
Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes

Hanno Krieger

Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes

6. Auflage

 Springer Spektrum

Hanno Krieger
Ingolstadt, Deutschland
hanno.krieger@t-online.de

ISBN 978-3-662-60583-7 ISBN 978-3-662-60584-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60584-4>

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2004, 2007, 2009, 2012, 2017, 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.

Einbandabbildung: Deblik, Berlin
Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer Spektrum 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 zur sechsten Auflage

Das vorliegende Buch ist die sechste überarbeitete und wegen der EU-Vorgaben zum Strahlenschutz und den neuen SI-Einheiten aktualisierte Auflage des Grundlagenbandes zur Strahlungsphysik und zum Strahlenschutz. In ihm werden die physikalischen, biologischen und rechtlichen Grundlagen der Strahlenkunde sowie die praktischen Verfahren zum Strahlenschutz dargestellt. Er richtet sich an alle diejenigen, die als Anwender, Lehrer oder Lernende mit ionisierender Strahlung zu tun haben, und soll eine ausführliche praxisorientierte Einführung in die Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes geben.

Mögliche Interessenten sind Medizinphysiker und sonstige Medizinphysikexperten, Techniker und Strahlenschutzingenieure, Radiologen und Radiologieassistenten, medizinische und technische Strahlenschutzbeauftragte und alle mit der Strahlenkunde befassten Lehrkräfte. Dieser Band deckt auch die einschlägigen Lehrinhalte für die Ausbildung und Examina der Radiologieassistenten und für die technisch-physikalischen und medizinischen Strahlenschutzkurse ab.

Das Buch gliedert sich in fünf große Abschnitte. Der erste Teil befasst sich mit den physikalischen Grundlagen der Strahlenkunde und den Wechselwirkungen der ionisierenden Strahlungsarten mit Materie. Ausführlich dargestellt werden die verschiedenen Wechselwirkungsprozesse der Photonen und Neutronen und das Schwächungsgesetz für diese ungeladenen Teilchen sowie die Wechselwirkungen der wichtigsten geladenen Korpuskeln - Elektronen, Protonen und Alphateilchen.

Der zweite Teil behandelt die verschiedenen Dosisgrößen und Dosisbegriffe in der neuesten aktualisierten Version. In diesem Abschnitt werden auch die praktischen Verfahren zur Berechnung bzw. Abschätzung der Dosisleistungen in Strahlungsfeldern dargestellt.

Im dritten Teil werden zunächst die strahlenbiologischen Prinzipien, die verschiedenen Wirkungen ionisierender Strahlung auf den Menschen und die epidemiologischen Grundlagen des Strahlenschutzes erläutert. Es folgt eine umfassende Darstellung der natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexpositionen.

Der vierte Teil des Buches beschreibt die Prinzipien des praktischen Strahlenschutzes. Er beginnt mit einer Zusammenstellung der aktualisierten und stark modifizierten rechtlichen Grundlagen des Strahlenschutzes. Anschließend werden die Rechenmethoden zur Dimensionierung von Strahlenabschirmungen an Hand einer Reihe praktischer Anwendungen erklärt. In einem gesonderten Kapitel werden ausführlich die Strahlenexpositionen in der medizinischen Radiologie sowie die korrekten Verhaltensweisen zum Schutz der Patienten und des radiologischen Personals bei den verschiedenen medizinischen Strahlungsanwendungen behandelt.

Den Abschluss bildet ein aktualisierter und erweiterter Tabellenanhang mit den wichtigsten für den praktischen Strahlenschutz erforderlichen Basisdaten.

Alle Kapitel beginnen mit einem kurzen Überblick über die dargestellten Themen. Am Ende jeden Abschnitts finden sich als Gedächtnisstütze knappe Zusammenfassungen und Wiederholungen der wichtigsten Inhalte sowie ein Anhang mit einschlägigen Übungsaufgaben. Die ausformulierten Lösungen dieser Aufgaben wurden in einem gesonderten Kapitel am Ende des Buches zusammengefasst.

Um den unterschiedlichen Anforderungen und Erwartungen der Leser an ein solches Lehrbuch gerecht zu werden, wurde der zu vermittelnde Stoff generell in grundlegende Sachverhalte und weiterführende Ausführungen aufgeteilt. Letztere befinden sich entweder gesondert in den mit einem Stern (*) markierten Kapiteln oder in den entsprechend markierten Passagen innerhalb des laufenden Textes. Sie enthalten Stoffvertiefungen zu speziellen radiologischen und physikalischen Problemen und können bei der ersten Lektüre ohne Nachteil und Verständnisschwierigkeiten übergangen werden. Soweit wie möglich wurde in den grundlegenden Abschnitten auf mathematische Ausführungen verzichtet. Wenn dennoch mathematische Darstellungen zur Erläuterung unumgänglich waren, wurden nur einfache Mathematikkenntnisse vorausgesetzt.

Neben den grundlegenden Ausführungen enthält dieser Band im laufenden Text zahlreiche Beispiele, sowie Tabellen und Grafiken zur technischen und medizinischen Radiologie, die bei der praktischen Arbeit sehr hilfreich sein können.

Die Literaturangaben wurden wie in den früheren Ausgaben im Wesentlichen auf die im Buch zitierten Fundstellen beschränkt. Für Interessierte gibt es darüber hinaus im laufenden Text und im Literaturverzeichnis Zitate der wegweisenden historischen Publikationen sowie Hinweise auf weiterführende Literatur und empfehlenswerte Lehrbücher. Solche Hinweise finden sich auch in den Publikationen der ICRP, der ICRU, der deutschen Strahlenschutzkommission SSK, im deutschen Normenwerk DIN und in allen zitierten Lehrbüchern.

Ich danke den zahlreichen Fachkolleginnen und Fachkollegen für ihr anhaltendes Interesse an diesem Buch und ihre hilfreichen Anregungen und Hinweise und hoffe auch zukünftig auf konstruktive Kritik.

Ingolstadt, im September 2019

Hanno Krieger

Inhaltsverzeichnis

Abschnitt I: Physikalische Grundlagen

1	Strahlungsarten und Strahlungsfelder	17
1.1	Die atomare Energieeinheit Elektronvolt (eV)	18
1.2	Begriffe und einfache Rechenregeln der Relativitätstheorie	19
1.3	Korpuskeln	26
1.4	Photonen	28
1.4.1	Das klassische Wellenbild	29
1.4.2	Elektromagnetische Wellenpakete (Photonen)	33
1.5	Dualismus Teilchen-Welle*	36
1.6	Beschreibung von Strahlungsfeldern*	40
1.6.1	Der stochastische Charakter von Strahlungsfeldern*	42
1.6.2	Nichtstochastische Strahlungsfeldgrößen*	44
1.6.3	Der Wirkungsquerschnitt*	46
	Aufgaben	51
2	Atombau	52
2.1	Historische Atommodelle*	52
2.2	Die Atomhülle	56
2.2.1	Aufbau der Atomhülle	56
2.2.2	Anregung und Ionisation von Atomhüllen	65
2.2.3	Hüllenstrahlungen	66
2.2.3.1	Charakteristische Photonenstrahlung	68
2.2.3.2	Augerelektronen	70
2.2.3.3	Fluoreszenz- und Augerelektronenausbeuten	71
2.3	Der Atomkern	74
2.3.1	Atomkernmodelle	77
2.3.2	Bindungsenergie und Massendefekt von Atomkernen	81
2.3.3	Anregung von Atomkernen und Separation von Nukleonen	84
2.4	Wichtige Begriffe der Atom- und Kernphysik	87

Aufgaben	90
3 Die radioaktiven Umwandlungen	91
3.1 Der Alphazerfall	97
3.2 Die β -Umwandlungen	102
3.2.1 Die β^- -Umwandlung	108
3.2.2 Die β^+ -Umwandlung	110
3.3 Der Elektroneinfang (EC)	113
3.4 Die Gammaumwandlung	114
3.5 Die Innere Konversion (IC)	118
3.6 Spontane Kernspaltung	121
3.7 Protonenzerfall, Neutronenzerfall, Cluster-Emission	122
3.8 Betaverzögerte Prozesse	124
Aufgaben	127
4 Das Zerfallsgesetz	128
4.1 Aktivitätsdefinitionen	128
4.2 Formulierung des Zerfallsgesetzes	131
4.3 Aktivitätsanalyse und radioaktives Gleichgewicht*	139
4.4 Experimentelle Bestimmung von Halbwertzeiten	147
4.5 Aktivierungsanalyse, Fluoreszenzanalyse*	148
Aufgaben	149
5 Natürliche und künstliche Radioaktivität	150
5.1 Natürliche Radioaktivität	150
5.1.1 Die primordialen Radionuklide	150
5.1.2 Die kosmogenen Radionuklide	157
5.2 Künstliche Radioaktivität	161
Aufgaben	166
6 Wechselwirkungen ionisierender Photonenstrahlung	167
6.1 Der Photoeffekt	169

6.2	Der Comptoneffekt	174
6.2.1	Überblick über die Theorie des Comptoneffekts*	175
6.2.1.1	Berechnung der Energie des gestreuten Photons*	175
6.2.1.2	Winkelverteilungen der Comptonphotonen*	179
6.2.1.3	Energie- und Winkelverteilungen der Comptonelektronen*	185
6.3	Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	191
6.4	Die klassische Streuung	194
6.5	Kernphotoreaktionen	195
6.6	Der Schwächungskoeffizient für Photonenstrahlung	199
6.7	Der Schwächungskoeffizient bei Stoffgemischen und Verbindungen*	205
6.8	Der Energieumwandlungskoeffizient für Photonenstrahlung	205
6.9	Der Energieabsorptionskoeffizient für Photonenstrahlung	210
	Aufgaben	214
7	Schwächung von Strahlenbündeln ungeladener Teilchen	216
7.1	Exponentielle Schwächung	216
7.2	Schwächung schmaler heterogener Strahlenbündel ungeladener Teilchen*	223
7.3	Aufhärtung und Homogenität heterogener Photonenstrahlung*	224
7.4	Schwächung ausgedehnter, divergenter Strahlenbündel in dicken Absorbentien*	229
	Aufgaben	236
8	Wechselwirkungen von Neutronenstrahlung	237
8.1	Elastische Neutronenstreuung	242
8.1.1	Labor- und Schwerpunktsystem*	242
8.1.2	Neutronenrestenergie bei der elastischen Streuung*	243
8.1.3	Energieübertrag durch Neutronen	245
8.1.4	Elastische Vielfachstreuung von Neutronen	245
8.1.5	Moderation und Lethargie von Neutronen*	245
8.1.6	Elastische Neutronenwechselwirkungen mit menschlichem Gewebe	248
8.2	Inelastische Neutronenstreuung	249
8.3	Neutroneneinfangreaktionen	249
8.3.1	Einfang langsamer Neutronen	249

8.3.2	Einfang schneller Neutronen	253
8.4	Neutroneninduzierte Kernspaltung und Spallation	254
	Aufgaben	256
9	Wechselwirkungen geladener Teilchen	257
9.1	Das Bremsvermögen für geladene Teilchen	263
9.1.1	Das Stoßbremsvermögen	263
9.1.2	Das Strahlungsbremsvermögen	272
9.2	Besonderheiten bei der Bremsung von Elektronen	277
9.2.1	Richtungsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen für Elektronenstrahlung	277
9.2.2	Verhältnis von Stoßbremsvermögen und Strahlungsbremsvermögen für Elektronen	279
9.2.3	Energiespektren von Elektronen in Materie	281
9.3	Das Streuvermögen für geladene Teilchen	284
9.3.1	Das Streuvermögen für Elektronen	284
9.3.2	Transmission und Rückstreuung von Elektronen	287
9.3.3	Streuung von Protonen am Coulombfeld der Kerne	290
9.3.4	Nukleare Wechselwirkungen von Protonen	291
9.4	Reichweiten geladener Teilchen	293
9.4.1	Reichweiten schwerer geladener Teilchen	293
9.4.2	Bahnlänge und Reichweiten monoenergetischer Elektronen	297
9.4.3	Reichweiten und Transmission von β -Strahlung	301
9.5	Wechselwirkungen negativer Pi-Mesonen	304
	Aufgaben	305
10	Ionisierung und Energieübertragung	306
10.1	Ionisierungsvermögen und Ionisierungsdichte	306
10.2	Der Lineare Energietransfer (LET)	311
10.3	Stochastische Messgrößen für die Mikrodosimetrie*	313
	Aufgaben	317

Abschnitt II: Dosisgrößen und Dosisberechnungen

11 Dosisgrößen	318
11.1 Die physikalischen Dosisgrößen	318
11.2 Die Dosisgrößen im Strahlenschutz	320
11.2.1 Die Mess-Äquivalentdosis	323
11.2.2 Die Ortsdosisgrößen	325
11.2.3 Die Personendosisgrößen	328
11.2.4 Die Organ-Äquivalentdosen	329
11.2.5 Die Effektive Dosis	332
11.2.6 Probleme mit den aktuellen Strahlenschutzdosisgrößen	337
11.3 Änderungen der Dosisgrößen im Strahlenschutz*	338
11.3.1 Die ehemaligen Dosismessgrößen im Strahlenschutz*	338
11.3.2 Die ehemalige Größe Äquivalentdosis*	339
11.3.3 Die ehemalige Größe effektive Äquivalentdosis*	341
11.3.4 Die Entwicklung der Gewebe-Wichtungsfaktoren*	342
Aufgaben	344
12 Strahlenschutzphantome	345
13 Dosisleistungskonstanten, Hautdosisfaktoren und Inkorporationsfaktoren	355
13.1 Dosisleistungskonstanten für ionisierende Photonenstrahlungen	355
13.1.1 Kermaleistungskonstanten für Gammastrahler	355
13.1.2 Strahlenschutz-Dosisleistungskonstanten für Gammastrahler	362
13.1.3 Dosisleistungskonstanten für Beta-Bremsstrahlungen	364
13.1.4 Dosisleistungskonstanten für Röntgenstrahler	366
13.1.5 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Photonen	367
13.2 Dosisleistungsfunktionen für reine Betastrahler	370
13.2.1 Dosisleistungsfunktionen für Betapunktstrahler	370
13.2.2 Dosisleistungen für Beta-Linien- und Beta-Flächenstrahler	374

13.2.3	Dosisleistungen in betakontaminierten Luftvolumina	376
13.2.4	Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Betastrahler*	378
13.3	Dosisfaktoren bei Hautkontaminationen	380
13.4	Dosisfaktoren bei Radionuklidinkorporation	387
	Aufgaben	390

Abschnitt III: Biologische und epidemiologische Grundlagen

14	Grundlagen zur Strahlenbiologie der Zelle	391
14.1	Aufbau menschlicher Zellen	392
14.2	Die strahlenbiologische Wirkungskette in Zellen	408
14.3	DNS-Schäden und ihre Reparatur	414
14.3.1	Arten von DNS-Schäden	415
14.3.2	Die Reparaturen von DNS-Schäden	420
14.3.2.1	Direktreparaturen von Basenschäden	422
14.3.2.2	Exzisionsreparaturen von Basenschäden	423
14.3.2.3	Reparaturen von DNS-Strangbrüchen	427
14.3.3	Wichtige Begriffe aus der Zell- und Strahlenbiologie	434
14.4	Dosiseffekt-Beziehungen	438
14.4.1	Beschreibung von Dosiswirkungskurven*	440
14.4.2	Mathematische Beschreibung von Überlebenskurven*	442
14.5	Parameter der Strahlenwirkung	449
14.5.1	Der Sauerstoffeffekt	450
14.5.2	Chemische Modifikatoren der Strahlenwirkung	452
14.5.3	Abhängigkeit der Strahlenwirkung von der Zellzyklusphase	455
14.5.4	Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom zeitlichen Bestrahlungsmuster	457
14.5.5	Einflüsse des morphologischen Zelldifferenzierungsgrades	461
14.5.6	Volumeneffekte der Strahlenwirkung	462
14.5.7	Temperaturabhängigkeit der Strahlenwirkung	463
14.6	Die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW)	466
14.6.1	Die Dosisabhängigkeit der RBW*	467
14.6.2	Abhängigkeit der RBW vom Linearen Energietransfer LET*	471

14.6.3 RBW und Wichtungsfaktoren Q und w_R im Strahlenschutz*	472
Aufgaben	475
15 Wirkungen und Risiken ionisierender Strahlung	476
15.1 Allgemeine Strahlenschutzbegriffe	477
15.2 Der Risikobegriff im Strahlenschutz*	480
15.3 Deterministische Strahlenwirkungen - Gewebereaktionen	484
15.4 Stochastische Strahlenwirkungen	497
15.4.1 Dosis-Wahrscheinlichkeitskurven für stochastische Schäden	498
15.4.2 Abschätzungen des stochastischen Strahlenrisikos	501
15.4.2.1 Abschätzung des Krebsrisikos	501
15.4.2.2 Das hereditäre Strahlenrisiko	507
15.4.3 Altersabhängigkeit des stochastischen Strahlenrisikos	509
15.5 Risiken pränataler Strahlenexposition	512
Aufgaben	515
16 Strahlenexpositionen des Menschen mit ionisierender Strahlung	516
16.1 Natürliche Strahlenexposition	517
16.1.1 Externe terrestrische Strahlenexposition	517
16.1.2 Externe kosmische Strahlenexposition	526
16.1.3 Interne Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide	535
16.1.3.1 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	536
16.1.3.2 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	537
16.1.4 Zusammenfassung zur natürlichen Strahlenexposition	547
16.2 Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition	548
16.2.1 Medizinische Strahlenexpositionen	549
16.2.2 Kernwaffentests	558
16.2.3 Kernenergie	561
16.2.4 Energie- und Wärmeerzeugung durch fossile Brennstoffe	564
16.2.5 Weitere zivilisatorische Strahlungsquellen	564
16.2.6 Baumaterialien*	565

16.2.7 Berufliche Strahlenexposition	568
16.3 Zusammenfassung natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition	569
Aufgaben	572

Abschnitt IV: Praktischer Strahlenschutz

17 Strahlenschutzrecht	573
17.1 Das neue System des Strahlenschutzrechts	573
17.2 Strahlenschutzverantwortliche und Beauftragte, Anwender	576
17.3 Fachkunde im Strahlenschutz	579
17.4 Strahlenschutzbereiche	581
17.5 Grenzwerte	582
Aufgaben	590
18 Praktischer Strahlenschutz gegen ionisierende Strahlungen	591
18.1 Allgemeine Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition	591
18.2 Abschirmung direkt ionisierender Strahlungen	595
18.3 Abschirmung von Neutronenstrahlung	598
18.4 Abschirmung von Photonenstrahlungen	599
18.4.1 Abschirmung niederenergetischer Röntgenstrahlung	599
18.4.1.1 Bleigleichwerte von Strahlenschutzmitteln im Röntgen	606
18.4.1.2 Umgang mit Bleischürzen in der radiologischen Praxis	610
18.4.2 Abschirmung von Gammastrahlung in der Nuklearmedizin	614
18.4.3 Auslegung von Abschirmungen und Schutzwänden für harte und ultraharte Gammastrahlung	619
Aufgaben	623
19 Strahlenexpositionen in der medizinischen Radiologie	624
19.1 Strahlenexpositionen in der Projektionsradiografie	625
19.1.1 Dosisbedarf von Detektoren für die Projektionsradiografie	625
19.1.2 Körperdosisabschätzungen für Patienten	629
19.1.3 Expositionen des Personals in der Projektionsradiografie	637
19.1.3.1 Exposition im Nutzstrahl von Projektionsradiografieranlagen	637

19.1.3.2	Strahlenexposition des Personals im Streustrahlungsfeld von Anlagen zur Projektionsradiografie	640
19.2	Strahlenexpositionen in der Computertomografie	643
19.2.1	Der Pitchfaktor bei CT-Untersuchungen	644
19.2.2	CTDI und Dosislängenprodukt bei CT-Untersuchungen	644
19.2.3	Abschätzung der Patientendosis bei CT-Untersuchungen*	649
19.2.4	Strahlenexposition des Personals bei der Computertomografie	660
19.3	Strahlenexpositionen in der Nuklearmedizin	663
19.3.1	Strahlenexpositionen von Patienten	663
19.3.2	Strahlenexpositionen des nuklearmedizinischen Personals	666
19.3.2.1	Externe Strahlenexpositionen durch Gammastrahler	667
19.3.2.2	Strahlenexpositionen beim Hantieren von Betastrahlern	674
19.3.2.3	Strahlenexposition bei Inkorporation von Radionukliden	679
	Aufgaben	682

Abschnitt V: Daten

20	Anhang	683
20.1	Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	683
20.2	Praktische physikalische Konstanten und Einheiten	686
20.3	Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	689
20.4	Massenschwächungskoeffizienten für monoenergetische Photonen	690
20.5	Zusammensetzung der Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff und Blei	695
20.6	Massenenergieabsorptionskoeffizienten μ_{en}/ρ für monoenergetische Photonen	698
20.7	Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	701
20.8	Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	704
20.9	Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	705
20.10	Massenstoßbremsvermögen und Massenreichweiten für Alphateilchen, Protonen und Reichweitenvergleich	706
20.11	Dichten wichtiger dosimetrischer Substanzen	713
20.12	Gewebe-Luft-Verhältnisse für diagnostische Röntgenstrahlung	714

20.13	Patientenschwächungsfaktoren und Konversionsfaktoren für diagnostische Röntgenstrahlung	716
20.14	Ortsdosisleistungen im Streustrahlungsfeld eines Computertomografen	717
20.15	Daten zum ICRP Referenzmensch	718
20.16	Elemente des Periodensystems	721
20.17	Bindungsenergien von Valenzelektronen	724
20.18	Dosisleistungsfaktoren bei Hautkontamination mit Radionukliden	725
20.19	Dosisfaktoren bei Inkorporation von Radionukliden	727
20.20	Halbwertszeiten wichtiger Radionuklide	730
21	Aufgabenlösungen	731
22	Literatur	763
22.1	Lehrbücher und Monografien	763
22.2	Wissenschaftliche Einzelarbeiten	768
22.3	Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	781
22.4	Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	788
22.5	Deutsche Industrie-Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	792
22.6	Wichtige Internetadressen	795
	Sachregister	799