Sie den Text aufmerksam gelesen haben, haben Sie etwas ganz Wichtiges bemerkt. Ich habe gesagt, Wasserstoff enthalte 1 und Uran 92 Protonen. Ein Atom ist auf eindeutige Weise durch die Anzahl Elektronen (und auch Protonen im Kern) festgelegt. Zum Beispiel haben Stickstoff 7, Sauerstoff 8, Eisen 26 und Uran eben 92 Protonen im Kern und eine entsprechende Zahl Elektronen in ihrer Hülle. Wir nennen die verschiedenen Atome auch (chemische) Elemente im Gegensatz zu Molekülen, die Verbindungen von Atomen sind (s. unten). Ob wir sagen, es handle sich um das chemische Element 26 oder um Eisen ist dasselbe. Ist es nicht schöner, dass man den Elementen Namen gegeben hat? Wir nennen ja die Tiere auch Hunde, Katzen, Chamäleons und Elefanten, und bezeichnen sie nicht mit Tier 1, 2, 3... Vielleicht erinnern Sie sich aus Ihrer Schulzeit an die Tafel der chemischen Elemente. Wenn ja, darum geht es hier! Die Tabelle ist eine geordnete Aufstellung des Atom-Zoos nach chemischen Eigenschaften seiner „Tiere“, den Atomen. Die vielen chemischen Elemente sind die Grundlage dafür, dass die Natur so vielfältig erscheint, denn Elemente können auf vielfältigste Art in Moleküle zusammengefügt werden, ähnlich wie man mit verschiedenen Legobausteinen verschiedenste Strukturen bauen kann. Wie das vor sich geht, braucht aber in doppeltem Sinne ein noch etwas tieferes Eindringen in die Materie.

10.1.3 Die Elektronenhülle

Um den Aufbau der Atome genauer zu verstehen, betrachten wir ihre Elektronenhülle. Ein Elektron, das nahe um den Atomkern „kreist“, spürt praktisch die ganze positive Ladung des Atomkerns. In einem Uranatom „sieht“ ein atomkernnahes Elektron z.B. fast 92 positive Ladungen und wird damit enorm stark vom Kern angezogen. Elektronen, die weiter weg vom Atomkern sind, verspüren viel kleinere Kräfte, die sie zum Atomkern ziehen. Die kernnahen Elektronen schirmen die Kernladung zum grossen Teil ab. Es kann hunderttausendfach mehr Kraft brauchen, die kernnahen Elektronen aus ihren Bahnen wegzureißen, als die Elektronen aus den äussersten Bahnen.

Nun geht es im Mikrokosmos doch sehr anders zu und her, als in unserem Sonnensystem. Elektronen können nicht auf beliebigen Bahnen um den Atomkern kreisen (Abb. 10.1). Es gibt nur eine limitierte Zahl von „Bahnen“ um den Atomkern herum, in denen sich die Elektronen aufhalten können. In diesen Bahnen werden die Elektronen mit einer Kraft zum Kern hingezogen, die für jede Bahn genau festgelegt ist, was im krassen Gegensatz zu Planetensystemen steht. Planeten können sich auf beliebigen Bahnen um die Sonne aufhalten, solange die Fliehkraft eines Planeten gerade durch die Anziehungskraft der Sonne aufgewogen wird: je weiter weg ein Planet von der Sonne, desto langsamer seine Umlaufzeit um die Sonne. An diesem Punkt mussten die grossen Physiker zwischen etwa 1913 und 1925 basierend auf den Erkenntnissen aus ihren Experimenten das Atommodell eines Minisonnensystems verlassen und nach neuen Modellen suchen.

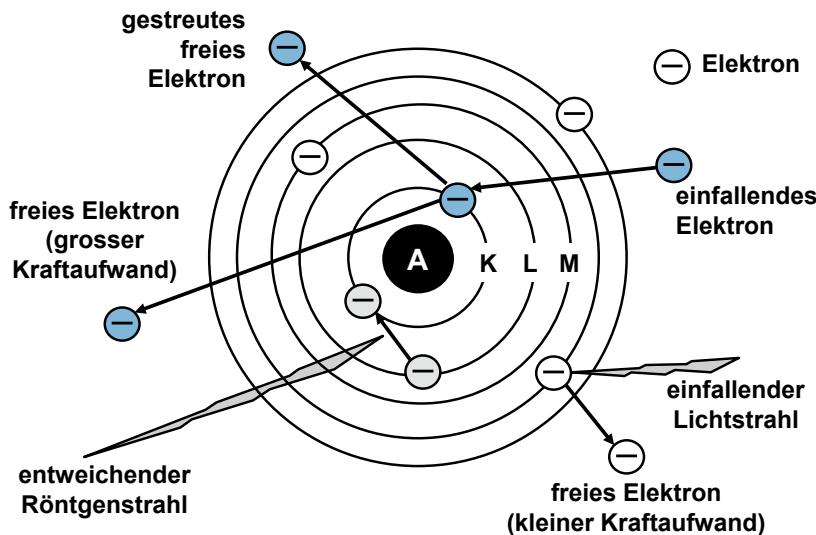


Abb. 10.1 Das Atom gleicht in erster Näherung einem Minisonnensystem. Im Zentrum befindet sich der Atomkern mit seinen Kernteilchen. Darum herum sind die Elektronen auf Elektronenbahnen oder „Schalen“ angeordnet. So gesehen ist die Abbildung ein Schnitt durch den Atomkern, womit sich dann die Kugelschalen als Kreise darstellen. Wir wissen aber nicht genau, wo auf der ihnen zugehörigen Schale sich die Elektronen befinden. Der Kraftaufwand, ein Elektron von einer kernnahen Bahn wegzureißen ist viel grösser, als der Kraftaufwand, die äusseren Elektronen wegzureißen. Ein einfallendes Elektron kann ein anderes aus einer Schale katapultieren (blaue Elektronen), wobei das einfallende Elektron selbst abgelenkt wird und dann das Atom ebenfalls verlässt. In diesem Fall ist wie hier gezeigt, ein Platz in der K-Schale frei. Wechselt dann ein L-Schalen-Elektron in die K-Schale, strahlt es elektromagnetische Wellen ab, was bei schweren Atomen zum Aussenden eines Röntgenstrahls führt. Auch elektromagnetische Wellen können Elektronen aus dem Atom herauskatapultieren (nicht dargestellt)

10.2 Quantenphänomene

10.2.1 Elektronenschalen um den Atomkern herum

Die möglichen Aufenthaltsorte der Elektronen um den Atomkern sind „gequantelt“. Es braucht ein genaues Quantum Kraft um von einer in die andere Elektronenschale zu gelangen. Es ist ähnlich wie bei einer Treppe. Unsere Füsse können sich nicht zwischen zwei Treppenstufen aufhalten. Weiter mussten die Physiker einsehen, dass man nicht immer genau bestimmen kann, an welchem Ort der Schale sich ein Elektron im Atomkern befindet. Dies ist somit entschieden anders als mit den Planeten in einem Sonnensystem. Daher kommt eben der Name „Schalenmodell“, der der Tatsache Rechnung trägt, dass wir nur wissen, dass ein Elektron irgendwo in einer bestimmten Schale ist. Den Elektronenschalen im Atom hat man einfache Namen gegeben, nämlich K, L, M-Schalen usw.

Und weil die Natur sich im Mikrokosmos so anders verhält, als der uns geläufige Makrokosmos, braucht man zur Beschreibung des Verhaltens von atomaren Teilchen eine andere Mechanik als diejenige, die für unseren Makrokosmos gilt: die Quantenmechanik. Die Experimente, die zur Formulierung der Grundlagen der Quantenmechanik führten, fanden zwischen ca. 1890 und 1930 statt. Viele bedeutende Physiker waren an dieser Entwicklung hin zu einem grundsätzlich neuen Verständnis der Natur beteiligt. Ohne es zu erwähnen, haben wir ja auch schon festgehalten, dass die Elektronen (und auch Protonen) gequantelte Ladungen haben. Man kann kein Elektron herstellen, dass z. B. eine Ladung von $1/5$ der Einheitsladung hat. Gewisse physikalische Größen im Mikrokosmos sind gequantelt!

Die Elektronen im Atom sind also in Schalen um den Atomkern gebunden. In der Schale K werden sie mit einer Kraft angezogen, die grösser ist als diejenige der Elektronen in den Schalen L und diese wiederum ist stärker, als diejenige der Elektronen in den Schalen M usw. Verfügt man mindestens über eine Kraft K, kann man alle Elektronen, seien sie in einer K-, L-, M- etc. Schale aus dem Atom reissen (Abb. 10.1). Ist die verfügbare Kraft kleiner als K, aber grösser als L, kann man die L-, M-, etc. Elektronen herauslösen, aber nicht die K-Elektronen, usw. Es ist wie wenn Sie Hanteln stemmen. Eine zu schwere Hantel kriegen Sie nicht vom Boden weg. Wenn Sie aber eine Hantel mit einem bestimmten Gewicht zu heben vermögen, vermögen Sie alle leichteren Hanteln auch zu heben. Hanteln sind auch so etwas wie „gequantelt“, $\frac{1}{2}$ kg, 1 kg, 3 kg usw.

Kehren wir zu unseren eigenen Erfahrungen mit einer Treppe zurück. Was passiert auf der Treppe, wenn ich auf einem Tritt stehe und mich nicht halte. Ich habe die Tendenz die Treppe hinunterzufallen, und zwar bis ins Parterre: Der berühmte und gefährliche Sturz auf der Treppe, der oft genug in der Notfallstation eines Spitals endet. Wenn allerdings alle Treppenstufen unter meiner Stufe von anderen Menschen besetzt sind, ist es schwierig, herunterzufallen. Auch die Elektronen können nur von einer kernferneren in eine kernnähere Schale fallen, wenn es in ihr Platz hat. Das „Parterre“ im Schalenmodell ist die dem Atomkern am nächsten gelegene Schale. Dort befindet sich ein Elektron im Grundzustand, es kann nicht mehr weiter hinunterfallen.

Nun haben ja wie gesagt, Atomkerne eine variable Anzahl von Protonen im Kern. Die Anziehung für der Kern-nächsten Elektronen durch den Atomkern ist umso grösser, je mehr positive Ladungen (Protonen) im Kern sitzen. Unsere Treppe sieht also sehr speziell aus. Die kern-nahen Treppenstufen sind sehr hoch, die weiter entfernten viel niedriger. Jedem Typ Atomkern (charakterisiert durch eine bestimmte Anzahl Protonen) ist eine andere Treppe mit verschiedenen hohen Stufen für die Elektronen zugeordnet. In schweren Elementen wie Uran sind die kernnahen Tritthöhen riesengross. Es muss viel Kraft aufgewendet werden, um auf den nächst oberen Tritt zu gelangen. In leichten Elementen wie Wasserstoff sind die „Treppenstufen“ relativ klein und es braucht wenig Kraft, „einen Tritt höher zu steigen“.

10.2.2 Elektronen aus einem Atom reissen und Strahlen erzeugen

Wie kann ich nun auf ein Schalenelektron in einem Atom Kräfte wirken lassen, um es dem Atom zu entreissen? Das gelingt zum Beispiel, indem ich Atome mit Teilchen wie Elektronen, oder Strahlen (elektromagnetische Wellen, Photonen; Kap. 9) wie Röntgen- oder Gammastrahlen bombardiere. Auch mit Ultraviolett oder sichtbarem Licht kann ich ein Atom bombardieren, aber letztere Strahlen (Wellen) vermögen nur Elektronen in den äussersten Schalen eines Atoms herauszukatapultieren, wo es entsprechend wenig Kraft braucht, sie dem Atom zu entreissen (Abb. 10.1). Um ein Elektron der K-Schale zu entziehen, brauche ich offenbar eine Kraft, die mindestens so gross ist, wie diejenige, mit der das Elektron vom Atomkern angezogen wird. Übertragen auf die Treppe, brauche ich eine grosse Kraft, um vom Parterre in den ersten Stock zu gelangen, aber viel weniger Kraft, um von einer der oberen Treppenstufen in den ersten Stock zu gelangen.

Conrad Wilhelm Röntgen experimentierte bei der Entdeckung der Röntgenstrahlen mit Elektronen, mit denen er relativ schwere Atome, wie z. B. das Atom Wolfram (Kernladungszahl 74) bombardierte. Dadurch wurden Elektronen der bombardierten Atome aus ihren K-, L-, M- etc. Schalen herauskatapultiert (bildlich bis ans obere Treppenende in den ersten Stock). Es resultierten damit freie Elektronen, die nicht mehr ans Atom gebunden waren. Ebenfalls entstand in einer Elektronenschale ein freier Platz, z. B. in einer K-Schale. Wie bei einer frei werdenden Treppenstufe fielen dann in Röntgens' Experimenten die in L-, M- oder anderen Schalen sitzenden Elektronen die Treppe „hinunter“ in die K-Schale. Beim Hinunterfallen von einer Schale in eine näher am Kern gelegene Schale sendeten die fallenden Elektronen Strahlung aus: Röntgenstrahlen (Abb. 10.1). Röntgen hatte so die berühmten Röntgenstrahlen erzeugt und entdeckt. Der hier beschriebene Prozess findet auch heute beim Entstehen jedes Röntgenstrahls in einer Röntgenröhre statt.

Dass man mit Strahlung Elektronen aus einem Atom herauskatapultieren kann, nennt man den photoelektrischen Effekt. Dieser wurde von Albert Einstein erstmals erklärt und dafür – nicht etwa für seine berühmte Relativitätstheorie - erhielt er den Physik-Nobelpreis im Jahr 1922. Basierend auf diesem Effekt funktionieren die elektronischen Bilddetektorelemente der Fotoapparate und auch der digitalen Röntgenstrahl-Detektorelemente (Kap. 12).

Elektronen können noch anders mit Atomen reagieren. Ein auf ein Atom treffendes Elektron kann vom Atom abgebremst werden und beim Bremsprozess wird Strahlung ausgesendet, die sinnigerweise „Bremsstrahlung“ heisst. Der Bremsprozess ist ähnlich dem eines Meteors, der in die Atmosphäre eintritt, abgebremst wird und dabei zu glühen (strahlen) beginnt. Werden die Elektronen mit hoher Geschwindigkeit auf schwerere Atome geschossen, entstehen ebenfalls wieder kurzwellige elektromagnetische Strahlen, eben Röntgenstrahlen, nicht nur Licht und Infrarot, wie beim verglühenden Meteor. Die beiden besprochenen Arten, wie von aussen auf Atome prallende Elektronen reagieren, erzeugen also bei schwereren Atomen Röntgenstrahlen. In den äusseren Schalen schwerer Atome und in allen Schalen leichterer Atome sind die Elektronen viel geringer an den Atomkern gebunden. Ein Elektron, das von einer in eine andere äussere Schale wechselt, sendet beim „Fallen“ in eine etwas atomkern-

nähere Schale viel langwelligere Strahlung aus, z. B sichtbares Licht. Die Kraft, die man braucht, um Elektronen aus ihren Bahnen zu heben, variiert also mit dem Atomtyp (chemisches Element), und ebenso variiert die Wellenlänge der Strahlung stark, die ein Elektron beim Wechsel von einer kernferneren in eine kernnähere Schale aussendet. Die ausgesendeten Wellen können eben sichtbares Licht (haben Sie schon eine Straßenbeleuchtung mit gelben Natriumdampflampen gesehen?) oder auch 100.000-fach kürzer und damit Röntgenstrahlen sein.

10.2.3 Das Pauli-Ausschlussprinzip: Basis der Vielfalt der Erscheinungsformen um uns herum

Wir haben also verstanden, dass man sich die Umgebung von Atomkernen als in Schalen aufgeteilt denken kann. Nur in diesen können sich die ans Atom gebundenen Elektronen aufhalten. Wolfgang Pauli, Professor für theoretische Physik an der ETH Zürich (1900–1958, Physiknobelpreis 1945) erkannte als erster, dass sich in jeder der Schalen nur 2 Elektronen aufhalten können (Pauli'sches Ausschlussprinzip). Es ist also so, wie wenn auf einer Treppe auf jeder Stufe nur zwei Leute Platz haben. Wäre dem nicht so, dann würden sich z. B. alle 92 Elektronen in einem Uranatom in der kernnächsten Schale (also im Parterre) aufhalten. Man kann sich die Umgebung eines Atoms also als eine schmale Treppe mit einem kleinen Parterre vorstellen, wo im Parterre und auf jeder Treppenstufe nur zwei Leute Platz finden. Im ersten Stock hat es dagegen beliebig Platz, denn dort sind die Elektronen frei, d. h. losgelöst von irgendwelchen Atomen.

10.2.4 Chemische Bindungen: Diamanten, Palmen und Chamäleons entstehen

Noch immer wundern Sie sich natürlich, warum es Diamanten, Palmen und Chamäleons gibt. Dies wollen wir nun verstehen. In den am weitesten vom Kern wegliegenden Elektronenschalen sind die Elektronen am schwächsten an den Atomkern gebunden. Es stellt sich heraus, dass die äussersten 4 Schalen sich so organisieren können, dass die Elektronen in ihnen gleich stark an den Atomkern gebunden sind. Atome, in denen diese äussersten Schalen nicht voll besetzt sind, d. h. nicht $4 \times 2 = 8$ Elektronen enthalten, sind chemisch reaktiv. Sind dagegen alle 4 Schalen mit je 2 Elektronen besetzt und damit gefüllt, sind sie nicht zu einer chemischen Reaktion disponiert: Man nennt diese Atome mit vollgefüllten Schalen Edelgase¹ (z. B. Neon, Argon) (Abb. 10.2). Hat ein Atom nur 1 Elektron in den äusseren 4 Schalen, wie z. B. Natrium, dann gibt es dieses Elektron gerne an ein anderes Atom ab. Dadurch ist es aber dann einfach positiv geladen, denn es fehlt ein Elektron. Solche Atome nennt man

¹ Dies gilt mit einer Ausnahme. Helium ist auch ein Edelgas, aber bei den Atomen Wasserstoff und Helium gibt es nur 1, nicht 4 äussere Schalen. Beim Wasserstoff hat es in dieser Schale 1 Elektron und Wasserstoff ist reaktiv. Bei Helium ist diese Schale mit zwei Elektronen voll: Es ist nicht reaktiv und daher ist auch Helium ein Edelgas.

Kationen. Atome, wie z. B. Natrium kommen entsprechend als Salze vor. Der Gegenpart von Atomen wie Natrium sind Atome, die 7 Elektronen in den 4 äussersten Schalen haben. Sie nehmen gerne ein Elektron auf, um auch die 4. äusserste Schale mit 2 Elektronen zu komplettieren. Man nennt diese Atome Anionen und sie sind einfach negativ geladen, denn sie haben ein Elektron mehr als Protonen im Kern stecken. Beispiele sind Chlor oder Jod. Chlor und Jod nehmen gerne das Elektron von Natrium auf. Es entsteht das Salz Natriumchlorid, das wir Kochsalz nennen, oder Natriumiodid, das als Behandlung bei Jodmangel eingesetzt wird und in der Abklärung und Behandlung von Schilddrüsenleiden seine Wichtigkeit hat (Kap. 4 und Kap. 8).

Wenn sich zwei Atome nahekommen, sind die kernnahen Schalen unbeeinflusst. Sie enthalten alle je zwei Elektronen. Die äussersten Schalen der beiden Atome können sich jedoch unter gewissen Bedingungen auch zusammenlegen und je ein Elektron einbringen. Diese „Verbundschalen“ sind dann wieder mit zwei Elektronen gesättigt, was der Natur gefällt: Entstanden ist ein Molekül durch eine chemische Verbindung zwischen zwei oder mehreren Atomen (Abb. 10.2).

Hat ein Atom 2 Elektronen in den 4 äussersten Schalen, kann es 2 Elektronen abgeben und ist dann zweifach negativ geladen, wie Kalzium. Es kann die Elektronen an 2 Chloratome abgeben, oder an ein Atom, das 6 Elektronen in den äusseren 4 Schalen hat, also noch Platz für 2 weitere Elektronen hat, wie z. B. Sauerstoff. Es entsteht dann $\text{Ca}^{2+}\text{Cl}_2^{1-}$ oder $\text{Ca}^{2+}\text{O}^{2-}$ (hochgestellt ist die Ladung des Atoms, tiefgestellt die Anzahl der Atome des gleichen Typs im Verbund).

Atome, die in ihren äussersten Schalen mindestens 4 Elektronen haben, können auch – wie gesagt – chemische Bindungen eingehen. Ein Sauerstoffatom kann die zwei Schalen, die nur 1 Elektron enthalten, mit z.B. einem anderen Sauerstoffatom verbinden. Es entsteht ein Sauerstoffmolekül O_2 mit einer „Doppelbindung“ oder es kann je eine Schale mit beispielsweise einem Wasserstoffatom oder einem Chloratom zusammenlegen und es entstehen dann H_2O (=Wasser) oder Cl_2O . Atome mit 3 Elektronen in den 4 äusseren Schalen können drei Elektronen abgeben und solche mit 5 Elektronen 3 aufnehmen. Stickstoff hat 5 Elektronen in den 4 äusseren Schalen, eine ist doppelt besetzt, die anderen drei nur einfach und so kann Stickstoff 3 Bindungen eingehen, Kohlenstoff hat 4 Elektronen in den äusseren Schalen und kann 4 Bindungen eingehen. Resultat aller dieser „Austauschvorgänge“ ist immer, dass möglichst eine Struktur entsteht, bei der alle Elektronenschalen mit je zwei Elektronen voll besetzt sind, denn diese werden von der Natur bevorzugt². Bei diesem Prozess entstehen entweder Salze oder sog. kovalente Bindungen, wie eben z. B. H-O-H oder H_2O = Wasser. Chemische Bindungen sind entstanden, welche so 2 oder mehrere Atome in einem Molekül zusammenhalten. Kohlenstoff (C) hat 4 gleichwertige Schalen, die mit je einem Elektron besetzt sind und kann so maximal 4 Schalen zusammenlegen. Macht ein Kohlenstoffatom dies mit anderen Kohlenstoffatomen, entsteht unter speziellen Umständen eine Superstruktur von unzähligen Kohlenstoffatomen, die in tetraedrischer Form angeordnet sind: Ein **Diamant** ist entstanden! Oder wir lassen ein Kohlenstoffatom sich mit drei Wasserstoffato-

² Sie sind, wie man in der Fachsprache sagt, energetisch günstiger

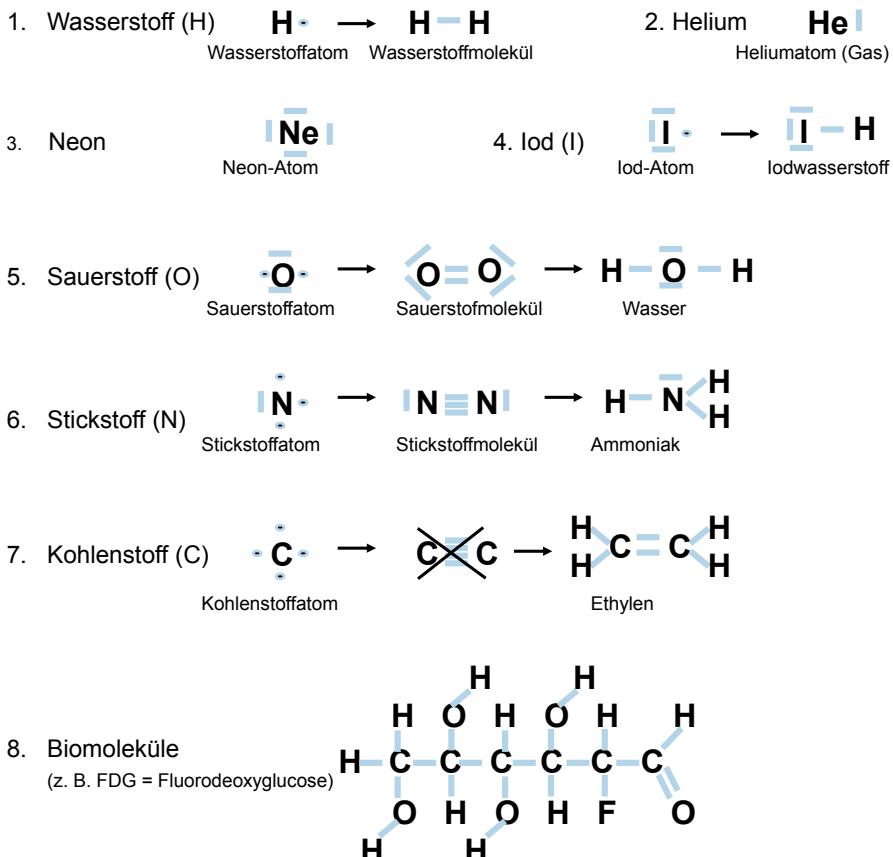


Abb. 10.2 Einige chemische Verbindungen, die zu uns bekannten Molekülen führen. Das wichtigste Prinzip ist, dass die Atome die äussersten 4 Schalen gerne mit je zwei Elektronen füllen möchten. Entsprechend sind in der schematischen Darstellung um die jeweiligen Atome Punkte oder Striche angeordnet, wobei ein Punkt einem und ein Strich zwei Elektronen entspricht. Die einzigen Ausnahmen sind Wasserstoff und Helium, die zur Komplettierung ihrer einzigen Schale nur 2 Elektronen benötigen. Helium ist mit 2 Elektronen „glücklich“ und chemisch nicht reaktiv. Wasserstoff verbindet sich gerne unter Zusammenlegung seiner Schale mit der Schale eines anderen Atoms z. B. zu H_2 . Chlor macht entweder wie Wasserstoff oder es schnappt sich ein Elektron von einem Elektronensender, wie z. B. Natrium. Es ist dann einfach negativ geladen, denn im Kern hat Chlor nur 17 positive Ladungen, während es in den 2 inneren Schalen 10 Elektronen und den 4 äusseren nun 8 Elektronen hat

men und einem Sauerstoffatom verbinden, und die zweite mögliche Bindung des Sauerstoffatoms wieder mit einem Wasserstoffatom eingehen und haben so Methylalkohol (COH_4) hergestellt. Wir können aber auch riesige Gebilde von verschiedenen Atomen, vor allem von Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff zusammenhängen und haben damit Biomoleküle erzeugt, die die erstaunlichsten Eigenschaften haben können. Da es eine enorme Zahl von möglichen Kombination-

nen zum Zusammenstecken von Atomen gibt, ist auch die biologische Vielfalt enorm. Es entstehen neben **Diamanten** auch **Palmen** und **Chamäleons** und sogar Menschen. Es kommen einem unweigerlich wieder die verschiedenen Bausteine im Lego in den Sinn. Auch mit Lego kann man Palmen und Chamäleons und eben auch Menschen nachbilden.

10.3 Zusammenfassung

In erster Näherung ähnelt ein Atom einem Minisonnensystem. Im Kern (Sonne) sitzen positiv geladene Protonen, die von negativ geladenen Elektronen (Planeten) umkreist werden. Zweckmässiger ist es allerdings, sich vorzustellen, dass die Elektronen sich in Schalen um den Atomkern herum aufhalten. Im Gegensatz zu unserer Welt ist der Mikrokosmos gequantelt. So braucht es eine ganz exakt bestimmte Kraft (ein Quantum Kraft), um z. B. ein Elektron von einer kernnahen in eine kernferne Schale zu verschieben. Beim Übergang eines Elektrons von einer kernfernen in eine kernnahe Schale entsteht elektromagnetische Strahlung. Ob es sich um Licht oder Röntgenstrahlen handelt, hängt damit zusammen wie schwer das Atom ist, also wie viele Protonen es im Kern hat, und ob die Schalenübergänge innerhalb von kernfernen oder kernnahen Schalen stattfinden. Übergänge können erzeugt werden, indem ein Atom mit Elektronen bombardiert wird. Die bombardierenden Elektronen können nicht nur verursachen, dass an den Kern gebundene Elektronen ihre Schalen wechseln und dabei Strahlung aussenden, sie können im Atom auch abgebremst werden und dann entstehen ebenfalls Strahlen. Dabei kann gleichzeitig auch ein atomeigenes Elektron aus dem Kern katapultiert werden. Dank Schalenübergängen von Elektronen und durch Abbremsen von Elektronen erzeugt man Strahlung, z.B. Röntgenstrahlen in einer Röntgenröhre.

Jede Elektronenschale eines Atoms kann nur 2 Elektronen enthalten (sog. Pauli-Ausschlussprinzip). Die inneren Schalen sind immer mit 2 Elektronen gefüllt während die äussersten 4 Schalen je nach Atomtyp nicht ganz gefüllt sind. Sie möchten aber gerne ganz gefüllt oder ganz leer sein, also 0 oder 8 Elektronen enthalten. So haben Atome mit 3 oder weniger Elektronen in den äussersten Schalen die Tendenz, ihre Elektronen abzugeben, Atome mit 5 oder mehr Elektronen in diesen Schalen die Elektronenzahl auf 8 zu ergänzen. Wenn Natrium sein einziges äusserstes Elektron abgibt, entsteht ein positiv geladenes Natrium(Na)-Ion und wenn Chlor (Cl) ein Elektron aufnimmt, dass es in den äussersten Schalen 8 Elektronen hat, entsteht ein negativ geladenes Chlorid-Ion. So ist z. B. Kochsalz (NaCl) eben natürlich stabil. Atome können aber ihre äussersten durch 1 Elektron besetzten Schalen auch mit anderen Atomen kombinieren. Dabei entstehen chemische Verbindungen. Alle Biomoleküle bestehen aus solchen chemischen Verbindungen. Da beliebig viele Kombinationen von Atomen in Moleküle möglich sind, bilden die chemischen Verbindungen die Grundlage zur Biodiversität bis hin zum Menschen.

Die moderne Alchemie oder wie kann man wertloses Metall in Gold verwandeln?

Im letzten Kapitel haben wir den Aufbau der Elektronenhülle besprochen, welche einen Atomkern umgibt. Wir haben gesehen, dass Hüllen-Elektronen durch Strahlen oder auftreffende Teilchen wie z. B. andere Elektronen, aus der Atomhülle herauskatapultiert werden können und dass sie auch unter Aussendung von Strahlen von kernferneren Schalen in der Elektronenhülle auf kernnähere „springen“. Die so entstehenden Strahlen sind elektromagnetische Wellen, wie z. B. Röntgenstrahlen oder sichtbares Licht.

Hier wollen wir uns dem Kern zuwenden, denn Strahlen können auch aus dem Kern kommen. Eine Strahlung aus dem Atomkern ist immer mit einer Kernumwandlung verbunden. Unweigerlich kommen einem die Worte „Kernspaltung“ und Radioaktivität in den Sinn. Radioaktivität und Kernumwandlungen sind für die in Kap. 4 erläuterten NUK- und PET-Verfahren grundlegend. In diesem Kapitel soll das Verständnis dazu vertieft werden.

11.1 Struktur des Atomkerns

Wir haben im letzten Kapitel angedeutet, dass der Kern Protonen (p) enthält, positiv geladene Teilchen, die im Vergleich zu den Elektronen massenreich sind und eine elektrische Einheitsladung von +1 aufweisen. Wir haben weiter festgehalten, dass sich gleiche Ladungen abstoßen. Sie haben sich vielleicht gefragt, wie es denn möglich ist, dass in den Atomkernen bis 92 Protonen auf engstem Raum zusammengepfercht sein können, wenn sie sich doch stark abstoßen. Dies wird dank den ebenfalls im Kern steckenden Neutronen(n) ermöglicht. Sie sind praktisch gleich schwer, wie die Protonen, tragen keine Ladung (daher der Name Neutron von „neutral“) und üben auf die Protonen eine starke Anziehung aus. Diese wirkt der Abstossung der Protonen untereinander entgegen. „Stimmt“ das Verhältnis von Protonen und Neutronen im Atomkern, ist er stabil. Das heisst, die Kräfte, die die Protonen und Neutronen aneinanderbinden, sind stärker als die Kräfte, welche die Teilchen auseinandertreiben wollen. Protonen und Neutronen haben noch eine weitere Eigen-

schaft: Sie beide tragen einen sog. Spin, wie übrigens die Elektronen auch. Der Wasserstoff, der im Atomkern ein einziges Proton hat, trägt entsprechend diesen Spin auch, und dank diesem Spin, dem Kernspin, kann man MR-Bilder machen (Kap. 5).

Bei kleineren stabilen Atomkernen ist das Verhältnis von Neutronen zu Protonen im Kern etwa 1:1, während bei schwereren Kernen, wie z. B. dem Uran im Kern auf die 92 Protonen rund 130–140 Neutronen kommen. Das Verhältnis Neutronen zu Protonen wächst also von den kleinen Atomen von etwa 1:1 zu den schweren Atomen zu etwa 1,5:1 an. Weicht das Verhältnis Neutronen zu Protonen zu stark von dieser Verhältniszahl ab, ist ein Atomkern so instabil, dass er praktisch nicht existiert. Aber kleine Abweichungen vom „Ideal“-Verhältnis können ebenfalls zu stabilen oder dann „teilstabilen“, sog. radioaktiven Atomen führen.

11.2 Stabile und radioaktive Isotopen

Ein Atom mit einer bestimmten Protonenzahl hat unabhängig von der Anzahl Neutronen die gleichen chemischen Eigenschaften, denn diese sind durch die Elektronen in der Hülle bestimmt (Kap. 10), und in dieser ist ja die Anzahl Elektronen gleich der Anzahl Protonen im Kern. Entsprechend nennt man die verschiedenen Atome auch chemische Elemente. Es gibt zum Beispiel einen Sauerstoff mit 8 oder 10 Neutronen (^{16}O und ^{18}O) und es gibt einen Sauerstoff mit 7 Neutronen (^{15}O), der radioaktiv ist und mit einer Halbwertszeit (s. unten) von ca. 2 Minuten zerfällt. Aber einen Sauerstoff mit 4 Neutronen gibt es ebenso wenig, wie einen mit 24 Neutronen. Atome des gleichen Typs, die verschiedene Anzahl von Neutronen haben, nennt man Isotope. Wir haben oben drei Sauerstoffisotopen vorgestellt. Viele chemischen Elemente haben mehrere Isotopen, einige davon sind stabil, andere sind jedoch radioaktiv, d. h. sie zerfallen. Beim Zerfall dieser Isotopen wird Strahlung ausgesendet, entweder in Form von elektromagnetischen Wellen (Gammastrahlung) (Kap. 9) oder in Form von Teilchen. Die natürliche Radioaktivität wurde u. a. von der berühmten Physikerin Marie Curie entdeckt, und auf der Radioaktivität einzelner Isotopen baut die ganze Nuklearmedizin (NUK) und die Positronenemissionstomographie (PET) auf (Kap. 4). Das chemische Element Fluor hat in stabiler Form 9 Protonen und 10 Neutronen im Kern (9+10), das Isotop Fluor-18 dagegen 9 Protonen und 9 Neutronen (9+9). Dieses Fluorisotop ist nicht stabil, es zerfällt radioaktiv und wird als wichtigstes radioaktives Isotop für die PET verwendet, heute meist gebunden an ein Zuckermolekül (Kap. 4 und Kap. 10).

Radioaktivität ist etwas ganz Interessantes. Jeder radioaktive Zerfall gehorcht nämlich dem gleichen ganz einfachen Naturgesetz. Beobachtet man z. B. 1024 radioaktive Isotopen einer einzigen Art (also z. B. 1024 Fluor-18 Isotopen), dann sind nach einer bestimmten Zeit $T^{1/2}$ im statistischen Mittel die Hälfte davon, also 512 radioaktiv zerfallen, nach $2 \times T^{1/2}$ sind von den 512 wieder die Hälfte, also 256 zerfallen, nach $3 \times T^{1/2}$ ist wieder die Hälfte davon, also 128 zerfallen usw. Man nennt $T^{1/2}$ die Halbwertszeit (HWZ) eines Isotops und damit ist eindeutig festgehalten, wie schnell ein radioaktives Isotop zerfällt. Nach 10 HWZ ist von den 1024 radioaktiven Isotopen im Mittel gerade noch ein einziges übrig, alle andern sind zerfallen. Von

der Anfangsradioaktivität des Materials ist nach 10 HWZ nur gerade rund noch ein Tausendstel verblieben. Das Fluor-18 hat eine HWZ von etwa 2 Stunden, nach 20 Stunden strahlt eine bestimmte Menge Fluor-18 also nur noch sehr schwach, nämlich etwa 1000-mal weniger als anfänglich. Entsprechend kann man nicht generell sagen, Radioaktivität sei ein Umweltproblem. Wichtig ist, wie viel radioaktives Material man hat, aber noch viel wichtiger, wie gross seine HWZ ist. Während sich das in der PET angewendete Fluor-18 nach einem Tag praktisch „selbst entsorgt“ hat, sind gewisse Abfälle von Kernkraftwerken viel langlebiger. Radioaktives Plutonium, das in einem Kernreaktor anfällt, hat eine HWZ von etwa 30.000 Jahren, man muss es also mindestens 10 Halbwertszeiten oder 300.000 Jahre „hüten“, damit seine Strahlung auf einen unproblematischen Wert abgeklungen ist. Sie verstehen nun, warum man um die Lagerung von radioaktiven Abfällen grosses Aufhebens macht, aber auch, dass dies nicht für jegliche Radioaktivität gilt. Die einen radioaktiven Isotope verschwinden rasch von selbst, die anderen bleiben lange ein Strahlenproblem. In der medizinischen Bildgebung verwendet man praktisch ausschliesslich kurzlebige radioaktive Isotopen (HWZ kürzer als 10 Tage). Der radioaktive Zerfall eines radioaktiven Isotops kann auf verschiedenste Arten stattfinden. Wir besprechen nur die Zerfallsarten, welche für die medizinisch bildgebende Diagnostik von Bedeutung sind.

11.3 Radioaktive Zerfallsarten

Die Natur hält sich an gewisse Gesetze, so z. B., dass die Ladung erhalten bleibt. Wenn wir diesen Grundsatz anwenden, dann ergeben sich u. a. folgende Möglichkeiten eines radioaktiven Zerfalls:

1. Ein Proton (Ladung +1) schnappt sich aus der Atomhülle ein Elektron (Ladung -1) und verwandelt sich in ein Neutron (Ladung 0). In einer der Elektronenschalen der Atomhülle wird ein Platz für ein anderes Elektron frei. Dies fällt in die leere Schale und sendet einen Röntgenstrahl aus. Mit solchen Röntgenstrahlen kann man dann in der NUK (Kap. 4) Bilder machen. Dieser radioaktive Umwandlungsprozess findet in Kernen statt, die in der Tendenz zu viele Protonen haben und so die Anzahl der Protonen reduzieren können.
2. Ein Proton kann sich auch in ein Neutron und ein Positron umwandeln. Das Positron ist der positiv geladene Bruder des Elektrons und dem Namen nach erkennen Sie, worauf dies hinausläuft: die Positronenemissionstomographie (PET: Kap. 4). Der Effekt auf den Atomkern ist der gleiche, wie unter 1 beschrieben. Wir werden unten auf diesen Prozess näher eingehen.
3. Ein Neutron kann sich in ein Proton und ein Elektron umwandeln. Dann wird ein Elektron aus dem Kern geschleudert. Dabei kann auch noch Strahlung aus dem Kern freigegeben werden. Diese Strahlen sind den Röntgenstrahlen identisch, weil sie aber aus dem Kern kommen, nennt man sie Gammastrahlen. Gammastrahlen, die Geschwister der Röntgenstrahlen, verwendet man ebenfalls in der NUK-Bildgebung (Kap. 4). Bei diesem Prozess nimmt die Anzahl Protonen um

eins zu, diejenige der Neutronen um eins ab. Er läuft dann ab, wenn das un stabile Isotop tendenziell zu viele Neutronen hat, um stabil zu sein.

4. Wie die Elektronen in der Atomhülle in Schalen sitzen, sitzen auch Protonen und Neutronen im Atomkern in Schalen. Die einen Protonen und Neutronen sind stärker gebunden als andere. Wenn dann ein Proton oder Neutron von einer in die andere Schale springt, entstehen ebenfalls Gammastrahlen, die in der NUK Verwendung finden.

Röntgenstrahlen und Gammastrahlen sind durchdringend. Sie können so aus dem menschlichen Körper hinausstrahlen und Informationen aus dem Körperinnern hinaustragen, z. B. wo ein radioaktiver Tracer steckt. Elektronen und Positronen, die bei einer Kernumwandlung entstehen, bleiben im Körper stecken. Elektronen finden irgendwie in einem anderen Atom „Unterschlupf“, aber Positronen haben ein anderes Schicksal.

11.4 Positronen: Teilchen der Antimaterie

Wir wissen es nicht. Vielleicht gibt es irgendwo Universen, die aus Antimaterie aufgebaut sind. Das für uns erfassbare Universum scheint aber ausschliesslich aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut zu sein. Die entsprechenden Antiteilchen, das Antiproton, das Antineutron und das Positron können zwar künstlich erzeugt werden, aber wenn sie auf unsere Materie treffen, gibt es unweigerlich eine „Explosion“ und die Antimaterieteilchen zerstrahlen als Gammastrahlen zusammen mit den entsprechenden Materieteilchen, also Elektronen mit Positronen, Protonen mit Antiprotonen und Neutronen mit Antineutronen. Dieser Prozess wird vom berühmten Einstein'schen Gesetz $E = mc^2$ bestimmt, welches besagt, dass Energie (E) nichts Anderes als Masse (m) mal einer Konstante im Quadrat, nämlich der Lichtgeschwindigkeit (c) im Quadrat ist. Masse ist „geballte“ Energie. Auch bei einer Atomexplosion oder in einem Kernkraftwerk finden Kernreaktionen statt, bei denen Masse in Energie umgewandelt wird, und natürlich in unserer Sonne: Enorme Energien werden frei.

Wenn ein radioaktives Isotop also z. B. in einem Patienten zerfällt und ein Positron aussendet, schnappt sich dieses in unmittelbarer Umgebung ein Elektron, denn der Patient enthält (dank aller seiner Atome) beliebig viele Elektronen. Bei der Positronen-Elektronen-Reaktion entstehen zwei Gammastrahlen, die vom Ort der Positronen-Elektronen-Reaktion fast exakt in entgegengesetzte Richtungen strahlen (Abbildung 4.2). Wenn wir also einen PET-Tracer in einen Menschen einbringen und er unter Aussendung eines Positrons zerfällt, definieren die zwei entstehenden Gammastrahlen eine Linie, auf welcher der Zerfall stattgefunden haben muss. Diese Linie kann mit einem PET-Scanner identifiziert werden, denn immer, wenn zwei Detektorelemente praktisch gleichzeitig je einen Gammastrahl detektieren (Abbildung 4.3), hat der Zerfall auf der Verbindungsgeraden der beiden Detektorelemente stattgefunden. Man kann sich sehr viele solche Linien durch den Patienten vorstellen, welche im Ring detektiert wurden. Dort, wo viele Linien sich kreuzen, müssen

viele Zerfälle stattgefunden haben. Aus diesen Linien lässt sich das PET-Bild errechnen.

11.5 Wie entstehen radioaktive Isotope

Wenn unstabile Isotope zerfallen, warum gibt es dann überhaupt noch natürliche Radioaktivität? Einige radioaktive Isotope wie Uran haben eine Halbwertszeit von Milliarden von Jahren, sind also Überbleibsel aus der Entstehungsgeschichte des Universums. Alle anderen radioaktiven Isotopen werden künstlich hergestellt. Dies geschieht in Kernreaktoren für ihre Herstellung (speziell ausgelegte Atomkraftwerke) und Zyklotrons. Zyklotrons zur Erzeugung von Radioisotopen für PET stehen an vielen Spitätern. In einem Kernreaktor wird ein bestimmter Atomtyp bestrahlt, wandelt sich in das gewünschte radioaktive Isotop um, wird dann chemisch gereinigt und anschliessend bei einer radiopharmazeutischen Firma oder direkt beim Kunden zum gewünschten radioaktiven Tracer verarbeitet.

In einem Zyklotron werden z. B. Wasserstoffkerne in einem kleinen Kreisbeschleuniger auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt und dann auf ein Target geschossen, welches aus den Atomen besteht, die umgewandelt werden sollen. Zum Beispiel wird ein Target, welches das stabile Sauerstoffisotop O-18 (mit 8 Protonen und 10 Neutronen) enthält, mit Protonen (Wasserstoffkernen) bombardiert. Das Proton gelangt so in den O-18 Kern, aber ein Neutron verlässt ihn. Entstanden ist ein Fluor (F)-18 Isotop (mit 9 Protonen und 9 Neutronen). Dieses F-18 Isotop ist instabil, also radioaktiv und zerfällt in einer Kernreaktion gemäss dem Zerfallsschema in Punkt 2 oben. Beim Zerfall entsteht dabei unter anderem ein Positron und wieder O-18. Auf dieselbe Art können mit einem Zyklotron verschiedenste andere radioaktive Isotopen hergestellt werden.

Für NUK / PET-Abteilungen ebenfalls interessant sind sog. Generatoren. Radioaktiver Zerfall kann in ganzen Kaskaden stattfinden, d. h. ein radioaktives Isotop zerfällt in ein anderes radioaktives Isotop, welches wieder zerfällt etc. bis am Schluss ein stabiles Isotop entsteht. Wenn wir ein radioaktives Isotop nehmen, dass erstens eine Halbwertszeit (HWZ) von Tagen bis Wochen hat, das dann in ein weiteres radioaktives Isotop zerfällt, das eine HWZ von Minuten bis Stunden hat, entsteht bei geeigneter chemischer Anordnung ein Generator. In der NUK kommt der Molybdän (Mo-99)-Technetium (Tc-99m)-Generator zum Einsatz. Mo-99 wird mittels Kernreaktor oder Zyklotron hergestellt und zerfällt mit einer HWZ von etwas mehr als 3 Tagen in Tc-99m (m steht für metastabil), das eine HWZ von 6 Stunden hat und in Tc-99 zerfällt. Mo-99 ist unlöslich in ein Salz gebunden, Tc-99m ist jedoch löslich. Man muss also einfach eine Vorrichtung bauen, mit welcher man Wasser durch das Mo-99 Salz laufen lässt. Das Wasser spült das Tc-99m aus dem Generator und kann dann chemisch an ein Biomolekül gebunden werden. Ein NUK-Tracer ist entstanden.

11.6 Zusammenfassung

Der Atomkern besteht aus Protonen und Neutronen. Diese können sich entweder spontan (natürliche Radioaktivität) oder von aussen angeregt (künstliche Radioaktivität) umwandeln. In NUK und PET brauchen wir radioaktive Atome, die künstlich erzeugt wurden.

Da die Anzahl Protonen im Kern bestimmt, um welches chemische Element es sich handelt, können so verschiedene Elemente ineinander umgewandelt werden. Die Kerne radioaktiver Isotope können zerfallen, indem sie u. a. Gammastrahlen aussenden. Solche Isotope kommen in der NUK zum Einsatz. Andere Isotope zerfallen, indem sich Neutronen in Protonen und Elektronen umwandeln, oder indem Protonen sich in Neutronen und Positronen umwandeln, wobei das Positron ein Antimaterieteilchen ist. Antimaterie ist nicht stabil. Bei der PET schnappt sich das Positron eines zerfallenden Positronen-strahlenden Tracers in seiner unmittelbaren Umgebung ein Elektron und beide zusammen werden in zwei vom Entstehungsort wegfahrende Gammastrahlen umgewandelt. Diese Gammastrahlen strahlen fast exakt in Gegenrichtung, liegen also beide auf derselben Geraden und werden dann in einer PET-Kamera als solche Strahlen registriert.

Künstliche radioaktive Atome können in einem Kernreaktor oder einem Zyklotron hergestellt werden. In beiden Fällen wird ein Material bestrahlt und in künstlich radioaktive Atome verwandelt. Diese werden nach einem Reinigungsprozess in Tracermoleküle eingebunden und der entstandene radioaktive Tracer wird dem Patienten appliziert. In NUK und PET kommen auch sog. Generatoren zum Einsatz. In diesen zerfällt ein radioaktives Atom in ein weiteres radioaktives Atom, welches wieder zerfällt. In dieser Zerfallskette kann dann ein geeignetes radioaktives Atom „geerntet“ und ebenfalls in einen Tracer eingebracht werden.

Kernreaktionen sind die moderne Alchemie. Man kann im Prinzip durch eine geeignete Kernumwandlung sogar Gold aus anderen Atomen erzeugen.

Was hat denn mein Mobiltelefon mit medizinischer Bildgebung zu tun?

Viele bedeutende Wissenschaftler haben möglich gemacht, dass Sie heute mit dem Telefon mobil telefonieren, fotografieren, Apps runterladen und vieles andere mehr. Da wir uns in diesem Buch mit medizinischer Bildgebung befassen, beschränken wir uns in der Diskussion auf die Fotokamera im Mobiltelefon, denn ein modernes Röntgengerät ist nicht wesentlich verschieden. Wie ein Computer funktioniert, ist ebenfalls interessant. Es wird hier aber nur eine kurze Beschreibung gegeben.

Wir haben im Kap. 10 etwas über den Aufbau der Materie aus Atomen gelernt. Kohlenstoffbasierte Moleküle und ihre chemischen Verbindungen mit anderen Atomen ermöglichen die Biodiversität, die wir auf der Erde finden. Alle Lebewesen inklusive der Mensch sind aus solchen Molekülen aufgebaut. Ein ganz anderer Typ von Verbindungen von Atomen führt zu Strukturen, zu denen Gesteine, Kristalle, Salze und Metalle gehören. Beispiele sind Bergkristalle, Kochsalz, Silizium, Eisen, Kupfer oder Aluminium. Man nennt sie allesamt Festkörper. Ein Festkörper hat je nach Zusammensetzung spezielle Eigenschaften. Wie alle Atome mit ihrem positiv geladenen Kern und den negativ geladenen Elektronen in der Atomhülle (Kap. 10) haben auch die Atome in festen Körpern viele Elektronen um sich, die an sie gebunden sind und so die hohe positive Kernladung abschirmen (erinnern Sie sich, positive und negative elektrische Ladungen ziehen sich an). Die stark gebundenen inneren Elektronen schirmen die positiven Kernladungen ab. Die äußersten atomaren Elektronen sind weit vom Atomkern weg, spüren also nur eine geringe Anziehungskraft. Wir haben gesehen, dass Atome ihren idealen Zustand finden, wenn ihre Elektronenschalen mit Elektronen aufgefüllt sind, d. h.: immer je mit zwei Elektronen (Kap. 10). Ein so „gesättigtes“ Atom ist wenig reaktiv, verbindet sich also nicht mit noch weiteren Atomen: Es sind dies die Edelgase wie Helium und Neon oder Moleküle wie Sauerstoff und Wasser (Abbildung 10.2). Die Sättigung der Elektronenschalen kann auch zustande kommen, wenn in einem Molekül viele Atome zusammengebunden sind, die durch das Zusammenlegen ihrer äußersten Schalen „gemeinsame“ Sache machen und so sicherstellen, dass alle gemeinsamen Schalen zwei Elektronen enthalten.

Bei Festkörpern machen Milliarden von Atomen „gemeinsame Sache“ mit ihren äußersten Schalen. Die speziellen Eigenschaften von Festkörpern machen sich z. B.

digitale Fotoapparate zunutze. Wir wollen zuerst verstehen, wie ein Festkörper aufgebaut ist. Dann verstehen wir zwangslässig, warum gewisse Festkörper beim Herstellen digitaler Bilder eine wichtige Funktion haben.

12.1 Festkörper

12.1.1 Metalle

Wenn Atome in einem Festkörper gebunden sind, legen sie ihre äussersten atomaren Elektronenschalen ebenfalls zusammen. Die Elektronenschalen erstrecken sich dann über den ganzen Festkörper, also über Abermilliarden von Atomen. Man nennt diese gemeinsamen Schalen „Bänder“. Die Bänder, die die Atome in einem Festkörper im Verbund halten, nennt man „Valenzbänder“. Sie enthalten zwei Elektronen pro Atom, das Valenzband ist bis oben voll. Wenn sich ein Elektron frei unter Milliarden von Atomkernen bewegen möchte, müsste es „nach oben“ in ein „Leitungsband“ springen (Abb. 12.1). Das Leitungsband enthält viele nicht besetzte Elektronenzustände von den zusammengelegten Schalen der Atome, wo solche freien Bewegungen möglich sind. In Metallen trägt jedes Atom nur ein einzelnes Elektron zum gemeinsamen Leitungsband bei; das Leitungsband ist damit nur halb gefüllt. In einem nur teilweise gefüllten Leitungsband können die Elektronen quasi frei im Band herum hüpfen, also auch durch das ganze Metall sausen. Verbindet man die zwei Pole einer Batterie mit einem Stück Metall (einem Draht), dann fließt ein „Strom von Elektronen“, also Elektrizität durch den Draht und zwar vom Minuspol der Batterie zum Pluspol (elektrisch negative und positive Ladungen ziehen sich an). Der Draht heizt sich auf und beginnt zu glühen, denn wir haben einen Kurzschluss erzeugt. Wenn wir ein geeignetes Metall wählen, das glüht, aber nicht verglüht, dann haben wir übrigens eine Glühbirne konstruiert.

12.1.2 Isolatoren und Halbleiter

Ist die Anzahl Elektronen pro Atom so, dass jedes Atom zwei Elektronen zum Valenzband beiträgt, aber keine Elektronen zum Leitungsband, dann können sich die Elektronen in einem solchen Festkörper nicht frei bewegen, und es kann kein Strom fließen. Beispiele sind Bergkristall (Quarzkristall) oder Kochsalz. Diese Festkörper nennen wir entsprechend Isolatoren. Man kann ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband bringen, muss aber viel Kraft aufwenden. Ein Puls sichtbaren Lichtes schafft dies z. B. nicht¹. Es gibt aber Festkörper, bei denen es nicht viel Kraft braucht,

¹ Allerdings kann sehr kurzwelliges Ultraviolett dies. Ein Röntgenstrahl ist dazu auch in der Lage, schlägt aber tendenziell Elektronen aus Festkörpern, die nicht in Bändern sondern den kernnäheren Schalen eines Atoms liegen. Dieser Effekt ist in einer Drehanode einer Röntgenröhre wirksam. (Kapitel 2 und 10).

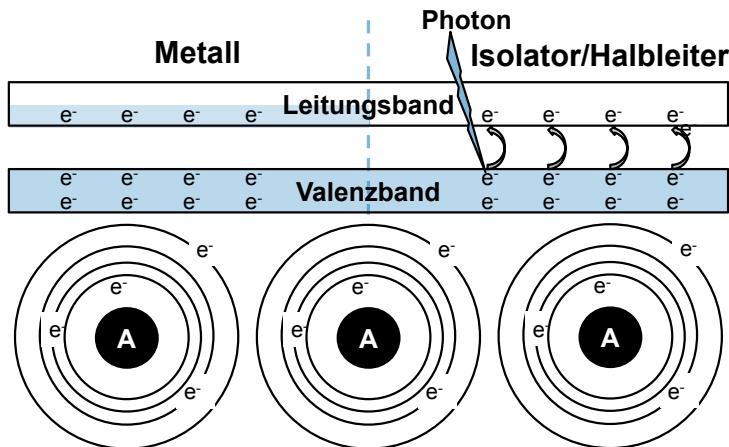


Abb. 12.1 Eindimensionale Darstellung eines Festkörpers. Unten sind die Atomkerne und die eng gebundenen Elektronen zu sehen. Die äussersten Elektronen ordnen sich in sog. Valenz- und Leitungsbändern an, die dem ganzen Festkörper gemeinsam sind. Ist das Valenzband mit Elektronen gefüllt, aber keine Elektronen im Leitungsband, dann liegt ein Isolator oder ein Halbleiter vor. Ist das Leitungsband teilweise mit Elektronen gefüllt, handelt es sich um Metalle. In Metallen können sich Elektronen frei bewegen. Darum können Metalle elektrischen Strom leiten, denn ein elektrischer Strom wird eben dank frei beweglichen Elektronen ermöglicht

um die Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband hochzuheben (Abb. 12.1). Man nennt diese Festkörper – wie beispielsweise bestehend aus den chemischen Elementen Silizium oder Germanium – Halbleiter. Versetzt man dann einem Elektron im Valenzband einen Stoss, eben z. B. durch einen Lichtpuls (ein Photon), dann springt das Elektron ins Leitungsband und kann sich dort – wie in einem Metall – frei bewegen. Bringen wir also einmal an zwei Seiten eines Halbleiterplättchens elektrische Drähte an und schalten ein Strommessgerät dazwischen. Dann verbinden wir die beiden Drähte mit einer Batterie (Abb. 12.2).

Jeder Lichtpuls (Photon), der auf das Halbleiterplättchen trifft, katapultiert ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband. Weil dieses Elektron frei beweglich ist und zum Pluspol der Batterie wandert, erzeugt es einen kleinen Stromstoss, denn eine bewegte Ladung ist ein Strom. Jedes Mal, wenn ein Lichtpuls auf das Halbleiterplättchen trifft, schlägt das Strommessgerät aus. Wir können die Ausschläge des Gerätes z. B. in einem Computer registrieren und zählen lassen. Wir wissen dann, wie viele Lichtpulse in einer gewissen Zeit auf das Halbleiterplättchen gefallen sind.

12.2 Digitalkameras

Eine Digitalkamera ist nichts Anderes, als die beschriebene Versuchsanordnung 1000-fach repetiert. Stellen Sie sich vor, dass ein einzelnes Halbleiterplättchen ein Quadrat mit Kantenlängen von einem hundertstel Millimeter hat. Dieses einzelne

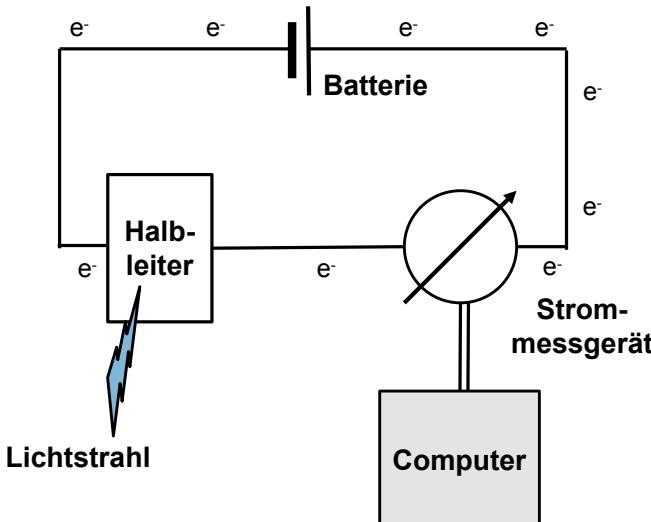


Abb. 12.2 Stromkreis, der ein Detektorelement bestehend aus einem Halbleitermaterial enthält. Der Detektor ist mit einer Batterie und einem Strommessgerät verbunden. Trifft ein Lichtpuls auf den Halbleiter, wird ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband gehoben. Dort ist es frei beweglich und dank der Batteriespannung fliesst dann ein Strom. Er wird im Strommessgerät gemessen und dieses sendet das Messresultat (ein Strompuls) an einen Computer, der das Resultat speichert. Treffen z. B. 95 Lichtpulse in einer Sekunde auf das Detektorelement, dann misst der Computer 95 Strompulse. Diese Anordnung entspricht einem Detektorelement im Bildchip einer Fotokamera

Plättchen ist ein Lichtdetektorelement Ihrer Digitalkamera. Moderne Fertigungsverfahren machen es tatsächlich möglich, auf einem Chip von einem Zentimeter oder noch weniger Kantenlänge eben 1000x1000 oder noch mehr solche Detektorelemente unterzubringen, elektrisch mit 1000x1000 Strommessern zu verbinden und die Strompulse zu messen. Im Computer zählt man jeden Strompuls, der von den 1000x1000 Detektorelementen kommt. Jedem Detektorelement ordnet der Computer einen entsprechenden Pixel zu. Da die Zuordnung eins zu eins geschieht, sagt man auch: eine Kamera hat z. B. eine Auflösung von 13,6 Megapixeln = 2400x1500 Pixeln. Öffne ich kurz den Verschluss der Fotokamera, fallen viele Lichtpulse auf den Chip und alle Plättchen zählen wie wild, wie viele Strompulse in ihnen entstehen. Je mehr Strompulse pro Plättchen, je höher ist die Zahl, die der Computer im entsprechenden Pixel speichert (Abb. 12.3). Wenn wir dann die Zahl in jedem Pixel auf einem Schwarz-Weiss-Bildschirm eines Computers in Graustufen darstellen, sehen wir die abgelichtete Fotografie vor uns. Für Farbbilder werden den Detektorelementen noch grüne, rote und blaue Farbfilter vorgelagert, denn mit diesen drei Farben kann man alle anderen Farben mischen. Fasst man dann entsprechend diese Detektorelemente zusammen, kann man auch Farbbilder erzeugen.

Wie gesagt, erlauben die modernen Methoden, Detektoren mit sehr vielen Detektorelementen herzustellen. Diese Detektoren bilden das Herzstück jeder digitalen

Abb. 12.3 Dargestellt ist ein 9x9 Pixelraster, der – mit viel mehr Pixeln – so im Computer abgelegt ist. Die Zahlen in den einzelnen Kästchen entsprechen z. B. der Anzahl Strompulse, welche im entsprechenden Detektorelement des Bildchip während einer Sekunde gemessen wird. Werden die Zahlen in Graustufen dargestellt, entsteht auf dem Computermonitor ein zweidimensionales Bild der Information, welche mit dem Fotochip in der digitalen Kamera aufgenommen wurde. Die Bildraster können aber auch digitale Werte nach der Berechnung von Schnittbildern darstellen. Im gezeigten Fall ist das 9x9 Quadrat die Auflösung des Sudoku, welches in Abbildung 3.3 gezeigt wird

5	8	9	6	3	4	1	7	2
4	1	6	7	8	2	9	5	3
7	2	3	5	9	1	8	6	4
2	6	4	8	5	3	7	9	1
9	3	8	4	1	7	5	2	6
1	7	5	9	2	6	4	3	8
6	5	1	2	4	9	3	8	7
8	4	7	3	6	5	2	1	9
3	9	2	1	7	8	6	4	5

Fotokamera, seien sie im Mobiltelefon oder in einer ausgewachsenen digitalen Kamera. In unserem Auge sind die Sehstäbchen die Detektorelemente. Diese sind über Leiterbahnen (Nervenstränge) mit unserem Hirn verbunden, das eben unser Computer ist. Beiden Bilddetektoren, dem Detektorchip und dem Auge ist gemeinsam, dass sie aus einer grossen Zahl Elementen bestehen, die zweidimensional angeordnet sind, um ein Bild aufzunehmen. Die moderne Technik von Computerbauteilen kann solche Detektorchips billig herstellen: unglaublich aber wahr. Wenn man solche Chips herstellt, muss man sicherstellen, dass die zig Millionen Detektoren, Strommesser und Stromkreise auch rasch und richtig ausgelesen werden können, nachdem die Belichtung stattgefunden hat. Aber auch das macht die moderne Hochleistungselektronik möglich. Wir können Detektorchips bauen, die für Licht geeignet sind und dann in Fotoapparaten Platz finden. Wir können aber auch Infrarotchips herstellen, die in Nachtsichtgeräten zum Einsatz kommen. Detektorchips, die Röntgen- oder Gammastrahlen (Kap. 10 und Kap. 11) detektieren können, funktionieren ebenfalls ähnlich. Meist treffen die einfallenden Strahlen aber zuerst auf einen vorgeschalteten Kristall, werden dort in Lichtblitze umgewandelt und von nachgeschalteten Lichtdetektorelementen registriert. Wir haben in Kap. 2, Kap. 3 und Kap. 4 beschrieben, wie bei den Röntgen-, CT-, NUK- und PET-Verfahren die digitalen Detektoren diese Strahlen detektieren und entsprechende Bilder machen können.

12.3 Computer

Nun fragen Sie natürlich, wie denn der dahinter geschaltete Computer z. B. im Mobiltelefon funktioniert. Eine detaillierte Erklärung würde hier zu weit führen und es gibt viele Stellen, wie beispielsweise die Wikipedia, wo man sich über die Funkti-

onsweise von Computern informieren kann. Für uns ist wichtig, dass ein Computer grundsätzlich Informationen speichern und rechnen kann, wie unser Hirn auch. Überhaupt gleicht ein Computer auf vielfältige Weise unserem Hirn. Unser Hirn kann nicht nur rechnen, es kann auch Informationen geordnet speichern und auch wieder in verständlicher Form ausgeben. Unser Hirn erhält viele verschiedene Inputs durch Augen, Ohren, Geruch, Geschmack und Tastsinn. Dank unserem Hirn können wir auch Outputs generieren, also sprechen, Klavierspielen oder Bilder malen. Wenn wir uns verbrennen, werden Signale ans Hirn gesendet (Input) und das Hirn ist programmiert zu sagen: a) Es ist heiß (Output 1), und b) die Muskeln müssen die Hand wegziehen (Output 2). Wie das Hirn, hat ein Computer auch eine oder mehrere Speichereinheiten (RAM, CD-ROM, USB), wo man Daten nach ihrer Eingabe auf eine logische Weise speichern und wieder auslesen kann. Ich kann auf einer Tastatur Rechenoperationen eingeben oder Buchstaben. Im ersten Fall tue ich das, um mit dem Computer Rechnungen auszuführen, im zweiten Fall betätige ich ein Schreibprogramm. Der Output ist dann ein Rechenresultat oder ein beschriebenes Blatt. Ein Computer kann also z. B. die Werte der Bildpunkte einer Digitalkamera nach einer Fotoaufnahme so abspeichern, dass sie nachher wieder auf einem Bildschirm in der Ordnung dargestellt werden können, in welcher sie aufgenommen wurden. Das aufgenommene Bild kann wiedergegeben werden. Dank der Fähigkeit zu rechnen, kann der Computer aber auch Befehle ausführen, wie z. B. alle Bildpunkte (Pixel), die – sagen wir – Werte über 100 enthalten als weiß, alle mit Werten 100 oder kleiner schwarz darzustellen.

Auf einen Input folgt oft ein Output, im Hirn wie im Computer. Wenn von unserem Detektorelement im digitalen Fotochip ein Stromstoß kommt, misst der Computer, von welchem Bildpunkt er kommt, also z. B. vom Detektorelement in Zeile 1325 und Kolonne 385 und wie stark der Stromstoß ist, also wie hell der Bildpunkt ist, beispielsweise 750 auf einer Helligkeitsskala von 0 (schwarz) bis 1000 (weiss). Im Computer wird dann das Bild folgendermassen gespeichert. Der besprochene Bildpunkt wird im Speicher als (1325, 385, 750) abgelegt. Machen wir das für alle Millionen von Detektorelementen in der Digitalkamera, können wir das Bild jederzeit aus dem Speicher abrufen und auf einem Bildschirm darstellen, oder auch auf einem Printer ausdrucken. Der Bildspeicher in unserem Hirn scheint etwas anders zu funktionieren und die Funktionsweise des Hirns ist in vielen Belangen noch nicht geklärt.

Ein Computer kann natürlich auch ganz anders programmiert sein. Der Input könnte eine (elektromagnetische) Welle von einem Mobilfonsender sein. Diese wird vom Computer im Mobilfonsrechner empfangen, analysiert und in Schallwellen umgesetzt, die aus dem Mobilfonslautsprecher kommen, oder ich kann ein SMS schreiben (Input) und dann dem Mobilfonscomputer den Befehl geben, es an einen Freund zu senden (Output).

Wir können also mittels moderner Elektronik Bildchips herstellen, die Bilder direkt digital aufnehmen können, den Inhalt an einen Computer senden, der die Daten speichert, und wir können die Bildinformation aus einem Computer auslesen und auf einem Bildschirm darstellen, sei dies der Bildschirm des Mobilfons oder eines (Fernseh-) Monitors. Natürlich können wir den Computer auch brauchen, um

die Bilddaten zu verändern oder Rechenoperationen auf den Daten durchzuführen. Es wurde in Kap. 3 beschrieben, wie man aus digitalen Daten zweidimensionaler Röntgenaufnahmen dreidimensionale Schnittbilder rechnen kann.

Moderne bildgebende Geräte funktionieren genau wie eine Digitalkamera im Mobiltelefon. Auf dem Detektor gibt es Bildelemente, welche je nach Stärke der darauf treffenden Röntgen- oder Gammastrahlen verschieden starke Stromstöße an den Computer senden. Meist werden die Strahlen durch eine vorgelagerte Materialschicht in Lichtpulse umgewandelt. Der Computer legt die gezählten Pulse geordnet ab. Bei einer Darstellung der abgelegten Information auf einem Monitor sehen wir ein digitales Bild, wenn es sich um Röntgen handelt (Kap. 2), bei den Schnittbildverfahren werden die Daten weiter verrechnet (Kap. 3).

12.4 Zusammenfassung

Die Natur kennt kleine und grosse Moleküle und grosse Atomverbände, die wir Festkörper nennen. Metalle sind Festkörper, in denen sich Elektronen frei bewegen können. Wenn z. B. mit einer Batterie eine Spannung über ein Metall gelegt wird, fliessen die Elektronen zum einen Pol der Batterie: Es fliesst ein Strom. Auch Isolatoren wie Salze, Halbleiter oder Silizium sind Festkörper. In diesen fliesst praktisch kein Strom. Wenn aber Elektronen durch das Einwirken z. B. eines Lichtpulses in einen Zustand gehoben sind, wo sie im Festkörper frei beweglich sind, fliesst jedes Mal bei einem solchen Lichtpuls kurz ein Strom. Baut man nun eine Anordnung, mit welcher diese Stromstöße gemessen werden können, hat man ein digitales Detektorelement gebaut. Diese Detektorelemente können stark miniaturisiert werden und so finden sich auf den Bildchips in den digitalen Fotokameras Millionen solcher Detektorelemente in einem Rechteck angeordnet. Zählt man die Strompulse eines Detektorelementes und legt sie in einem Pixelraster in einem Computer ab, hat man ein digitales Bild gespeichert. Fotochips für Farbbilder verwenden den einzelnen Detektorelementen vorgelagerte Farbfilter.

Ein Chip einer Fotokamera, welches Daten an den Computer sendet, findet seine Entsprechung in unseren Augen und dem dahinter geschalteten Hirn. Darum nennt man einen Computer auch oft ein elektronisches Hirn. Man kann auch Röntgen- oder Gammastrahlen auf einen ähnlich gebauten digitalen Chip auftreffen lassen und die so entstehenden Strompulse messen. Meist schaltet man in diesem Fall dem Detektorelement noch einen Wandler vor (einen lichtdurchlässigen Festkörper), welcher die Röntgen- oder Gammastrahler in Lichtpulse verwandelt und dann kann man dahinter diese Lichtpulse mit einer Fotokamera registrieren. Eine digitale Kamera und die Detektorsysteme der medizinischen Bildgebung gleichen sich also stark. Wenn Sie verstanden haben, wie etwa eine Digitalkamera funktioniert, haben Sie auch etwa verstanden, wie bei Röntgen, CT, NUK und PET digitale Bilder aufgenommen, gespeichert und sichtbar gemacht werden.

Die „zehn Gebote“ der medizinischen Bildgebung

Das Ziel dieses Kapitels und seiner auf Krankheiten bezogenen Unterkapitel ist es zusammenzufassen, wie und warum medizinische Bildgebung eingesetzt wird und was Sie bei einer bestimmten Krankheit von einer entsprechenden Untersuchung erwarten können. Dieser kurze Abriss ist daher aus der Sicht einzelner Krankheiten geschrieben, während die Kapitel 2–6 aus der Sicht der bildgebenden Technologien geschrieben sind. Natürlich können hier nur die Anwendungen bei den wichtigsten Krankheiten beleuchtet werden. Wenn Sie z.B. ein Herzleiden haben, können Sie hier einen Eindruck gewinnen, wofür Bilder mit den beschriebenen Verfahren gebraucht werden.

Ärzte verlangen Bilder in der Medizin meist nach einfach erkennbaren Mustern. Es braucht allerdings Erfahrung abzuwagen, welche Bildgebung man genau wann einsetzt und natürlich, wie die resultierenden Bilder zu interpretieren sind. Dafür haben bildgebend-diagnostische Ärzte (Radiologen und Nuklearmediziner) und andere Mediziner eine langjährige „Lehre“ durchlaufen. Radiologen oder Nuklearmediziner sehen Sie oft bei einer bildgebenden Untersuchung gar nicht oder nur kurz. Warum? Sie wirken im Hintergrund, interpretieren die Bilddaten und übermitteln dann die gewonnenen Erkenntnisse an Ihren behandelnden Arzt. Der behandelnde Arzt – heute oft auch ein Ärzteteam – sichtet alle Untersuchungsergebnisse, nicht nur Bilder, sondern auch Laboruntersuchungen und weitere Daten. Durch das Zusammenfassen aller Daten wird genau definiert, was für eine Krankheit Sie haben und wie ausgedehnt sie ist. Dann wird entschieden, wie Sie behandelt werden sollen.

13.1 Die „Zehn Gebote“ der medizinischen Bildgebung

Es gibt einige wichtige Regeln, wie medizinische Bildgebung zum Einsatz kommt. Wir nennen sie hier einmal die „zehn Gebote“ der Bildgebung.

1. Medizinische Bildgebung soll bestimmen helfen, an welcher Krankheit Sie genau leiden. Dies nennt man: eine Diagnose stellen. Man braucht die Bilder also

- zu diagnostischen Zwecken: Man behandelt mit Bildern nicht. Die Behandlung folgt anschliessend und basiert unter anderem auf den Erkenntnissen der Bildgebung. => *Ein Patient hustet und das Röntgenbild zeigt einen Herd, der auf eine Lungenentzündung hinweist (Abbildung 2.1). Blutwerte zeigen eine Entzündung. Man behandelt den Patienten mit Antibiotika.*
2. Medizinische Bildgebung wird ebenso eingesetzt, wenn die Krankheit schon bekannt ist. Oft ist es wichtig zu wissen, wie sich eine Krankheit ausgedehnt hat. Auch dieses Wissen gehört zu einer genauen Diagnose. Hier ist aber nicht die Frage, was der Patient für eine Krankheit hat, sondern wie ausgedehnt diese ist. Bei bösartigen Tumoren bezeichnet man diese Form von Diagnostik mit dem englischen Ausdruck „Staging“. => *Ein Patient leidet an einem bösartigen Tumor. Um ihn richtig zu behandeln, muss man wissen, ob er gestreut hat, und wohin er überall im Körper gestreut hat. Sind die Lymphdrüsen (Lymphknoten) befallen? Sind die Knochen befallen? Sind andere Organe befallen (Abbildung 4.1)? Hat der Tumor nicht gestreut, kann man den Tumor oft mit einer Operation entfernen.*
 3. Medizinische Bildgebung kommt auch zur Erfolgskontrolle nach einer Behandlung zum Einsatz. Die angefertigten Bilder werden mit Bildern vor Beginn der Behandlung verglichen. Damit wird der Verlauf der Krankheit untersucht. => *Ein Patient hat einen Tumor mit verschiedenen Herden, die vor der Behandlung in den Bildern sichtbar waren. Nach der Behandlung will man wissen, ob die Herde kleiner geworden oder verschwunden sind. Man wiederholt die bildgebende Untersuchung und vergleicht die Bilder vor und nach der Behandlung.*
 4. „Viele Wege führen nach Rom“. Manchmal hat man die Wahl zwischen verschiedenen Verfahren, denn sie liefern vergleichbare Informationen. => *CT und MR werden z. B. im Bauch oft wahlweise und entsprechend der Verfügbarkeit eingesetzt.*
 5. „Nobody is perfect“. Kein medizinischer Test ist perfekt. Eine Computertomographie kann einen Krankheitsherd übersehen¹, oder ein sichtbar gemachter Herd kann nicht einer bestimmten Krankheit zugeordnet werden². Dann sind meist weitere Abklärungen nötig. => *bei einem Patienten wird im CT zufällig eine Abnormalität in der Leber gesehen. Es kann sich um einen primären Tumor der Leber, um einen Streuherd (Metastase) eines anderen Tumors oder um nichts Bösartiges handeln. Ein MR kann dann weiterhelfen, oder es muss eine Gewebeprobe entnommen werden.*
 6. „Oft ist die Summe besser als ihre Teile“. Manchmal braucht es mehrere sich ergänzende Untersuchungen, um eine präzise Antwort zu erhalten. Heute kommen auch sog. Hybridverfahren (PET/CT, PET/MR, SPECT/CT) zum Einsatz, mit welchen gleichzeitig zwei sich ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden (Kapitel 4). => *Ein Patient hat Herzbeschwerden. Man sucht erstens ein verengtes Blutgefäß, das den Herzmuskel versorgt. Zweitens schaut man, ob diese Verengung der Grund für die schlechte Durchblutung des Herzens ist.*

¹ In der Fachsprache spricht man von der Sensitivität eines Tests

² In der Fachsprache spricht man von der Spezifität eines Tests

Dafür braucht es zwei bildgebende Verfahren. Das eine zeigt die Anatomie (Verengung), das andere die Durchblutung.

7. „Wenn es nichts zu sehen gibt, sieht man nichts“. Wenn eine Krankheit den ganzen Körper mit unsichtbaren kleinsten Krankheitsherden befällt (diffus), helfen Bilder nichts. Ist eine Krankheit an einem oder mehreren Orten lokalisiert (fokal), dann helfen Bilder oft weiter. => Bei einem Blutkrebs (Leukämie) sind die Tumorzellen überall im Körper verteilt und bilden meist keine Herde. Die Bildgebung hilft hier nicht weiter.
8. Alle Strukturen im menschlichen Körper haben eine bestimmte Form (Anatomie) und eine bestimmte Funktion. Die Form folgt der Funktion, aber eine gestörte Funktion zeigt sich nicht unbedingt als gestörte Form. Je nach Fragestellung werden eher anatomische oder eher Funktionsverfahren eingesetzt. => Eine Verengung der Herzkratzgefäße zeigt sich mit einem Röntgenverfahren. Ob die Verengung für die Herzfunktion relevant ist, wird z. B. mittels nuklearmedizinischen Verfahren entschieden.
9. Auch das beste bildgebende Verfahren taugt nichts, wenn der Arzt nichts taugt, der die Bilder beurteilt. Ein guter Radiologe oder Nuklearmediziner informiert sich generell über den Patienten, nicht nur über vorgängige Bilddiagnostik. Er integriert die gesamte verfügbare Information in seine Beurteilung und hat umfassende Kenntnisse über die Erscheinungsformen einer Krankheit in den vorhandenen Bildern. Er ist Berater des Arztes, der die Untersuchung angeordnet hat. => der Arzt sieht im MR eine vergrösserte Lymphdrüse in der Achsel einer Patientin mit Brustkrebs und interpretiert diese als Streuherd des Tumors. Er hat sich aber nicht darüber informiert, dass die Patientin vor vier Tagen eine Impfung hatte, und dass daher die Lymphdrüsenschwellung durch eine Impfreaktion verursacht ist. Er macht eine falsche Diagnose.
10. Keine Untersuchung bringt nur Nutzen, auch wenn mögliche Schäden (Kosten) vernachlässigbar sind (Kap. 7 und Kap. 8). Immer muss der mögliche „Nutzen“ gegen den möglichen „Schaden“ einer Untersuchung abgewogen werden. Je schwerer die Krankheit, desto eher kann man ein Verfahren einsetzen, das mit einem grösseren Risiko einhergeht. Diese Nutzen-/Schadenabwägung ist Aufgabe der behandelnden Ärzte. => Ein sehr ängstlicher, aber kerngesunder 40-jähriger Mann möchte eine PET-Untersuchung, um Tumorherde auszuschliessen. Es ist extrem unwahrscheinlich, dass er einen Tumor hat (Nutzen praktisch null), anderseits besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass man in dieser kostspieligen Untersuchung etwas anderes, meist Banales findet. Nur weiss man nicht sicher, ob es banal ist. Es braucht dann eventuell weitere Abklärungen. Jede weitere Abklärung birgt weitere Risiken und Kosten. Am Schluss war oft alles ein „Sturm im Wasserglas“.

Wenn Sie diese „10 Gebote“ verinnerlicht haben, haben Sie wichtige Grundkenntnisse, wie medizinische Bildgebung sinnvoll eingesetzt wird. Sie können diese Regeln brauchen, um zu verstehen, warum beispielsweise bei Ihnen ein bildgebendes Verfahren nicht angewendet wurde, welches vor kurzem bei einem Ihrer Bekannten durchgeführt wurde.

Wir haben im ganzen Buch gesehen, dass bildgebende Verfahren nicht nur dazu verwendet werden, Krankheiten zu diagnostizieren, sondern auch, um Instrumente im Körperinneren zu führen, mit denen der Patient behandelt wird. Man führt dann die Behandlung mit der „Röntgen-, der CT-, der MR- oder der Ultraschallbrille“ durch. Instrumente können so im Körper an einen Ort gelenkt werden, wo z. B. eine Gewebeprobe zum besseren Verständnis der Krankheit entnommen werden soll, oder um eine Gefässverengung zu erweitern. => *Ein verengtes Gefäss wird unter Röntgensicht von der Leistengegend her durch die Blutbahnen mit einem dünnen Schläuchlein angesteuert. Die ersten paar Zentimeter des Schläuchleins sind mit einem kleinen Ballon versehen. Liegt der kleine Ballon in der Verengung, kann er aufgeblasen und damit die Verengung erweitert werden. Die Verengung wird so behoben.*

Der Einsatz von bildgebenden Verfahren zur Führung von therapeutischen Eingriffen ist **nicht Gegenstand dieses Buches** und soll nicht weiter besprochen werden. Ebenfalls nicht besprochen werden Verfahren, die mit sichtbarem Licht Bilder machen. So kann man zum Beispiel ein Rohr in den Darm einführen, um ihn anzuschauen (Darmpiegelung) oder im Rahmen einer Schlüssellochchirurgie in die Bauchhöhle oder die Brusthöhle zu schauen, um dort eine Operation vorzunehmen. Diese Verfahren sehen nur Körperoberflächen, wie die Darmwand oder die Bauchhöhle, erlauben aber keinen Blick in das Innere von Organen wie Hirn, Herz oder Leber.

13.2 Klinische Anwendungen der medizinisch-bildgebenden Verfahren

Mit dem Wissen um die zehn Gebote wollen wir nun besprechen, bei welchen wichtigen Krankheiten Ärzte welche medizinische Bildgebung einsetzen. Wir schauen also nun aus „Krankheitssicht“, statt wie in den Kapiteln 2–6 aus Sicht der angewandten Bildgebungstechnologie. Dabei werden dem Hirn, dem Herzen, den Lungen und Tumorerkrankungen spezielle Unterkapitel gewidmet: Hirn, Herz und Lungen sind am häufigsten von bedrohlichen Krankheiten betroffen und Tumoren sind ebenfalls oft lebensbedrohlich.

13.2.1 Hirn

Die wichtigsten Gehirnerkrankungen betreffen einmal die Gefäße. Sie führen zum sog. „Hirnschlag“. Ähnlich können auch im früheren Alter Gefässmissbildungen zu einem „Hirnschlag“ führen. Im Hirn können sodann – wie überall im Körper – Tumoren entstehen. Sie sind aber relativ selten. Viel häufiger sind Ableger (Metastasen) von Tumoren, die in anderen Organen entstanden sind. Im Alter häufig sind die sog. neuro-degenerativen Erkrankungen des Hirns. Zu dieser Krankheitsgruppe gehören die Alzheimer- oder die Parkinson-Krankheit. Schliesslich sind entzündliche Erkrankungen des Gehirns wichtig, wie z. B. die multiple Sklerose. Wenn ein Patient Hin-

weise auf eine Abnahme der Hirnleistung zeigt, können die Ursachen breit gefächert sein und sind am häufigsten durch eine der erwähnten Erkrankungen verursacht. Der Ultraschall wird im Hirn praktisch nur bei Säuglingen und Kleinkindern eingesetzt, denn Ultraschall „sieht“ schlecht durch Knochen hindurch. Daher wird das MR meist als Erstuntersuchung bei Hirnerkrankungen eingesetzt, dies im Gegensatz zum Herz, wo der Ultraschall oft diese Rolle übernimmt.

13.2.1.1 Gefässerkrankungen und Unfälle

Der relativ häufige „*Hirnschlag*“ tritt im Alter als Folge von *Arteriosklerose*, also den generellen Gefässveränderungen und -verkalkungen auf, welche durch Rauchen, hohen Blutdruck, Zuckerkrankheit und familiärer Veranlagung gefördert werden. An schadhaften Stellen der Gefässwände können sich Blutgerinnse bilden, die dann plötzlich ein wichtiges Gefäss verschliessen, sei dies im Hirn, im Herz, dem Darm, den Nieren oder einem Beingefäß. Bei jüngeren Patienten kann ein Hirnschlag Folge einer angeborenen *Gefässmissbildung* sein, die „platzt“, wobei Blut ins Hirngewebe austritt. Ein Hirnschlag ist ein medizinischer Notfall, der – wird er binnen Stunden erkannt – oft behandelt werden kann. Eine Hirnblutung zwischen Schädeldecke und Hirn (*Subduralhämatom*) kann auch langsam auftreten, z. B. nachdem der Patient seinen Kopf angeschlagen hat. Patienten mit Blutverdünnung haben hier ein grösseres Risiko.

Bei einem Hirnschlag (Lähmungserscheinungen, Sprachverlust, Bewusstlosigkeit) wird in der medizinischen Notfallstation meist eine CT, aber auch MR durchgeführt. CT ist rasch verfügbar und erkennt Hirnblutungen gut, welche gefürchtete Komplikationen eines Hirnschlags sind. Entsprechend wird CT auch bei Unfallpatienten im Notfall sofort eingesetzt, um Hirnblutungen und Schädelverletzungen auszuschliessen, bzw. genau definieren zu können. Nachkontrollen von Hirnschlagpatienten und Patienten mit Krankheiten, die langsam auftreten, sind Domäne des MR. Ultraschall kommt zum Einsatz, um sicherzustellen, dass die grossen Halsgefässe, welche das Hirn mit Blut versorgen, frei von arteriosklerotischen Veränderungen sind, denn im Hals ist der Ultraschall eine gute Methode³, die nicht nur Veränderungen der Halsschlagadern darstellt, sondern auch den Blutfluss in den Gefässen messen kann (Kap. 6). Der Blutfluss ist je nach Art der Verengung reduziert.

Moderne Therapien von akuten oder chronischen Gefässerkrankungen im Hirn werden oft mit bis ins Hirn vorgeschobenen dünnen Schläuchlein⁴ behandelt. Die Lagekontrolle des Schläuchleins wird laufend mit der „Röntgenbrille“ vorgenommen (Kap. 2).

13.2.1.2 Tumoren

Viele *Hirntumoren* sind nicht bösartig, aber sie müssen trotzdem erkannt werden. Wenn Sie wachsen, wird das Hirn verdrängt und kann eben eingeschlossen im Schä-

³ Im Hals sind keine Schädelknochen im Weg und der Ultraschall kann so gute Bilder der Halsschlagadern anfertigen, die das Hirn mit Blut versorgen

⁴ Die Schläuchlein werden in der Leiste in eine Beinschlagader eingeführt und über die Haupt- und Halsschlagadern ins Hirn vorgeschoben.

del nicht ausweichen. Anfänglich mag der Patient sich über langsam zunehmendes Kopfweh beklagen. Primär wird immer ein MR durchgeführt. Zum Teil kommen sehr komplexe MR-Untersuchungen zum Einsatz, welche dem Chirurgen oder dem Strahlentherapeuten helfen, kritisches Hirngewebe bei der Operation zu schonen. Wird eine Operation in Betracht gezogen, wird vor der Operation und je nachdem auch im Verlauf nach der Operation oder Bestrahlung zusätzlich eine PET-Untersuchung durchgeführt. PET kann am besten identifizieren, welche Anteile eines Tumors am bösartigsten sind, und dies bestimmt (nach einer gezielten Gewebsentnahme), wie behandelt werden muss. Die gleichen Verfahren kommen auch bei der Beurteilung des Krankheitsverlaufs zum Einsatz.

13.2.1.3 Degenerative Erkrankungen

Zeigt ein Patient auffällige Defizite in seiner geistigen Leistungsfähigkeit, können verschiedenste Krankheiten vorliegen (Anzeichen von *Demenz*). Vorerst müssen als Ursachen *Gefässerkrankungen*, *Tumoren*, *multiple Sklerose* und weitere Krankheiten ausgeschlossen werden, was mit MR geschieht. Sind diese Ursachen ausgeschlossen, kommen am ehesten Krankheiten wie *Alzheimer*- oder andere ähnliche Krankheiten in Frage. Auch die *Parkinson-Krankheit* kann bei einem Patienten zur *Demenz* führen, aber diese Krankheit manifestiert sich zuerst oft ganz anders: der Patient zittert, geht verlangsamt und seine Mimik ist nicht mehr so lebhaft, wie bei einem gesunden Menschen. Zum Nachweis einer *Alzheimer-Demenz* gewinnen PET-Untersuchungen zunehmend an Bedeutung. Sie können eine Alzheimer-Krankheit mit grosser Treffsicherheit ausschliessen oder auch auf eine Alzheimer-Demenz als Ursprung der Abnahme geistiger Leistungsfähigkeit hinweisen. Allerdings sind Abklärungen mit der kostspieligen PET heute noch nicht weit verbreitet, da man bisher insbesondere für Patienten mit Alzheimer-Krankheit keine guten Behandlungsmöglichkeiten kennt. Es steht dann den hohen Kosten der Bildgebung ein oft geringer Nutzen der zusätzlich gewonnenen Information gegenüber. Die Situation könnte sich allerdings in den nächsten Jahren ändern, da bei der Behandlung von Alzheimer-Demenzen und ähnlichen Erkrankungen gegenwärtig grosse wissenschaftliche Fortschritte in der Therapie gemacht werden.

13.2.1.4 Entzündliche Erkrankungen

Zu dieser Patientengruppe gehört die *Multiple Sklerose*, die zu schweren körperlichen Behinderungen führen kann. Die Krankheit verläuft in Schüben und MR erlaubt, die Diagnose zu stellen und ist auch das erste Verfahren bei Verlaufskontrollen. Auf weitere entzündliche Hirnerkrankungen soll hier nicht eingegangen werden.

13.2.2 Herz und Gefässe

Die wichtigste Krankheit des Herzens ist die Arteriosklerose (Gefässverkalkung), welche die Gefäße betrifft, die das Herz mit Blut versorgen (Koronararterien, *koronare Herzkrankheit*). Rauchen, hoher Blutdruck, Zuckerkrankheit oder eine erbliche Veranlagung fördern die Arteriosklerose. Eine Verengung oder gar Verschluss eines

Herzgefäßes zeigt sich oft zuerst durch Schmerzen in der Brust und im linken Arm. *Schäden an den Herzklappen* können ebenfalls ähnliche Schmerzen verursachen, weil dann das Herz ineffizient pumpt und die Blutversorgung des Herzens nicht mehr ausreicht. Kommt es zu einem akuten Verschluss eines Herzgefäßes, hat der Patient sehr starke Schmerzen und es ist ein akuter Herzinfarkt eingetreten.

Oft kommt bei chronischen Herzbeschwerden als erstes Bildverfahren eine Ultraschalluntersuchung (Kap. 6) zum Einsatz. Sie liefert Informationen zur Bewegung der Herzwände, der Herzklappen sowie zum Blutfluss im Herzen, der bei Problemen mit den Herzklappen verändert ist. Sie zeigt auch, ob sich die Herzwände normal bewegen. Bewegt sich ein Teil des Herzens schlecht, wurde es wahrscheinlich wegen eines vorgängigen Herzinfarktes geschädigt. Die mit Ultraschall gewonnenen Informationen können auf eine Krankheit der Herzkrankgefäßse oder auf eine andere Herzkrankheit hinweisen. Je nach Resultat werden weitergehende Abklärungen notwendig.

Deuten die Untersuchungsresultate (auch solche ohne Bilder, wie ein Herzbelaustungstest) auf eine Erkrankung der Herzkrankgefäßse hin, basiert heute die umfassendste Bildabklärung auf einem „Röntgenkino“. Dabei wird eine Schlagader in der Leistengegend angestochen, und dann unter laufender Röntgenkamera (Röntgenkino) ein Schläuchlein von dort bis zu den Herzkrankgefäßse vorgeschoben. Dann wird Kontrastmittel direkt in diese Gefäßse eingespritzt, um Verengungen oder Verschlüsse darzustellen. Dieses relativ aufwändige Verfahren hat den Vorteil, dass man anschliessend gerade mit dem erwähnten aufblasbaren Ballon behandeln kann, birgt aber gewisse Risiken. Diese betreffen unter anderem das Auslösen von Herzrhythmusstörungen und das Loslösen von kleinen arteriosklerotischen Wandveränderungen von Gefäßse, die dann in andere Organe abfließen und dort lokal die Blutversorgung behindern können (sie können sogar einen *Hirnschlag* verursachen: s. oben). Heute wird das Röntgenkinoverfahren zunehmend durch die Darstellung der Herzkrankgefäßse mittels CT abgelöst (Kap. 3). Dazu muss nur eine Vene, aber keine Schlagader angestochen werden, was – wie schon gesagt – vergleichbar mit einer Blutentnahme für eine Blutuntersuchung ist. Damit ist das Verfahren wesentlich weniger komplikationsbelastet.

Weder Röntgenkino noch CT sind Verfahren der ersten Wahl um festzustellen, ob die Verengung eines Gefäßes wirklich Probleme verursacht und deshalb behandelt werden muss. Wie ist das zu verstehen? Die Blutgefäßse ähneln in erster Näherung den sich verzweigenden Zweigen eines Baums. Die Blutgefäßse entsprechen den Ästen und Ästlein und die Zellen des Herzgewebes den Blättern. Sterben wegen einer Verengung oder eines Verschlusses eines „dicken Astes“ die Zellen (Blätter) ab, ist ein *Herzinfarkt* eingetreten, wie eben die Blätter absterben, wenn ein Ast bricht. Beim Baum ist es klar: Wenn ich einen Ast ansäge oder abbreche, sterben Teile des Baumes ab. Im Gegensatz zu einem Baum haben aber auch die kleineren Herzgefäßse (Ästlein) Verbindungen untereinander. Das wäre, wie wenn verschiedene Äste eines Baums manchmal weit aussen im Baum wieder zusammenwachsen würden. Verengt sich also ein Gefäß langsam (wird ein Ast angesägt), können sich diese Verbindungen zwischen Gefäßse (Ästen) öffnen und so auch Zellen (Blätter) versorgen, die eben bei einem angesägten Ast in einem Baum absterben. Verschiedene

bildgebende Verfahren, vorab NUK und PET (Kap. 4), aber auch MRT (Kap. 5) erlauben kombiniert mit einem Herzbelastungstest zu zeigen, ob alle Wandabschnitte des Herzens auch unter Belastung noch genügend mit Blut und damit mit Sauerstoff und Nahrung versorgt werden. Erst wenn dies in einem Gebiet des Herzmuskels nicht mehr der Fall ist, lohnt es sich, die vorgesetzte Gefässverengung zu beheben.

Nicht nur die Gefäße des Herzens können sich krankhaft verengen. Auch Gefässverengungen in anderen Organen oder Körperteilen, so in den Nieren, dem Darm und den Beinen und – wie gesagt – im Hirn können betroffen sein. Die gleichen oben benannten Risikofaktoren gelten. Ähnliche Überlegungen zur Anwendung bildgebender Verfahren gelten auch bei der Abklärung von Durchblutungsstörungen dieser Organe. Die Darstellung von Verengungen geschieht je nach Organ hauptsächlich mittels Ultraschall und MRT, aber auch mittels CT.

Es gibt viele andere Erkrankungen des Herzens, die aber im Vergleich zur Erkrankung der Koronararterien wesentlich weniger häufig sind. Zunehmend häufig ist ein Teilversagen der Pumpfunktion des Herzens (*Herzinsuffizienz*), das verschiedene Gründe haben kann: wieder am häufigsten eine *koronare Herzkrankheit*. Praktisch immer steht die Ultraschalluntersuchung (Kap. 6) an erster Stelle, manchmal gefolgt von einer MR-Untersuchung (Kap. 5), von einer PET-Untersuchung (Kap. 4) oder einer Untersuchung mit „Röntgenkino“ (Kap. 2).

13.2.3 Lunge

Die wichtigsten Lungenkrankheiten sind Tumoren, Blutgerinnung in den Lungengefäßen (*Lungenembolien*) und *Entzündungen*. Lungentumoren sind bei Rauchern häufiger und Blutgerinnung in den Lungengefäßen sind oft die Folgen von Krampfadern und von langen Perioden geringer Bewegung (Bettlägerigkeit, lange Flugreisen). *Lungenentzündungen* können in der Folge einer Erkältung entstehen, entstehen aber heute oft im Zusammenhang mit aggressiven Behandlungen bei bösartigen Tumoren. Diese Behandlungen schwächen das menschliche Abwehrsystem gegen Entzündungserkrankungen. Lungenentzündungen treten auch bei Alkoholisierten und im Alter auf, dann bei Patienten, die sich häufig verschlucken. All diese Erkrankungen werden primär mit Röntgenbildern (Kap. 2) und mit der CT (Kap. 3) abgeklärt.

13.2.3.1 Tumoren

Tumoren im *Lungengewebe* werden meist zuerst mit einem normalen Lungenröntgenbild oder einer CT gefunden, denn der Kontrast zwischen der Lungenluft und dem Tumor ist bei diesen Verfahren hervorragend. Viele Tumoren, die von anderen Organen stammen (z. B. *Brustkrebs* oder *Darmkrebs*) produzieren Ableger (*Metastasen*) in der Lunge. Auch diese werden mit CT gefunden (s. unten: Tumoren). Nur Tumoren der Brustwand (z.B. *Mesotheliome*) werden besser mit MR abgeklärt. Ultraschall hat bei der Beurteilung der Lunge keine Bedeutung, denn das Eindringen von Ultraschall wird einerseits durch die Rippen behindert und anderseits werden

die stark lufthaltigen Lungen schlecht abgebildet. Bei allen bösartigen Tumoren der Lunge hat sich in den letzten 10 Jahren eine weitergehende Abklärung mit PET durchgesetzt. Steht nämlich einmal fest, dass es sich um einen bösartigen Tumor handelt, was mittels Gewebeprobe bestimmt wird, ist PET/CT die beste Methode, um die Ausbreitung des Tumors in andere Organe zu erkennen (Kap. 4, s. auch unten unter Tumoren). Die Ausdehnung des Tumors an andere Orte ist entscheidend für eine korrekte und möglichst erfolgreiche Behandlung.

13.2.3.2 Blutgerinnssel (Lungenembolien)

Blutgerinnssel in der Lunge führen meist akut zu massiver Atemnot. Der Patient erscheint dann in einer medizinischen Notfallstation. Ob der Patient tatsächlich an einer sog. Lungenembolie leidet, wird heute elegant mittels CT bestimmt. Spritzt man Kontrastmittel und fährt dann das Lungen-CT, sieht man die Lungenschlagadern, die mit Kontrastmittel gefüllt sind. Wenn das Kontrastmittel irgendwo in einem Lungengefäß abbricht, ist dies durch ein Gerinnsel verursacht. Man kann Lungenembolien auch mittels NUK finden. Das entsprechende Verfahren wird heute aber nur noch selten angewendet, z. B. wenn der Patient mittels Röntgentechnik nicht untersucht werden kann, weil er eine Kontrastmittelallergie hat (Kap. 7).

13.2.3.3 Entzündungen und weitere Lungenerkrankungen

Eine *Lungenentzündung* ist eine häufige Erkrankung und vor allem im Alter lebensgefährlich. Die Behandlung erfordert oft den Einsatz von Antibiotika. Meist sieht man eine Lungenentzündung auf dem Röntgenbild und das Erscheinungsmuster deutet auf den „Käfer“ hin, der die Entzündung verursacht. Selten braucht man eine CT zur besseren Abklärung. Es gibt viele weitere Lungenerkrankungen, welche das feine Wabengewebe der Lungenbläschen schädigen. Diese Erkrankungen werden alle sehr gut mit CT abgeklärt. Die anderen bildgebenden Verfahren spielen keine oder eine untergeordnete Rolle.

13.2.4 Tumoren

13.2.4.1 Allgemeine Bemerkungen

Während in der ambulanten Praxis wahrscheinlich die häufigste bildgebende Untersuchung ein Röntgenbild der Lunge, der Knochen oder der Gelenke ist, ist in einem Zentrumsspital oder auch in entsprechenden Spezialpraxen die medizinische Bildgebung zur Abklärung oder Kontrolle eines **bösartigen Tumorleidens** am häufigsten. Es werden oft sofort Schnittbildverfahren wie CT, MR oder PET eingesetzt, denn nur die Schnittbildverfahren erlauben es, die Lage und Ausdehnung eines Tumors genau zu bestimmen. Ein bösartiger Tumor – und von solchen sprechen wir hier – zeichnet sich dadurch aus, dass er in seiner Umgebung Organe zerstören kann und sich gleiche Tumorzellen auch in den Lymphknoten in seiner Umgebung (Lymphknotenmetastasen) oder in entfernten Organen einnistieren (Fernmetastasen). Die Abklärung eines Patienten mit Verdacht auf einen bösartigen Tumor läuft fast immer standardmäßig ab. Dies soll zuerst kurz beschrieben werden.

1. In einem ersten Schritt wird bestimmt, in welchem Organ der Tumor entstanden ist. Hat man den Tumor gefunden, was meist mit einem Röntgenbild (Lunge), CT oder MR geschieht, wird ein Stück des verdächtigen Gewebes entnommen. Dieses wird dann präpariert, im Mikroskop angeschaut und verschiedenen Tests unterworfen. Damit weiss man genau, um welchen Tumortyp es sich handelt (z. B. Lungenkrebs, Brustkrebs, Prostatakrebs).
2. Es wird mit medizinischer Bildgebung die Beschaffenheit des Tumors festgestellt und wie sich der Tumor ausgebreitet hat. Fragen sind dabei z. B. wie und ob der Tumor in die Umgebung eingewachsen ist. Zur Beurteilung der lokalen Verhältnisse stehen CT und MR, und manchmal Ultraschall im Vordergrund.
3. Eine weitere Frage an die Bildgebung ist, ob nahegelegene Lymphknoten vom Tumor befallen sind (*Lymphknotenmetastasen*). Diese Frage wird mittels Ultraschall, CT oder MR beantwortet. PET/CT spielt jedoch hier auch eine wichtige Rolle.
4. Die abschliessende Frage ist, ob andere Organe vom Tumor befallen sind, wie etwa die Lunge, die Leber, das Hirn oder die Knochen (*Fernmetastasen*). Während das Hirn bei dieser Fragestellung Domäne des MR ist, ist bei anderen Organen und Körperregionen diese Fragestellung meist Domäne der PET/CT.

Zeigen die Untersuchungen weder Lymphknoten- noch Fernmetastasen und hat sich der Tumor lokal nicht ausgebreitet, ist oft eine Operation der beste erste Behandlungsschritt. Falls Lymphknoten- und/oder Fernmetastasen vorliegen, ist eine Operation oft nicht mehr sinnvoll. Man muss dann davon ausgehen, dass sich der Tumor im ganzen Körper eingenistet hat. Dieses Problem kann man nicht mit einer Operation lösen. Man wüsste gar nicht erst, wo anfangen. Allerdings wurde in den letzten Jahren gezeigt, dass z. B. wenige Lebermetastasen bei Darm- und Hirnmetastasen beim Lungenkrebs manchmal doch noch erfolgreich mit einer Operation behandelt werden können.

5. Auch nach erfolgter Therapie werden bildgebende Verfahren zur Kontrolle eingesetzt. Dabei sind die gestellten Fragen folgende: Ist der Tumor verschwunden? Ist er kleiner geworden? Ist er gleich gross oder gar gewachsen?

Heute wird bei den meisten bösartigen Tumoren PET/CT als abschliessende bildgebende Methode eingesetzt, denn mit PET/CT erhält man einfach einen Überblick über den Tumorbefall im ganzen Körper. PET/CT ist insbesondere zur Klärung der Punkte 3–5 von Bedeutung. In gewissen Fällen wird wohl in Zukunft PET/MR statt PET/CT eingesetzt werden.

13.2.5 Andere Erkrankungen

Die häufigsten anderen Erkrankungen sind Entzündungen von Organen und altersbedingte Veränderungen der Knochen und Gelenke. Ein wichtiges generelles Prinzip gilt auch für den Einsatz der medizinischen Bildgebung bei nicht-tumorbedingten Erkrankungen. Wenn immer die Krankheit lokalisiert ist (z. B. *Gelenksentzündung*,

Nierenstein), kann man mit lokalen Massnahmen (z. B. Spritze mit einem Medikament, Operation) behandeln. In diesem Fall kommt die medizinische Bildgebung häufig zum Einsatz. Ist die Krankheit im Körper verteilt, wie z. B. bei einer *Blutvergiftung*, werden Medikamente verabreicht, die ins Blut übergehen und im ganzen Körper wirksam sind. Bei diesen Krankheiten hat die Bildgebung oft einen geringeren Stellenwert, denn die Krankheit ist nicht lokalisierbar. Also grob gesagt: Verdacht auf lokales Problem = Bilder, Hinweise auf im Körper verteiltes Problem = keine Bilder. Der Einsatz medizinischer Bildgebung bei bösartigen Tumoren widerspricht allerdings diesem Prinzip. Dies ist so, weil es so wichtig ist zu wissen, ob der Tumor Metastasen gestreut hat oder nicht, was mit Bildgebung gesehen werden kann. Im Folgenden besprechen wir kurz die wichtigsten Krankheiten von nicht schon oben besprochenen Organen und Geweben.

13.2.5.1 Kopf und Hals

Die häufigsten Erkrankungen im Kopf-/Halsbereich sind (s. oben) *Krebs in der Nasenhöhle, der Mundhöhle, dem Rachen, dem Stimmapparat und der Schilddrüse*. Ausser bei Schilddrüsentumoren, wird das Entstehen dieser Tumoren durch Rauchen, insbesondere intensives Pfeifenrauchen und übermässigen Alkoholgenuss gefördert. Zur Bestimmung der Ausdehnung des Tumors werden in der Kopf-Halsregion wahlweise und sich zum Teil ergänzend Ultraschall, CT und MRT eingesetzt. Die Ausbreitung dieser Tumoren in andere Organe wird mittels PET festgestellt. Häufig sind auch *gutartige Erkrankungen der Schilddrüse*. Die Schilddrüse liegt oberflächlich und so reicht eine Ultraschalluntersuchung zur detaillierten bildgebenden Abklärung. Gelegentlich braucht es zur Abklärung der Schilddrüse eine Szintigraphie. Sie zeigt, welche Bereiche noch aktiv Schilddrüsenhormon produzieren und engt ein, wie weiter behandelt werden soll.

13.2.5.2 Brust

Ein Knoten in der Brust deutet häufig auf *Brustkrebs* hin und muss weiter abgeklärt werden. Zur Frühdagnostik werden heute ab 50 Jahren oder sogar früher Röntgenbilder (sog. Mammographie) gemacht. Sie zeigen verdächtige Herde, die dann durch Entnehmen von Gewebeproben weiter abgeklärt werden. Ultraschall ist ein sehr gutes Verfahren zur Abklärung von *unklaren Gewebeherden* in der Brust und auch MR kommt oft zum Einsatz. Brustkrebs ist bei Frauen ein sehr häufiger Tumor, selten kommt er auch bei Männern vor. Brustkrebs ist die gefährlichste Erkrankung der Brust und erfordert daher auch am häufigsten eine Abklärung durch bildgebende Verfahren. Ist der Brustkrebs bekannt und vermutet man, dass der Krebs gestreut hat, also Ableger (*Metastasen*) in anderen Organen gesetzt hat, kommt heute häufig PET zum Einsatz.

13.2.5.3 Verdauungsorgane: Speiseröhre, Magen, Dünndarm und Dickdarm

Die häufigsten Krankheiten unseres Verdauungstrakts von der Speiseröhre bis zum Dickdarm sind *Speiseröhren-, Magen- und Dickdarmkrebs*⁵ sowie *entzündliche Erkrankungen*. *Entzündungen des Magens oder Dickdarms* werden am einfachsten mit einer Magen- oder Darmspiegelung abgeklärt und dann entsprechend behandelt. Es braucht meist keine medizinische Bildgebung. Mit Krebs ist dies ganz anders. Ein Krebs der Speiseröhre, des Magens und des Dickdarms produziert schon in frühen Stadien *Metastasen in andere Organe*, vorwiegend in Lymphknoten im Bauchbereich und in die Leber. Ableger (*Metastasen*) finden sich aber auch in der Lunge (s. oben), Knochen (s. unten) und weniger häufig in anderen Organen. Genaue Kenntnisse über die Ausbreitung des Krebses werden für die Behandlung unbedingt benötigt. Zum Einsatz kommen hier je nach Fragestellung Ultraschall, CT, MR und PET.

13.2.5.4 Leber und Bauchspeicheldrüse

Die häufigsten Ursachen von Leberleiden in den westlichen Ländern sind: Gallensteine und eine Zerstörung des Lebergewebes als Folge von übermässigem Alkoholgenuss (*Leberzirrhose*), Entzündungen durch Viren (*Hepatitis*), und Tumorableger (*Metastasen*) vor allem von *Brustkrebs*, *Dickdarmkrebs*, *Magenkrebs*, *Buchspeicheldrüsenkrebs*, und *Krebs der Gallenwege* oder *Lebertumoren*. Sie alle erfordern eine eingehende Abklärung. Die Bauchspeicheldrüse kann entzündlich verändert sein (*Pankreatitis*). Während die Leber und Gallenblase gut mit Ultraschall untersucht werden können, ist eine normale Ultraschalluntersuchung bei Gallenwegs- oder Bauchspeicheldrüsenkrebs nicht ausreichend. Bauchspeicheldrüsenkrebs wird oft spät entdeckt, weil der Krebs sich anfänglich in keiner Weise zu erkennen gibt. Zur Abklärung wird Ultraschall in Kombination mit einer Magenspiegelung eingesetzt (ein Ultraschallkopf wird über das Rohr für die Magenspiegelung vorgeschoben). CT, MR und PET kommen je nach der Fragestellung zum Einsatz, insbesondere bei bösartigen Tumoren entsprechend den oben gegebenen Richtlinien.

13.2.5.5 Nieren, Blase, männliche und weibliche Geschlechtsorgane

In Patienten ab ca. 50 Jahren stehen auch bei diesen Organen wieder Tumoren als Krankheitsursache im Vordergrund, wobei in erster Linie *Nieren-, Blasen-, Prostata-, Hoden-, Gebärmutter-, Gebärmutterhals- und Eierstockkrebs* entstehen können. Tumoren der Hoden und Gebärmutterhals-Krebs werden auch schon in jugendlichem Alter beobachtet. Bei den bösartigen Tumoren kommen wieder CT, MRT und PET zum Einsatz (Sie sehen, die Dinge wiederholen sich und sind gar nicht so kompliziert). Einschränkend muss gesagt werden, dass PET mit FDG (Kap. 4 und Kap. 7) bei Nieren und Blase einen kleinen Stellenwert hat, da FDG natürlich durch die Nieren und in die Blase ausgeschieden wird und so dort schon normal anreichert. Dies behindert die Bildinterpretation. Ein *Prostatakrebs* wird mit Ultraschall abgeklärt. Wenn ein Verdacht auf Ausbreitung besteht, stehen heute MR und PET im

⁵ Interessanterweise ist der Dünndarm relativ wenig von Krankheiten befallen.

Vordergrund. FDG-PET eignet sich nicht, aber es gibt beim Prostatakarzinom andere hervorragende PET-Tracer, wie Cholin und Moleküle, die spezifisch an Prostatakrebszellen andocken und so verraten, wo sich der Krebs überall ausgebreitet hat (Kap. 4 und 7).

Natürlich werden die in diesem Abschnitt genannten Organe auch von anderen Krankheiten befallen, vorweg von Entzündungen. Oft ist klar, woher die Entzündung kommt und es braucht keine Bilder, um korrekt zu behandeln. Dies ist aber nicht immer der Fall (s. unten). In den Nieren finden sich relativ häufig Steine, die den Harnabfluss behindern. Ultraschall, CT und MRT kommen hier zum Einsatz, denn Steine sind oft röntgendicht. Auch nuklearmedizinische Verfahren zur Abklärung der Nierenfunktion werden angewendet. Im Unterbauch und insbesondere den weiblichen Geschlechtsorganen kommt oft zuerst Ultraschall zum Einsatz. Welche schwangere Frau hätte in den letzten 20 Jahren nicht ihr Kind zum ersten Mal im Ultraschall gesehen!

13.2.5.6 Blutbildende Organe, Lymphsystem

Auch bei den blutbildenden Organen und unserem Lymphsystem stehen Tumoren als wichtige Krankheiten im Vordergrund (*Lymphome, Leukämien*). Unsere Blutzellen entstehen vor allem im Knochenmark der Knochen der Wirbelsäule, des Beckens und des Schädels. Da die wichtigsten Informationen bei „*Blutkrebs*“ im Blut sichtbar sind und die Krebsherde im ganzen Knochen verteilt sind, wird selten bildgebend abgeklärt, denn eine lokale Behandlung z. B. mittels Operation bringt nichts: der Tumor ist von Anbeginn im ganzen Körper verteilt. Hingegen ist der Lymphdrüsen-„*Krebs*“, in der Fachsprache *Lymphom* genannt, oft lokalisiert und die Kenntnis der Tumorausdehnung wichtig. Sie haben richtig geraten! Hier kommen wieder CT, MR und PET zum Zug. Lymphdrüsen und Knochenmark sind oft frühe Orte, in denen sich Ableger (*Metastasen*) von Krebs aus anderen Organen bilden. Bei der Analyse der entsprechenden Bilder wird daher immer sehr genau auf diese Organe geachtet.

13.2.5.7 Haut, Muskeln, Gelenke, Knochen, Weichteile

Unser Muskel- und Skelettsystem, wie Muskeln, Gelenke und Knochen kurz zusammenfassend genannt werden, unsere Weichteile und unsere Haut zeigen einen breiten Fächer von Erkrankungen, die mit Bilddiagnostik abgeklärt und nachkontrolliert werden. Die meisten Hauterkrankungen können – da an unserer Körperoberfläche – gesehen und mit den Augen oder Instrumenten, die mit Licht funktionieren, analysiert werden. Nur bei den verschiedenen Hautkrebsarten (unter anderem dem *Melanom*) muss abgeklärt werden (wieder mit CT, MRT oder PET), ob Metastasen in inneren Organen vorliegen.

Gutartige und bösartige Tumoren der Muskeln, Gelenke, Knochen und Weichteile sind relativ selten und werden eben – wie Tumoren von anderen Organen – auch mittels CT, MRT und PET abgeklärt. Hingegen sind Entzündungen des Muskel- und Skelettsystems und der Weichteile häufig. Weiter häufig sind Unfall- und Sportverletzungen (Ist Sport gesund?). Knochenbrüche werden in der behandelnden Notfallstation mit Röntgenbildern oder CT erkannt. Veränderungen in den Gelenken können durch Unfälle und chronische Abnutzung verursacht werden. Chronische Schäden

von Gelenken, – auch der Wirbelsäule mit ihren Gelenken und Bandscheiben – führen zur sog. Arthrose, die wiederkehrende schmerzhafte Entzündungen nach sich ziehen können. Es gibt auch eine ganze Reihe von sog. rheumatischen Erkrankungen, die zu entzündeten Gelenken führen können. Schliesslich sind Knochen, Gelenke, aber auch Muskeln und Weichteile häufig Orte von Entzündungen mit Bakterien. Bakterielle Entzündungen brauchen nur in schwerwiegenden Fällen Bilder und nur, wenn Sie lokalisiert sind. Sie werden meist mit MR, weniger mit CT abgeklärt, und auch Ultraschall spielt eine Rolle. Muskeln und Weichteile werden gut mit MR und Ultraschall dargestellt. Knochenmetastasen, d. h. Metastasen von anderen Tumoren, sind bei vielen Tumoren sehr häufig, unter anderem bei Brust- und Prostatakrebs. Sie werden mittels CT, MR und PET erkannt.

13.3 Zusammenfassung

Der kurze Abriss in diesem Kapitel hat nicht das Ziel, umfassend zu sein, sondern ein paar Hinweise zu geben, wie medizinische Bildgebung aus der „Sicht“ von Organ- und Gewebekrankheiten zum Einsatz kommt. In den letzten Jahrzehnten ist ein grosses Fachwissen entstanden, welches im Detail klärt, welche Untersuchung wann am besten zum Einsatz kommt. Selten steht am Anfang die Bildgebung. Das Gespräch mit dem Arzt und die körperliche Untersuchung haben einen wichtigen Stellenwert. Dann kommen oft Blut- und Urinuntersuchungen zum Einsatz und erst dann wird die – oft kostspielige – medizinische Bildgebung eingesetzt, die wir in den Kapiteln 2–6 beschrieben haben. Sie ist vor allem dann gefragt, wenn das medizinische Problem lokalisiert werden kann und erlaubt dann, beispielsweise einen chirurgischen Eingriff zu planen. Die Bildgebung vor allem bei Tumoren ist aber auch wichtig, um sicherzustellen, dass das Problem (der Tumor) lokalisiert ist und sich nicht im ganzen Körper ausbreitet hat. Da Krankheiten des Hirns, des Herzens und der Lunge etwas speziell sind, wurden sie separat diskutiert. Hirn-, Herz- und Lun-

Tab. 13.1 Preise für medizinisch bildgebende Untersuchungen

Untersuchung	Preis tief in CHF	Preis hoch in CHF
Einfaches Röntgen	100	300
Röntgen mit Kontrastmittel	300	800
Röntgen-„Kino“	1000	2000
Computertomographie	400	1500
MR	500	2000
Nuklearmedizin	300	2000
PET/CT	2000	3500
PET/MR	2500	4000
Ultraschall	50	200

generkrankungen erfordern in den meisten Fällen frühzeitig eine Abklärung mit medizinisch bildgebenden Verfahren.

Wie schon gesagt, ist es weder das Ziel dieses Kapitels noch des gesamten Buches, verschiedene Behandlungsmethoden von Krankheiten vorzustellen. Unsere Ausführung in diesem ganzen Buch haben zum Ziel, Ihnen darzulegen, wann welche bildgebenden Verfahren verwendet werden. Der Einsatz der medizinischen Bildgebung befolgt einige generelle Regeln (die 10 Gebote). Welche Bildgebung zum Einsatz kommt, hat aber auch wesentlich mit dem Organ oder Körergewebe zu tun, welches untersucht werden soll.

Vielleicht interessieren Sie die Preise der Untersuchungen, die wir beschrieben haben. Sie sind in Tabelle 13.1 zusammengestellt. Wichtig ist zu wissen, dass diese Preise in verschiedenen Ländern sehr verschieden sein können. In der Schweiz sind sie typischerweise höher als in den meisten anderen Ländern. Dies ist vor allem Folge der hohen Lohnkosten in der Schweiz.

Index

A

ALARA-Prinzip, 79
Alzheimer-Demenz, 124
Alzheimer-Krankheit, 123
Alzheimer-Patienten, 29
Anionen, 102
Antimaterie, 110
Antiteilchen, 108
Arteriosklerose, 10, 123, 125
Arthrose, 132
Atemnot, 69
Atomkern, 96
Atomschleudern, 71

B

Bariumkontrastmittel, 10
Bauchspeicheldrüsenkrebs, 130
Bildchips, 117
Bilddetektoren, 35
Bilddiagnostik, 121
Bildgebung
 medizinische, 119
Bleiröhrchen, 91
Bleiwände, 91
Blutfluss, 60
Blutkörperchen, 60
Blutvergiftung, 129
Bremssstrahlung, 101
Brustkrebs, 130

C

Cholin-PET, 30
Christian Doppler, 60
Computertomographie, 9, 15
Conrad Wilhelm Röntgen, 100
CT-Datensatz, 23

CT-Ring, 20

CT-Systeme, 16

D

Darmaufnahmen, 68
Demenz, 124
Demenzen, 29
Detektorchips, 115
Detektorelemente, 16
Detektoren, 90
Detektorring, 35
Diagnose, 120
Diagnostik, 17
Doppelstrangbrüche, 81
Dopplereffekt, 60
DOTA-Peptide PET, 31
Druckschwankungen, 86

E

echogebende Struktur, 57, 59
Eigenschaften
 magnetische, 41
Einstein'sches Gesetz, 108
elektromagnetische Strahlung, 104
Elektronenhülle, 97
Elektronenlöcher, 8
Elemente
 chemische, 97
Empfangsantennen, 43
Endo-US, 62
Entzündungen, 31
Erbgut, 79
Erbgutschädigung, 78
Ernest Rutherford, 95

F

Facettenauge, 90
 Facettenaugenprinzip, 91
 Fernmetastasen, 128
 Festkörper, 111
 Fliehkraft, 98
 Fluorid-PET, 31
 Flüssigkeitsansammlung, 58
 Fourier-Transformation, 50
 Frequenzcodierung, 51
 Frequenzen, 49

G

Gadolinium, 69
 Gallenwegskrebs, 130
 Gammastrahlen, 27, 88, 108, 110
 Gefässerkrankungen, 124
 Gefäßmissbildung, 123
 Gefäßverengung, 126
 Gelenksaufnahmen, 68
 Generatoren, 109
 Glaslinsen, 90
 Graustufenskala, 23

H

Halbleiter, 113
 Halbwertszeit, 107
 Hautrötungen, 69
 Hepatitis, 130
 Herzdurchblutung, 28
 Herzgefäße, 11
 Herzinfarkt, 125
 Herzinsuffizienz, 126
 Herzrhythmusstörungen, 125
 Hirndurchblutungsmessungen, 29
 Hirnerkrankungen, 48
 Hirnschlag, 123
 Hirnstrukturen, 59
 Hirntumoren, 30
 Hörfähigkeit, 85
 Hybridsysteme, 36
 Hybridverfahren, 26, 121

I

Infrarotchips, 115
 Infrarotwellen, 85
 Isolatoren, 113

J

Jodkontrastmittel, 10
 Joseph Fourier, 50

K

Kationen, 102
 Kernreaktoren, 109
 Kernspin, 106
 Kernumwandlungen, 105
 Knochenbrüche, 23
 Knochenmetastasen, 132
 Knochenstrukturen, 59
 Knochenveränderungen, 9
 Kontrastverstärkung, 67
 Koppelung
 elektromagnetische, 19
 Koronarangiographie, 11
 koronare Herzkrankheit, 125, 126
 Körperwärmung, 82
 Kreislaufzusammenbruch, 69
 künstliche Radioaktivität, 110

L

Leberzirrhose, 130
 Leitungsband, 112
 Leukämie, 131
 Licht
 sichtbares, 85
 Lichtaugen, 87
 Lichtblitze, 93
 Lichtdetektor, 91, 92
 Lichtdetektorelement, 114
 Lichtwellen, 57, 84, 89
 Linse, 90
 Lungendurchblutung, 29
 Lungenembolien, 17, 126
 Lungenentzündungen, 8, 126
 Lungentumoren, 8
 Lymphknotenmetastasen, 128
 Lymphome, 131

M

Magnetfelder, 49, 80
 Magnetfeldstärke, 49
 Magnetkreisel, 52
 Mammographie, 130
 Marie Curie, 6, 106
 Melanom, 132
 Mesotheliome, 127
 Metallobjekte, 81
 Metastasen, 17
 Mikrowellen, 80
 MR-Gewebseigenschaften, 51
 MR-Magnet, 43
 MR-Pulssequenzen, 52
 MR-Systeme, 39
 Multiple Sklerose, 123, 125

N

- natürliche Radioaktivität, 110
- neuro-degenerative Erkrankungen, 123
- Neutronen, 106
- Niels Bohr, 95
- Nierenfunktion, 69
- Notfalluntersuchungen, 17, 47
- Nutzen-/Schadenabwägung, 122

O

- Oberflächenpulse, 39, 43
- Operationsplanung, 17
- Osteoporose, 9

P

- Pankreatitis, 130
- Paracelsus, 27
- Parkinson-Krankheit, 29, 123
- PET-Bild, 109
- Phasencodierung, 51
- photoelektrischer Effekt, 100
- Photonen, 85
- Piezokristalle, 61
- Pixelmatrix, 33
- Prostatakrebs, 131
- Protonen, 96
- PSA-Wert, 30
- PSMA-PET, 30
- Punktquelle, 92

Q

- Quantenmechanik, 99

R

- radioaktive Isotope, 109
- radioaktiver Abfall, 107
- radioaktiver Zerfall, 107
- Radioaktivität, 66
- Radioantennen, 43
- Radiowellen, 40, 53, 80, 84
- Radiowellenspuren, 49
- Radiowellenspuren, 41, 52
- Radon, 76
- Reaktionen
 - akute, 68
- Ringsystem, 19
- Röntgenbrille, 11
- Röntgendichten, 21
- Röntgendichtewerte, 21
- Röntgenfilm, 8, 94
- Röntgenkino, 8, 68
- Röntgenkontrast, 9
- Röntgenkontrastmittel, 66

- Röntgenkontrastmitteln, 9
- Röntgenröhre, 7, 18, 90
- Röntgenstrahlen, 5, 88, 90
- Röntgenstrahlendetektor, 92
- Röntgenstrahlrichtungen, 23

S

- Sauerstoffatom, 102
- Schalenmodell, 99
- Schallkeulen, 60
- Schallkopf, 61
- Schallschatten, 58
- Schallwellen, 55, 88, 117
- Schichtbilder, 20
- Schilddrüse, 129
- Schleifringe, 19
- Schnittbild, 15
- Schnittbildverfahren, 128
- Schwingungen
 - elektrische, mechanische, 61
- Selbstbefriedigung. Siehe Masturbation
- Sievert, 76
- Signaldetektion, 93
- Sinnesorgane, 94
- Skelettszintigraphie, 31
- SPECT, 32, 34
- Speichereinheiten, 116
- Spiral-CT, 19
- Sportverletzungen, 62
- Stabsignale, 50
- Staging, 120
- Stoffwechselprozesse, 26
- Strahlung
 - ionisierende, 75
- Strahlenbelastung, 71
 - natürliche, 78
- Strahlendosen, 8
- Strahlendosis, 76, 77
- Strahlenquelle, 26
- Strahlenschädigung, 79
- Strahlkraft, 71
- Streuung, 57
- Streuzentrum, 57
- Strompulse, 93
- Subduralhämatom, 123
- Supraleitung, 43
- Szintigraphie, 129
- Szintillator, 33

T

- Tracer, 66
 - radioaktive, 25
- Traubenzuckermolekül (FDG)
 - radioaktives, 67

Tumoren, 126

U

Ultraschallbrille, 122

Ultraschallkontrastmittel, 66

Ultraschallwellen, 56, 88

V

Valenzbänder, 112

Voxeln, 47

W

Waben, 91

Wabenstrukturen, 92

Wandler, 118

Wärmeempfindlichkeit, 92

Wärmestrahlung, 85

Wasserstoffatom, 41

Wechselspannung, 61

Wechselstrom, 94

Weichteilstrukturen, 61

Wellen

elektromagnetische, 84, 85

Wellenlängen, 87

Wilhelm Conrad Röntgen, 5, 94

Wolfgang Pauli, 101

Wolfram-Metallocerfläche, 8

Z

Zahnröntgen, 9

Zuckerstoffwechsel, 28

Zyklotron, 109

Zyklotrons, 71

Röntgen, Computertomografie & Co.

Dieses Buch veranschaulicht klar verständlich, wie Ärzte heute Bilder aus dem Körperinnern gewinnen können: mit Röntgenstrahlen, Radiowellen in der Magnetresonanztomografie, Schallwellen im Ultraschall und radioaktiv markierten Substanzen in der Nuklearmedizin.

Die moderne Bildgebung erlaubt uns heute ganz neue Realitäten darzustellen und dank moderner Physik, auf ganz andere Weise als mit unseren Augen, in den Menschen hineinzuschauen. So ist es uns möglich, verschieden dichtes Gewebe im Menschen darzustellen, magnetische Eigenschaften verschiedener Organe sichtbar zu machen und den Zuckerstoffwechsel oder Hirnveränderungen bei Alzheimer-Krankheit abzubilden.

Neben der anschaulichen Darstellung grundlegender physikalischer Zusammenhänge wird auch erläutert, welches Verfahren bei den häufigsten Krankheiten zu welchem Zeitpunkt am besten zum Einsatz kommt.

Der Text ist so aufgebaut, dass der Einstieg in jedes Kapitel direkt möglich ist ohne die anderen Kapitel lesen zu müssen.

- Was passiert bei einer Magnetresonanztomografie mit mir in der Röhre?
- Muss ich Angst vor Röntgenstrahlen haben?
- Wie ist der Aufbau von Atomen und wie wird mit diesem Verständnis von Physik ein Bild aus dem Körperinneren generiert?

Diese und andere Fragen beantwortet Professor Dr. Gustav von Schulthess in un-nachahmlich anschaulicher Art und Weise.

Der Autor

Professor Dr. Gustav von Schulthess studierte Physik in Zürich und promovierte am renommierten MIT Physics Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA. Anschließend studierte er Medizin in Boston an der Harvard Medical School. Seit 1987 bis ins Jahr 2014 leitete er die Klinik für Nuklearmedizin am UniversitätsSpital in Zürich, die meiste Zeit davon als Klinikdirektor. Er ist Ehrenmitglied der Fachgesellschaften ESMRMB (1995), RSNA (2008), Ehrendoktor der Uni Kopenhagen (2007) und gibt in über 300 Fachpublikationen, 5 Fachbüchern und mehr als 20 Kapiteln in Fachbüchern sein Fachwissen weiter.

ISBN 978-3-662-53930-9



9 783662 539309