

# *Radiologie*

Herausgegeben von  
Heinz Hundeshagen

Mit Beiträgen von  
J. Freyschmidt · G. Hagemann · H. Hundeshagen  
K. Jordan · D. Junker · G. Luska · H. Sack  
H.-St. Stender · G. Thiessen · H.G. Vogelsang  
H.-H. Wagner



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

# Radiologie

Herausgegeben von

**Heinz Hundeshagen**

Mit Beiträgen von

J. Freyschmidt · G. Hagemann · H. Hundeshagen

K. Jordan · D. Junker · G. Luska · H. Sack

H.-St. Stender · G. Thiessen · H. G. Vogelsang

H.-H. Wagner

Mit 273 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York 1978

HEINZ HUNDESHAGEN, Prof. Dr. med.

Leiter der Abteilung für Nuklearmedizin und spezielle Biophysik,  
Department Radiologie, Medizinische Hochschule, 3000 Hannover

ISBN 3-540-08328-6 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ISBN 0-387-08328-6 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Library of Congress Cataloging in Publication Data. Main entry under title:  
Radiologie. Includes index. 1. Radiology, Medical. I. Hundeshagen, Heinz, 1928—  
II. Freyschmidt, J. R895.R33. 616.07'57. 77-22239

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung vorbehalten.

Bei der Vervielfältigung für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1978

Printed in Germany

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.

Satz, Druck und Buchbinderei: Brühlsche Universitätsdruckerei, Lahn-Gießen  
2127/3130-543210



## Vorwort

Das Fach Radiologie, heute ein großes Fachgebiet der Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin, ist aus mühsamen Anfängen einer Abgrenzung gegenüber anderen Fachspezialitäten der Medizin entstanden. Kaum wohl etabliert — noch immer in Abgrenzungsschwierigkeiten der zu erbringenden Leistungen — machten sich, bedingt durch die rasanten technischen Entwicklungen, Spaltungstendenzen bemerkbar. In der Erkenntnis, daß das Gesamtgebiet der Radiologie in der täglichen Ausübung nicht mehr von einem überschaubar ist, wurde in Hannover schon von Anfang an eine Teilung in Röntgendiagnostik, Strahlentherapie und Nuklearmedizin vorgenommen. Damit war erreicht, daß die Radiologie als Ganzes, ohne die bekannten, sich hemmend auswirkenden Abgrenzungs- und Profilierungsschwierigkeiten, sich gut entwickeln konnte.

So sehen wir auch nach dem weiteren Hinzukommen von Abteilungen für Neuroradiologie, Strahlenmeßtechnik und Strahlenschutz und der Einrichtung von strahlenbiologischen Arbeitsgruppen keinerlei Schwierigkeiten in der Ausbildung, das Gebiet der Radiologie als Ganzes darzustellen und zu vertreten.

Das vorliegende Kurzlehrbuch ist ein Ergebnis dieser Bemühungen. Es wurde versucht, aus dem großen Stoffgebiet ein Grundgerüst des Wissens für den Studenten und für den nicht speziell radiologisch ausgebildeten Mediziner in einer Gesamtschau zu bringen. Wir haben uns bemüht, die Lernziele für den ersten, zweiten und dritten klinischen Studienabschnitt, die durch die Gegenstandskataloge für die Fächer der ärztlichen Prüfung gegeben sind, darzustellen.

Durch die Entwicklung der Naturwissenschaften und der Technik werden gerade die einzelnen Verfahren der Radiologie ständig weiter entwickelt und verbessert bzw. neue Techniken eingeführt. Die langjährige Erfahrung zeigt, daß sich nur das durchsetzt und bewährt, was für die Klinik im Verhältnis zum Aufwand zu tatsächlich brauchbaren Ergebnissen führt. Das besondere Augenmerk liegt dabei auf der klinischen Brauchbarkeit. Aus diesem Grunde sind die Diagnostik und Therapie beschreibenden Teile auch umfangreicher angelegt. Den zu diesem Zeitpunkt erreichten Stand, besonders unter Berücksichtigung dieser Tatsache, haben wir in diesem Kurzlehrbuch aufgezeigt.

Daneben sind das Fundament für die Radiologie die Erkenntnisse auf dem Gebiete der Physik, Strahlenbiologie, Chemie und Ingenieurwissenschaften. Aus diesem Grunde war es wichtig, die Grundlagen zu vermitteln. Die gleichberechtigte Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaftler, Ingenieur und Mediziner hat die großen Fortschritte auf unserem Gebiet gebracht, und eine Förderung dieser Bemühungen und der Bereitschaft des Mediziners zu

einer solchen Zusammenarbeit muß immer wieder angestrebt werden.

Naturwissenschaftler, Ingenieure und Mediziner haben die Kapitel dieses Kurzlehrbuches, welches als eine Einführung in das Fachgebiet Radiologie zu betrachten ist, geschrieben und bedanken sich beim Springer-Verlag für die Möglichkeit, ein Grundgerüst für den Unterricht auf dem gesamten Gebiet der Radiologie festzulegen.

Hannover, August 1977

HEINZ HUNDESHAGEN

## Mitarbeiterverzeichnis

- FREYSCHMIDT, J., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. I – Klin. Radiologie, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- HAGEMANN, G., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Arbeitsbereich Experimentelle Radiologie, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- HUNDESHAGEN, H., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. IV: Nuklearmedizin und spez. Biophysik, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- JORDAN, K., Prof., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. V: Nuklearmeßtechnik und Strahlenschutz, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- JUNKER, D., Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. IV: Nuklearmedizin und spez. Biophysik, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- LUSKA, G., Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Arbeitsbereich im Krankenhaus Oststadt, 3000 Hannover 51, Pasteur-Allee
- SACK, H., Prof. Dr., Universität Köln, Institut und Poliklinik für Strahlentherapie, 5000 Köln 41, Joseph-Stelzmann-Straße 9
- STENDER, H.-St., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. I: Klin. Radiologie, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- THIESSEN, G., Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. IV: Nuklearmedizin und spez. Biophysik, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- VOGELSANG, H.G., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Abt. II: Neuroradiologie, 3000 Hannover 61, Karl-Wiechert-Allee 9
- WAGNER, H.-H., Prof. Dr., Medizinische Hochschule – Dept. Radiologie – Arbeitsbereich im Krankenhaus Oststadt, 3000 Hannover 51, Pasteur-Allee

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Radiologie.</b>	
	G. HAGEMANN . . . . .	1
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Methoden der Strahlenerzeugung . . . . .	2
1.3	Wechselwirkungen von Quantenstrahlung mit Materie . . . . .	8
1.4	Wechselwirkungen von Korpuskeln mit Materie . . . . .	14
1.5	Messung von ionisierenden Strahlungen . . . . .	17
1.6	Dosimetrische Einheiten . . . . .	21
1.7	Grundbegriffe der biologischen Dosimetrie . . . . .	23
<b>2.</b>	<b>Biologische Grundlagen der Strahlenwirkung.</b>	
	G. THIESSEN . . . . .	28
2.1	Strahlenchemische und strahlenbiochemische Veränderungen . . . . .	28
2.2	Veränderungen der Nucleinsäuren und ihres Stoffwechsels nach Bestrahlung . . . . .	35
2.3	Antikörpersynthese nach Bestrahlung . . . . .	42
2.4	Permeabilität von Membranen nach Bestrahlung . . . . .	43
2.5	Cytologische Veränderungen . . . . .	44
2.6	Strahlenwirkung auf Gewebe und Organe . . . . .	47
2.7	Akute Strahlenschäden . . . . .	58
2.8	Strahlenspätchäden . . . . .	60
2.9	Strahlenwirkung auf die pränatale Entwicklung . . . . .	62
2.10	Genetisches Strahlenrisiko . . . . .	63
2.11	Grundbegriffe zur Kinetik der Radionuklide . . . . .	66
<b>3.</b>	<b>Röntgendiagnostik</b>	
<b>3.1.</b>	<b>Technische Grundlagen der Röntgendiagnostik.</b>	
	H.-ST. STENDER . . . . .	72
3.1.1	Röntgenröhre . . . . .	72
3.1.2	Röntgeneratore . . . . .	73
3.1.3	Röntgenuntersuchungs-Geräte . . . . .	74
3.1.4	Entstehung des Strahlenbildes . . . . .	75
3.1.5	Abbildungs-Systeme . . . . .	76
3.1.6	Projektions-Gesetze . . . . .	80
3.1.7	Detailwahrnehmung . . . . .	81
3.1.8	Schärfe des Röntgenbildes . . . . .	81
3.1.9	Kontrast . . . . .	81
3.1.10	Spezialuntersuchungen . . . . .	82
<b>3.2</b>	<b>Thoraxorgane. H.-ST. STENDER . . . . .</b>	<b>84</b>
3.2.1	Lunge und Pleura . . . . .	84
3.2.2	Zwerchfell . . . . .	118
3.2.3	Mediastinum . . . . .	119

3.2.4	Herz . . . . .	121
3.2.5	Aorta . . . . .	134
<b>3.3</b>	<b>Gefäßsystem. G. LUSKA . . . . .</b>	<b>136</b>
3.3.1	Erkrankungen der Arterien . . . . .	136
3.3.2	Erkrankungen der Venen . . . . .	140
3.3.3	Erkrankungen der Lymphwege . . . . .	141
<b>3.4</b>	<b>Verdauungsorgane. H.-H. WAGNER . . . . .</b>	<b>143</b>
3.4.1	Oesophagus . . . . .	143
3.4.2	Magen . . . . .	150
3.4.3	Duodenum . . . . .	158
3.4.4	Dünndarm . . . . .	161
3.4.5	Dickdarm . . . . .	165
3.4.6	Leber . . . . .	170
3.4.7	Gallenwege . . . . .	174
3.4.8	Pankreas . . . . .	179
3.4.9	Milz und extrahepatischer Pfortaderkreislauf . . . . .	183
<b>3.5</b>	<b>Harnsystem und Retroperitonealraum. G. LUSKA . . . . .</b>	<b>187</b>
3.5.1	Untersuchungs-Methoden . . . . .	187
3.5.2	Röntgen-Anatomie . . . . .	187
3.5.3	Congenitale Veränderungen der Nieren . . . . .	188
3.5.4	Veränderungen des Parenchyms . . . . .	188
3.5.5	Congenitale Veränderungen der oberen Harnwege . . . . .	189
3.5.6	Gefäßanomalien . . . . .	190
3.5.7	Erworbene Erkrankungen . . . . .	190
3.5.8	Erkrankungen des Nierenbeckenkelchsystems und des Ureters . . . . .	194
3.5.9	Nierenverkalkungen . . . . .	196
3.5.10	Nephrocalcinosen . . . . .	196
3.5.11	Traumatische Nierenveränderungen . . . . .	196
3.5.12	Tumoren . . . . .	197
3.5.13	Harnblase . . . . .	198
3.5.14	Urethra . . . . .	200
3.5.15	Nebennieren . . . . .	200
3.5.16	Retroperitoneale Fibrose (Ormond) . . . . .	200
3.5.17	Retroperitoneale Tumoren . . . . .	201
3.5.18	Weibliche Geschlechtsorgane . . . . .	201
<b>3.6</b>	<b>Skelet. J. FREYSCHMIDT . . . . .</b>	<b>202</b>
3.6.1	Untersuchungsmethoden . . . . .	202
3.6.2	Peripheres Skelet . . . . .	203
3.6.3	Die Gelenke . . . . .	244
3.6.4	Erkrankungen des fibro-ossären Übergangsbereiches . . . . .	252
3.6.5	Die Weichteile . . . . .	252
3.6.6	Wirbelsäule . . . . .	253
3.6.7	Becken . . . . .	264

<b>3.7</b>	<b>Schädel und Gehirn.</b> H. G. VOGELSANG . . . . .	267
3.7.1	Nativdiagnostik . . . . .	267
3.7.2	Beurteilungskriterien . . . . .	268
3.7.3	Pathologische Befunde . . . . .	269
3.7.4	Nasennebenhöhlen . . . . .	275
3.7.5	Orbita . . . . .	275
3.7.6	Schläfenbein . . . . .	276
3.7.7	Frakturen . . . . .	276
3.7.8	Verkalkungen (endokraniell) . . . . .	277
3.7.9	Computer-Tomographie (CT-Scan) . . . . .	278
3.7.10	Kontrastmitteldiagnostik . . . . .	279
<b>3.8</b>	<b>Weichteile und weibliche Brust.</b> G. LUSKA . . . . .	291
3.8.1	Allgemeine Weichteilveränderungen . . . . .	291
3.8.2	Veränderungen der Mamma . . . . .	291
<b>3.9</b>	<b>Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik.</b> H.-ST. STENDER	293
3.9.1	Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	293
3.9.2	Vorschriften der Röntgenverordnung . . . . .	294
3.9.3	Patienten-Dosen in der Röntgen-Diagnostik . . . . .	294
3.9.4	Strahlenexposition des Personals . . . . .	297
<b>4.</b>	<b>Klinische Strahlentherapie.</b> H. SACK . . . . .	300
4.1	Technische und methodische Grundlagen . . . . .	300
4.2	Strahlentherapie gutartiger Erkrankungen . . . . .	306
4.3	Allgemeine Strahlentherapie maligner Tumoren . . . . .	309
4.4	Spezielle Strahlentherapie bösartiger Tumoren . . . . .	321
<b>5.</b>	<b>Meßtechnische Grundlagen der Nuklearmedizin.</b>	
	K. JORDAN . . . . .	340
5.1	Allgemeine Betrachtungen . . . . .	340
5.2	Die Grundbausteine der nuklearmedizinischen Meßgeräte . . . . .	340
5.3	In vitro-Meßgeräte . . . . .	347
5.4	In vivo-Meßgeräte . . . . .	348
5.5	Fragen zur Meßgenauigkeit . . . . .	353
<b>6.</b>	<b>Nuklearmedizin.</b> H. HUNDESHAGEN . . . . .	359
6.1	Begriffsbestimmung . . . . .	359
6.2	Nuklearmedizinische Diagnostik — Spezieller Teil . . . . .	364
6.3	Spezielle Verfahren zum Nachweis von Tumoren (Onkologie) . . . . .	401
6.4	Placenta-Szintigraphie und Anwendung von Radionukliden im Säuglings- und Kindesalter . . . . .	402
<b>7.</b>	<b>Grundlagen des Strahlenschutzes.</b> D. JUNKER . . . . .	405
7.1	Strahlendosen und ihre Bewertung . . . . .	405
7.2	Gesetzliche Vorschriften zum Strahlenschutz . . . . .	410

7.3	Zivilisatorische Strahlenexposition des Menschen . . .	412
7.4	Grundlagen des praktischen Strahlenschutzes . . . .	417
7.5	Überwachungsmaßnahmen . . . . .	421
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>425</b>

# 1. Physikalische Grundlagen der Radiologie

E. HAGEMANN

## 1.1 Einleitung

Die vorliegende knappe Einführung behandelt das Stoffgebiet, wie es durch den Gegenstandskatalog für das Gesamtfach „Radiologie“ für den ersten Abschnitt der ärztlichen Prüfung (Stand: 13. September 1973) abgegrenzt worden ist. Die allgemeinen Grundlagen der Atom- und Kernphysik (Harten, H. U.: Physik für Mediziner. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1975) werden als bekannt vorausgesetzt.

### 1.1.1 Allgemeine Eigenschaften der Strahlungen

*Gradlinige Ausbreitung* ist charakteristisch für alle Strahlungen unter der Voraussetzung, daß das Ausbreitungsmedium eine räumlich homogene Struktur besitzt.

Die *Röntgendiagnostik* verwendet Röntgenstrahlen zur Erzeugung von Schattenbildern ihrer Objekte. Diese Strahlenart besitzt trotz großer Inhomogenitäten des durchstrahlten Körpers hinreichende Anteile unbeeinflusst *durchgelassener Strahlintensitäten*, die wegen ihrer geradlinigen Ausbreitung zur *Bilderzeugung durch Zentralprojektion* benutzt werden.

Die *Strahlentherapie* nutzt nur die vom bestrahlten Körper absorbierte Strahlungs-

energie, während die aus dem Körper austretende Strahlung ungenutzt bleibt.

Die absorbierte, je Gramm Gewebe deponierte Strahlungsenergie wird, analog der Definition in der Pharmakologie, als *Dosis* bezeichnet (vgl. Abschnitt 1.5.1 und 1.6.1). Das Verhältnis aus der Dosis und der Bestrahlungszeit, in der die Dosis aufgenommen wurde, heißt *Dosisleistung* (vgl. Abschnitt 1.5.1 und 1.6.1).

### 1.1.2 Strahlenarten

Die in der Röntgendiagnostik und Strahlentherapie genutzten Arten ionisierender Strahlen lassen sich weiter in Quanten- und Korpuskular-Strahlungen unterteilen.

*Quantenstrahlungen* sind wie das sichtbare und ultraviolette Licht elektromagnetische Wellenstrahlungen (s. Tabelle 1.1). Die Bezeichnung Quantenstrahlung rührt daher, daß die Strahlungsquanten, die auch kürzer als *Photonen* bezeichnet werden, als Energie  $E$  ein Vielfaches  $\nu$  des berühmten Planckschen Wirkungsquantums  $h$  transportieren:  $E = h \cdot \nu$ .

Die Zahl  $\nu$  wird als Frequenz der elektromagnetischen Welle bezeichnet, die mit der Wellenlänge  $\lambda$  und der Wellen-(Licht-)Geschwindigkeit  $c$  zusammenhängt:  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ .

*Korpuskular-Strahlungen* bestehen aus schnell bewegten Bestandteilen der Atome,

**Tabelle 1.1.** Einteilung und Bezeichnungen elektromagnetischer Wellenstrahlungen.  
Einheiten:  $1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$ ,  $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ,  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ Schwingung/sec}$ ,  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$

Wellenlänge	1 $\mu\text{m}$	0,01 $\mu\text{m}$	1 $\text{ \AA}$	0,01 $\text{ \AA}$
Bezeichnung	Licht	Ultraviolett	/// Röntgen-Strahlen ///	$\gamma$ -Strahlen
Frequenz	$10^{14} \text{ Hz}$	$10^{16}$	$10^{18}$	$10^{20}$
Energie	1 eV	100 eV	1 keV	1 MeV

aus denen die Materie aufgebaut ist. Ihre Geschwindigkeit ist im Gegensatz zu derjenigen der Quantenstrahlen immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Die in der Strahlentherapie gebräuchlichsten Korpuskular-Strahlen sind die Elektronen, die aus historischen Gründen auch als  $\beta$ -Strahlen bezeichnet werden (vgl. Abschnitt 1.2.1).

## 1.2 Methoden der Strahlungserzeugung

### 1.2.1 Methoden der Erzeugung von Quantenstrahlungen

**Forderungen an Strahlungsgeneratoren.** Die Anforderungen, die die Medizin heute an die Röntgenapparaturen stellt, lassen sich in drei große Gruppen einteilen. Die *Diagnostikröhren* verlangen eine große Leistung über kurze Zeiten hinweg und sollen eine Röntgenstrahlung abgeben, die von einer möglichst *punktförmigen Quelle* ausgestrahlt wird. Röntgenapparaturen für die *Therapie* sollen über *lange Zeiten hinweg große Leistungen* abgeben.

Wenn nur eine kleine Fläche in geringem Abstand von der Röntgenröhre bestrahlt werden soll, sind die Bedingungen der *Nahstrahltherapie* gegeben. Man verwendet in solchen Fällen relativ kleine Röntgenröhren, die ein Beryllium-Fenster erhalten, das für Röntgenstrahlen besonders gut durchlässig ist. Bei *Teletherapieanlagen* werden über Entfernungen bis zu einem Meter *großflächige Körpergebiete* bestrahlt, wobei zusätzlich verlangt wird, daß die Strahlung in den Körper möglichst *tief eindringen soll*.

Dies setzt voraus, daß die Quantenenergie der Röntgenstrahlung so groß ist, daß 10 cm Gewebe ohne größere Schwächung der Röntgenstrahlintensität durchstrahlt werden können.

Da bei der Erzeugung von Röntgenstrahlung energieärmere Anteile geringer

Durchdringungsfähigkeit bei weitem überwiegen, muß man diesen Anteil durch *Metallfilter* entfernen (vgl. Abschnitt 1.3.1). Als Filtermaterial wird gewöhnlich Kupfer oder Aluminium benutzt.

**Telekobaltanlagen.** Die Forderungen der Teletherapie werden von der  $\gamma$ -Strahlung künstlich radioaktiver Isotope, wie z. B. des  $^{60}\text{Co}$  oder des  $^{137}\text{Cs}$ , erfüllt (vgl. Abschnitt 1.2.4). Der Name Gamma( $\gamma$ )-Strahlung wird seit Entdeckung der ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )-Strahlung (Becquerel, 1896) radioaktiver Stoffe für die von Atomkernen emittierten Quantenstrahlen benutzt.

Die  $\gamma$ -Strahlung des  $^{60}\text{Co}$  ist so durchdringend, daß hinter 15 cm Gewebeschichtdicke noch 50% der Intensität ohne Gewebeschicht vorhanden ist. Die immer noch halb so starke Aktivität nach Ablauf der großen Halbwertzeiten (HWZ) von 5,4 Jahren bei  $^{60}\text{Co}$  oder 30 Jahren bei  $^{137}\text{Cs}$  garantiert darüber hinaus eine ausreichend lange Gebrauchsfähigkeit der Anlagen.

### 1.2.2 Funktionsprinzip der Röntgenröhren

Die Röhrenkathode wird durch eine 2000° C heiße Wolframwendel gebildet, die Elektronen emittiert. Durch das *elektrische Feld* zwischen Kathode und Anode werden die *Elektronen beschleunigt* und erhalten eine Bewegungsenergie je nach angelegter Spannung von mindestens 10000 eV = 10 keV bis maximal 300 keV. Die beschleunigten Elektronen treffen auf die Anode. Dabei werden sie abgebremst und verlieren einen Teil ihrer Energie, die als Röntgenstrahlung („Bremsstrahlung“) emittiert wird.

Die Anodenspannung wird in einem *Hochspannungstransformator* mit nachgeschaltetem *Gleichrichter* erzeugt. Die durch die hohe *Welligkeit* gleichgerichteter Wechselspannung verursachten, unerwünscht ho-

hen *Schwankungen der Röntgenstrahlintensität* können durch Verwendung von Gleichspannungen geringer Welligkeit vermieden werden. Praktisch benutzt man in der Röntgendiagnostik Gleichspannungsgeneratoren, deren *Restwelligkeit* durch zweifache Verwendung des dreiphasigen Drehstroms und je Phase von Zweiweggleichrichtern, „Zwölf-Puls-Generator“, auf wenige Prozent der erzeugten Gleichspannung reduziert ist (vgl. Abschnitt 3.1.2). In Therapieapparaten werden die pulsierenden Gleichspannungen unter Verwendung von Kondensatoren durch *Siebglieder* großer Zeitkonstanten geglättet.

Der Schalttisch enthält als wesentliche Bedienelemente Hochspannungs- und Röhrenstromregler, Zeitschaltuhr, bei Diagnoseapparaten eine Vorwahleinstellung für das Strom-Zeit-Produkt, „*mAs-Produkt*“, und die Arbeitsplatzwahl bei Röntgenaufnahmen. Da der Strom (mA) durch Kathode und Anode der Röntgenröhre die Dosisleistung bestimmt (vgl. Abschnitt 1.1.1), ändert sich die Dosis und damit auch die Filmschwärzung proportional zum mAs-Produkt.

Bei Therapieapparaten zeigt ein Signalfeld den in den Strahlengang eingeschobenen Metallfilter an, der durch bevorzugte Schwächung der weichen Strahlenteile zur Regulierung der Strahleneindringtiefe führt (vgl. Abschnitt 1.3.1).

Nach Austritt aus den Filterblechen wird das Röntgenstrahlenbündel durch Metallblenden eingeleuchtet, so daß je nach Blendenstellung ein nach Größe und Form festgelegter Strahlquerschnitt entsteht.

Ein in seiner Strahlenqualität durch Spannung (kV) und Filterung (mm Al, mm Cu) und in seiner Dosisleistung durch den Röhrenstrom (mA) definiertes Röntgenstrahlenbündel heißt *Nutzstrahlung*, wenn es auf eine nutzbare Feldgröße eingeleuchtet wird.

Alle übrigen, ungewollt auftretenden Strahlungen im Bestrahlungsraum nennt man *Störstrahlungen*. Sie setzen sich aus den vom Patienten, von Geräteteilen, von Schutzwänden oder Raumwänden ausgehenden, aus dem Nutzstrahlenbündel heraus *gestreuten Strahlungen* (vgl. Abschnitt 1.3.2) und der sogenannten *Durchlaßstrahlung* zusammen.

Die Streustrahlung ist damit von der Feldgröße des Nutzstrahlenbündels abhängig und nimmt mit der Einblendung stark ab.

Die Durchlaßstrahlung entsteht als eine von der Röhrenhaube durchgelassene Röntgenstrahlung und ist entsprechend der konstruktiven Anordnung der Röntgenröhre und der übrigen Bauteile in der Haube richtungsabhängig.

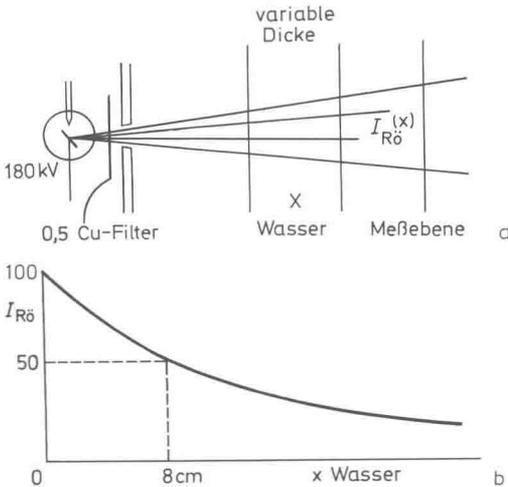
Da die Nutzstrahlung die für die Röntgen-Durchleuchtung oder -Aufnahme oder eine therapeutische Bestrahlung erforderliche Dosis liefern muß, wird Dosisleistung und Bestrahlungszeit diesen Erfordernissen entsprechend am Schalttisch eingestellt.

Die durch Nutzstrahlung und Störstrahlung dem Patienten und der Umgebung zugestrahlte Dosis wächst mit dem Produkt aus Röhrenstrom (mA) und der Bestrahlungszeit (sec) (mAs-Produkt).

In der Diagnostik ist daher das mAs-Produkt für die Aufnahmequalität entscheidend, in der Therapie wird die Dosis über die Bestrahlungszeit reguliert.

### 1.2.3 Intensität, Halbwertschichtdicke und Härte einer Quantenstrahlung

Zur Charakterisierung der Wirkung von Röntgenstrahlen auf Materie kann der Intensitätsverlust eines Strahlenbündels beim Durchgang durch Wasserschichten benutzt werden (Abb. 1.1a), da Wasser sich gegenüber Röntgenstrahlen ähnlich verhält wie



**Abb. 1.1.** Zur Schwächung der Intensität einer Röntgenstrahlung durch eine  $x$  cm dicke Wasserschicht. Oberer Teil der Abbildung: Schema der Meßanordnung. Unterer Teil: Änderung der Röntgenstrahlintensität mit veränderlicher Dicke der Wasserschicht für eine HWSD der Strahlung von 8 cm

Gewebe. Dabei ist die Intensität  $I_{R_0}$  einer Röntgenstrahlung gleich der Zahl  $n$  der Röntgen-Quanten, die in der Zeit  $t$  (sec) die Fläche  $F$  ( $\text{cm}^2$ ) durchsetzen, multipliziert mit ihrer mittleren Quantenenergie  $\bar{E}$  [Ws]:

$$I_{R_0} = \frac{n \cdot \bar{E}}{F \cdot t} \left[ \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right].$$

Damit sind Strahlungsintensität und Dosisleistung einer Röntgenstrahlung einander proportional.

Trägt man die Strahlungsintensität der Röntgenstrahlung, die nach Durchgang durch verschieden dicke Wasserschichten übrig bleibt, gegen die Schichtdicke auf, so erhält man für Röntgenstrahlung mit einer Grenzenergie von 180 keV den Verlauf, wie er in Abb. 1.1 b dargestellt ist. In der Abbildung ist bei der Schichtdicke 0 die Röntgenstrahlintensität  $I_0 = 100\%$  gesetzt. Aus dem Kurvenverlauf liest man ab:

Ist nach Durchstrahlung einer Wasserschicht noch genau 50% der Anfangs-

intensität vorhanden, so bezeichnet man die zugehörige Schichtdicke als *Halbwertschichtdicke (HWSD)*, die ein einfaches Maß für die Durchdringungsfähigkeit einer Röntgenstrahlung ist.

Den Intensitätsverlauf von Röntgenstrahlen verschiedener Erzeugerspannungen zeigt Abb. 1.2. Eine Zunahme der Durchdringungsfähigkeit der Strahlungen, man sagt auch kurz „Strahlenhärte“, ergibt sich mit zunehmender Erzeugerspannung. Dementsprechend lassen sich die harten Strahlenqualitäten zwischen 180 und 300 kV für die Tiefentherapie, die energieärmeren Strahlen bis etwa 120 kV dagegen für die Diagnostik und die Oberflächentherapie verwenden. Strahlenhärten über 300 keV werden, wie erwähnt, entweder durch Tele- $\gamma$ -Strahler radioaktiver Isotope oder auch durch Elektronenbeschleuniger mit Umwandlung der Elektronenstrahlung in Quantenstrahlung erzeugt (vgl. Abschnitt 1.2.7) und therapeutisch genutzt.

#### 1.2.4 Natürliche radioaktive Strahler

**Radium und die Einheit des radioaktiven Zerfalls.** Neben Röntgenapparaturen sind auch radioaktive Substanzen als therapeutisch eingesetzte Strahlenquellen in Gebrauch, am längsten das natürlich vorkommende Radium. Die von Zerfallsprodukten dieses Elements ausgehende Quantenstrahlung besitzt eine Wasser-HWSD von 16,2 cm gegenüber einem Wert von 8 cm für 180 kV-Röntgenstrahlung. Zwar konnten Teletherapie-Anlagen wegen der geringen zur Verfügung stehenden Substanzmengen nicht hergestellt werden, in speziell gekapselter Form wird Radium jedoch in der intracavitären Therapie, besonders in der Gynäkologie und Laryngologie, eingesetzt.

Man nennt radioaktive Präparate allgemein „umschlossene“ radioaktive Strahler, wenn aus ihnen keine gasförmigen,

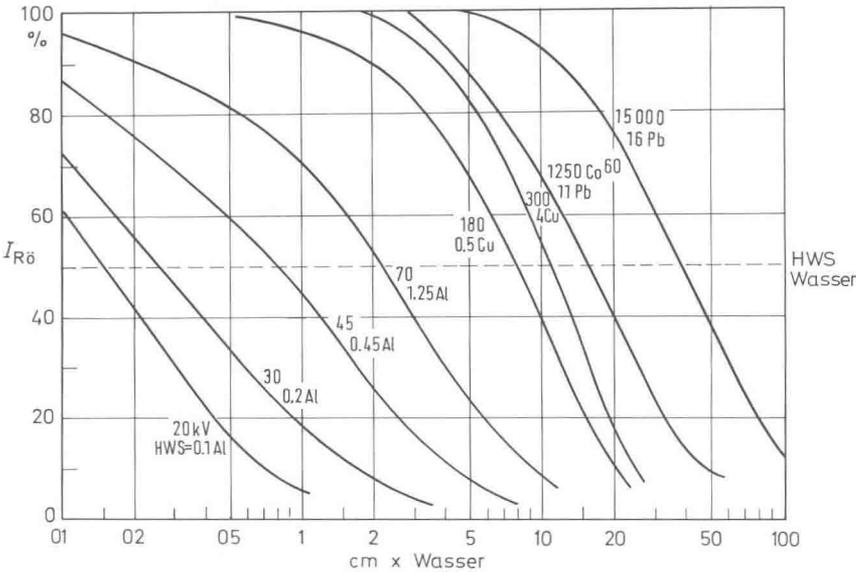


Abb. 1.2. Die Röntgenstrahlintensität in Abhängigkeit von der veränderlichen Wasserschichtdicke für Röntgenstrahlungen verschiedener Erzeugerspannungen bis 15000 kV. Die Schnittpunkte der 50%-Linie mit den Kurven geben zugleich die Wasserhalbwertssdicken auf der logarithmisch eingeteilten Abszisse an

flüssigen oder festen radioaktiven Substanzen in die Umgebung gelangen können.

Die von solchen Präparaten des Radiums abgegebene Strahlung entsteht nicht beim Zerfall des Radiums, sondern wird von Kernen ausgesandt, die in der natürlichen Zerfallsreihe dieses Elements stehen. Das Radium besitzt unter diesen Kernen die längste Halbwertszeit,  $T_{1/2} = 1602$  Jahre, so daß die Aktivität der Präparate vom  $^{226}\text{Ra}$  bestimmt wird, letztlich die Ursache für die praktische Bedeutung dieses Isotops. Die Aktivitäten des Radiums und seiner Zerfallsprodukte stehen im sogenannten *radioaktiven Gleichgewicht*, d.h. nach einer gewissen Zeit der Einstellung haben alle Folgekerne dieselbe Zerfallsrate wie das  $^{226}\text{Ra}$ .

Die Zerfallsrate des  $^{226}\text{Ra}$  wurde zur Definition der, nach der Entdeckerin des Radiums benannten *Einheit des radio-*

*aktiven Zerfalls* verwendet:

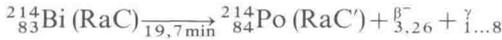
$$1 \text{ Curie (Ci)} = \frac{\text{Zahl der Radiumzerfälle/sec}}{1 \text{ g Radium}} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/sec.}$$

Jedes radioaktive Isotop mit  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfällen je sec besitzt daher die Aktivität 1 Ci. Ab 1977 gilt eine, nach dem Entdecker der Korpuskularstrahlung benannte neue Einheit:

$$1 \text{ Bequerel (Bq)} = 1 \text{ Zerfall/sec.}$$

Trägt man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Massenzahl auf der Ordinate gegen die Ordnungszahl auf der Abszisse auf, so läßt sich die Zerfallsreihe des  $^{226}\text{Ra}$  bekanntlich in einfacher Weise darstellen (s. Harten, H. U.: Physik für Mediziner. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1975). Alle Kernumwandlungen der Reihe erfolgen unter Emission von  $\alpha$ -,  $\beta$ -Teilchen oder bzw. und  $\gamma$ -Quan-

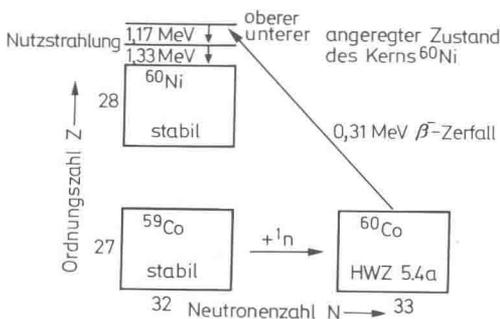
ten, und der therapeutisch nutzbare Anteil an der emittierten  $\gamma$ -Strahlung besteht aus acht  $\gamma$ -Linien mit einer Emissionshäufigkeit über 4%, die als Kernfluoreszenz-Strahlungen des angeregten  $^{214}\text{Po}$  beim Zerfall



entstehen, wobei die acht  $\gamma$ -Linien Energien zwischen 0,6093 und 2,204 MeV besitzen. Die Gesamtheit dieser energiereichen Quantenstrahlungen zeigt eine Blei-HWSD von 12 mm und eine Wasser-HWSD von 16,2 cm.

### 1.2.5 Technisch hergestellte radioaktive Strahler

**$^{60}\text{Co}$ .** Dieses radioaktive Isotop ist mit seiner Blei-HWSD von 11 mm nach dem Radium dasjenige mit der größten Durchdringungsfähigkeit seiner  $\gamma$ -Strahlung (vgl. Abb. 1.2).  $^{60}\text{Co}$  wird aus  $^{59}\text{Co}$  durch Neutronenbestrahlung im Reaktor hergestellt und zerfällt mit einer HWZ von 5,4 Jahren nach dem Schema in Abb. 1.3 unter Emission von zwei therapeutisch nutzbaren  $\gamma$ -Linien der Energie 1,33 und 1,17 MeV.



**Abb. 1.3.** Aus Kobalt-59 entsteht durch Neutronenbestrahlung der Kern Kobalt-60, der mit einer Halbwertszeit von 5,4 Jahren unter Elektronenemission in den oberen angeregten Zustand des Kerns Nickel-60 übergeht. Beim Übergang in den Grundzustand des Kerns Nickel-60 über einen unteren angeregten Zustand werden die therapeutisch nutzbaren  $\gamma$ -Linien mit der Energie 1,17 und 1,33 MeV ausgesandt

$^{137}\text{Cs}$  emittiert mit einer HWZ = 30 Jahren  $\beta$ -Teilchen, die in 94% aller Zerfälle auf einen angeregten Zustand des Kerns  $^{137}\text{Ba}$  führen, von dem der Übergang in den Grundzustand unter Emission eines  $\gamma$ -Quants der Energie 0,662 MeV erfolgt. Die Blei-HWSD beträgt 5,3 mm. Das Isotop entsteht bei der Spaltung des Urankerns in einem Atomreaktor und wird aus dem Abbrand der Brennelemente gewonnen.

Bei der chemischen Aufarbeitung der ausgebrannten Reaktorstäbe erhält man alle als Folge der Uranspaltung entstandenen Cäsium-Isotope, von denen jedoch das nutzbare  $^{137}\text{Cs}$  nur einen kleinen Prozentsatz darstellt. Die herstellbare spezifische Aktivität ist darum geringer als beim  $^{60}\text{Co}$ , so daß dieses Isotop hauptsächlich in der Halbtiefen-Therapie verwendet wird.

**$^{99\text{m}}\text{Tc}$ .** Dieses vor allem in der Nuklearmedizin zu diagnostischen Zwecken häufig gebrauchte Nuklid ist ein Beispiel für eine besondere Eigenschaft eines angeregten Nukleonenzustandes. Die Rückkehr in den Grundzustand unter Emission der Kernfluoreszenz- $\gamma$ -Strahlung erfolgt erst nach längerer Lebensdauer dieses „metastabilen“ Zustandes. Beim Kern  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  beträgt die HWZ 6 Std und die Quantenenergie der Kernfluoreszenz- $\gamma$ -Strahlung 0,14 MeV, so daß auch bei wiederholter Anwendung die kurze HWZ und gleichzeitig niedrige Quantenenergie zu extrem geringer Strahlenbelastung führt.

Man nennt allgemein radioaktive Stoffe, die sich in gasförmiger, flüssiger oder fester Form ausbreiten können, „offene“ radioaktive Stoffe.

Offene radioaktive Strahler werden oft zu therapeutischen Zwecken eingesetzt:  $^{198}\text{Au}$  zum Beispiel kann mit einer HWZ = 2,7 Tagen, in Form von Goldsol oder als dünne Drahtstückchen appliziert, im Körper verbleiben, so daß auf diese Weise die erforderliche therapeutische Wirkung erreicht wird. Dabei kann neben der  $\gamma$ -Strahlung der Energie 0,41 MeV auch die  $\beta$ -Strahlung der