

Hanno Krieger

Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes

3. Auflage

STUDIUM



Hanno Krieger

Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes

Hanno Krieger

Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

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

Dr. rer. nat. Hanno Krieger

Geboren 1942 in Heidelberg. Studium der Physik an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Diplomarbeit und Promotion in Experimentalphysik und angewandter Kernphysik mit den Spezialgebieten Kernspektrometrie und Kernspaltung. Bis 2008 leitender Medizophysiker und zentraler Strahlenschutzbevollmächtigter am Klinikum Ingolstadt. Medizophysikexperte nach RöV und StrlSchV für Radioonkologie, Nuklearmedizin, Röntgendiagnostik und Interventionelle Radiologie. Dozent am Medizinischen Schulzentrum Ingolstadt für die Ausbildung Technischer Assistenten in der Medizin in den Fächern Radiologie, Röntgenphysik, Nuklearmedizin, Strahlenphysik, Strahlenbiologie, Strahlenschutz und Dosimetrie. Kursleiter und Veranstalter von Strahlenschutz-Fachkursekursen nach der Strahlenschutz- und Röntgenverordnung für die Strahlenschutz Ausbildung von Physikern, Radiologieärzten, Technischen Assistenten und Arzthelferinnen. Gastdozent beim Helmholtz Zentrum München in Neuherberg.

E-Mail: Hanno.Krieger@t-online.de

1. Auflage 2004
2. Auflage 2007
- 3., überarbeitete und erweiterte Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Ulrich Sandten | Kerstin Hoffmann

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Stürtz GmbH, Würzburg
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0801-1

Vorwort zur dritten Auflage

Die jüngsten Entwicklungen im Strahlenschutzrecht sowie die Fortschritte beim Erschließen neuer Strahlungsquellen und Techniken für die technische und medizinische Radiologie haben eine Umgestaltung und Erweiterung der ursprünglich zweibändigen Ausgabe "Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz" erforderlich gemacht. Die Strahlenkunde wird jetzt in einer mehrbändigen Buchreihe dargestellt. Dieses vorliegende Buch ist die dritte Auflage des Grundlagenbandes zur Strahlenkunde. Im zweiten Band (Erstausgabe 2005) werden die Strahlungsquellen in Technik und Medizin dargestellt. Der kommende dritte Band enthält Ausführungen zur Dosimetrie, insbesondere zu den medizinisch-radiologischen Strahlungsquellen.

Das vorliegende Buch ist die dritte erweiterte und überarbeitete Auflage des Grundlagenbandes zur Strahlenphysik und zum Strahlenschutz. In diesem Grundlagenband werden ausführlich die physikalischen, biologischen und rechtlichen Grundlagen der Strahlenkunde 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, Techniker und Strahlenschutzingenieure, Radiologen und Radiologieassistenten, medizinische und technische Strahlenschutzbeauftragte und alle mit der Strahlenkunde befassten Lehrkräfte. Er deckt auch die einschlägigen Lehrinhalte für die ärztliche Prüfung, die Radiologieassistentenausbildung und für die technisch-physikalischen und medizinischen Strahlenschutzkurse ab.

Das Buch gliedert sich in vier große Abschnitte. Der erste Teil befasst sich mit den physikalischen Grundlagen der Strahlungskunde, den Dosisbegriffen und den praktischen Verfahren zur Berechnung bzw. Abschätzung der Dosisleistungen in Strahlungsfeldern. Im zweiten Teil werden die strahlenbiologischen und epidemiologischen Grundlagen des Strahlenschutzes sowie die natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition dargestellt. Der dritte Teil des Buches erläutert ausführlich die rechtlichen und praktischen Aspekte des Strahlenschutzes. Neben den grundlegenden Ausführungen enthält dieser Band im laufenden Text zahlreiche Tabellen und Grafiken zur technischen und medizinischen Radiologie, die bei der praktischen Arbeit sehr hilfreich sein können. Im letzten Teil findet sich ein aktualisierter Tabellenanhang mit den wichtigsten für den praktischen Strahlenschutz erforderlichen Basisdaten.

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 wer-

den. 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.

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

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 Hinweise auf weiterführende Literatur und empfehlenswerte Lehrbücher. Solche Hinweise finden sich auch in den Publikationen der ICRP, der ICRU, im deutschen Normenwerk DIN und in allen zitierten Lehrbüchern. Für die praktische Arbeit in der technischen oder medizinischen Radiologie und im Strahlenschutz sollten die einschlägigen Gesetze und Verordnungen sowie die gängigen DIN-Normen und internationalen Reports zu Rate gezogen werden. Sehr empfehlenswert sind Recherchen im Internet. Als Anregung wurde deshalb eine Liste wichtiger und weiterführender Internetadressen am Ende des Literaturverzeichnisses zusammengestellt.

Ich danke den zahlreichen Fachkolleginnen und Fachkollegen für ihre hilfreichen Anregungen und Hinweise und die geduldigen Diskussionen und hoffe auch zukünftig auf konstruktive Kritik.

Ingolstadt, im Juli 2009

Hanno Krieger

Inhalt

Abschnitt I: Physikalische Grundlagen

1	Strahlungsarten und Strahlungsfelder	17
1.1	Die atomare Energieeinheit eV	18
1.2	Korpuskeln	19
1.2.1	Relativistische Massenzunahme von Korpuskeln	22
1.2.2	Der klassische Grenzfall*	26
1.3	Photonen	27
1.3.1	Das klassische Wellenbild	28
1.3.2	Elektromagnetische Wellenpakete (Photonen)	32
1.4	Dualismus Teilchen-Welle*	35
1.5	Beschreibung von Strahlungsfeldern*	39
1.5.1	Der stochastische Charakter von Strahlungsfeldern*	41
1.5.2	Nichtstochastische Strahlungsfeldgrößen*	43
1.5.3	Der Wirkungsquerschnitt*	45
	Aufgaben	50
2	Atombau	51
2.1	Historische Atommodelle*	51
2.2	Die Atomhülle	55
2.2.1	Aufbau der Atomhülle	55
2.2.2	Anregung und Ionisation von Atomhüllen	64
2.2.3	Hüllenstrahlung	65
2.2.3.1	Charakteristische Photonenstrahlung	67
2.2.3.2	Augerelektronen	69
2.2.3.3	Fluoreszenz- und Augerelektronenausbeuten	70
2.3	Der Atomkern	73
2.3.1	Atomkernmodelle	76
2.3.2	Bindungsenergie und Massendefekt von Atomkernen	80
2.3.3	Anregung von Atomkernen und Separation von Nukleonen	83

2.4	Wichtige Begriffe der Atom- und Kernphysik	85
	Aufgaben	89
3	Radioaktivität	90
3.1	Radioaktive Umwandlungsarten	90
3.1.1	Der Alphazerfall	96
3.1.2	Die β -Umwandlungen	101
3.1.2.1	Die β^- -Umwandlung	106
3.1.2.2	Die β^+ -Umwandlung	108
3.1.2.3	Der Elektroneneinfang (EC)	111
3.1.3	Die Gammaumwandlung	112
3.1.4	Die Innere Konversion (IC)	116
3.1.5	Spontane Kernspaltung, Neutronenquellen, Protonenzerfall	118
3.2	Das Zeitgesetz für den radioaktiven Zerfall	123
3.2.1	Aktivitätsdefinitionen	123
3.2.2	Formulierung des Zerfallsgesetzes	126
3.2.3	Aktivitätsanalyse und radioaktives Gleichgewicht*	133
3.3	Natürliche Radioaktivität	143
3.3.1	Die kosmogenen Radionuklide	143
3.3.2	Die primordialen Radionuklide	147
3.4	Künstliche Radioaktivität	154
	Aufgaben	157
4	Wechselwirkung ionisierender Photonenstrahlung	158
4.1	Der Photoeffekt	160
4.2	Der Comptoneffekt	165
4.2.1	Überblick über die Theorie des Comptoneffekts*	166
4.2.1.1	Berechnung der Energie des gestreuten Photons*	166
4.2.1.2	Winkelverteilungen der Comptonphotonen*	169
4.2.1.3	Energie- und Winkelverteilungen der Comptonelektronen*	176
4.3	Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	182
4.4	Die klassische Streuung	185

4.5	Kernphotoreaktionen	186
4.6	Der Schwächungskoeffizient für Photonenstrahlung	190
4.7	Schwächungskoeffizient bei Stoffgemischen und Verbindungen*	196
4.8	Der Energieumwandlungskoeffizient für Photonenstrahlung	196
4.9	Der Energieabsorptionskoeffizient für Photonenstrahlung	202
	Aufgaben	206
5	Schwächung von Strahlenbündeln ungeladener Teilchen	207
5.1	Exponentielle Schwächung	207
5.2	Schwächung schmaler heterogener Strahlenbündel ungeladener Teilchen*	214
5.3	Aufhärtung und Homogenität heterogener Photonenstrahlung*	215
5.4	Schwächung ausgedehnter, divergenter Strahlenbündel in dicken Absorbern*	220
	Aufgaben	227
6	Wechselwirkung von Neutronenstrahlung mit Materie	228
6.1	Elastische Neutronenstreuung	233
6.1.1	Labor- und Schwerpunktsystem*	233
6.1.2	Neutronenrestenergie*	234
6.1.3	Energieübertrag durch Neutronen	236
6.1.4	Vielfachstreuung von Neutronen	236
6.1.5	Moderation und Lethargie von Neutronen*	236
6.1.6	Neutronenwechselwirkungen mit menschlichem Gewebe	239
6.2	Inelastische Neutronenstreuung	240
6.3	Neutroneneinfangreaktionen	240
6.3.1	Einfang langsamer Neutronen	240
6.3.2	Einfang schneller Neutronen	244
6.4	Neutroneninduzierte Kernspaltung und Spallation	245
	Aufgaben	247
7	Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie	248
7.1	Das Bremsvermögen für geladene Teilchen	254
7.1.1	Das Stoßbremsvermögen	254

7.1.2	Das Strahlungsbremsvermögen	263
7.1.3	Richtungsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen für Elektronenstrahlung	267
7.1.4	Verhältnis von Stoß- und Strahlungsbremsvermögen für Elektronen	268
7.2	Energiespektren von Elektronen in Materie	271
7.3	Das Streuvermögen für Elektronen	274
7.3.1	Transmission und Rückstreuung von Elektronen	277
7.4	Reichweiten geladener Teilchen	280
7.4.1	Reichweiten schwerer geladener Teilchen	280
7.4.2	Bahnlänge und Reichweiten monoenergetischer Elektronen	284
7.4.3	Reichweiten und Transmission von β -Strahlung	288
7.5	Wechselwirkungen negativer Pi-Mesonen	291
	Aufgaben	292
8	Ionisierung und Energieübertragung	293
8.1	Ionisierungsvermögen und Ionisierungsdichte	293
8.2	Der Lineare Energietransfer (LET)	298
8.3	Stochastische Messgrößen für die Mikrodosimetrie*	300
	Aufgaben	304
9	Strahlenschutzbegriffe und Dosisgrößen	305
9.1	Allgemeine Strahlenschutzbegriffe	305
9.2	Physikalische Dosisgrößen	308
9.3	Die Dosisgrößen im Strahlenschutz	310
9.3.1	Die Äquivalentdosis	313
9.3.2	Die Ortsdosisgrößen	315
9.3.3	Die Personendosisgrößen	318
9.3.4	Die Organdosen	319
9.3.5	Die Effektive Dosis	322
9.3.6	Probleme mit den aktuellen Strahlenschutzdosisgrößen	325
9.4	Die bisherigen Dosisgrößen im Strahlenschutz*	326
9.4.1	Die bisherigen Dosismessgrößen*	326

9.4.2 Die bisherige Größe Äquivalentdosis*	327
9.4.3 Die bisherige Größe Effektive Äquivalentdosis*	329
Aufgaben	330

10 Dosisleistungskonstanten, Hautdosisfaktoren und Inkorporationsfaktoren 331

10.1 Dosisleistungskonstanten für Photonenstrahlungen	331
10.1.1 Kermaleistungskonstanten für Gammastrahler	331
10.1.2 Strahlenschutz-Dosisleistungskonstanten für Gammastrahler	338
10.1.3 Dosisleistungskonstanten für Bremsstrahlungen	340
10.1.4 Dosisleistungskonstanten für Röntgenstrahler	342
10.1.5 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Photonen	343
10.2 Dosisleistungskonstanten für reine Betastrahler	346
10.2.1 Dosisleistungskonstanten für Betapunktstrahler	346
10.2.2 Dosisleistungen für Beta-Linien- und Beta-Flächenstrahler	350
10.2.3 Dosisleistungen in betakontaminierten Luftvolumina	352
10.2.4 Umrechnung der Ortsdosen in Körperdosen für Betastrahler*	354
10.3 Dosisfaktoren bei Hautkontaminationen	357
10.4 Dosisfaktoren bei Radionuklidinkorporation	363
Aufgaben	365

Abschnitt II: Biologische und epidemiologische Grundlagen

11 Grundlagen zur Strahlenbiologie der Zelle 366

11.1 Aufbau menschlicher Zellen	367
11.2 Die strahlenbiologische Wirkungskette in Zellen	381
11.3 DNS-Schäden und ihre Reparatur	387
11.4 Dosiseffekt-Beziehungen	397
11.4.1 Beschreibung von Dosiswirkungskurven*	399
11.4.2 Mathematische Beschreibung von Überlebenskurven*	401
11.5 Parameter der Strahlenwirkung	408
11.5.1 Der Sauerstoffeffekt	409

11.5.2	Chemische Modifikatoren der Strahlenwirkung	411
11.5.3	Abhängigkeit der Strahlenwirkungen von der Zellzyklusphase	414
11.5.4	Abhängigkeit der Strahlenwirkung vom zeitlichen Bestrahlungsmuster	416
11.5.5	Einflüsse des morphologischen Zelldifferenzierungsgrades	420
11.5.6	Volumeneffekte der Strahlenwirkung	421
11.5.7	Temperaturabhängigkeit der Strahlenwirkung	422
11.6	Die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW)	425
11.6.1	Die Dosisabhängigkeit der RBW*	426
11.6.2	Abhängigkeit der RBW vom Linearen Energietransfer LET*	430
11.6.3	RBW und Wichtungsfaktoren Q und w_T im Strahlenschutz*	431
	Aufgaben	434
12	Strahlenwirkung und Strahlenrisiko	435
12.1	Deterministische Strahlenwirkungen	436
12.2	Stochastische Strahlenwirkungen	449
12.2.1	Dosis-Wahrscheinlichkeitskurven für stochastische Schäden	450
12.2.2	Abschätzungen des stochastischen Strahlenrisikos	452
12.2.2.1	Abschätzung des Krebsrisikos	453
12.2.2.2	Hereditäres Schadensrisiko	459
12.3	Risiken pränataler Strahlenexposition	460
12.4	Altersabhängigkeit des stochastischen Strahlenrisikos	462
	Aufgaben	466
13	Strahlenschutzphantome	467
14	Strahlenexposition des Menschen mit ionisierender Strahlung	475
14.1	Natürliche Strahlenexposition	476
14.1.1	Externe terrestrische Strahlenexposition	476
14.1.2	Externe kosmische Strahlenexposition	482
14.1.3	Interne Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide	488

14.1.3.1	Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	489
14.1.3.2	Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	490
14.2	Zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition	501
14.2.1	Medizinische Strahlenexpositionen	502
14.2.2	Kernwaffentests	511
14.2.3	Kernenergie	514
14.2.4	Energie- und Wärmeerzeugung durch fossile Brennstoffe	516
14.2.5	Weitere zivilisatorische Strahlungsquellen	517
14.2.6	Baumaterialien*	518
14.2.7	Berufliche Strahlenexposition	521
14.3	Zusammenfassung natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition	522
	Aufgaben	525

Abschnitt III: Praktischer Strahlenschutz

15	Strahlenschutzrecht	526
15.1	Das System des Strahlenschutzrechts	526
15.2	Strahlenschutzverantwortliche und Beauftragte, Anwender	529
15.3	Fachkunde im Strahlenschutz	532
15.4	Strahlenschutzbereiche	533
15.5	Grenzwerte	535
	Aufgaben	542
16	Praktischer Strahlenschutz	543
16.1	Allgemeine Regeln zur Verringerung der Strahlenexposition	543
16.2	Abschirmung direkt ionisierender Strahlungen	547
16.3	Abschirmungen von Neutronenstrahlung	550
16.4	Auslegung von Gamma-Abschirmungen und Schutzwänden	550
16.5	Abschirmungen für Röntgenstrahlung	555
16.5.1	Bleigleichwerte von Strahlenschutzschürzen im Röntgen	561
16.5.2	Umgang mit Bleischürzen in der radiologischen Praxis	566
16.6	Abschirmungen in der Nuklearmedizin	569

Aufgaben	573
17 Strahlenexpositionen in der medizinischen Radiologie	574
17.1 Strahlenexpositionen in der Projektionsradiografie	575
17.1.1 Körperdosisabschätzungen für Patienten	575
17.1.2 Expositionen des Personals in der Projektionsradiografie	583
17.1.2.1 Exposition im Nutzstrahl von Projektionsradiografieanlagen	583
17.1.2.2 Strahlenexposition des Personals im Streustrahlungsfeld von Anlagen zur Projektionsradiografie	586
17.2 Strahlenexpositionen in der Computertomografie	589
17.2.1 Expositionen von Patienten bei CT-Untersuchungen	589
17.2.1.1 CTDI und Dosislängenprodukt bei CT-Untersuchungen*	590
17.2.1.2 Abschätzung der Patientendosis bei CT-Untersuchungen	594
17.2.2 Strahlenexposition des Personals bei der Computertomografie	605
17.3 Strahlenexpositionen in der Nuklearmedizin	607
17.3.1 Strahlenexpositionen von Patienten	607
17.3.2 Strahlenexpositionen des nuklearmedizinischen Personals	610
Aufgaben	616
18 Anhang	618
18.1 Einheiten des Internationalen Einheitensystems SI, abgeleitete Einheiten	618
18.2 Physikalische Fundamentalkonstanten	622
18.3 Daten von Elementarteilchen, Nukleonen und leichten Nukliden	623
18.4 Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ für monoenergetische Photonen	624
18.5 Zusammensetzung der Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff und Blei	627
18.6 Massenenergieabsorptionskoeffizienten μ_{en}/ρ für monoenergetische Photonen	630
18.7 Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	633
18.8 Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	636
18.9 Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	637
18.10 Massenstoßbremsvermögen und Massenreichweiten für Alphateilchen, Protonen und Reichweitenvergleich	638
18.11 Dichten wichtiger dosimetrischer Substanzen	642

18.12 Gewebe-Luft-Verhältnisse für diagnostische Röntgenstrahlung	643
18.13 Patientenschwächungsfaktoren und Konversionsfaktoren für diagnostische Röntgenstrahlung	645
18.14 Ortsdosisleistungen im Streustrahlungsfeld eines Computertomografen	646
18.15 Daten zum ICRP Referenzmensch	647
18.16 Elemente des Periodensystems	650
18.17 Bindungsenergien von Valenzelektronen	653
18.18 Dosisleistungsfaktoren bei Hautkontamination mit Radionukliden	654
18.19 Dosisfaktoren bei Inkorporation von Radionukliden	656
19 Aufgabenlösungen	659
20 Literatur	678
20.1 Lehrbücher und Monografien	678
20.2 Wissenschaftliche Einzelarbeiten	681
20.3 Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	690
20.4 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien zum Strahlenschutz, gültig für die Bundesrepublik Deutschland	696
20.5 Deutsche Industrie-Normen zu Dosimetrie und Strahlenschutz	698
20.6 Wichtige Internetadressen	702
Sachregister	704