

Teubner Studienbücher

Physik/Chemie

Becher/Böhm/Joos: **Eichtheorien der starken und elektroschwachen Wechselwirkung**
2. Aufl. DM 38,—

Bourne/Kendall: **Vektoranalysis**. 2. Aufl. DM 26,80

Carlsson/Pipes: **Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe**. DM 28,80

Daniel: **Beschleuniger**. DM 26,80

Eilschenbroich/Salzer: **Organometallchemie**. 2. Aufl. DM 46,—

Engelke: **Aufbau der Moleküle**. DM 38,—

Fischer/Kaul: **Mathematik für Physiker**

Band 1: Grundkurs. DM 48,—

Goetzberger/Wittwer: **Sonnenenergie**. DM 26,80

Gross/Runge: **Vielteilchentheorie**. DM 38,—

Großer: **Einführung in die Teilchenoptik**. DM 26,80

Großmann: **Mathematischer Einführungskurs für die Physik**. 5. Aufl. DM 34,—

Heil/Kitzka: **Grundkurs Theoretische Mechanik**. DM 39,—

Heinloth: **Energie**. DM 42,—

Hennig/Rehorek: **Photochemische und photokatalytische Reaktionen von Koordinatenverbindungen**. DM 24,80

Kamke/Krämer: **Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten**. DM 23,80

Kleinknecht: **Detektoren für Teilchenstrahlung**. 2. Aufl. DM 29,80

Kneubühl: **Repetitorium der Physik**. 3. Aufl. DM 46,—

Kneubühl/Sigrist: **Laser**. 2. Aufl. DM 42,—

Kopitzki: **Einführung in die Festkörperphysik**. DM 36,—

Kröger/Unbehauen: **Technische Elektrodynamik**. DM 39,80

Kunze: **Physikalische Meßmethoden**. DM 26,80

Lautz: **Elektromagnetische Felder**. 3. Aufl. DM 32,—

Lindner: **Drehimpulse in der Quantenmechanik**. DM 26,80

Lohrmann: **Einführung in die Elementarteilchenphysik**. DM 24,80

Lohrmann: **Hochenergiephysik**. 3. Aufl. DM 34,—

Mayer-Kuckuk: **Atomphysik**. 3. Aufl. DM 34,—

Mayer-Kuckuk: **Kernphysik**. 4. Aufl. DM 38,—

Mommsen: **Archäometrie**. DM 38,—

Neuert: **Atomare Stoßprozesse**. DM 26,80

Nolting: **Quantentheorie des Magnetismus**

Teil 1: Grundlagen. DM 36,—

Teil 2: Modelle. DM 36,—

Primas/Müller-Herold: **Elementare Quantenchemie**. DM 39,—

Raeder u. a.: **Kontrollierte Kernfusion**. DM 42,—

Rohe: **Elektronik für Physiker**. 3. Aufl. DM 29,80

Fortsetzung auf der 3. Umschlagseite

Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz

Band 2 Anwendungen in der Strahlentherapie und der klinischen Dosimetrie

Von Dr. rer. nat. Hanno Krieger, Klinikum Ingolstadt
und Dr. rer. nat. Wolfgang Petzold, Universität Würzburg

Mit 131 Figuren, 34 Tabellen und 26 Beispielen



B. G. Teubner Stuttgart 1989

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. Seit 1982 leitender Medizinphysiker und zentraler Strahlenschutzbeauftragter am Klinikum Ingolstadt. Dozent am Medizinischen Schulzentrum Ingolstadt für die Ausbildung Technischer Assistenten in der Medizin in den Fächern Radiologie, Röntgenphysik, Strahlenschutz und Dosimetrie. Kursleiter von Strahlenschutz-Fachkursekursen nach der Strahlenschutz- und der Röntgenverordnung am Klinikum Ingolstadt. Gastdozent bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung Neuherberg (GSF) für die Strahlenschutzausbildung von Radiologieärzten und Technischen Assistenten.

Dr.rer.nat. Wolfgang Petzold

Geboren 1927 in Berlin. Studium der Physik an der Freien Universität Berlin (Diplomphysiker, Promotion auf dem Gebiet der Röntgenoptik). Seit 1965 am Physikalischen Institut der Universität Würzburg (Akademischer Direktor und Strahlenschutzbeauftragter). Seit 1973 Dozent an der Schule für Medizinisch-Technische Assistenten in Würzburg für das Fach „Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz“, Leiter von Fachkursekursen für Strahlenschutzbeauftragte nach der Röntgen- und der Strahlenschutzverordnung.

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Krieger, Hanno:

Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz / von Hanno Krieger
u. Wolfgang Petzold – Stuttgart : Teubner.

Bd. 1 u.d.T.: Petzold, Wolfgang: Strahlenphysik, Dosimetrie und
Strahlenschutz

NE: Petzold, Wolfgang:

Bd.2. Anwendungen in der Strahlentherapie und der klinischen
Dosimetrie. – 1989

ISBN 978-3-519-03078-2

ISBN 978-3-322-94777-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-94777-2

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

© B. G. Teubner Stuttgart 1989

Gesamtherstellung: Präzis-Druck GmbH, Karlsruhe
Umschlaggestaltung: M. Koch, Reutlingen

Vorwort

Die Technisierung und die erweiterten Anwendungsmöglichkeiten ionisierender Strahlungen in der Medizin haben zu erhöhten Anforderungen an die medizinisch-technische Ausbildung im Bereich der medizinischen Radiologie geführt. Erfahrungsgemäß bestehen beim Lernenden große Schwierigkeiten, das strahlenphysikalische Grundlagenwissen auf die Anwendungsgebiete in der Medizin zu übertragen. Neben der Röntgendiagnostik und der Nuklearmedizin sind es vor allem die Gebiete der Strahlentherapie und der klinischen Dosimetrie, in denen die Strahlenphysik und die Strahlungsmesstechnik quantitativ angewendet werden müssen.

Dieser zweite Band "**Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz**" beschreibt deshalb basierend auf den im ersten Band behandelten allgemeinen Grundlagen der Strahlenphysik die mehr anwendungsbezogenen, physikalisch-technischen und meßtechnischen Lerninhalte der Strahlentherapie und der klinischen Dosimetrie. Er soll den in der Berufspraxis oder der beruflichen Weiterbildung stehenden Medizinphysikern, Medizintechnikern und Strahlenschutzingenieuren, wie auch den Radiologen und den Medizinisch-Technischen Assistenten eine Reihe von Informationen und praktischen Hinweisen zur Anwendung ionisierender Strahlungen geben. Der Stoff orientiert sich deshalb auch an den Inhalten des Gegenstandskataloges für die ärztliche Prüfung und den Lernzielen der medizinisch-technischen Radiologieassistentenausbildung, wie sie in dem 1988 in Kraft getretenen neuen Lehrplan der Bayerischen Staatsregierung festgeschrieben wurden.

Nach einer zusammenfassenden Einführung in die für die Dosimetrie bedeutsamen Parameter der Wechselwirkungen ionisierender Strahlungen mit Materie werden ausführlich die physikalischen und technischen Grundlagen und Eigenschaften moderner medizinischer Bestrahlungsanlagen wie Elektronenlinearbeschleuniger, Kobaltanlagen und Afterloadinganlagen dargestellt. Für die sonstigen medizinischen Beschleuniger (Betatron, Mikrotron und Zyklotron) werden entsprechend ihrer geringeren Bedeutung für die Medizin nur kurze Darstellungen des Funktionsprinzips und der wichtigsten Eigenschaften gegeben.

Der zweite Schwerpunkt dieses zweiten Bandes liegt in der Darstellung der Grundlagen, Aufgaben und Anwendungen der klinischen Dosimetrie. Die wichtigsten Verfahren der klinischen Dosimetrie sind die Ionisationsmethode mit luftgefüllten Ionisationskammern und die Thermolumineszenzdosimetrie. Sie zeichnen sich durch hohe Genauigkeit, gute Reproduzierbarkeit und einigermaßen einfachen Umgang aus und sollten von jedem beherrscht werden, der mit der klinischen Dosimetrie befaßt ist. Ihre Grundlagen und die Anwendungen auf die Aufgaben der klinischen Dosimetrie werden daher in der notwendigen Ausführlichkeit dargestellt. Neben den mehr methodischen Aspekten der klinischen Dosimetrie werden die zur

Messung und Analyse von Dosisverteilungen im Patienten oder anderen Medien benötigten Meßgrößen und Verfahren für alle in der Radioonkologie verwendeten Strahlungsarten und Strahlungsqualitäten besprochen. Dieses Buch enthält deshalb auch ausführliche Tabellen aller für die praktische Dosimetrie benötigten Größen.

Medizinische Elektronenlinearbeschleuniger dienen zunehmend als Ersatz für veraltete Gammabestrahlungsanlagen mit radioaktiven Strahlern. Viele Medizinphysiker in strahlentherapeutischen Abteilungen werden deshalb zum ersten Mal mit der Beschaffung des für die Beschleunigerdosimetrie notwendigen Instrumentariums und der physikalischen Inbetriebnahme der Beschleuniger konfrontiert. Dieser Band enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten einschlägigen gesetzlichen Regelungen und eine Beschreibung der notwendigen Geräte- und Raumausstattung für die klinische Dosimetrie und die an Beschleunigern vorgeschriebenen Sicherheitsüberprüfungen. Neben einem Vorschlag zur zeit- und aufwandsparenden Bewältigung der Erstdosimetrie an einem Elektronenlinearbeschleuniger werden auch Hinweise zur physikalischen Qualitätssicherung in der Strahlentherapie und zu den Methoden der Dosisberechnung in Therapieplanungssystemen gegeben, die die Entscheidungsfindung bei der Beschaffung solcher Systeme erleichtern sollen.

Literaturangaben wurden auf die in diesem Band verwendeten Fundstellen beschränkt. Die meisten der zitierten Arbeiten enthalten eine Vielzahl weiterführender Literaturangaben. Dies gilt insbesondere für die Deutschen Normen zur Radiologie (DIN) und die internationalen Berichte der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Beide Sammlungen enthalten wichtige Ausführungen zur klinischen Dosimetrie und sollten deshalb unbedingt beschafft und für die konkrete medizin-physikalische Arbeit zu Rate gezogen werden.

Wir danken den Kollegen, die sich zu Diskussionen und Gesprächen bereitgefunden haben, ganz besonders aber Herrn Hans Damoune für seine Mithilfe bei der Anfertigung eines Teils der Zeichnungen für die Figuren in diesem Buch.

Ingolstadt und Würzburg, Februar 1989

H. Krieger und W. Petzold

Inhalt

1 Wechselwirkungen ionisierender Strahlungen mit Materie	11
1.1 Photonenstrahlung	11
1.1.1 Der Photoeffekt	11
1.1.2 Der Comptoneffekt	15
1.1.3 Die Paarbildung durch Photonen im Coulombfeld	19
1.1.4 Die klassische Streuung	20
1.1.5 Kernphotoreaktionen	21
1.1.6 Die Bedeutung der verschiedenen Photonenwechselwirkungsprozesse in der medizinischen Radiologie	21
1.1.7 Schwächung eines Photonenstrahlenbündels beim Durchgang durch Materie	23
1.1.8 Energieumwandlung und Energieabsorption von Photonenstrahlung in Materie	27
1.2 Elektronenstrahlung	31
1.2.1 Das Bremsvermögen für Elektronen (Das Stoßbremsvermögen 32, Das Strahlungsbremsvermögen 33, Das totale Bremsvermögen 34)	32
1.2.2 Energiespektren von Elektronen in Materie	36
1.2.3 Richtungsänderungen von Elektronen, Streuvermögen	38
1.2.4 Rückstreuung und Transmission von Elektronen	40
1.2.5 Bahnlänge und Reichweiten von Elektronen in Materie	43
1.2.6 Der Lineare Energietransfer (LET)	47
1.2.7 Die Ionisierungsdichte und das Ionisierungsvermögen	48
2 Physikalisch-technische Grundlagen der Strahlentherapie	51
2.1 Strahlungsquellen in der Strahlentherapie	51
2.2 Elektronenlinearbeschleuniger	56
2.2.1 Klinische Anforderungen an Elektronenbeschleuniger	56
2.2.2 Prinzipieller Aufbau von Elektronenlinearbeschleunigern	57
2.2.3 Hochfrequenzquellen	58
2.2.4 Die Beschleunigungseinheit	60
2.2.4.1 Die Elektronenkanone	60
2.2.4.2 Energiegewinn der Elektronen bei der Hochfrequenz- beschleunigung	61
2.2.4.3 Das Wanderwellenprinzip	62
2.2.4.4 Das Stehwellenprinzip	64

2.2.4.5	Vergleich von Wander- und Stehwellenprinzip	67
2.2.5	Der Strahlerkopf im therapeutischen Elektronenbetrieb	70
2.2.5.1	Grundlagen zur Strahloptik mit Magnetfeldern	71
2.2.5.2	Umlenkung und Fokussierung des Elektronenstrahlenbündels	74
2.2.5.3	Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels (Das Streufolienverfahren 78, Das Scanverfahren 82)	78
2.2.5.4	Kollimation des Elektronenstrahls	84
2.2.6	Der Strahlerkopf im Photonenbetrieb	88
	(Bremsstrahlungserzeugung und Auslegung des Bremstargets 88, Homogenisierung des Photonenstrahlenbündels 90, Kollimation des Photonenstrahlenbündels 95)	
2.2.7	Das Doppelmonitorsystem	97
2.3	Weitere medizinische Beschleuniger	100
2.3.1	Das Mikrotron	100
2.3.2	Das Betatron	102
2.3.3	Das Zyklotron	105
2.4	Kobaltbestrahlungsanlagen	108
2.4.1	Kobaltquellen	108
	(Abschätzung der Selbstabsorption von Kobaltquellen 109)	
2.4.2	Der Strahlerkopf von Kobaltanlagen	110
2.5	Afterloadinganlagen	113
2.5.1	Prinzip des medizinischen Afterloadings	113
2.5.2	Strahlungsquellen für das medizinische Afterloading	115
2.5.3	Erzeugung der therapeutischen Dosisleistungsverteilungen	116
3	Klinische Dosimetrie	120
3.1	Aufgaben der klinischen Dosimetrie	120
3.2	Dosimeter für die klinische Dosimetrie	122
3.3	Anforderungen an die Genauigkeit der klinischen Dosimetrie	124
4	Grundlagen der Ionisationsdosimetrie	128
4.1	Strahlungsfeldbedingungen	128
	(Sekundärelektronengleichgewicht 130, BRAGG-GRAY-Bedingungen 131)	
4.2	Photonendosismessungen unter Elektronengleichgewicht	133
	(Standardionendosis 133, Luftkerma 134, Das Luftkermakonzept für Photonen- strahlung unter 600 keV 136, Das Wasserenergiedosiskonzept für Photonen- energien unter 3 MeV 137)	

4.3	Photonendosismessungen unter BRAGG–GRAY–Bedingungen	138
	(Charakterisierung der Strahlungsqualität ultraharter Photonenstrahlung 138, Die C_{λ} -Methode für Photonenstrahlung 140, Das Wasserenergiedosis-konzept für Photonenstrahlung unter Hohlraumbedingungen 141)	
4.4	Elektronendosismessungen unter BRAGG–GRAY–Bedingungen	142
	(Das Wasserenergiedosis-konzept für Elektronenstrahlung 143, Die C_E -Methode 144)	
4.5	Dosimetrische Äquivalenz	144
4.6	Bauformen von Ionisationskammern für die klinische Dosimetrie	149
4.7	Kontrollen und Korrekturen bei der Ionisationsdosimetrie	152
	(Luftdruck- und Temperaturkorrekturen 153, Sättigungskorrektur 154, Effektiver Meßort 155, Richtungsabhängigkeit der Dosimeteranzeigen 157, Eisensulfatkalibrierung 158)	
5	Thermolumineszenzdosimetrie	160
5.1	Physikalische Grundlagen	161
	(Das Bändermodell der Festkörper 161, Ideale und reale Kristalle 163, Lumineszenz 165, Thermolumineszenz 166, Glowkurven 168)	
5.2	Dosimetrische Eigenschaften von Thermolumineszenz–Materialien	169
	(Emissionsspektren von TLD 170, Struktur der Glowkurven 170, Dosisbereich und Linearität von TLD 172, Abhängigkeit der Dosimeteranzeige von der Photonen–Strahlungsqualität 175)	
5.3	Praktische Aspekte der Thermolumineszenzdosimetrie	176
	(Form von Thermolumineszenzdetektoren 176, Die Auswerteeinheit 177, Heizprofile 179, Kalibrierung von TLD 181)	
6	Dosisleistungen therapeutischer Strahlungsquellen	183
6.1	Perkutane Strahlungsquellen	183
6.1.1	Definition und Messung der Kenndosisleistung	184
6.1.2	Feldgrößenabhängigkeit der Zentralstrahldosisleistungen	186
	(Phantomstreuung 186, Strahlerkopf-streuung in Kobaltanlagen 188, Strahlerkopf-streuung in Elektronenlinearbeschleunigern 191, Die Methode der äquivalenten Quadratfelder 194)	
6.1.3	Abstandsabhängigkeit der Dosisleistung perkutaner Strahlungsquellen	197
	(Das Abstandsquadratgesetz 197, Gültigkeit des Abstandsquadratgesetzes an Kobaltanlagen 200, Gültigkeit des Abstandsquadratgesetzes an Elektronenlinearbeschleunigern 202)	
6.2	Kenndosisleistungen von Afterloadingquellen	204

7	Dosisverteilungen von Photonenstrahlung in Materie	208
7.1	Perkutane Photonendosisverteilungen im homogenen Medium	209
7.1.1	Tiefendosisverteilungen	210
7.1.1.1	Der Dosisaufbaueffekt von Photonen in Materie	211
7.1.1.2	Entstehung der Phantomoberflächendosis	214
7.1.1.3	Verlauf der Photonendosis in der Tiefe des Phantoms (Einfluß des Fokus-Haut-Abstandes 218, Einfluß der Strahlungs- qualität 220)	217
7.1.2	Weitere Tiefendosisgrößen (Rückstrefaktoren 223, Gewebe-Luft-Verhältnisse und Gewebe-Maxi- mum-Verhältnisse 225, Rechnerischer Zusammenhang der verschiedenen Dosis- und Tiefendosisgrößen 226)	221
7.1.3	Dosisquerverteilungen (Einflüsse auf das Dosisquersprofil 229, Homogenität und Symmetrie der Dosisverteilungen 231)	227
7.2	Isodosendarstellung perkutaner Photonendosisverteilungen	232
7.3	Auswirkungen von Inhomogenitäten auf die Dosisverteilungen	234
7.4	Methoden zur Berechnung der Dosisverteilungen perkutaner Photonenstrahlung	238
7.4.1	Die Monte-Carlo-Methoden	239
7.4.2	Die Matrix-Verfahren	240
7.4.3	Die Näherungsverfahren mit speziellen Funktionen	241
7.4.4	Die Separationsverfahren	243
7.5	Energiedosisverteilungen um ruhende Afterloadingquellen	247
7.5.1	Messung der Dosisverteilungen	247
7.5.1.1	Die Matrixmethode	248
7.5.1.2	Die Zerlegungsmethode (Messung und Beschreibung der radialen Dosisverteilung 249, Messung der Winkelverteilungen um Afterloadingquellen 251)	249
7.5.2	Berechnung der Dosisverteilungen	253
7.5.2.1	Die Quantisierungsmethode	254
7.5.2.2	Eine empirische Näherungsformel zur Dosisleistungsberechnung	258
8	Dosisverteilungen perkutaner Elektronenstrahlung	261
8.1	Tiefendosisverteilungen	261
8.1.1	Messung der Tiefendosisverteilungen (Meßsonden für die Elektronendosismessung 261, Umrechnung von Iontiefendosis in Energietiefendosis 261)	261

8.1.2	Einflüsse auf die Elektronentiefendosiskurven (Entstehung des Dosismaximums 264, Charakteristische Größen zur Beschreibung der Elektronen-Tiefendosiskurven 266, Einfluß des Elektronenspektrums auf die Tiefendosiskurve 270, Kontamination des Elektronenstrahlenbündels mit Bremsstrahlung 271, Abhängigkeit der Tiefendosiskurven von der Feldgröße 272, Einfluß des Fokus-Haut-Abstandes auf die Tiefendosiskurven 273)	264
8.2	Isodosenverteilungen	277
8.3	Auswirkungen von Inhomogenitäten auf Elektronendosisverteilungen	279
8.4	Berechnung der Elektronendosisverteilungen	282
9	Hinweise und Beispiele zur praktischen klinischen Dosimetrie	284
9.1	Gesetzliche Vorschriften	284
9.2	Geräteausstattung für die Dosimetrie von therapeutischen Bestrahlungsanlagen	285
9.3	Erstdosimetrie an einem Elektronenlinearbeschleuniger	291
9.4	Physikalische Qualitätssicherung in der Strahlentherapie	293
9.4.1	Dosimetrische Qualitätskontrollen und Sicherheitsüberprüfungen	294
9.4.2	Geometrische Kontrollen an Lokalisationseinrichtungen	296
9.4.3	Qualitätssicherung an Bestrahlungsplanungssystemen	296
9.5	Messung der Luft-Kermaleistung von Afterloadingquellen im Festkörperphantom	297
10	Tabellenanhang	300
10.1	Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ für monoenergetische Photonen	300
10.2	Massenenergieabsorptionskoeffizienten η/ρ für monoenergetische Photonen	302
10.3	Verhältnisse von Massenenergieabsorptionskoeffizienten für monoenergetische Photonen	305
10.4	Faktoren zur Umrechnung der Standardionendosis in Luft- und Wasserkerma	307
10.5	Umgebungskorrekturfaktoren für handelsübliche Ionisationskammern	308
10.6	Faktoren zur Photonendosimetrie nach der C_λ -Methode	309
10.7	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für verschiedene Phantommaterialien	310
10.8	Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	311
10.9	Massenstrahlungsbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	314
10.10	Bremsstrahlungsausbeuten für monoenergetische Elektronen	315

10.11	Bestimmung der mittleren Elektronen-Eintrittsenergie aus der Reichweite in Wasser	316
10.12	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für Elektronen in Wasser und Luft	317
10.13	Kammerfaktoren zur Elektronendosimetrie	319
10.14	Verhältnisse von Massenstoßbremsvermögen für monoenergetische Elektronen	321
10.15	Massenphotonenwechselwirkungskoeffizienten für Stickstoff ($Z = 7$)	322
10.16	Atomare Zusammensetzung verschiedener Gewebe, Phantommaterialien und Dosimetersubstanzen	323
11	Literatur	324
11.1	Lehrbücher und Monografien	324
11.2	Deutsche Normen und Vorschriften zu Dosimetrie und Strahlenschutz	325
11.3	Nationale und internationale Protokolle und Reports zu Dosimetrie und Strahlenschutz	326
11.4	Wissenschaftliche Einzelarbeiten	327
	Sachregister	331