



Jens-Holger Grunert

# Strahlenschutz für Röntgen- diagnostik und Computertomografie

Grundkurs und Spezialkurse



---

# Strahlenschutz für Röntgendiagnostik und Computertomografie

---

Jens-Holger Grunert

# Strahlenschutz für Röntgendiagnostik und Computertomografie

Grundkurs und Spezialkurse

 Springer

Prof. Dr. med. Jens-Holger Grunert  
Facharzt für Radiologie  
Röntgenpraxis Georgstraße  
Hannover, Deutschland

ISBN 978-3-662-59274-8      ISBN 978-3-662-59275-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59275-5>

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-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Fotonachweis Umschlag: © Prof. Dr. med. Jens Holger Grunert, Hannover (Symbolbild mit Fotomodell)  
Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

# Vorwort

Wie muss ich mich bei einer Durchleuchtung hinstellen, um meine Strahlenexposition zu minimieren? In welchem Ausmaß bin ich durch eine Strahlenschutzschürze geschützt? Von wo gehen die für mich gefährlichen Streustrahlen aus? Wie wird meine Personendosimetrie ermittelt, und wo werden meine persönlichen Messwerte archiviert? Wer darf die rechtfertigende Indikation stellen und wie erhalte ich meine Fachkunde im Strahlenschutz? Was hat sich mit der neuen Strahlenschutzgesetzgebung geändert?

Der Autor dieses Buches ist seit über 10 Jahren als Dozent und wissenschaftlicher Leiter von medizinischen Strahlenschutzkursen zur Röntgendiagnostik aktiv und kennt die Fragen, die die Teilnehmer der von ihm geleiteten Kurse bewegen. Gleichzeitig ist er selbst als niedergelassener Radiologe mit Themen des Strahlenschutzes in seinem Arbeitsalltag konfrontiert. Ziel des Buches ist es, ein grundlegendes Verständnis der Gesetzmäßigkeiten im Strahlenschutz zu vermitteln, die es dem Leser ermöglichen, richtige Verhaltens- und Verfahrensweisen für den Berufsalltag abzuleiten. Es ist als kursbegleitendes Lehrbuch für die Strahlenschutzkurse zur Erlangung der Fachkunde in der Röntgendiagnostik und Computertomografie konzipiert. Durch die enge Anbindung der Gliederung und der Inhalte des Buches an die gesetzlichen Vorgaben der Fachkunde-Richtlinie ist sichergestellt, dass alle erforderlichen Kursinhalte berücksichtigt sind. Darüber hinaus umfasst die Zielgruppe auch ärztliches und nichtärztliches Personal, das sich für den Strahlenschutz in der Röntgendiagnostik interessiert, sei es im Rahmen der Ausbildung, zur Prüfungsvorbereitung oder im beruflichen Alltag.

Die Sichtweise des Autors ist primär medizinisch mit Betonung praktischer Aspekte des Strahlenschutzes in der Röntgendiagnostik sowie der Computertomografie. Aspekte des Strahlenschutzes betreffend die Nuklearmedizin bzw. die Strahlentherapie werden nur insoweit berücksichtigt, wie es von der Richtlinie zu den Strahlenschutzkursen gefordert wird und wie es dem allgemeinen Verständnis zum Strahlenschutz dient. Neuere technologische Entwicklungen im Rahmen der Digitalisierung der Röntgendiagnostik werden ausgiebig behandelt, wogegen auf die Darstellung älterer nur noch selten angewandter Techniken wie zum Beispiel die Filmverarbeitung verzichtet wurde.

Seit dem 01.01.2019 gilt eine neue Strahlenschutzgesetzgebung. Viele Details haben sich hinsichtlich der gesetzlichen Vorgaben im Vergleich zur alten Röntgenverordnung

geändert. Dieses Buch soll helfen, sich in dem Paragrafendickicht der neuen Gesetzgebung zurechtzufinden, kann jedoch keine Rechtsberatung ersetzen. Für rechtsverbindliche Aussagen sollte man sich an die zuständigen Behörden wenden. Ebenso übernimmt der Autor keinerlei Haftung für Fehler in der Darstellung physikalisch-technischer Prozesse einschließlich der Angabe von Dosiswerten. Für Anregungen und Verbesserungsvorschläge wäre der Autor sehr dankbar.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. med. vet. Dorothea Grunert für umfassende Korrekturtätigkeit und Anregungen, Herrn Ralf Herbers von der HS-Strahlenschutz GmbH für zahlreiche Informationen zur neuen Strahlenschutzgesetzgebung sowie dem Springer-Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Hannover, Deutschland

Jens-Holger Grunert

April 2019

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundkurs im Strahlenschutz für Ärzte und Medizinphysik-Experten

<b>1</b>	<b>Entdeckung der Röntgenstrahlen und Grundlagen der Strahlenphysik. . . .</b>	<b>3</b>
1.1	Die Entdeckung der Röntgenstrahlen und deren Bedeutung für Grundlagenwissenschaft und Anwendungen außerhalb der Medizin . . . . .	3
1.2	Entstehung und Eigenschaften ionisierender Strahlung . . . . .	4
1.2.1	Aufbau des Atoms . . . . .	4
1.2.2	Arten ionisierender Strahlung . . . . .	6
1.3	Wechselwirkung der Strahlung mit Materie . . . . .	21
1.3.1	Photoabsorption . . . . .	22
1.3.2	Compton-Streuung. . . . .	24
1.3.3	Massen-Schwächungskoeffizient. . . . .	25
1.3.4	Strahlenkontrast und Bildgebung. . . . .	27
	Literatur. . . . .	37
<b>2</b>	<b>Dosisbegriffe und Dosimetrie. . . . .</b>	<b>39</b>
2.1	Grundbegriffe der Dosimetrie . . . . .	39
2.2	Dosisgrößen und Dosisseinheiten . . . . .	40
2.2.1	Energiedosis. . . . .	43
2.2.2	Lineares Energieübertragungsvermögen, Qualitätsfaktor, relative biologische Wirksamkeit und Strahlungswichtungsfaktor. . . . .	44
2.3	Dosismessverfahren. . . . .	47
	Literatur. . . . .	51
<b>3</b>	<b>Strahlenbiologische Grundlagen einschließlich der Wirkung kleiner Dosen</b>	<b>53</b>
3.1	Strahlenwirkungen auf DNA, Repair, Zellen, Zellzyklus, Zellüberlebenskurven. . . . .	53
3.1.1	Radiolyse des Wassers . . . . .	53
3.1.2	Biologische Wirkung der Strahlung. . . . .	54
3.1.3	Zellzyklus. . . . .	54
3.1.4	Zellüberlebenskurven. . . . .	55
3.2	Strahlenwirkungen auf Gewebe und Organe, Tumorgewebe. . . . .	57

3.3	Strahlenschäden; deterministische, stochastische, und teratogene Strahlenschäden . . . . .	59
3.4	Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition des Menschen . . . . .	60
3.4.1	Natürliche Strahlenbelastung . . . . .	60
3.4.2	Künstlich erzeugte Strahlung . . . . .	62
3.4.3	Risikobetrachtung . . . . .	63
	Literatur. . . . .	65
<b>4</b>	<b>Strahlenschutz</b> . . . . .	<b>67</b>
4.1	Grundlagen und Grundprinzipien . . . . .	67
4.2	Baulicher Strahlenschutz . . . . .	70
4.2.1	Strahlenschutzbereiche . . . . .	70
4.3	Apparativer Strahlenschutz . . . . .	73
4.4	Strahlenschutz des Personals . . . . .	74
4.4.1	Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen . . . . .	74
4.4.2	Maßnahmen bei Störfällen. . . . .	77
	Literatur. . . . .	77
<b>5</b>	<b>Rechtsvorschriften, Richtlinien, Leitlinien und Empfehlungen</b> . . . . .	<b>79</b>
5.1	Atomgesetz, Strahlenschutzgesetz, Strahlenschutzverordnung, Richtlinien und Leitlinien . . . . .	79
5.1.1	Strahlenschutzgesetz(StrlSchG) und die Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts. . . . .	80
5.1.2	Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) . . . . .	80
5.1.3	Richtlinien . . . . .	81
5.1.4	Leitlinien zur Qualitätssicherung der Bundesärztekammer (BÄK). . . . .	83
5.1.5	Die alte Röntgenverordnung, das Strahlenschutzgesetz und die neue Strahlenschutzverordnung . . . . .	83
5.2	Empfehlungen der Strahlenschutzkommission . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Prüfungsfragen zum Grundkurs im Strahlenschutz</b> . . . . .	<b>85</b>
6.1	Fragen . . . . .	85
6.2	Die Lösungen. . . . .	93
<b>Teil II Spezialkurs im Strahlenschutz bei der Untersuchung mit Röntgenstrahlung (Diagnostik)</b>		
<b>7</b>	<b>Röntgeneinrichtungen und Strahlenschutzeinrichtungen in der Röntgendiagnostik</b> . . . . .	<b>99</b>
7.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung . . . . .	99
7.1.1	Gerätetechnik. . . . .	99
7.2	Medizinische Röntgeneinrichtungen für die Diagnostik. . . . .	115
7.3	Einflussparameter auf Abbildungsgüte und Strahlenexposition . . . . .	118

7.3.1	Kontrast und Ortsauflösung, Modulationsübertragungsfunktion. . .	118
7.3.2	Bildrauschen, Signal-Rausch-Verhältnis, Quantenwirkungsgrad . . . . .	118
7.3.3	Dosisindikator, Deviationsindex . . . . .	120
7.3.4	Zentralprojektion . . . . .	122
7.3.5	Abstandsquadratgesetz. . . . .	124
7.3.6	Geometrische Unschärfe . . . . .	125
7.3.7	Bewegungsunschärfe . . . . .	125
7.3.8	Betrachtung und Befundung an Monitoren . . . . .	126
7.3.9	Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung . . . . .	128
7.4	Strahlenschutzeinrichtungen in der Röntgendiagnostik. . . . .	131
7.4.1	Baulicher Strahlenschutz . . . . .	131
7.4.2	Apparativer Strahlenschutz . . . . .	132
7.4.3	Strahlenschutzzubehör . . . . .	134
	Literatur. . . . .	135
<b>8</b>	<b>Dosisbegriffe und Dosimetrie in der Röntgendiagnostik . . . . .</b>	<b>137</b>
8.1	Dosisflächenprodukt . . . . .	139
8.2	Organdosis, effektive Dosis . . . . .	140
8.3	Abschätzung der Strahlenexposition und deren Bedeutung . . . . .	141
8.4	Dosismessverfahren . . . . .	143
	Literatur. . . . .	143
<b>9</b>	<b>Strahlenschutz des Personals in der Röntgendiagnostik. . . . .</b>	<b>145</b>
9.1	Kontroll- und Überwachungsbereiche . . . . .	145
9.2	Kategorien des beruflich strahlenexponierten Personals . . . . .	145
9.3	Personendosimetrie . . . . .	146
9.3.1	Gleitschattendosimeter. . . . .	149
9.3.2	Fingerringdosimeter und Kopf-/Armband-Dosimeter . . . . .	152
9.3.3	Elektronische Personendosimeter . . . . .	153
9.3.4	Strahlenschutzregister . . . . .	154
9.3.5	Grenzwerte für beruflich exponierte Personen . . . . .	155
9.4	Schutzkleidung. . . . .	157
9.4.1	Blei als Material zum Abschirmen der Strahlung . . . . .	157
9.4.2	Persönliche Schutzausrüstung (PSA). . . . .	159
9.5	Einweisung und Unterweisung . . . . .	167
9.6	Ärztliche Überwachung . . . . .	168
	Literatur. . . . .	169
<b>10</b>	<b>Strahlenschutz des Patienten in der Röntgendiagnostik. . . . .</b>	<b>171</b>
10.1	Schutzmittel . . . . .	172
10.1.1	Gonadenschutz. . . . .	173
10.1.2	Schilddrüsen- und Brustschutz . . . . .	174

10.1.3	Augenlinsenschutz . . . . .	174
10.1.4	Becken-Halbschürze oder Becken-Rundumschürze . . . . .	175
10.2	Strahlenschutzgerechte Aufnahme- und Untersuchungstechnik in der Röntgendiagnostik . . . . .	175
10.2.1	Strahlenqualität . . . . .	175
10.2.2	Einblenden des Strahlenfeldes und Lagerung des Patienten . . . . .	176
10.2.3	Strahlengang . . . . .	177
10.2.4	Kompression . . . . .	177
10.2.5	Strahlenschutzrelevantes Verhalten im Umgang mit C-Bögen . . . . .	178
10.2.6	Strahlenexposition einer schwangeren Patientin . . . . .	181
10.3	Arbeitsanweisungen . . . . .	182
10.4	Indikationen zur Untersuchung mit Röntgenstrahlung . . . . .	182
10.4.1	Rechtfertigende Indikation . . . . .	182
10.4.2	Indikationsempfehlungen und alternative Verfahren . . . . .	189
10.4.3	Diagnostische Referenzwerte . . . . .	190
10.4.4	Untersuchungen außerhalb der Heilkunde (Forschung) . . . . .	191
10.5	Spezialfragen bei der Röntgenuntersuchung von Kindern . . . . .	193
10.5.1	Strahlenempfindlichkeit des kindlichen Organismus . . . . .	193
10.5.2	Spezielle Geräteanforderungen . . . . .	194
10.5.3	Einstellungs- und Untersuchungstechnik bei Kindern und besondere Strahlenschutzmaßnahmen . . . . .	196
10.5.4	Aufnahmeparameter bei der Untersuchung von Kindern . . . . .	196
10.5.5	CT in der Pädiatrie . . . . .	196
	Literatur . . . . .	197
<b>11</b>	<b>Qualitätssicherung, Dokumentation und Organisation des Strahlenschutzes . . . . .</b>	<b>199</b>
11.1	Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle . . . . .	199
11.1.1	Abnahme- und Konstanzprüfungen . . . . .	199
11.1.2	Qualitätskriterien für Röntgenaufnahmen und -untersuchungen . . . . .	204
11.1.3	Aufgaben und Erfahrungen der ärztlichen Stellen . . . . .	207
11.2	Dokumentation und Bildwiedergabe . . . . .	209
11.2.1	Aufzeichnungen . . . . .	209
11.2.2	Archivierung . . . . .	211
11.3	Organisation des Strahlenschutzes . . . . .	215
11.3.1	Strahlenschutzverantwortlicher und -beauftragter . . . . .	215
11.3.2	Genehmigungs- und Anzeigeverfahren . . . . .	216
11.3.3	Strahlenschutzanweisung . . . . .	217
	Literatur . . . . .	217

<b>12</b>	<b>Rechtsvorschriften, Richtlinien und Empfehlungen bezüglich der Anwendung von Röntgenstrahlung</b> . . . . .	219
12.1	Das Strahlenschutzgesetz und die Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts . . . . .	219
12.1.1	Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) . . . . .	219
12.1.2	Verordnung zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts . . . . .	222
12.1.3	Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) . . . . .	222
12.2	Leitlinien und Richtlinien . . . . .	230
	Literatur . . . . .	231
<b>13</b>	<b>Prüfungsfragen zum Spezialkurs im Strahlenschutz bei der Untersuchung mit Röntgenstrahlen (Diagnostik)</b> . . . . .	233
13.1	Fragen . . . . .	233
13.2	Die Lösungen . . . . .	244
 <b>Teil III Spezialkurs Computertomografie</b>		
<b>14</b>	<b>Geräte- und Detektortechnologie</b> . . . . .	249
14.1	Prinzip der Computertomografie . . . . .	249
14.1.1	Einzelschicht-CT . . . . .	251
14.1.2	Spiral-CT . . . . .	251
14.1.3	Multislice-CT . . . . .	251
14.1.4	Dual-energy-CT . . . . .	252
14.2	Röhrentechnologie . . . . .	253
14.3	Detektortechnologie . . . . .	254
14.4	Bilderstellung . . . . .	256
14.4.1	Bildberechnung und Bilddarstellung in der Computertomografie . . . . .	256
14.4.2	3D-Bildverarbeitungsverfahren . . . . .	261
	Literatur . . . . .	267
<b>15</b>	<b>Dosismessgrößen und Beeinflussung der Dosis in der Computertomografie</b> . . . . .	269
15.1	CT-Dosismessung (CTDI, DLP) . . . . .	270
15.2	Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle in der Computertomografie . .	273
15.3	Scanparameter: Bedeutung für Bildqualität und Dosis . . . . .	273
15.3.1	Dosisbedarf und Rauschen . . . . .	273
15.3.2	Röhrenstrom . . . . .	275
15.3.3	Röhrenspannung . . . . .	275
15.3.4	Tischvorschub, Pitch-Faktor . . . . .	276
15.3.5	Schichtdicke . . . . .	276
15.3.6	Schichtdicke und 3-D Bildverarbeitung . . . . .	277

15.3.7	Bildrekonstruktion .....	278
15.3.8	Niedrigdosis-CT .....	278
15.4	Apparative Einflussfaktoren auf die Dosis .....	279
15.4.1	Filter .....	279
15.4.2	Overbeaming .....	280
15.4.3	Overranging .....	281
15.4.4	Mechanismen zur Dosisreduktion .....	282
15.5	Anwenderbedingte Einflussfaktoren auf die Dosis .....	286
15.5.1	Indikation für CT-Untersuchungen und rechtfertigende Indikation .....	286
15.5.2	Scanparameter und Untersuchungsprotokolle .....	290
	Literatur .....	291
<b>16</b>	<b>Strahlenschutz des Patienten in der Computertomografie</b> .....	<b>293</b>
16.1	Strahlenexposition des Patienten in der Computertomografie .....	293
16.2	Methoden zur Abschätzung der Patientenexposition in der Computertomografie .....	294
16.3	Maßnahmen zur Dosisreduktion beim Patienten in der Computertomografie – Strahlenschutzmittel, Patientenlagerung .....	295
16.3.1	Lagerung .....	295
16.3.2	Strahlenschutzmittel .....	296
	Literatur .....	298
<b>17</b>	<b>Strahlenschutz bei Anwendung spezieller Techniken in der   Computertomografie (z. B. Kardio-CT, CT-Fluoroskopie,   pädiatrisches CT)</b> .....	<b>301</b>
17.1	Kardio-CT .....	301
17.2	CT-Fluoroskopie .....	302
17.3	CT in der Pädiatrie .....	303
	Literatur .....	304
<b>18</b>	<b>Prüfungsfragen zum Spezialkurs Computertomografie</b> .....	<b>307</b>
18.1	Fragen .....	307
18.2	Die Lösungen .....	313
	<b>Vergleich der Nummern der Paragraphen der Röntgenverordnung (RöV),   des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) und der Strahlenschutzverordnung   (StrlSchV)</b> .....	<b>315</b>
	<b>Gesetze, Verordnungen, Richtlinien, Leitlinien,   Empfehlungen und Referenzwerte</b> .....	<b>319</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>325</b>

## Verzeichnis der Abkürzungen

<i>Abkürzungsverzeichnis</i>		
Abkürzung	Abkürzung für	deutsch/erweiterte Bedeutung
µm	Mikrometer	10 <sup>-6</sup> m
ABS	Acryl-Butadien-Styrol	Kunststoff für die Hülle der Gleitschattendosimeter
ADR	automatic dose regulation	automatische Dosisregulationen
AEC	automatic exposure control	automatische Röhrenstrommodulation
ALARA	as low as reasonably achievable	Grundsatz im Strahlenschutz
BÄK	Bundesärztekammer	
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz	
BG	Berufsgenossenschaft	
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
BP	Belichtungspunkt	
Bq	Becquerel	
BV	Bildverstärker	
CaF <sub>2</sub>	Kalziumfluorid	
CCT	kraniale Computertomografie	
CESM	contrast enhanced spectral mammography	Kontrastmittelmammografie
CNR	contrast to noise ratio	Kontrast-Rausch-Verhältnis
CR	computed radiography	digitale Radiografie mit Speicherfolien
CsJ	Cäsiumjodid	
CT	Computertomografie	
CTDI	computed tomography dose index	CT-Dosis-Index
CTDI <sub>vol</sub>	volume computed tomography dose index	Volumen-CT-Dosis-Index
CTDI <sub>w</sub>	weighted computed tomography dose index	gewichteter CT-Dosis-Index
CT-Expo	Computertomografie-Exposition	Computerprogramm zur Berechnung der Strahlenexposition beim Patienten in der Computertomografie

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		
Abkürzung	Abkürzung für	deutsch/erweiterte Bedeutung
D	absorbed dose	Energiedosis
DEXA	dual energy X-ray absorptiometry	Methode zur Knochendichtemessung
DFP	Dosisflächenprodukt	
DI	deviation index	Deviationsindex
DICOM	digital imaging and communications in medicine	Datenformat in der medizinischen Bildgebung
DIN	Deutsches Institut für Normung	
DL	Durchleuchtung	
DLP	Dosislängenprodukt	
DLR	digitale Lumineszenzradiografie	digitale Speicherfolienradiografie
DNA	deoxyribonucleic acid	Desoxyribonukleinsäure
DQE	detective quantum efficiency	Quantenwirkungsgrad eines Bildempfängersystems
DR	digital radiology	digitale Radiografie mit Flachbilddetektoren
DRW	diagnostischer Referenzwert	
DSA	digitale Subtraktionsangiografie	
DVT	digitale Volumentomografie	
E	effective dose	effektive Dosis
EHz	Exahertz	$10^{18}$ Herz
EI	exposure index	Dosisindikator
EI <sub>T</sub>	target exposure index	optimaler Dosisindikatorwert
EMI	Electric and Musical Industries Ltd.	britische Firma, die den ersten klinischen Computertomografen entwickelt hat
EPD	elektronisches Personendosimeter	
eV	Elektronenvolt	
F	Brennfleck	
FFS	Film-Folien-System	
FoOA	Fokus-Objekt-Abstand	
GHz	Gigahertz	$10^9$ Herz
GSDf	DICOM-Grayscale-Standard-Display-Function	Leuchtdichtekennlinie für Befundungsmonitore
Gy	Gray	Einheit der Energiedosis
H	dose equivalent	Äquivalentdosis
H*	Wasserstoffradikal	
H'(0,07)	Richtungsäquivalentdosis in 0,07 mm Gewebetiefe	
H'(3)	Richtungsäquivalentdosis in 3 mm Gewebetiefe	
H*(10)	Umgebungsäquivalentdosis in 10 mm Gewebetiefe	
HBO	hyperbare Oxygenierung	
HE	Hounsfield-Einheit	
Hp	personal dose equivalent	Personendosis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		
Abkürzung	Abkürzung für	deutsch/erweiterte Bedeutung
Hp(0,07)	Oberflächen-Personendosis	
Hp(3)	Augenlinsen-Personendosis	
Hp(10)	Tiefen-Personendosis	
H <sub>T</sub>	equivalent dose	Organdosis
HU	hounsfield unit	Hounsfield-Einheit
HWZ	Halbwertszeit	
ICRP	International Commission on Radiological Protection	internationales Gremium für die Festlegung weltweit geltender Standards im Strahlenschutz
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurement	internationales Gremium für die Festlegung weltweit geltender Standards hinsichtlich der Dosismessung
IEC	International Electrotechnical Commission	internationales Normungsgremium für Elektrotechnik
IHE PDI	integrating the healthcare enterprise portable document imaging	medizinisches Bilddatenformat, Spezifikation des DICOM-Standards
ImPACT	ImPACT CT Dosimetry spreadsheet	Computerprogramm zur Berechnung der Strahlenexposition beim Patienten in der Computertomografie
INWORKS	international nuclear workers study	Studie über die gesundheitlichen Folgen der Strahlenexposition von Beschäftigten in der Nuklearindustrie in den USA, Großbritannien und Frankreich
K	Kilobit	10 <sup>3</sup> Bit
KIS	Krankenhausinformationssystem	
L	Linienzahl	Kenngroße eines Streustrahlenrasters
LET	linear energy transfer	Lineares Energieübertragungsvermögen
LiF	Lithiumfluorid	
LNT	linear no threshold	lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellendosis
Lp	Linienpaar	
LUT	Lookup-Tabelle	
mAs	Milliamperesekunde	10 <sup>-3</sup> Amperesekunde
MeV	Megaelektronenvolt	10 <sup>6</sup> Elektronenvolt
MFA	medizinische(r) Fachangestellte(r)	
MGD	mean glandular dose	relevante Dosis in der Mammografie
MHz	Megahertz	10 <sup>6</sup> Hertz
MinIP	minimum intensity projection	Minimumintensitätsprojektion
MIP	maximum intensity projection	Maximumintensitätsprojektion
mm	Millimeter	10 <sup>-3</sup> Meter
MP-BetreibV	Medizinprodukte-Betreiber-Verordnung	
MPE	Medizinphysikexperte	
MPG	Medizinproduktegesetz	

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		
Abkürzung	Abkürzung für	deutsch/erweiterte Bedeutung
MPR	multiplanar reformatting	Multiplanare Reformation
MRT	Magnetresonanztomografie	Kernspintomografie
MSCT	multislice-CT	Mehrzeilen-CT
MTA-R	medizinisch-technische(r) Assistent(in) Röntgen	
MTF	modulation transfer function	Modulationsübertragungsfunktion
MÜF	Modulationsübertragungsfunktion	
NAR	Normenausschuss Radiologie	
NiSV	Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen nicht ionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen	
nm	Nannometer	$10^{-9}$ Meter
NNH	Nasennebenhöhle	
NSF	nephrogene systemische Fibrose	
ODM	organ dose modulation	organbasierte Röhrenstrommodulation
OFiA	Objekt-Film-Abstand	
OH*	Hydroxylradikal	
OSL	optisch stimulierte Lumineszenz	
P	CT-Pitchfaktor	
pa	postero-anterior	
PACS	picture archiving and communication system	digitales Bildarchiv
PAS	publicly available specification	technische Spezifikation, die innerhalb einer Firma oder einer Gruppe von Firmen in Zusammenarbeit mit dem DIN als Werknorm oder übergeordnete Werknorm erstellt wird
PET	Positronen-Emissions-Tomografie	
PHz	Petaherz	$10^{15}$ Herz
pm	Picometer	$10^{-12}$ Meter
PR	Projektionsradiografie	
PSA	persönliche Schutzausrüstung	
PTB	Physikalisch-Technische-Bundesanstalt	
Q	quality factor	Qualitätsfaktor
QS-RL	Qualitätssicherungsrichtlinie	
r	Schachtverhältnis	Kenngroße eines Streustrahlenrasters
Rad	radiation absorbed dose	alte Einheit für Dosis
RBW	relative biologische Wirksamkeit	
Rem	roentgen equivalent in man	alte Einheit für Dosis
RIS	Radiologieinformationssystem	
Rn-222	Radon 222 Isotop	
RöV	Röntgenverordnung	
RPL	Radiophotolumineszenz	

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		
Abkürzung	Abkürzung für	deutsch/erweiterte Bedeutung
SNR	signal to noise ratio	Signal-Rausch-Verhältnis
SSD	shaded surface display	3D-Bilddarstellung in der Computertomografie
SSDE	size-specific dose estimates	Dosisabschätzung in der Pädiatrie
SSK	Strahlenschutzkommission	
SSR	Strahlenschutzregister	
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz	
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung	
sts	sliding thin slab	CT-Verfahren zur Bilddarstellung
Sv	Sievert	Einheit der Äquivalentdosis
SV-RL	Richtlinie für Sachverständigenprüfungen	
T	target	Zielorgan bei Strahlenexposition
$T_{1/2}$	Halbwertszeit	
TCM	tube current modulation	Röhrenstrommodulation
TFT	thin film transistor	
THz	Terahertz	$10^{12}$ Herz
Ti	target region	Zielregion
TLD	Thermolumineszenzdosimeter	
UFC	ultra fast ceramic	Szintillatorsubstanz in CT-Festkörperdetektoren
Ugeo	geometrische Unschärfe	
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation	
VNC	virtual non contrast	virtuelles Bild ohne Darstellung des Kontrastmittels anhand einer dual-energy CT-Untersuchung nach Kontrastmittelgabe
VRT	volumen rendering technique	3D-Bilddarstellung in der Computertomografie
WL	window level	Fensterlage
$w_R$	radiation weighting factor	Strahlungswichtungsfaktor
$w_T$	tissue weighting factor	Gewebewichtungsfaktor
WW	window width	Fensterweite
$\Gamma_H$	Äquivalentdosisleistungskonstante	

---

**Teil I**

**Grundkurs im Strahlenschutz für Ärzte  
und Medizinphysik-Experten**



# Entdeckung der Röntgenstrahlen und Grundlagen der Strahlenphysik

1

## Inhaltsverzeichnis

1.1 Die Entdeckung der Röntgenstrahlen und deren Bedeutung für Grundlagenwissenschaft und Anwendungen außerhalb der Medizin .....	3
1.2 Entstehung und Eigenschaften ionisierender Strahlung .....	4
1.2.1 Aufbau des Atoms .....	4
1.2.2 Arten ionisierender Strahlung .....	6
1.3 Wechselwirkung der Strahlung mit Materie .....	21
1.3.1 Photoabsorption .....	22
1.3.2 Compton-Streuung .....	24
1.3.3 Massen-Schwächungskoeffizient .....	25
1.3.4 Strahlenkontrast und Bildgebung .....	27
Literatur .....	37

## 1.1 Die Entdeckung der Röntgenstrahlen und deren Bedeutung für Grundlagenwissenschaft und Anwendungen außerhalb der Medizin

**Wilhelm Conrad Röntgen** (Nobelpreis für Physik 1901) war nicht der erste Mensch, der Röntgenstrahlen erzeugt hat. Zahlreiche Experimentatoren waren vor ihm auf die Idee gekommen, Elektroden innerhalb evakuierter Glasröhren unter eine hohe Spannung zu setzen. Die dabei erzeugten sogenannten „**Kathodenstrahlen**“ waren bereits 1858 von Julius Plücker entdeckt worden. Für eine ausreichend hohe Spannung stand Röntgen ein Funkeninduktor von Heinrich Daniel Ruhmkorff zur Verfügung. Auch der Einsatz von fluoreszierenden Substanzen zum Nachweis der Kathodenstrahlen war wissenschaftlicher Standard. In dem Labor von Röntgen befanden sich verschiedene fluoreszierende Substanzen wie z. B. ein Schirm mit Bariumplatinzyanid, mit dem er die von ihm entdeckten neuen Strahlen nachweisen konnte.

Die Besonderheit in dem Versuch von Röntgen bestand darin, dass er die Röhre mit einer dicken Schicht aus schwarzer Pappe umgeben hatte, die für die Kathodenstrahlen oder Lichtwellen undurchdringlich war. So konnte das Aufleuchten des Schirmes im dunklen Labor am Abend des 8. November 1895 nicht als ein Phänomen angesehen werden, das von den bekannten Kathodenstrahlen ausgelöst worden war. Es war das große Verdienst von Röntgen als erster zu erkennen, dass es sich hierbei um eine neue Art von Strahlung handeln musste. Des Weiteren war es seine Leistung, innerhalb von wenigen Wochen die grundlegenden physikalischen Eigenschaften der nach ihm benannten Röntgenstrahlung hinsichtlich Absorption, Ionisation und Schwärzung von Fotoplatten zu beschreiben und zu quantifizieren. Im Rahmen seiner Experimente entstand mit dem Röntgenbild der Hand seiner Frau Anna Bertha vom 22. Dezember 1895 die wohl erste fotografische Dokumentation einer Röntgenaufnahme eines menschlichen Körperteils. Auch das erste Strahlungsmessgerät, das auf dem Effekt der Ionisation beruhte, wurde von Röntgen entwickelt (Sándor 2014).

Es war ihm jedoch nicht vergönnt zu klären, ob es sich bei den von ihm entdeckten Strahlen um eine korpuskulare oder eine elektromagnetische Strahlung handelte. Für den Nachweis elektromagnetischer Wellen waren die Erzeugung von Beugung und Interferenzen notwendig. Die üblichen Beugungsgitter, die bei Lichtwellen Interferenzen erzeugen konnten, waren für die Röntgenstrahlung nicht fein genug. Erst 1912 konnte Max von Laue (Nobelpreis für Physik 1914) mithilfe eines Kristalls Beugung und Interferenzen bei Röntgenstrahlen nachweisen.

Entdeckungen wie die elementspezifische sogenannte „**charakteristische Röntgenstrahlung**“ (Charles Glover Barkla, Nobelpreis für Physik 1917) und der **Compton-Effekt** bei harter Strahlung (Arthur Holly Compton, Nobelpreis für Physik 1927) hatten Einfluss auf Modellvorstellungen des Atoms. Durch Experimente mit Beugung der Röntgenstrahlen an in Kristalle übergeführten Molekülen konnte eine Aussage über deren räumliche Struktur gemacht werden. Dies führte im Jahre 1953 zur Entdeckung der Doppelhelixstruktur der DNA und der Enträtselung des Mechanismus der genetischen Reproduktion durch James Watson und Francis Crick (gemeinsamer Nobelpreis für Medizin 1962). In der Astronomie werden Analysen von Röntgenstrahlen genutzt, um kosmische Ereignisse zu detektieren. Auch für technische Anwendungen wie z. B. im Rahmen der Materialprüfung werden Röntgenstrahlen eingesetzt. Es gibt neben den medizinischen Anwendungen in Diagnostik und Therapie viele Bereiche der Naturwissenschaften und der Technik, die von der Entdeckung der Röntgenstrahlung profitiert haben.

---

## 1.2 Entstehung und Eigenschaften ionisierender Strahlung

### 1.2.1 Aufbau des Atoms

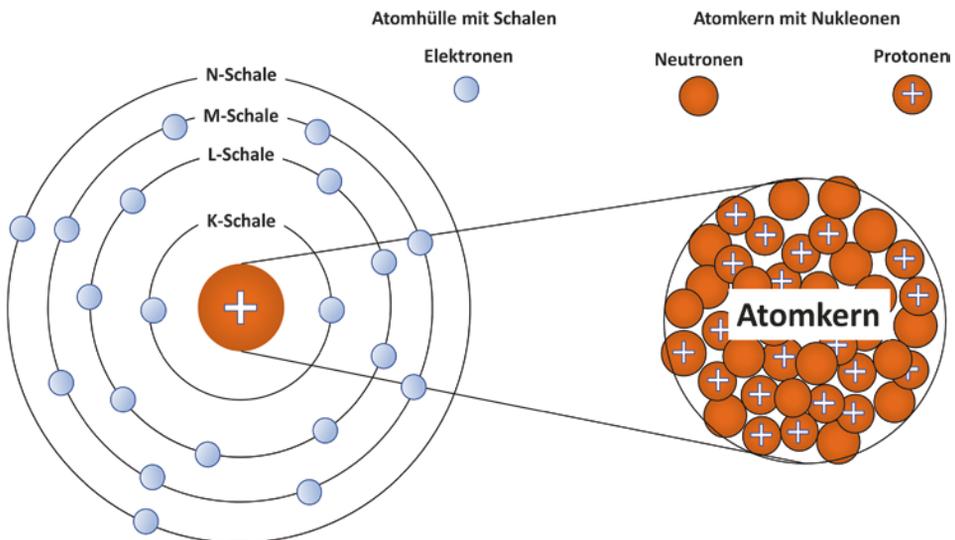
Sowohl die Entstehung ionisierender Strahlung als auch deren Interaktion mit Materie sind ohne Grundkenntnisse über den Aufbau der Atome nicht zu verstehen.

Bereits im vierten Jahrhundert vor Christi lehrte der griechische Philosoph Demokrit, dass die Materie aus unteilbaren Teilchen zusammengesetzt ist. Er nannte die Teilchen Atome nach dem griechischen Wort „atomos“ unteilbar. Joseph John Thomson postulierte 1903 aufgrund der Beschäftigung mit Kathodenstrahlen ein Atommodell, das aus positiven und negativ gela-

denen Teilchen, den Elektronen, besteht. Das Rutherfordsche Atommodell von 1911 (Ernest Rutherford, Nobelpreis für Chemie 1908) beschreibt einen positiv geladenen Atomkern, der nahezu die gesamte Masse des Atoms enthält, sowie eine Atomhülle aus Elektronen. 1913 schlägt Niels Bohr (Nobelpreis für Physik 1922) ein Modell vor, in dem neuere Erkenntnisse der **Quantenmechanik** aufgenommen wurden. James Chadwick (Nobelpreis für Physik 1935) gelang 1932 der experimentelle Nachweis für die Existenz des Neutrons.

Der **Atomkern** besteht aus Nukleonen (positiv geladene **Protonen** und elektrisch neutrale **Neutronen**) und hat eine **positive Ladung**. Die Anzahl der Protonen definiert die **Kernladungszahl**, die identisch mit der **Ordnungszahl**  $Z$  des Elementes im Periodensystem ist. Die Summe aus der Anzahl der Protonen und der Neutronen wird **Massenzahl** genannt. Alle Atome eines Elements haben zwar die gleiche Kernladungszahl bzw. Ordnungszahl, sie können aber eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen und damit eine unterschiedliche Massenzahl haben. Atome eines Elements mit unterschiedlicher Massenzahl werden **Isotope** genannt. Isotope werden durch den Namen des Elements mit zusätzlicher Angabe der Massenzahl gekennzeichnet (z. B. Radon-222 bzw. Rn-222). Vereinzelt findet sich noch der Zusatz „m“ für „**metastabil**“ wie beim Technetium-99m.

Der Atomkern wird von negativ geladenen **Elektronen** auf bestimmten definierten Bahnen umkreist. Diese definierten Bahnen ermöglichen eine Bewegung der Elektronen um den Atomkern herum, ohne dass es zu einem Energieverlust der Elektronen durch Aussendung einer Strahlung kommt. Diese Bahnen werden **Schalen** genannt und nach dem Alphabet beginnend mit K bezeichnet (K, L, M, N, O, P, Q; von zentral nach peripher) (Abb. 1.1). Eine verfeinerte Analyse von **Röntgenspektren** verschiedener Elemente ermöglicht eine weitergehende Differenzierung der Schalen mit unterschiedlichen Energieniveaus der Elektronen innerhalb einer Schale (I, II, III usw.)



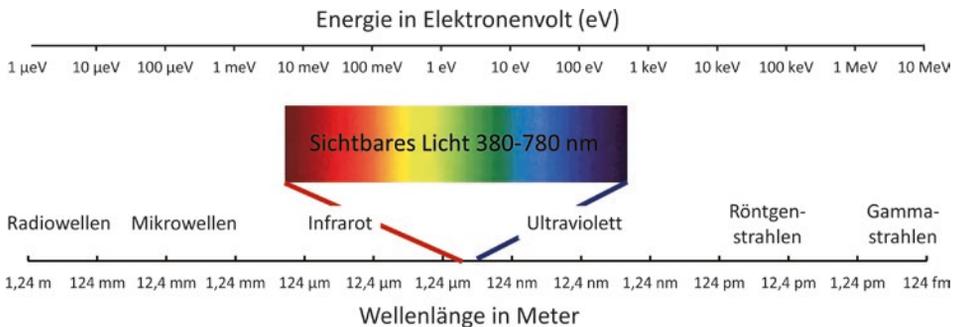
**Abb. 1.1** Schalenmodell eines Atoms nach Niels Bohr. Elektronen umkreisen einen positiv geladenen Atomkern auf definierten Umlaufbahnen (Schalen), ohne kinetische Energie zu verlieren (Schemazeichnung nicht maßstabsgerecht)

## 1.2.2 Arten ionisierender Strahlung

### 1.2.2.1 Röntgen- und Gammastrahlung

- Röntgen- und Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellen, die sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

**Röntgen- und Gammastrahlen** unterscheiden sich von anderen **elektromagnetischen Strahlungen** wie Radiowellen, Infrarotstrahlung, sichtbarem Licht und Ultraviolettstrahlung durch eine höhere Frequenz und damit verbunden eine sehr kurze Wellenlänge mit Durchdringung der Gewebe (Abb. 1.2, Tab. 1.1). Röntgenstrahlen und Gammastrahlen unterscheiden sich überwiegend hinsichtlich ihrer Strahlenenergie. Gammastrahlen sind hochenergetische Röntgenstrahlen, die z. B. beim radioaktiven Kernzerfall auftreten.



**Abb. 1.2** Elektromagnetische Strahlung in Abhängigkeit von der Energie und der Wellenlänge der Strahlung (logarithmische Skala)

**Tab. 1.1** Unterteilung der elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Frequenz

Parameter	Radio- wellen	Mikrowel- len	Infrarot	Sichtbares Licht	Ultraviolett	Röntgen- strahlen	Gamma- strahlen
Wellenlänge	>1 m	1 m bis 1 mm	<1 mm bis 780 nm	<780 nm bis 380 nm	<380 nm bis 1 nm	<1 nm bis 10 pm	<10 pm
Frequenz	<300 MHz	>300 MHz bis 300 GHz	>300 GHz bis 385 THz	>385 THz bis 789 THz	>789 THz bis 300 · PHz	>300 PHz bis 30 EHz	>30 EHz
1 mm (Millimeter) = $10^{-3}$ m 1 $\mu\text{m}$ (Mikrometer) = $10^{-6}$ m 1 nm (Nanometer) = $10^{-9}$ m 1 pm (Picometer) = $10^{-12}$ m				1 MHz (Megahertz) = $10^6$ Hz 1 GHz (Gigahertz) = $10^9$ Hz 1 THz (Terahertz) = $10^{12}$ Hz 1 PHz (Petahertz) = $10^{15}$ Hz 1 EHz (Exahertz) = $10^{18}$ Hz			

- Elektromagnetische Strahlung transportiert und überträgt Energie. Die Energieübertragung erfolgt durch Lichtquanten (Photonen). Die Energie einer Strahlung mit der Einheit Elektronenvolt (eV) entspricht der Energie eines einzigen Photons dieser Strahlung.

Die Energie einer Strahlung ist proportional zur Frequenz und umgekehrt proportional zur Wellenlänge der elektromagnetischen Welle (Tab. 1.2 und 1.3). Die **Strahlenenergie** bestimmt die Eigenschaften der Strahlung und damit auch die Art der Wechselwirkung der

**Tab. 1.2** Energie einer elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der Frequenz und der Wellenlänge

Formel	$E_p = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ <p> <math>E_p</math>: Energie des Photons  <math>h</math>: Plancksches Wirkungsquantum (<math>4,135667662 \cdot 10^{-15}</math> eVs)  <math>f</math>: Frequenz der elektromagnetischen Welle (Hertz, 1 Hz = 1/s)  <math>c</math>: Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (<math>2,99792458 \cdot 10^8</math> m/s)  <math>\lambda</math>: Wellenlänge der elektromagnetischen Welle (m) </p>
Einheit	Elektronenvolt, 1 eV = $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Joule

**Tab. 1.3** Beispiel für die Berechnung der Frequenz und der Wellenlänge einer Röntgenstrahlung

Fragestellung	Die Energie einer Röntgenstrahlung beträgt 120 keV (Kiloelektronenvolt). Wie groß sind die Frequenz und die Wellenlänge der Strahlung?	
Ausgangsformel	$E_p = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$ $E_p$ : Energie des Photons $h$ : Plancksches Wirkungsquantum ( $4,135667662 \cdot 10^{-15}$ eVs) $f$ : Frequenz der elektromagnetischen Welle (Hertz, 1 Hz = 1/s) $c$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s) $\lambda$ : Wellenlänge der elektromagnetischen Welle (m)	
Berechnung der Frequenz	Formel	$f = \frac{E_p}{h}$
	Rechenweg	$\frac{120 \cdot 10^3 \text{ eV}}{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 2,9 \cdot 10^{19} \text{ 1/s}$
	Ergebnis	Die Frequenz einer Strahlung von 120 keV beträgt $2,9 \cdot 10^{19}$ Hz.
Berechnung der Wellenlänge	Formel	$\lambda = \frac{c}{f}$
	Rechenweg	$\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,90 \cdot 10^{19} \cdot 1/\text{s}} = 1,03 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
	Ergebnis	Die Wellenlänge einer Strahlung von 120 keV beträgt $1,03 \cdot 10^{-11}$ m.

Strahlung mit der durchstrahlten Materie. Die Strahlenenergie, die sich auf das einzelne **Photon** der Strahlung bezieht, darf nicht mit der **Energiedosis** verwechselt werden, die im Rahmen der Strahlenabsorption auf das Gewebe übertragen wurde.

- ▶ Energiereiche Strahlung hat eine hohe Frequenz und eine kurze Wellenlänge. Energiearme Strahlung hat eine niedrige Frequenz und eine lange Wellenlänge.
- ▶ Aufgrund der Fähigkeit der Röntgenstrahlung, Elektronen aus der Atomhülle herauszulösen und damit positiv geladene Atome (Ionen) zu erzeugen, wird sie als ionisierende Strahlung bezeichnet.
- ▶ Elektromagnetische Strahlung mit hoher Energie, die im Rahmen der Radioaktivität entsteht, wird Gammastrahlung genannt.

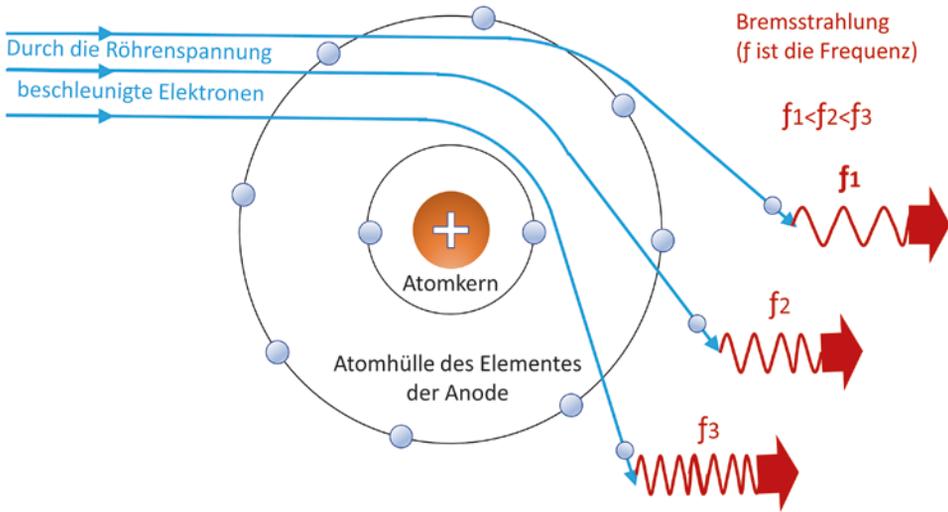
Der Begriff „Gammastrahlung“ galt ursprünglich für elektromagnetische Strahlung, die im Rahmen der natürlichen oder künstlichen Radioaktivität durch Prozesse im Atomkern freigesetzt wird. Der Begriff „Röntgenstrahlung“ wurde für künstliche mittels Röntgenröhren erzeugte Bremsstrahlung verwendet. Da die Strahlung bei radioaktiven nuklearen Prozessen üblicherweise höherenergetisch ist (im Bereich von Megaelektronenvolt, MeV), wurde der Begriff „Gammastrahlung“ zunehmend auf jede höherenergetische elektromagnetische Strahlung  $>200$  keV angewandt. Es gibt jedoch auch radioaktiv entstandene „weiche Gammastrahlung“ mit einer Energie von unter 200 keV (z. B. Technetium-99m mit 143 keV) bzw. durch **Linearbeschleuniger** erzeugte „ultraharte Röntgenstrahlung“ von vielen MeV. Hier überschneiden sich die Begrifflichkeiten.

- ▶ Radioaktiv entstandene Strahlung weist in der spektralen Analyse im Gegensatz zur kontinuierlichen Verteilung der Röntgenbremsstrahlung eine diskrete Verteilung mit Spektrallinien auf.

### Bremsstrahlung

Röntgenstrahlung entsteht durch den Aufprall von beschleunigten Elektronen auf eine **Anode** aus Materie wie z. B. **Wolfram oder Molybdän**. Die Beschleunigung der Elektronen erzielt man durch eine hohe elektrische Spannung von mehreren tausend Volt (Kilovolt, kV), die an zwei Elektroden (**Kathode, Anode**) in einem Vakuum angelegt wird. Die beschleunigten negativ geladenen Elektronen verlieren in der Nähe der positiv geladenen Atomkerne des Anodenmaterials aufgrund der elektrostatischen Anziehung (**Coulomb-Wechselwirkung**) einen Teil ihrer kinetischen Energie, ändern ihre Richtung und werden abgebremst (Abb. 1.3). Bei diesem Bremsvorgang entsteht zum größten Teil Hitze, die das Material der Anode zum Glühen bringt. 99 % der emittierten Gesamtenergie ist Wärmeenergie in Abhängigkeit von dem Anodenmaterial und der Röhrenspannung. Der Anteil der **Bremsstrahlung** an der emittierten Gesamtenergie beträgt lediglich 1 %.

Je mehr sich die negativ geladenen Elektronen dem positiv geladenen Kern nähern, desto stärker werden sie abgebremst und umso größer ist die Energieübertragung auf die



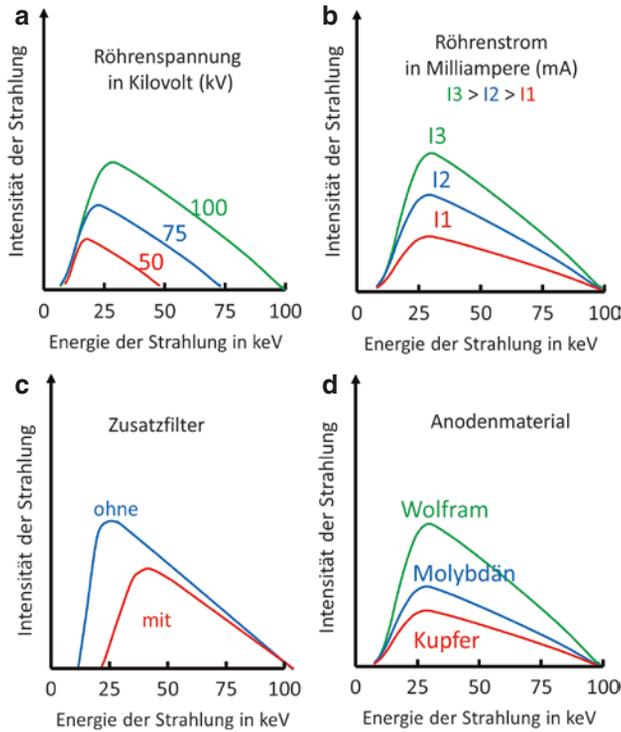
**Abb. 1.3** Entstehung der **Bremsstrahlung**. Die im Vakuum der Röntgenröhre durch die angelegte Hochspannung beschleunigten negativen Elektronen werden von den positiv geladenen Atomkernen abgelenkt und abgebremst. Je mehr sich ein Elektron dem Atomkern annähert, desto größer ist sein Verlust an kinetischer Energie und desto energiereicher (höhere Frequenz) ist die Bremsstrahlung

Photonen der emittierten Strahlung. Da die Energie und damit auch die Frequenz der emittierten Bremsstrahlung von der Entfernung der auftreffenden Elektronen zum Atomkern des Anodenmaterials abhängt und der Abstand für jedes Elektron unterschiedlich ist, werden bei dem Bremsvorgang alle Frequenzen bis zur maximalen Frequenz (**Grenzfrequenz**, abhängig von der Röhrenspannung) in unterschiedlicher Intensität erzeugt.

- Das abgebremste Elektron gibt einen geringen Teil seiner kinetischen Energie in Form von elektromagnetischer Röntgenstrahlung ab. Diese Art von Röntgenstrahlung nennt man Bremsstrahlung.

Ähnlich wie bei der Spektralanalyse des sichtbaren Lichtes durch Beugung eines Lichtstrahls im Prisma kann das **Spektrum** der emittierten Röntgenstrahlung (Intensität der Strahlung in Abhängigkeit von der Strahlenenergie) durch Beugung mittels eines Kristalls analysiert und grafisch dargestellt werden. Bei der Bremsstrahlung handelt es sich um eine **polychromatische Strahlung** mit einer kontinuierlichen Verteilung der Energie der Photonen. Der Gipfel der Strahlungsintensität liegt in der ersten Hälfte der Verteilung. Die maximale Photonenenergie des Spektrums (**Grenzenergie**) entspricht der Röhrenspannung, die zwischen der Kathode und der Anode angelegt wurde und die für die Beschleunigung der Elektronen verantwortlich ist.

Das Anodenmaterial hat auf die **Grenzenergie** keinen Einfluss (Abb. 1.4). Es beeinflusst jedoch die Intensität der erzeugten Strahlung ähnlich wie der **Röhrenstrom**. Dieser Effekt



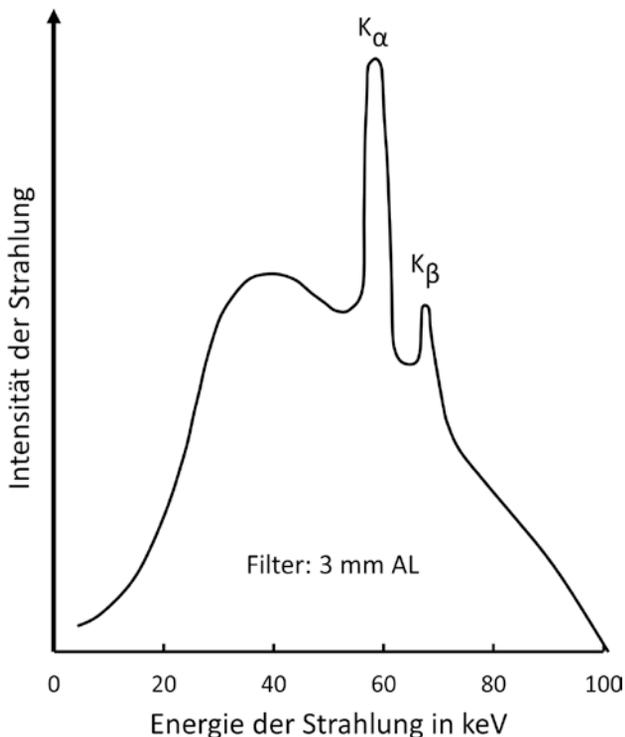
**Abb. 1.4** Einfluss verschiedener Parameter auf das Spektrum der Bremsstrahlung: **a)** Spektrum der Bremsstrahlung in Abhängigkeit von der Röhrenspannung (in kV (Kilovolt)): In Abhängigkeit von der angelegten **Röhrenspannung** verschiebt sich die Grenzeenergie (maximale Energie der Strahlung). Gleichzeitig sinkt das Maximum der Strahlenintensität mit abnehmender Röhrenspannung. **b)** Spektrum der Bremsstrahlung in Abhängigkeit vom **Röhrenstrom**; Die Grenzeenergie bleibt erhalten, lediglich die Intensität der Strahlung ändert sich. **c)** Spektrum der Bremsstrahlung in Abhängigkeit von den **Zusatzfiltern**: Die Strahlenintensität wird überwiegend in den niedrigen Energiebereichen reduziert. **d)** Spektrum der Bremsstrahlung in Abhängigkeit vom **Anodenmaterial**: Die Strahlenintensität ist bei Verwendung einer Wolframanode am größten

ist abhängig von der Ordnungszahl  $Z$  des Anodenmaterials. So erzeugt eine Wolframanode (Ordnungszahl  $Z = 74$ ) eine deutlich höhere Strahlungsintensität als eine Molybdänanode (Ordnungszahl  $Z = 42$ ).

### Charakteristische Strahlung

Bei genauerer Analyse des Spektrums einer emittierten Röntgenstrahlung erkennt man, dass aus der kontinuierlichen Energieverteilung der Bremsstrahlung einzelne Intensitätsspitzen herausragen (Abb. 1.5). Die Energieniveaus (angegeben in keV (Kiloelektronenvolt)) der charakteristischen Strahlung haben für jedes Anodenmaterial die gleichen Werte und sind unabhängig von der angelegten Röhrenspannung. Da aufgrund der Energieniveaus dieser Spitzen das Element bestimmt werden kann, das die Strahlung aussendet,

**Abb. 1.5** Spektrum der von einer Wolframanode emittierten Röntgenstrahlung (Filter 3mm Aluminium) in Abhängigkeit von der Strahlenenergie. Die Bremsstrahlung wird von der charakteristischen Strahlung mit den Intensitätsspitzen  $K_\alpha$  und  $K_\beta$  überlagert (nach Petzold und Krieger 1988)

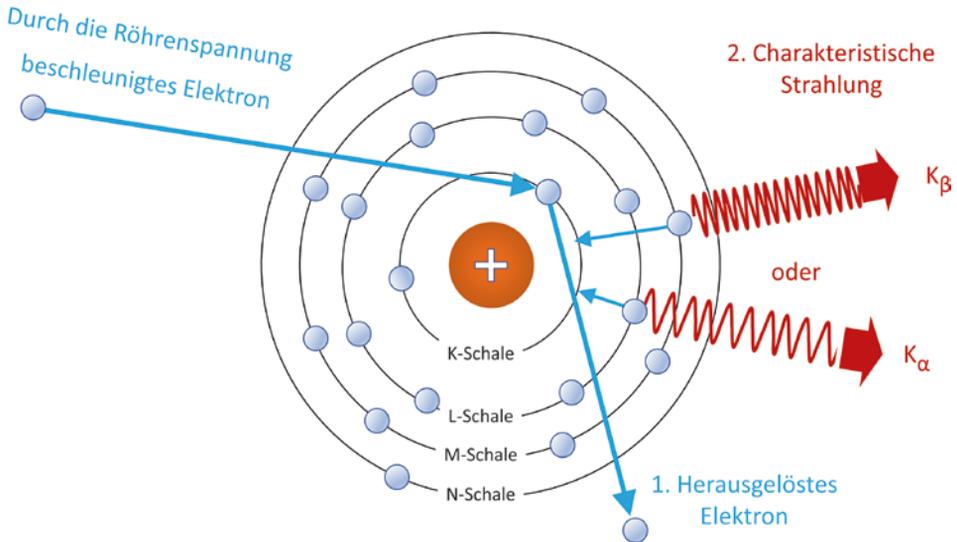


wird die Strahlung „**charakteristische Strahlung**“ genannt. Das Energiespektrum der Bremsstrahlung wird von dem Energiespektrum der charakteristischen Strahlung überlagert.

Die charakteristische Strahlung entsteht beim Zusammenstoß einzelner beschleunigter Elektronen mit Elektronen aus der Atomhülle des Anodenmaterials (Abb. 1.6). Hierbei werden Elektronen des Anodenmaterials aus einer inneren Schale der Atomhülle „herausgeschossen“. Der vakante Platz wird durch ein Elektron einer äußeren Schale aufgefüllt, die wiederum aufgefüllt wird usw. Ein Wechsel eines Elektrons von einer äußeren auf eine innere Schale einer Atomhülle hat eine Veränderung der Energie dieses Elektrons zur Folge. Die freigewordene Energie wird von dem springenden Elektron auf ein Photon der emittierten elektromagnetischen Strahlung übertragen. Die Energieniveaus der charakteristischen Strahlung entsprechen demnach den Energiedifferenzen zwischen den Elektronen der jeweiligen Schalen, zwischen denen die Elektronensprünge stattgefunden haben.

- Die Energiewerte der Spektrallinien der charakteristischen Röntgenstrahlung sind ausschließlich vom Anodenmaterial abhängig.

Da in jedem Element die Elektronen in den verschiedenen Schalen unterschiedlich stark angebonden sind, haben die gleichnamigen Schalen unterschiedlicher Elemente auch unterschiedliche Energieniveaus. Ein Sprung auf die K-Schale wird als „K-Linie“, ein



**Abb. 1.6** Erzeugung der charakteristischen Strahlung: 1. Ein beschleunigtes Elektron trifft auf ein Elektron einer inneren Schale der Atomhülle des Anodenmaterials und „schießt“ dies aus der Atomhülle. 2. Die entstandene Lücke wird durch Elektronen äußerer Schalen aufgefüllt (z. B. K<sub>α</sub>-Strahlung durch Sprung eines Elektrons von der L-Schale auf die K-Schale und K<sub>β</sub>-Strahlung durch Sprung eines Elektrons von der M-Schale auf die K-Schale). Die hierbei jeweils freigesetzte Energie wird als charakteristische Strahlung emittiert. Die Energie der charakteristischen Strahlung entspricht den Energiedifferenzen zwischen den Elektronen der Schalen

**Tab. 1.4** Charakteristika der emittierten charakteristischen Strahlung (Spektrallinien) einer Anode aus Wolfram bzw. Molybdän

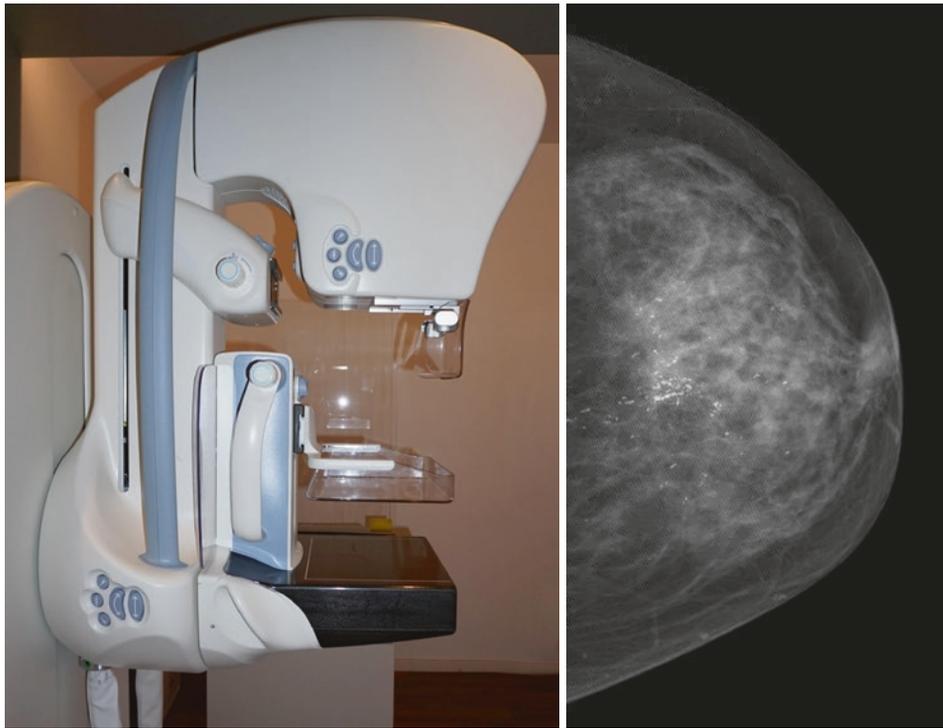
Name der Spektrallinie	Übergänge der Elektronen der Schalen K, L, M bzw. N (Unterschalen II bzw. III) auf die K-Schale	Energie der emittierten charakteristischen Strahlung einer Wolfram-Anode in keV (Kiloelektronenvolt)	Energie der emittierten charakteristischen Strahlung einer Molybdän-Anode in keV (Kiloelektronenvolt)
K <sub>α1</sub>	L <sub>III</sub> ->K	59,32	17,48
K <sub>α2</sub>	L <sub>II</sub> ->K	57,98	17,37
K <sub>β1</sub>	M <sub>III</sub> ->K	67,24	19,6
K <sub>β2</sub>	N->K	69,07	

Hübner 1974

Sprung auf die L-Schale als „L-Linie“ usw. definiert. Eine weitergehende Differenzierung erfolgt mit den Indices „α“, „β“, „γ“ und einer Nummerierung.

Eine Übersicht der emittierten **Spektrallinien** der als **Anodenmaterialien** verwendeten Elemente **Wolfram** und **Molybdän** zeigt Tab. 1.4.

Die Mammografie ist das einzige medizinisch eingesetzte Röntgenverfahren, bei dem die charakteristische Strahlung einer Anode aus Molybdän mit einer Energie der K-Linien



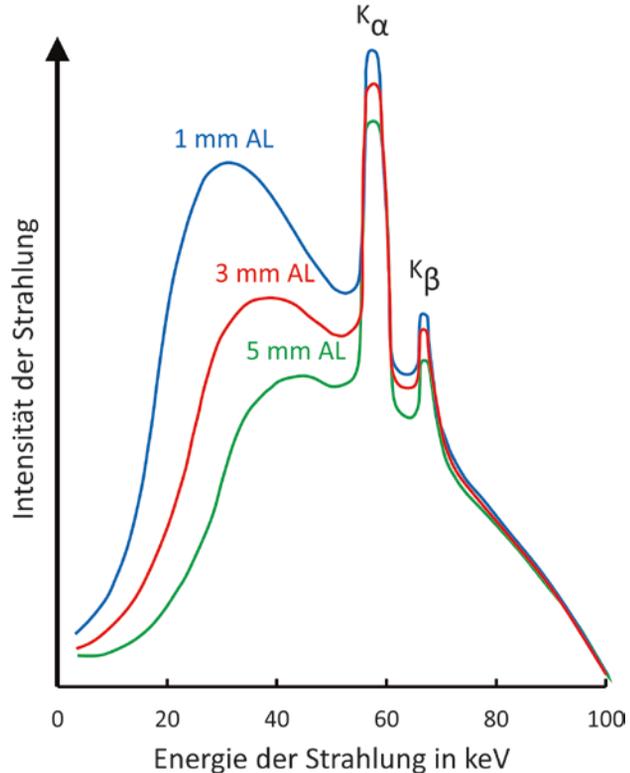
**Abb. 1.7** Mammografiegerät und Mammografie mit Darstellung malignomtypischer Mikroverkalkungen (weiße Kalkpunkte)

von weniger als 20 keV (zusätzlich zur Bremsstrahlung mit einem niedrigen Energiemaximum von unter 30 keV) zu einem signifikanten Anteil für die Bildgebung eingesetzt wird. Hierbei macht man sich den hohen Kalk/Weichteilkontrast im niedrigen Energiebereich zu Nutze. Der durch diese niederenergetische (weiche) Strahlung sehr empfindliche Nachweis feinsten Verkalkungen (Mikrokalk, kleiner als 100  $\mu\text{m}$ ) ist für die Früherkennung von Brustkrebs von entscheidender Bedeutung (Abb. 1.7).

### Aufhärtung der Strahlung

Niederenergetische Strahlung ist oft nicht in der Lage, Körperstrukturen ausreichend zu durchdringen und mit der austretenden Strahlung ein Bild zu erzeugen, da sie stärker vom durchstrahlten Körper absorbiert wird und damit lediglich zur Strahlenbelastung des Körpers beiträgt. Bereits bei der Erzeugung der Röntgenstrahlen wird der niederenergetische Anteil der Gesamtstrahlung beim Durchtritt durch die Röntgenröhre, durch das umgebende Öl, das Austrittsfenster sowie das Tiefenblendensystem überproportional geschwächt. Diese sogenannte **Eigenfilterung** der Röntgenröhre zusammen mit dem Röhrengehäuse entspricht einer Filterung durch ein Aluminiumblech von ca. 2,5 mm Dicke (entsprechend einem sogenannten Aluminium – Gleichwert von 2,5 mm). Durch **Zusatzfilter** wie dünne

**Abb. 1.8** Spektren einer Röntgenstrahlung bei Verwendung unterschiedlich dicker Aluminiumbleche als Filter. Filter reduzieren überwiegend die niederenergetischen Anteile der Strahlung (Aufhärtung der Strahlung) (nach Petzold und Krieger 1988)



Aluminium- (1 mm) oder Kupferbleche (0,1–0,2 mm) kann der niederenergetische Strahlungsanteil weiter herausgefiltert werden, sodass überwiegend der höherenergetische Anteil der Strahlung für die Bildgebung zur Verfügung steht und die Strahlenexposition für den Patienten reduziert ist (Abb. 1.8). Dieses Vorgehen nennt man **Aufhärtung** der Strahlung. Gleichzeitig wird die spektrale Verteilung der Strahlung einheitlicher, d. h. homogener. Das Verhältnis der niederenergetischen und höherenergetischen Strahlungsanteile in der spektralen Verteilung zueinander definiert die **Strahlenqualität**.

Der Nachteil einer Aufhärtung der Strahlung durch Filter ist die Schwächung der Intensität der Gesamtstrahlung mit Verlängerung der Belichtungszeiten sowie ein Verlust an Kontrast zwischen Knochen- und Weichteilstrukturen aufgrund der relativen Zunahme des höherenergetischen Strahlungsanteils.

Entsprechend der Leitlinie der Bundesärztekammer muss bei Aufnahmen am Körperstamm von Säuglingen, Kindern und Jugendlichen eine zusätzliche Filterung (Metallplättchen) von mindestens 0,1 mm Kupfer-Gleichwert in den Strahlengang eingebracht werden. Röntgenuntersuchungen in der pädiatrischen Radiologie erfordern daher besonders leistungsstarke Röntgenanlagen, da einerseits die Gesamtstrahlung durch die Zusatzfilter geschwächt wird, andererseits für Kinder in der Leitlinie besonders kurze Belich-