

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

 Springer

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](http://www.gelehrte-gesellschaft.ch)

---

## Vorwort

Ein Mitglied der Gelehrten Gesellschaft in Zürich ist im Laufe seiner Mitgliedschaft verpflichtet, mindestens einen gelehrten 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 „esoterisch“-unfundierte Erklärungen zu Eigen machten. 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	Forschungsfellow 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

<b>Widmung</b> .....	V
<b>Vorwort</b> .....	VII
<b>Danksagung</b> .....	IX
<b>Der Autor</b> .....	XI
<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Einleitende Bemerkungen .....	1
1.2 Gebrauchsanleitung zum Lesen dieses Buches .....	2
<b>2 Röntgenbilder</b> .....	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
<b>3 Röntgen-Computertomographie (CT)</b> .....	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

<b>4</b>	<b>Nuklearmedizin (NUK), Positronenemissionstomographie (PET) und Hybridverfahren</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Magnetresonanzbildgebung (MR)</b> .....	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 (Muskuloskelettal-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
<b>6</b>	<b>Ultraschall (US)</b> .....	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
<b>7</b>	<b>Kontrastmittel und radioaktive Tracer für die medizinische Bildgebung</b> .....	<b>65</b>
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
<b>8</b>	<b>Strahlenschutz</b> .....	<b>75</b>
8.1	Ionisierende Strahlen: Röntgen- und Gammastrahlen .....	76
8.2	Radiowellen im MR .....	80
8.3	Ultraschall-Wellen .....	81
8.4	Zusammenfassung .....	81
<b>9</b>	<b>Was und wie wir sehen können</b> .....	<b>83</b>
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
<b>10</b>	<b>Atome und ihre Eigenschaften</b> .....	<b>95</b>
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
<b>11 Der Atomkern</b> .....	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
<b>12 Digitale Bildgebung</b> .....	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
<b>13 Bei welcher Krankheit welche Bilder</b> .....	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
<b>Index</b> .....	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 schmerzhaft 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 Erkenntnisse, 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 Land<sup>1</sup>. 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-

---

<sup>1</sup> 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, welches sind 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.